

## СОДЕРЖАНИЕ

## Научный отдел

## Физика

- Названов В. Ф.** Поверхностные электромагнитные волны оптического диапазона (плазмоны-поляритоны): свойства, применение 5
- Березин К. В., Нечаев В. В., Козлов О. В., Новоселова А. В., Чернавина М. Л., Березин В. И., Березин М. К., Новоселов В. В.** Исследование проявления парной ассоциации в ИК-спектрах пиридина методом функционала плотности 14
- Биленко Д. И., Терин Д. В., Тозкопаран О., Йлдырым О., Галушка В. В., Динкер И., Добринский Э. К., Элерман Я., Вениг С. Б.** Влияние морфологии, условий получения и внешних воздействий на диэлектрические свойства наночастиц на основе железа 21
- Воронин Д. В., Бегинин Е. Н.** Спектры поглощения и резонансные частоты структуры «магнитное нанокompозитное покрытие – микрополосковая линия» 27
- Гофтман В. В., Вострикова А. М., Горячева И. Ю.** Изменение флуоресцентных свойств квантовых точек в процессе силанизации 32
- Бойков А. А., Бойкова Н. А.** Квазипотенциальный подход к сверхтонкому расщеплению в мюонном водороде 36
- Горбачев И. А., Штыков С. Н., Глуховской Е. Г.** Получение и флуоресценция многослойных пленок Ленгмюра – Блоджетт, содержащих квантовые точки CdSe/CdS/ZnS 40
- Клочков М. А., Залесный Г. Н.** Спектр гамма-квантов в бериллиевой мишени 45
- Беляев С. Н., Клочков М. А., Нечкин А. А., Сидоров В. И.** Энергетический спектр фотонейтронов из  $^{209}\text{Bi}$  при  $E_{\gamma\text{max}} = 12 \text{ МэВ}$  47
- Кожевников И. О., Михайлов А. И., Браташов Д. Н.** Исследование влияния топологии контактных площадок на воспроизводимость параметров колебаний тока в мезапланарных структурах на основе полужолирующего арсенида галлия 51
- Усанов Д. А., Мерданов М. К., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В.** СВЧ фотонные кристаллы. Новые сферы применения 57

## Методический отдел

- Анищенко В. С.** О предназначении и особенностях университетской системы образования 74
- Аникин В. М., Пойзнер Б. Н.** Научное руководство аспирантами: «внутренние» и «внешние» регуляторы 83

## Сведения об авторах

Решением Президиума ВАК Министерства образования и науки РФ журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертационных исследований на соискание ученой степени доктора и кандидата наук

Зарегистрировано в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № 77-7185 от 30 января 2001 года. Зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-56150 от 15 ноября 2013 года

Индекс издания по каталогу ОАО Агентства «Роспечать» 36015, раздел 39 «Физико-математические науки. Химические науки». Журнал выходит 4 раза в год

## Заведующий редакцией

Бучко Ирина Юрьевна

## Редактор

Бучко Ирина Юрьевна

## Художник

Соколов Дмитрий Валерьевич

## Редактор-стилист

Степанова Наталья Ивановна

## Верстка

Ковалева Наталья Владимировна

## Технический редактор

Ковалева Наталья Владимировна

## Корректор

Крылова Инна Геннадиевна

## Адрес редакции:

410012, Саратов, ул. Астраханская, 83  
Издательство Саратовского университета  
Тел.: (845-2) 52-26-89, 52-26-85  
E-mail: izvestiya@sgu.ru

Подписано в печать 27.02.2015.  
Формат 60×84 1/8.  
Усл. печ. л. 10,92 (11,75).  
Тираж 500 экз. Заказ 13.

Отпечатано в типографии  
Издательства Саратовского  
университета

© Саратовский государственный  
университет, 2015



## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Журнал публикует на русском и английском языках научные статьи по физике, содержащие новые результаты исследований, статьи учебно-методического характера, содержащие инновационную компоненту, статьи по методологии разделов физической науки, статьи, отражающие хронику научных мероприятий и важных событий в жизни физического сообщества. Материалы, ранее опубликованные или представленные для публикации в другие журналы, к рассмотрению не принимаются.

Рекомендуемый объем статьи – до 16 страниц текста, 5 рисунков и 4 таблицы, объемом краткого сообщения – до 6 страниц текста, 2 рисунка и 2 таблицы. Таблицы не должны превышать 20% общего объема статьи.

На русском языке статья содержит: УДК, заглавие, инициалы и фамилии авторов, название их места работы, электронный адрес автора, с которым ведётся переписка, аннотацию (около 12 строк), ключевые слова (не более 15), текст, благодарности и ссылки на гранты, список литературы.

На английском языке необходимо продублировать: заглавие, инициалы и фамилии авторов, аннотацию, ключевые слова.

Редколлегия рекомендует авторам структурировать текст, используя подзаголовки. Текст должен быть набран и напечатан через 1,5 интервала на бумаге формата А4 с полями 2,5 см, шрифт Times New Roman, размер шрифта основного текста – 14, второстепенного (аннотация, ключевые слова, сноски, таблицы, подписи к рисункам, приложения, список литературы, примечания) – 12; все страницы рукописи, таблицы, рисунки, следует пронумеровать. Таблицы и рисунки представляются отдельно от текста, таблица должна иметь заголовки, на обратной стороне рисунка следует указать его номер, фамилию первого автора. Нумерация источников в списке литературы должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте, ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Для публикации статьи необходимо представить в редакцию:

– подписанный авторами текст статьи, включая резюме и ключевые слова, таблицы, рисунки и подписи к ним (2 экз.);

– сведения об авторах на русском и английском языках: фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученые степень и звание, служебные адреса и телефоны, адреса электронной почты, указать автора, ответственного за переписку с редакцией (1 экз.);

– файлы всех вышеперечисленных материалов в форме документа Microsoft Word doc или Word docx;

– направление от организации (1 экз.);

– внешнюю рецензию, заверенную в установленном порядке.

Все перечисленные материалы следует посылать по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, физический факультет, журнал «Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика», главному редактору; электронную версию – по адресу: e-mail: fizika.sgu@bk.ru

Материалы, не соответствующие настоящим правилам, редакцией не рассматриваются.

Сайт журнала: <http://www.sgu.ru/journal/izvestiya/phys>

## CONTENTS

### Scientific Part

#### Physics

**Nazvanov V. F.** Surface Electromagnetic Waves in the of Optical Range (Surface Plasmon Polaritons – Spps): Their Properties and Applications 5

**Berezin K. V., Nechaev V. V., Kozlov O. V., Novoselova A. V., Chernavina M. L., Berezin V. I., Berezin M. K., Novoselov V. V.** The Manifestation's Research of the Pair Association in the Pyridine's Ir-Spectrums by the Matrix Isolation Technique 14

**Bilenko D. I., Terin D. V., Tozkoparan O., Yildirim O., Galushka V. V., Dincer I., Dobrinskiy E. K., Elerman Y., Venig S. B.** The influence of Morphology, Conditions of Production and External Effects on Nanoparticles' (in Terms of Iron) Dielectric Properties 21

**Voronin D. V., Beginin E. N.** Microwave Absorption Spectra and Resonance Frequencies of a «Magnetic Nanocomposite Coating – Microstrip Line» Structure 27

**Goftman V. V., Vostrikova A. M., Goryachva I. Yu.** Fluorescent Properties of Quantum Dots During Silanization Process 32

**Boikov A. A., Boikova N. A.** The Quasipotential Approach to the Syperfine Splitting of Muonic Hydrogen and Positronium 36

**Gorbachev I. A., Shtykov S. N., Glukhovskoy E. G.** Creating and Fluorescence of the Multilayer Langmuir – Blodgett Films of CdSe/CdS/ZnS Quantum Dots 40

**Klochkov M. A., Zalesny G. N.** Range of Gamma Quanta in the Beryllium Target 45

**Belyaev S. N., Klochkov M. A., Nechkin A. A., Sidorov V. I.** Power Range of Photoneutrons from  $^{209}\text{Bi}$  at  $E_{\gamma\text{max}} = 12 \text{ MeV}$  47

**Kozhevnikov I. O., Mikhailov A. I., Bratashov D. N.** Research of the Contact Pads Topology Influence on the Parameters Reproducibility of the Current Oscillations in Mesa-Planar Structures Based on Semi-Insulating Gallium Arsenide 51

**Usanov D. A., Merdanov M. K., Skripal A. V., Ponomarev D. V.** Microwave Photonic Crystals. New Application Areas 57

#### Methodological Section

**Anishchenko V. S.** On the Purpose and Features of the University Education System 74

**Anikin V. M., Poizner B. N.** Scientific Supervision by Graduate Students: «Internal» and «External» Regulators 83

**Information about the Authors** 89



**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА  
«ИЗВЕСТИЯ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. НОВАЯ СЕРИЯ»**

**Главный редактор**

Чумаченко Алексей Николаевич, доктор геогр. наук, профессор (Саратов, Россия)

**Заместитель главного редактора**

Стальмахов Андрей Всеволодович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

**Ответственный секретарь**

Халова Виктория Анатольевна, кандидат физ.-мат. наук, доцент (Саратов, Россия)

**Члены редакционной коллегии:**

Балаш Ольга Сергеевна, кандидат экон. наук, доцент (Саратов, Россия)

Бучко Ирина Юрьевна, директор Издательства Саратовского университета (Саратов, Россия)

Данилов Виктор Николаевич, доктор ист. наук, профессор (Саратов, Россия)

Ивченков Сергей Григорьевич, доктор соц. наук, профессор (Саратов, Россия)

Коссович Леонид Юрьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Макаров Владимир Зиновьевич, доктор геогр. наук, профессор (Саратов, Россия)

Прозоров Валерий Владимирович, доктор филол. наук, профессор (Саратов, Россия)

Усанов Дмитрий Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Устьянцев Владимир Борисович, доктор филос. наук, профессор (Саратов, Россия)

Шамионов Раиль Мунирович, доктор психол. наук, профессор (Саратов, Россия)

Шляхтин Геннадий Викторович, доктор биол. наук, профессор (Саратов, Россия)

**EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL  
«IZVESTIYA OF SARATOV UNIVERSITY. NEW SERIES»**

**Editor-in-Chief** – Chumachenko A. N. (Saratov, Russia)

**Deputy Editor-in-Chief** – Stalmakhov A. V. (Saratov, Russia)

**Executive Secretary** – Khalova V. A. (Saratov, Russia)

**Members of the Editorial Board:**

Balash O. S. (Saratov, Russia)

Buchko I. Yu. (Saratov, Russia)

Danilov V. N. (Saratov, Russia)

Ivchenkov S. G. (Saratov, Russia)

Kossovich L. Yu. (Saratov, Russia)

Makarov V. Z. (Saratov, Russia)

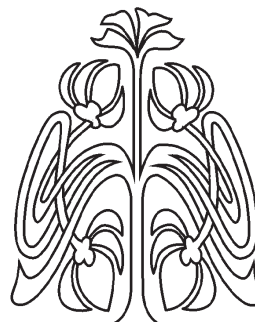
Prozorov V. V. (Saratov, Russia)

Usanov D. A. (Saratov, Russia)

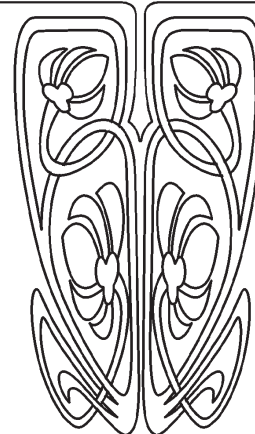
Ustiantsev V. B. (Saratov, Russia)

Shamionov R. M. (Saratov, Russia)

Shlyakhtin G. V. (Saratov, Russia)



**РЕДАКЦИОННАЯ  
КОЛЛЕГИЯ**





**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА  
«ИЗВЕСТИЯ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. НОВАЯ СЕРИЯ.  
СЕРИЯ: ФИЗИКА»**

**Главный редактор**

Усанов Дмитрий Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

**Заместители главного редактора**

Анищенко Вадим Семенович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

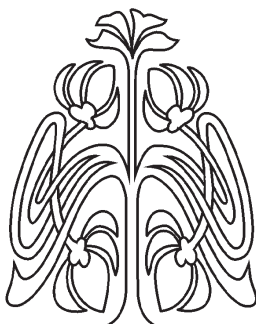
Тучин Валерий Викторович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

**Ответственный секретарь**

Ревзина Елена Мстиславовна, кандидат физ.-мат. наук (Саратов, Россия)

**Члены редакционной коллегии:**

- Аникин Валерий Михайлович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)  
 Бабков Лев Михайлович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)  
 Вадивасова Татьяна Евгеньевна, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)  
 Вениг Сергей Борисович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)  
 Винницкий Сергей Ильич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Дубна, Россия)  
 Горохов Александр Викторович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Самара, Россия)  
 Грибов Лев Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор, чл.-корр. РАН (Москва, Россия)  
 Давидович Михаил Владимирович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)  
 Кудряшов Валерий Павлович, доктор техн. наук (Саратов, Россия)  
 Кузнецов Сергей Петрович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)  
 Лёвин Юрий Иванович, кандидат физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)  
 Мельников Леонид Аркадьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)  
 Нефёдов Игорь Сергеевич, доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник университета Аалто (Хельсинки, Финляндия)  
 Никитов Сергей Аполлонович, доктор физ.-мат. наук, профессор, чл.-корр. РАН (Москва, Россия)  
 Резчиков Александр Фёдорович, доктор техн. наук, профессор, чл.-корр. РАН (Саратов, Россия)  
 Скрипаль Александр Владимирович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)  
 Сухоруков Глеб Борисович, профессор Университета Королевы Марии (Лондон, Великобритания)  
 Трубецков Дмитрий Иванович, доктор физ.-мат. наук, профессор, чл.-корр. РАН (Саратов, Россия)  
 Филимонов Юрий Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)  
 Хлебцов Николай Григорьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)  
 Шараевский Юрий Павлович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)  
 Шиманский-Гайер Лутц, Ph.D, профессор Гумбольдтского университета (Берлин, Германия)



**РЕДАКЦИОННАЯ  
КОЛЛЕГИЯ**

**EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL  
«IZVESTIYA OF SARATOV UNIVERSITY. NEW SERIES.  
SERIES: PHYSICS»**

**Editor-in-Chief** – Usanov D. A. (Saratov, Russia)

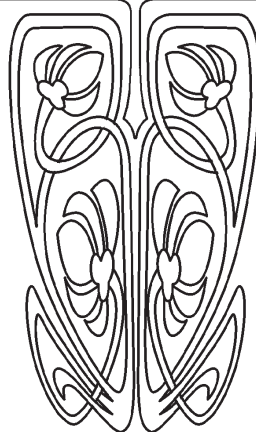
**Deputy Editor-in-Chief** – Anishchenko V. S. (Saratov, Russia)

Tuchin V. V. (Saratov, Russia)

**Executive Secretary** – Revzina E. M. (Saratov, Russia)

**Members of the Editorial Board:**

- |                                    |                                       |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| Anikin V. M. (Saratov, Russia)     | Nikitov S.A. (Moscow, Russia)         |
| Babkov L. M. (Saratov, Russia)     | Melnikov L. A. (Saratov, Russia)      |
| Gorokhov A. V. (Samara, Russia)    | Rezchikov A.F. ((Saratov, Russia)     |
| Gribov L. A. (Moscow, Russia)      | Schimanski-Geier L. (Berlin, Germany) |
| Davidovich M. V. (Saratov, Russia) | Sharaevsky Yu. P. (Saratov, Russia)   |
| Filimonov Yu. A. (Saratov, Russia) | Skripal A. V. (Saratov, Russia)       |
| Khlebtsov N. G. (Saratov, Russia)  | Sukhorukov G. B. (London, UK)         |
| Kudryashov V. P. (Saratov, Russia) | Trubetskov D. I. ((Saratov, Russia)   |
| Kuznetsov S. P. (Saratov, Russia)  | Vadivasova T. E. (Saratov, Russia)    |
| Levin Yu. I. (Saratov, Russia)     | Vinitsky S. I. (Dubna, Russia)        |
| Nefedov I. S. (Helsinki, Finland)  | Wenig S. B. (Saratov, Russia)         |







## ФИЗИКА

УДК 539.21; 621.3

### ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА (ПЛАЗМОНЫ-ПОЛЯРИТОНЫ): СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ

В. Ф. Названов

Саратовский государственный университет  
E-mail: Vasily.Nazvanov@gmail.com

В первой части статьи представлен краткий обзор по свойствам поверхностных электромагнитных волн оптического диапазона (плазмонов-поляритонов) и их применению в оптоэлектронике и сенсорике. Во второй части статьи приведены основные результаты исследований автора в данной научной области.

**Ключевые слова:** поверхностные электромагнитные волны, плазмоны-поляритоны, свойства, особенности, методы возбуждения, применение в оптоэлектронике и сенсорике.

**Surface Electromagnetic Waves in the of Optical Range  
(Surface Plasmon Polaritons – SPPs): Their Properties and Applications**

V. F. Nazvanov

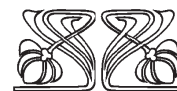
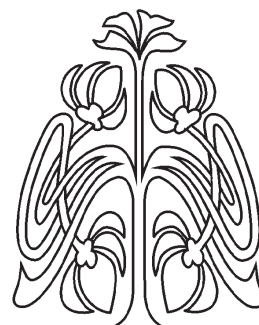
Surface plasmon polaritons (SPPs) are electromagnetic excitations, in which electromagnetic field in dielectric is coupled to collective electron oscillation in metal, and propagate along and is tightly bound to metal/dielectric interfaces. First, we present an overview of SPPs in the optical range and their applications in optoelectronics and sensorics. We further present the main research results achieved by the author in this area.

**Key words:** surface electromagnetic waves, surface plasmon polaritons (SPPs), properties, peculiarities, excitement methods, application in optoelectronics and sensorics.

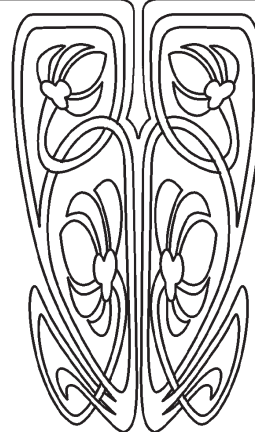
#### Введение

Современная оптика, связанная с развитием лазеров, в последние годы была дополнена новой перспективной областью – оптикой поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) или поверхностных плазмонов-поляритонов.

Научный интерес к ПЭВ оптического диапазона связан с возможностью эффективного возбуждения ПЭВ на реальных поверхностях (металлов, полупроводников, диэлектриков) и влиянием ПЭВ на многие фотофизические процессы, протекающие на поверхности исследуемых материалов. Данный факт имеет большое практическое значение для разработок в оптической спектроскопии, нелинейной оптике, микроскопии высокого разрешения, технологии и других областях. Представляет значительный интерес использование поверхностных плазмонов-поляритонов для разработки модуляторов света и биосенсоров.



НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ





В первой части данной статьи представлено краткое описание свойств ПЭВ оптического диапазона (поверхностных плазмонов-поляритонов) и их применения [1–33].

В развитии этого направления активное участие приняли автор статьи и его сотрудники, основные результаты исследований которых приведены во второй части работы [13–20, 34–35].

### Часть 1. Плазмоны на плоской границе раздела «металл – диэлектрик»

#### 1.1. Поверхностные электромагнитные волны (ПЭВ)

Поверхностные плазмоны-поляритоны являются волнами, распространяющимися вдоль границы между двумя средами и существующими в каждой из них. Они удовлетворяют уравнениям Максвелла и обычным граничным условиям. Электромагнитные поля, связанные с ПЭВ, локализованы вблизи границы раздела двух сред и затухают при удалении в обе стороны от неё. Они являются частично продольными ТМ-волнами. Вектор электрического поля  $\mathbf{E}$  имеет две компоненты:  $E_x$  вдоль волнового вектора  $\mathbf{k}_s$  ПЭВ и  $E_z$  перпендикулярно к поверхности; вектор магнитного поля  $\mathbf{H}$  перпендикулярен к направлению распространения волны и лежит в плоскости поверхности (границы раздела сред 1 и 2). Взаимная ориентация векторов и распределение каждой компоненты электрического и магнитного полей в плоской ПЭВ, распространяющейся вдоль оси  $X$ , представлены на рис. 1. Важной характеристикой ПЭВ является глубина проникновения волны в каждую из двух граничащих сред, определяемая как расстояние от границы раздела сред, на котором амплитуда волны убывает в  $e$  раз. Отметим на рис. 1, что глубина проникновения поля ПЭВ в поверхностно-активную среду (2) значительно меньше, чем в неактивную (1).

#### 1.2. Постоянная распространения $k_s$

Постоянная распространения ПЭВ отличается от волнового вектора света  $k_0 = \omega/c$ , где  $c$  – скорость света в вакууме, и удовлетворяет следующему дисперсионному соотношению:

$$k_s = k_0[\varepsilon_1\varepsilon_2/(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)]^{1/2}. \quad (1)$$

Коэффициенты (факторы) затухания ПЭВ  $k_1$  и  $k_2$  в средах 1 и 2 соответственно определяются как

$$k_1 = k_s(-\varepsilon_1/\varepsilon_2)^{1/2}, \quad k_2 = k_s(-\varepsilon_2/\varepsilon_1)^{1/2}. \quad (2)$$

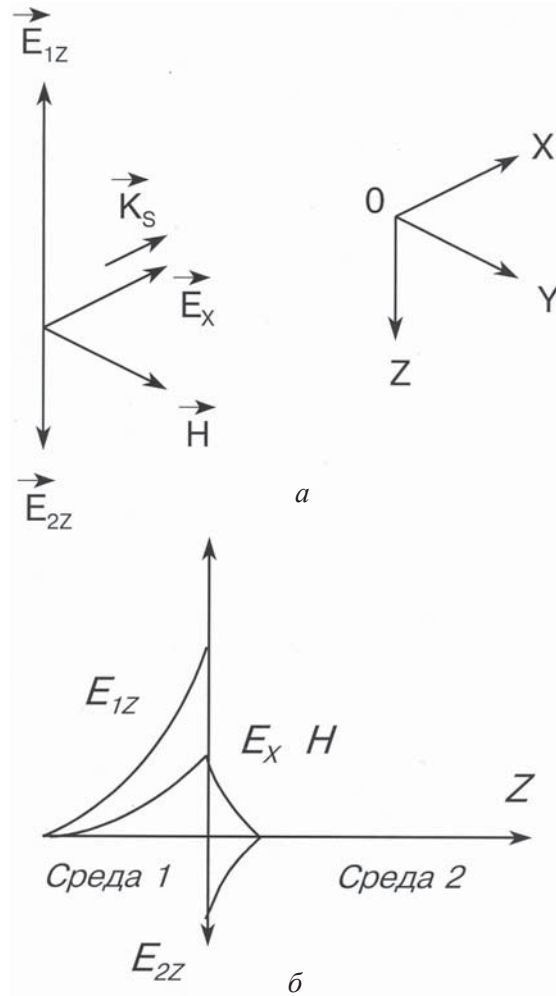


Рис. 1. Ориентация (а) и распределение (б) электрического  $E_x$ ,  $E_z$  и магнитного полей в ПЭВ с волновым вектором  $\mathbf{k}_s$ , распространяющейся вдоль оси  $X$ , параллельной границе раздела сред 1 (диэлектрик) и 2 (поверхностно-активная среда)

Из условия, что величины  $k_s$ ,  $k_1$  и  $k_2$  являются реальными и положительными, следует, что ПЭВ может существовать и распространяться вдоль границы раздела двух сред, имеющих диэлектрические постоянные разных знаков. Если среда 1 имеет  $\varepsilon_1 > 0$ , то для диэлектрической постоянной среды 2 (так называемой поверхностно-активной среды) необходимо выполнение неравенств

$$\varepsilon_2 < 0, \quad |\varepsilon_2| > \varepsilon_1. \quad (3)$$

Из этих соотношений также следует, что для среды без потерь  $k_s > k_0$ , т.е. ПЭВ имеет неизлучательную моду, которая не может быть непосредственно возбуждена светом на идеально гладкой поверхности. Кроме того,  $k_1 < k_s < k_2$ .

Из последнего неравенства следует, что энергия ПЭВ концентрируется в основном в



поверхностно-неактивной среде ( $\text{Re } \epsilon_1 > 0$ ) и переносится преимущественно вдоль направления распространения волны  $\mathbf{k}_s$ . Одновременно энергия в ПЭВ циркулирует через поверхность раздела двух сред попеременно от одной среды в другую, вследствие продольной компоненты  $E_x$  электрического поля. Присутствие каких-либо потерь (например, поглощение в среде 2 и рассеяние на шероховатой поверхности границы раздела), а также адсорбированных слоев и тонких пленок на поверхности (в частности, в случае биосенсоров) приводит к ограничению длины распространения (пробега)  $L_{sp}$  плазмонов вдоль оси  $X$ , определяемой как расстояние, на котором интенсивность ПЭВ уменьшается в  $e$  раз.

Отметим, что величина длины пробега  $L_{sp}$  поверхностных плазмонов зависит от мнимой части модуля волнового вектора  $\mathbf{k}_s''$ , характеризующей затухание амплитуды поля ПЭВ при распространении волны вдоль границы раздела сред:

$$L_{sp} = 1/(2 \cdot |\mathbf{k}_s''|). \quad (4)$$

Действительная же часть модуля волнового вектора  $\mathbf{k}_s'$  определяет фазовую скорость ПЭВ.

### 1.3. ПЭВ на границе двух сред

Обычно в оптике имеют дело с ПЭВ на границе поверхностно-активной среды с воздухом ( $\epsilon_1 = 1$ ) или другим прозрачным диэлектриком.

Неравенство (3) выполняется для металлов и легированных полупроводников с большой концентрацией свободных носителей заряда, для которых область аномальной дисперсии диэлектрической постоянной простирается до инфракрасной и видимой областей спектра (для металлов).

ПЭВ могут быть возбуждены на поверхностях полупроводников и диэлектриков в средней части инфракрасного диапазона в интервале между частотами продольных и поперечных фононов. Соответствующие ПЭВ называются поверхностными фонон-поляритами. Существуют также ПЭВ, связанные с линией экситонного поглощения в полупроводниках (экситон-поляритоны).

### 1.4. ПЭВ на границе раздела металлов с диэлектриком

Свойства ПЭВ на границе раздела металл-диэлектрик определяются плазменной частотой  $\omega_p$  и частотой столкновений  $\gamma$  в электронной

плазме металла. В общем случае металл играет роль открытого волновода для ПЭВ, распространяющихся по его поверхности на расстояния  $L_{sp}$ , определяемые, как уже отмечалось, диссипативными потерями. Типичная длина распространения (пробега) ПП  $\sim 10$  мкм при длине волны света  $\lambda = 0.63$  мкм и достигает величин от 1 до 5 см при  $\lambda = 10$  мкм. Следовательно, для видимой области спектра при использовании таких поверхностно-активных металлов, как Au и Ag, поверхностные плазмоны являются сильно локализованным явлением, что исключительно важно для создания разнообразных устройств. Следует отметить, что выбор оптимальной комбинации металл – область оптических длин волн существенно зависит от принципа измерения поверхностно-плазмонного резонанса (см., например, в [27]).

### 1.5. Методы оптического возбуждения поверхностных плазмонов

Как уже указывалось, ПЭВ являются неизлучательными модами.

Типичная дисперсионная кривая для  $\mathbf{k}_s$  поверхностных плазмонов-поляритонов на границе металл-диэлектрик, удовлетворяющая соотношению (1), представлена на рис. 2.

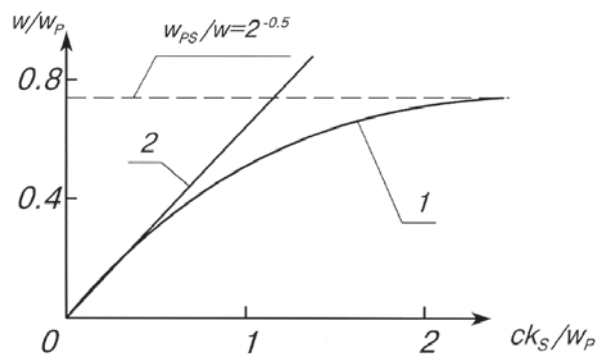


Рис. 2. Закон дисперсии плазмонных колебаний в системе «металл – воздух» (в случае металла с законом дисперсии Друде). Кривая 1 – поверхностные плазмоны; прямая линия 2 – фотоны в свободном пространстве

Поэтому для их возбуждения требуется применять специальные методы: неупругое рассеяние электронов, дифракцию световых волн на гофрированной или шероховатой поверхности (дифракционное возбуждение ПЭВ на решетках), метод нарушенного полного внутреннего отражения при призмной связи по схемам Отто либо Кречмана (рис. 3).

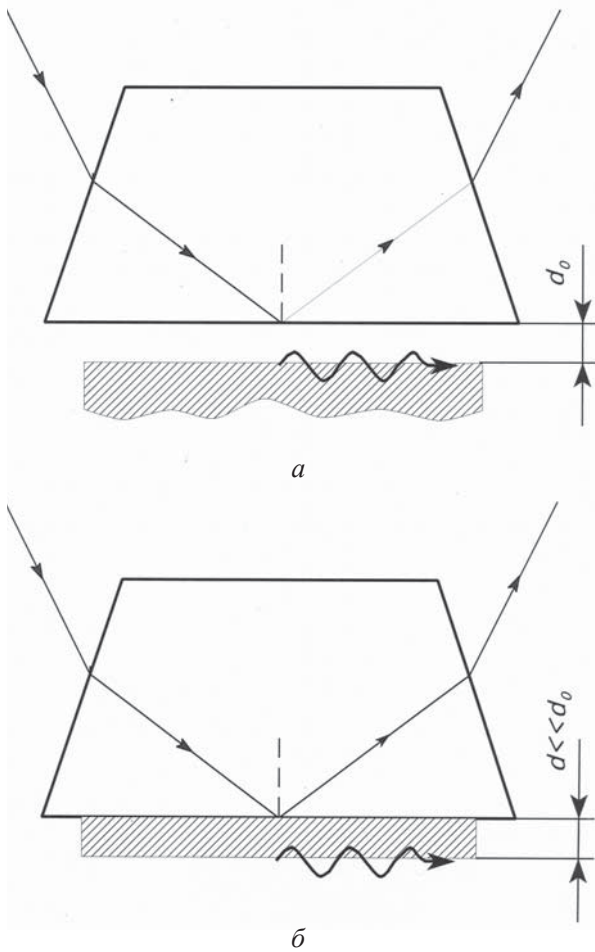


Рис. 3. Два способа оптического возбуждения поверхностных плазмонов методом нарушенного полного внутреннего отражения при призмной связи: а – геометрия Отто; б – геометрия Кречмана

В представленных на рис. 3 схемах оптического возбуждения ПП монохроматическое  $p$ -поляризованное излучение фиксированной длины волны направляют на основание стеклянной призмы под углом  $\theta > \theta_{кр}$  (критический угол для полного внутреннего отражения), отсчитываемом от нормали к основанию призмы, и измеряют зависимость коэффициента отражения по мощности  $p$ -поляризованного излучения от угла  $R_p(\theta)$  либо от длины волны оптического излучения  $R_p(\lambda)$  (при фиксированном угле падения). Такая зависимость имеет резонансный провал, обусловленный интерференцией зеркально-отраженного от основания призмы излучения и переизлученного в призму поля возбужденной ПЭВ. В частности, угловое положение минимума резонансного провала  $\theta_{min}$ , его угловая ширина  $\Delta\theta_0$  на уровне  $0.5(R_{p_{max}} + R_{p_{min}})$  и величина коэффициента отражения  $R_{p_{min}}$  при  $\theta = \theta_{min}$

являются функциями оптических постоянных и толщин слоев волноведущей структуры и экспериментально измеряемыми величинами при рефлектометрическом методе детектирования ПЭВ. Полное поглощение излучения достигается при равенстве двух типов потерь: первый тип обусловлен потерями в металле, второй – потерями в результате переизлучения в призму.

Это условие является существенным при согласовании импедансов и достигается выбором необходимой толщины поверхностно-активного металлического слоя.

Наиболее узкие резонансные кривые могут быть получены при использовании металлов с высокой проводимостью при оптических частотах (т.е. с малыми потерями). Так, например, для серебра при длине волны излучения 633 нм толщина слоя, удовлетворяющая условию согласования импедансов, равна 560 Å, а длина распространения (пробега) поверхностных плазмонов  $L_{sp} = 10\text{--}20$  мкм.

Отметим еще раз, что все методы возбуждения ПП имеют резонансный характер (роль резонатора играет граница раздела сред  $\epsilon_1/\epsilon_2$ ), поэтому у границы имеет место резонансное усиление напряженности поля падающей плоской световой волны примерно в  $10^2\text{--}10^3$  раз. Данное свойство ПП имеет исключительное значение для оптической спектроскопии, биосенсорики, нелинейной оптики и других областей науки и техники.

### 1.6. Поверхностные плазмоны в слоистых средах

Представляет большой интерес исследование поведения и свойств ПЭВ в структуре, которая состоит из тонкого слоя поверхностно-активной среды, помещенного между двумя слоями диэлектриков с различными коэффициентами преломления. В такой структуре имеются две связанные между собой поверхностные моды при частотах, меньших частоты поверхностных плазмонов, с различными распределениями поля в поверхностно-активном слое и примыкающих к нему средах – так называемые симметричная и антисимметричная моды. Связанная симметричная мода обладает малой величиной оптического поля в тонком слое активной среды. В такой геометрии возможно наблюдение слабо затухающих мод, имеющих большие длины распространения (пробега). В случае достаточно тонкого слоя активного металла эти моды являются поверхностными плазмонами с большой длиной распростра-





нения [5–8]. При использовании призмной или решеточной связи для возбуждения этой моды можно добиться довольно острого резонанса, если металлический слой достаточно тонок для взаимодействия двух поверхностных мод. Такие структуры могут быть также использованы при разработке биосенсоров и других устройств, в частности, оптических фильтров и модуляторов оптического излучения [5–9].

### 1.7. Принцип работы оптических устройств на поверхностных плазмонах

В качестве примера рассмотрим принцип работы различных устройств, в частности, перестраиваемых оптических фильтров, модуляторов света, биосенсоров, на поверхностных плазмонах [5–25].

Как уже мы видели, постоянная распространения ПП  $k_s$  зависит от коэффициента преломления среды, граничащей с поверхностно-активной средой согласно уравнению (1). Положение минимума резонансной кривой коэффициента отражения  $R_p(\theta_{\min})$  при фиксированной длине волны излучения (либо минимума кривой зависимости коэффициента отражения от длины волны оптического излучения при фиксированном угле падения) очень чувствительно к колебаниям коэффициента преломления среды вне металлической пленки. Например, замена воздушной среды ( $n=1.0$ ) водной ( $n=1.33$ ) приводит к сдвигу резонансного угла на 25 градусов

Изменения указанного коэффициента преломления могут быть управляемыми внешними воздействиями, например, электрическим полем при использовании в качестве диэлектрической среды какого-либо электрооптического материала (жидкие кристаллы, полимеры и др.) либо светом (при использовании слоистой структуры фотопроводник – электрооптический материал, нелинейных оптических эффектов, фазовых переходов и др.). В результате может быть получена модуляция отраженного света, если считывающее излучение при выбранной длине волны направлено на структуру ПВМС под углом к основанию призмы, близким к резонансному углу.

Следует отметить, что с помощью модуляторов света на поверхностных плазмонах возможно получить не только амплитудную, но и фазовую модуляцию считывающего излучения [5, 13–14, 16–19]. Эффект изменения фазы электромагнитной волны при ее отражении можно также использовать и при разработке биосенсоров [20–21, 29].

### 1.8. Биосенсоры на основе поверхностных плазмонов

Биосенсоры на основе поверхностных плазмонных резонансов от различных производителей являются, возможно, наиболее используемыми и доступными на рынке.

Такие биосенсоры используются для биохимических анализов на глюкозу и мочевины, иммунологических анализов белков, гормонов, лекарств, стероидов вирусов, анализа ДНК и для исследования кинетики действия лекарств в реальном масштабе времени. Все биосенсоры на поверхностных плазмонах используют свойство их сильной локализации и весьма большой чувствительности к изменению диэлектрических свойств сред вблизи поверхности раздела.

В сенсорах такого типа обычно используется метод возбуждения поверхностных плазмонов в геометрии Кречмана и проводятся измерения угла, при котором коэффициент отражения (по интенсивности) минимален, величины минимального коэффициента отражения и ширины резонансной кривой. Эти данные используются для компьютерного определения действительной и мнимой частей коэффициента преломления и толщины анализируемого слоя (на основе формул Френеля для коэффициентов отражения).

В коммерческих биосенсорах на поверхностных плазмонах обычно используется CCD камера (на основе прибора с зарядовой связью или с переносом заряда) либо набор фотодиодов для измерения свойств отраженного света (см. рис. 4 из монографии [5]). Такие установки могут быть использованы для измерений в реальном масштабе времени кинетики связывания аналита с функционализированным субстратом. Для получения этой информации исследуемый раствор аналита движется над сенсором, на поверхность которого нанесены лиганды.

Во время фазы связывания аналит накапливается на лигандах, что приводит к постепенному увеличению угла минимального отражения, пока не будет достигнуто насыщение, определяемое количеством используемого лиганда. Во время фазы диссоциации поток раствора аналита заменяется буферным раствором, который вымывает аналит, в результате чего сигнал уменьшается. Кривая, которая получается в результате циклов ассоциации и диссоциации аналита, часто называется сенсорграммой. Часть такой сенсорграммы, обусловленной процессами связывания аналита, показана на рис. 4 справа.

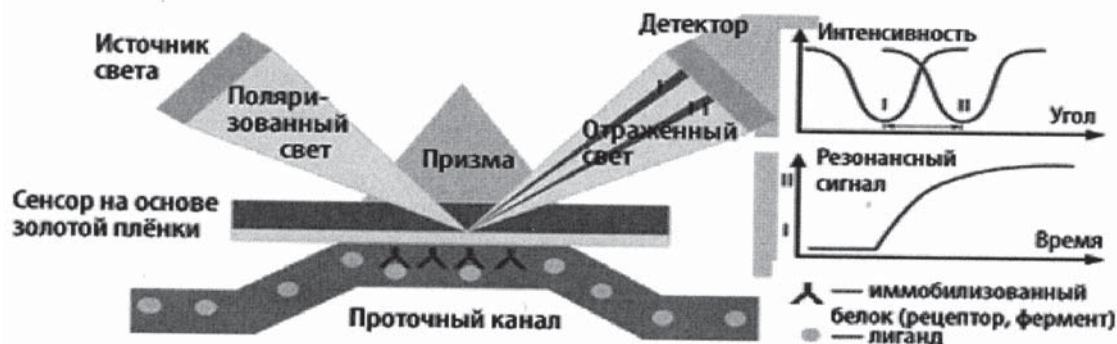


Рис. 4. Схема типичного биосенсора на поверхностных плазмонах [5]

В настоящее время промышленностью выпускаются уже десятки марок интеллектуальных сенсоров на поверхностных плазмонах [32]. Большинство из них рассчитаны на реализацию нескольких методик анализа, нуждаются в небольших объемах пробы. Некоторые имеют несколько каналов для одновременного сопоставительного анализа нескольких проб. У ряда сенсоров стандартные процедуры биохимических исследований в значительной мере автоматизированы. При использовании проточных ячеек эти процедуры включают такие этапы, как промывка буферным раствором, прокачка через ячейку заданного объема исследуемого раствора, измерения и запись сенсорграммы, прокачка чистого растворителя, отмывание элюентом. Такие циклы могут автоматически повторяться несколько раз.

С помощью микросистемных технологий созданы также миниатюрные ППР сенсоры. С использованием Фурье-спектроскопии разработан интеллектуальный сенсор, в котором кривые поверхностного резонанса наблюдаются в виде зависимости интенсивности отраженного света от волнового числа.

Весьма интересным типом сенсоров на поверхностных плазмонах являются волоконно-оптические сенсоры [32, 33].

Перечислим основные преимущества резонанса поверхностных плазмонов (РПП) для использования в биосенсорах.

1. РПП – высокочувствительный метод регистрации специфических взаимодействий двух веществ, одно из которых нанесено на сенсорную поверхность поверхностно-активного металлического слоя. Например, в результате взаимодействия антигена с антителом на поверхности металлического слоя изменяется диэлектрическая проницаемость слоя, что ведет к сдвигу резонансного угла.

2. Метод РПП позволяет получить информацию о структуре и толщине иммобилизованного слоя.

3. За счет поверхностных плазмонных волн достигается значительное усиление оптического возбуждения иммобилизованного слоя.

4. Метод РПП позволяет получить информацию о молекулярной структуре слоя. Усиленные РПП рамановские спектры могут быть получены для монослоя органического вещества.

5. Метод РПП позволяет следить за кинетикой связывания в режиме реального времени.

6. В данном методе не требуется флуоресцентных или других меток, что позволяет исследовать широкий класс биомолекулярных систем.

7. В данном методе РПП типичные анализы возможны при малых количествах вещества.

## Часть 2.

### Результаты исследований сотрудников кафедры физики твердого тела Саратовского государственного университета в области физики и применения поверхностных плазмонов

2.1. Экспериментально разработаны и исследованы в эллипсометрической оптической схеме электрически и оптически управляемые жидкокристаллические модуляторы света на поверхностных плазмонах [13, 16].

Проведены измерения и сравнение характеристик в режимах фазовой и амплитудной модуляции. Отличительной особенностью модулятора, работающего на явлении резонанса поверхностных плазмонов, является электрически управляемая модуляция фазы отраженного от жидкокристаллической структуры



*p*-поляризованного излучения, считываемого в оптической схеме эллипсометрии при углах падения излучения, близких к углу оптимального возбуждения поверхностных плазмонов в структуре.

Для реализации оптически управляемой амплитудной и фазовой модуляции излучения жидкокристаллическая (ЖК) структура соединялась последовательно с сэндвич-ячейкой на основе фоточувствительной пленки CdS с темновым сопротивлением, значительно превышающим сопротивление ЖК-структуры.

Измерения разности фаз *s*- и *p*-компонент отраженного света в зависимости от угла падения и приложенного напряжения проведены впервые. Как и следовало ожидать, *s*-поляризованным излучением поверхностные плазмоны не возбуждались.

Описанный режим модуляции излучения может быть успешно использован и в других устройствах, работающих на резонансном эффекте возбуждения поверхностных плазмонов в слоистых структурах.

**2.2.** Впервые теоретически рассчитаны фазовые характеристики отраженного *p*-поляризованного излучения (с длиной волны 0.6328 мкм) в условиях возбуждения поверхностных плазмонов для ряда слоистых структур (как в конфигурации Кречмана: стекло–серебро–этанол, так и в конфигурации Отто: стекло–MgF<sub>2</sub>–серебро–этанол).

В частности, при исследовании структуры в геометрии Кречмана обнаружено, что при добавлении дополнительного слоя диэлектрика в структуры с неоптимальным выбором параметров для возбуждения поверхностных плазмонов возможно получить структуру, оптимальную для плазмонов [17, 18].

**2.3.** Впервые рассчитаны зависимости амплитуды и фазы отраженного излучения (0.6328 мкм) от приложенного к жидкокристаллической структуре в конфигурации Кречмана напряжения в условиях возбуждения поверхностных плазмонов [17].

При приложении напряжения к жидкокристаллической структуре на поверхностных плазмонах возникающие моды в структуре сильно искажают идеальную картину нарушения полного внутреннего отражения света. Свойства мод можно использовать для эффективной амплитудной и фазовой модуляции *p*-поляризованного излучения.

**2.4.** Впервые теоретически рассчитаны температурные зависимости амплитудного коэффициента и фазы отраженного излучения в жидкокристаллических структурах в конфигурации Кречмана с поверхностными плазмонами [17, 19]. Обнаружена высокая чувствительность отраженного излучения к изменению температуры. Так, при изменении температуры ЖК в пределах 45–55 °С интенсивность отраженного света возрастает примерно в 5 раз с ростом температуры. То же самое можно сказать и об изменении фазы отраженного излучения.

**2.5.** Впервые теоретически исследовано явление оптической фазовой бистабильности в многослойных структурах с нелинейным оптическим материалом в конфигурации Кречмана с поверхностными плазмонами для *p*-поляризованного излучения [17, 20]. Показано, что:

- с увеличением угла падения на длине волны излучения 1.06 мкм увеличивается как амплитуда гистерезиса коэффициента отражения, так и мощность излучения, необходимая для его возвращения;

- в оптическом волноводе с нелинейным слоем возможно возникновение не только амплитудной, но и фазовой бистабильности при отражении *p*-поляризованного излучения от волновода, причем фазовая бистабильность начинает проявлять себя при углах падения меньших, чем углы падения, необходимые для наблюдения амплитудной бистабильности.

**2.6.** Проведены теоретические расчеты угловых зависимостей амплитудного коэффициента и фазы *p*-поляризованного излучения (для различных длин волн: 0.6328 мкм и 1.15 мкм) в слоистых структурах в геометрии Кречмана на основе двуокиси ванадия обеих фаз – полупроводниковой и металлической [17, 18].

Как известно, двуокись ванадия VO<sub>2</sub> обладает фазовым переходом 1-го рода полупроводник – металл при критической температуре около 68 °С, сопровождающимся как перестройкой кристаллической структуры, так и изменением электрических и оптических свойств, что позволяет применять этот материал в электронике и оптоэлектронике.

Расчеты показали, что с увеличением длины волны падающего излучения изменения фазы отраженного излучения становятся более значимыми, нежели изменения амплитуды.



2.7. Исследовано влияние эффекта диффузионного растекания носителей заряда в фотопроводнике, а также длины пробега (распространения) поверхностных плазмонов на разрешающую способность оптически адресуемых жидкокристаллических пространственных модуляторов света на поверхностных плазмонах [15, 17].

Показано, что непосредственный учет эффекта диффузионного растекания носителей заряда в фотосенсорной части оптически адресуемого жидкокристаллического модулятора света может быть выполнен при введении величины частотно-контрастной характеристики фотопроводника в выражение для модуляционной передаточной функции пространственного модулятора света. В случае жидкокристаллических оптически управляемых пространственных модуляторов света на поверхностных плазмонах учет длины распространения поверхностных плазмонов выполняется введением частотно-контрастной характеристики системы считывания изображения поверхностными плазмонами одновременно с частотно-контрастной характеристикой фотопроводника.

2.8. Проведено исследование (компьютерное моделирование) особенностей спектров отражения слоистых структур металл –  $J$ -агрегат с поверхностными плазмонами [34, 35].

В последние годы большой интерес представляют исследования взаимодействия поверхностных и локализованных плазмонов с экситонами в органических соединениях. В частности, весьма актуальным является изучение спектров отражения (зависимостей коэффициента отражения излучения от длины волны падающего излучения) структур металл –  $J$ -агрегат на поверхностных плазмонах при проявлении эффектов взаимодействия поверхностных плазмонов с френкелевскими экситонами  $J$ -агрегатов органических красителей со значительной силой осцилляторов.

Нами проведено моделирование для многослойных структур, содержащих в отдельности три разновидности цианиновых красителей (типа ТС, ОС и РС) с различной частотой перехода и силой осциллятора.

При использовании полученных в ходе моделирования результатов представляется возможным количественная оценка величины энергии расщепления Раби для исследованных структур со слоями цианиновых красителей с возбуждением поверхностных плазмонов.

## Заключение

Следует еще раз подчеркнуть ряд полезных свойств поверхностных плазмонов (ПП), перспективных с точки зрения их использования.

1. Поверхностные плазмоны-поляритоны – возможно оптически возбуждать как в видимой, так и ближней инфракрасной области спектра.

2. Оптическое возбуждение ПП весьма чувствительно к типу поляризации излучения; ПП возбуждаются лишь при  $p$ -поляризации.

3. Моды ПП распространяются вдоль границы металл – диэлектрик, однако сильно локализованы в направлении, нормальном к границе раздела. Поэтому не случаен большой интерес к оптическому возбуждению ПП как к резонансному явлению, чувствительному к свойствам поверхностей и границ раздела и используемому для исследования тонких слоев металлов и диэлектрических пленок, разработки электрооптических модуляторов света, оптических фильтров, ПЭВ-микроскопии, датчиков, биосенсоров и других устройств.

4. Поверхностные плазмоны сильно локализованы в направлении распространения, что очень важно для разработки пространственно-временных модуляторов света, сенсоров и ПП-микроскопов. Как мы уже отмечали, типичная длина распространения ПП, обратно пропорциональная ширине резонансной кривой  $R_p(\theta)$ , составляет порядка  $\sim 10$  мкм при  $\lambda = 0.63$  мкм. Следовательно, для видимой области спектра возбуждение ПП является достаточно локализованным. При выборе соответствующей поверхностно-активной среды длина распространения  $L_{sp}$  поверхностных плазмонов в видимой области спектра может быть доведена до величин  $< 5$  мкм. Выбор оптимальной комбинации поверхностно-активный металл – оптическая длина волны существенно определяется принципом измерения поверхностно-плазменного резонанса.

5. При резонансном возбуждении поверхностных плазмонов на границе раздела металл – диэлектрик повышаются напряженности электрических полей и поглощение световой энергии, что вследствие джоулевых потерь может привести к сильному нагреву границы раздела. Отмеченные особенности находят применение как в линейной оптике, приводя к повышенной чувствительности во множестве измерений, таких, например, как измерение переходных процессов термоотражения, многофотонной фотоэлектронной эмиссии, туннельных токов





сканирующего туннельного микроскопа, чувствительности и квантовой эффективности поляризационно-чувствительных фотодиодов с барьером Шоттки, так и в нелинейной оптике, усиливая эффекты второго и третьего порядков, такие как генерация второй гармоники в диэлектриках, явления оптической бистабильности жидких кристаллах и других средах.

6. На основе эффекта резонансного возбуждения поверхностных плазмонов возможна также разработка пространственно-временных модуляторов света и преобразователей инфракрасных изображений непосредственно в видимые, если, например, на поверхностно-активный металлический слой нанести слой неорганического или органического материала, коэффициент преломления которого изменяется при воздействии ИК-излучения, приводя к изменению коэффициента отражения видимого излучения, возбуждающего поверхностные плазмоны.

7. Во второй части работы приведены результаты исследований автора с сотрудниками в обсуждаемой научной области плазмоники.

#### Список литературы

1. Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред / под ред. В. М. Аграновича, Д. Л. Миллса. М. : Наука, 1985. 525 с.
2. *Bonch-Bruевич A. M., Libenson M. N., Makin V. S., Trubaev V. V.* Surface electromagnetic waves in optics // *Optical Engineering*. 1992. Vol. 31, № 4. P. 718–730.
3. *Либенсон М. Н.* Поверхностные электромагнитные волны оптического диапазона // *Соросовский образоват. журн.* 1996. № 10. С. 93–98.
4. *Либенсон М. Н.* Поверхностные электромагнитные волны в оптике // *Соросовский образоват. журн.* 1996. № 11. С. 103–110.
5. *Климов В. В.* Наноплазмоника. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. 480 с.
6. *Plumereau Christine, Bouchoux Anne-Marie, Cachard Alain.* Electrooptic light modulator using long-range surface plasmons // *Proc. SPIE*. 1987. Vol. 800. Novel Optoelectronic Devices. P. 79–83.
7. *Matsubara K., Kawata S., Minami S.* Multilayer system for a high-precision plasmon resonance sensor // *Optics Lett.* 1990. Vol. 15, № 1. P. 754–777.
8. *Kajenski P. J.* Tunable optical filter using long-range surface plasmons // *Opt. Eng.* 1997. Vol. 36, № 5. P. 1537–1541.
9. *Пономаренко В. П., Филачев А. М.* Новые направления инфракрасной фотоэлектроники // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2010. № 5. С. 44–53.
10. *Yetman E. M., Caldwell M. E.* Spatial light modulation using surface plasmon resonance // *Appl. Phys. Lett.* 1989. Vol. 55, № 7. P. 613–615.
11. *Caldwell M. E., Yeatman E. M.* Performance characteristics of surface plasmon liquid crystal light valve // *Electron. Lett.* 1991. Vol. 27, № 16. P. 1471–1472.
12. *Caldwell M. E., Yeatman E. M.* Surface-plasmon spatial light modulators based on liquid crystal // *Appl. Opt.* 1992. Vol. 31, № 20. P. 3880–3891.
13. *Названов В. Ф., Афонин О. А.* Фазовая модуляция оптического излучения в структурах с поверхностными плазмонами // *Письма в ЖТФ*. 1994. Т. 20, № 7. С. 26–31.
14. *Названов В. Ф., Коваленко Д. И.* О поведении амплитуды и фазы отраженного излучения в многослойных структурах с поверхностными плазмонами // *Письма в ЖТФ*. 1995. Т. 21, вып. 14. С. 60–63.
15. *Названов В. Ф., Коваленко Д. И.* О разрешающей способности оптически адресуемых жидкокристаллических пространственных модуляторов света // *Письма в ЖТФ*. 1998. Т. 24, № 13. С. 48–53.
16. *Названов В. Ф., Афонин О. А., Гребенников А. И.* Характеристики жидкокристаллических модуляторов света на поверхностных плазмонах в режиме фазовой модуляции // *Квантовая электроника*. 1995. Т. 22, № 10. С. 1063–1064.
17. *Коваленко Д. И.* Исследование отражения поляризованного излучения от слоистых структур в условиях возбуждения поверхностных плазмонов : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Саратов, 1997. 18 с.
18. *Названов В. Ф., Коваленко Д. И.* Поведение интенсивности и фазы отраженного излучения в структуре на основе двуокиси ванадия с поверхностными плазмонами // *Письма в ЖТФ*. 1997. Т. 23, № 13. С. 32–36.
19. *Названов В. Ф., Коваленко Д. И.* Температурная зависимость интенсивности и фазы отраженного света в жидкокристаллической структуре с поверхностными плазмонами // *Письма в ЖТФ*. 1997. Т. 23, вып. 17. С. 11–15.
20. *Названов В. Ф., Коваленко Д. И.* Фазовая оптическая бистабильность в структурах с поверхностными плазмонами // *Письма в ЖТФ*. 1998. Т. 24, № 16. С. 60–65.
21. *Кочергин В. Е., Белоглазов А. А., Валеико М. В., Никитин П. И.* Фазовые свойства поверхностно-плазмонного резонанса с точки зрения сенсорных применений // *Квантовая электроника*. 1998. Т. 254, № 5. С. 457–461.
22. *Кочергин В. Е., Валеико М. В., Белоглазов А. А., Ксеневич Т. И., Никитин П. И.* Визуализация угловой зависимости фазы отраженного излучения в условиях поверхностно-плазмонного резонанса и ее сенсорные применения // *Квантовая электроника*. 1998. Т. 215, № 9. С. 857–861.
23. *Биосенсоры : основы и приложения : пер. с англ. / под ред. Э. Тернера, И. Карубе, Дж. Уилсона.* М. : Мир, 1992. 614 с.



24. Эггинс Б. Химические и биологические сенсоры. М. : Технофера, 2005. 336 с.
25. van Gent Jos, Lambeck P. V., Kreuwel H. M. J., Gerritsma G. J., Sudholter E. J. R., Reinhoudt D. N., Popma Th. J. A. Optimization of a chemo-optical surface plasmon resonance based sensor // *Appl. Opt.* 1990. Vol. 29, № 19. P. 2843–2849.
26. Fontana E., Pantell R. H., Strober S. Surface plasmon immunoassay // *Appl. Opt.* 1990. Vol. 29, № 31. P. 4664–4704.
27. de Breuijn Helene E., Altenburg Bert S. F., Kooyman Rob P. H., Greve J. Determination of thickness and dielectric constant of thin transparent dielectric layers using surface plasmon resonance // *Opt. Commun.* 1991. Vol. 82, № 5, 6. P. 425–432.
28. de Breuijn Helene E., Kooyman Rob P. H., Greve J. Choice of metal and wavelength for surface-plasmon resonance sensors : some considerations // *Appl. Opt.* 1992. Vol. 31, № 4. P. 440–442.
29. Никитин А. К., Тищенко А. А., Черная А. И. Датчики физических величин на основе планарных волноводных структур оптического диапазона // *Зарубежная электроника.* 1990. № 10. С. 14–30.
30. Никитин П. И. Усовершенствованные методы поверхностно-плазмонного резонанса и биологические и химические сенсорные системы на их основе // *Сенсорные системы.* 1998. Т. 12, № 3. С. 69–87.
31. Никитин А. К. Плазменная оптометрия : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Науч.-технол. центр уникального приборостроения ; Рос. Академия наук. М., 2002. 28 с.
32. Войтович И. Д., Корсунский В. М. Интеллектуальные сенсоры : учеб. пособие. М. : Интернет-Университет информационных технологий ; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 623 с.
33. Leung A., Shankar P. M., Mutharasan R. A review of fiber-optic biosensors // *Sensors and Actuators : Chemical.* 2007. Vol. 125, iss. 2. P. 688–703.
34. Сычев П. Г., Названов В. Ф. Спектры отражения структур металл-диэлектрик (*J*-агрегат) на поверхностных плазмонах (компьютерное моделирование) // *Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами : материалы Всерос. науч. школы-семинара / под ред. Д. А. Усанова. Саратов : Саратов. источник, 2014. С.111–113.*
35. Сычев П. Г., Названов В. Ф. Особенности спектров отражения структур металл–*J*-агрегат с поверхностными плазмонами (компьютерное моделирование) // *Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2014 : материалы Междунар. симпозиума Saratov Fall Meeting 2014 «Оптика и биофотоника-II» / под ред. Г. В. Симоненко, В. В. Тучина. Саратов : Новый ветер, 2014. С. 61–64.*

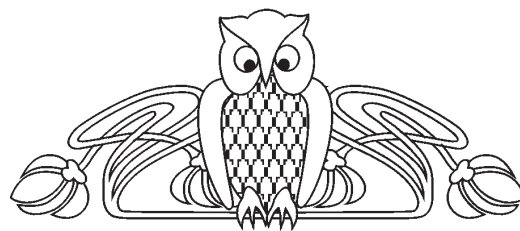
УДК 539.182/184, 519.677

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ПАРНОЙ АССОЦИАЦИИ В ИК-СПЕКТРАХ ПИРИДИНА МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ

К. В. Березин, В. В. Нечаев, О. В. Козлов, А. В. Новоселова, М. Л. Чернавина, В. И. Березин, М. К. Березин, В. В. Новоселов

Саратовский государственный университет  
E-mail: nusena1975@mail.ru

Методом функционала плотности B3LYP/6-311+G(d, p) выполнен расчет структуры, частот нормальных колебаний и интенсивностей полос в ИК-спектрах пяти димеров пиридина с водородной связью. Выполнено моделирование ряда сложных колебательных контуров в ИК-спектре пиридина с учетом межмолекулярного взаимодействия. Показано, что большой вклад в формирование полос спутников, усложняющих структуру колебательных полос мономерного пиридина в матрично-изолированном низкотемпературном ИК-спектре, вносят водородосвязанные парные самоассоциаты. Предложена детальная интерпретация низкотемпературного матрично-изолированного ИК-спектра поглощения пиридина  $H_5$  и  $D_5$ . Вычислены термодинамические характеристики образования комплексов с учетом базисной суперпозиционной ошибки.



**Ключевые слова:** инфракрасная (колебательная) спектроскопия, ИК-спектр, метод матричной изоляции.

### The Manifestation's Research of the Pair Association in the Pyridine's Ir-Spectrums by the Matrix Isolation Technique

K. V. Berezin, V. V. Nechaev, O. V. Kozlov, A. V. Novoselova, M. L. Chernavina, V. I. Berezin, M. K. Berezin, V. V. Novoselov

The calculation of structure, frequencies of normal fluctuations and the strips intensity in IR-spectrums of five dimer of pyridine with hydrogen communication has been performed by the matrix



isolation technique B3LYP/6-311+G (d, p). The number's modeling of the difficult oscillatory contours in the pyridine's IR-spectrum was executed taking into account the intermolecular interaction. It is shown that the hydrogen communications of the pair self-associate the brought the big contribution to formation of strips of the satellites complicating structure of oscillatory strips of monomeric pyridine in the matrix-isolated low-temperature IR-spectrum. The detailed interpretation of the low-temperature matrix isolated IR-spectrum of H<sub>5</sub> D<sub>5</sub> pyridine absorption is offered. Thermodynamic characteristics of complexes formation taking into account a basic peak-a-boo mistake are calculated.

**Key words:** infrared (oscillatory) spectroscopy, IR-spectrum, matrix isolation technique.

### Введение

При взаимодействии молекул положения их энергетических уровней и вероятностей переходов между ними изменяются, что лежит в основе применения колебательной спектроскопии к исследованию межмолекулярных взаимодействий различных типов.

Межмолекулярные взаимодействия условно подразделяют на два типа: специфические, обусловленные наличием водородной связи, и универсальные, называемые взаимодействием Ван-дер-Ваальса. Известно, что они определяют структуру и биологическую активность сложных биомолекул, таких как белки, ДНК и их многообразных комплексов.

Парные ассоциаты ароматических N-гетероциклов можно рассматривать в качестве модельных систем для детального исследования проявлений межмолекулярных взаимодействий в оптических спектрах, а также для построения спектрально-структурных корреляций для анализа конформационной динамики в биополимерах.

Большой объем информации о взаимодействии удается получить путем изоляции молекул и их комплексов в матрицах инертных газов при низкой температуре [1] преимущественно за счет резкого уменьшения ширины полос в спектре. Метод матричной изоляции [2, 3] широко использовался для исследования колебательных состояний нестабильных частиц [4, 5], конформеров [6, 7], комплексов с водородной связью [8, 9], оснований ДНК [10–12], аминокислот [13, 14], порфиринов [15, 16].

Образование водородной связи между алифатическим донором и акцептором протона сопровождается изменением характеристик связей ближайшего окружения, что проявляется в спектрах различных типов [17]. В случае, когда атом, связывающий протон, входит в состав сопряженной системы, возмущение оказывает

влияние на свойства всех связей, входящих в сопряжение, а также на характеристики связей ближайшего окружения. Например, для N-гетероциклических соединений при протонировании атомов N наблюдается гипсохромный сдвиг полосы низкоэнергетического  $n \rightarrow \pi^*$  электронного перехода и сдвиг частот кольцевых колебаний, регистрируемый в ИК- и КР-спектрах.

На практике данный эффект может применяться для доказательства существования водородной связи (Н-связи) и установления отнесенных нормальных колебаний в сложных ароматических соединениях с Н-связями. Недавно эффект повышения колебательных частот наблюдался при протонировании пуринового кольца ацетильного производного аденозина [18]. Следовательно, частотные сдвиги кольцевых мод могут служить в качестве тонкого инструмента для исследования структуры и энергетики комплексов с водородной связью (Н-комплексов) производных пуриновых оснований (аденин, гуанин) с белками [19].

В работе [20] был зарегистрирован спектр ИК-поглощения пиридина в матрице твердого аргона, на основе эмпирического метода атом-атомных потенциалов определена наиболее вероятная структура  $\pi$ -связанных димеров и сделана оценка влияния межмолекулярного взаимодействия на положение полос фундаментальных колебаний. Наряду с  $\pi$ -димерами пиридин может образовывать ряд комплексов с водородной связью.

Использование частотных сдвигов в прикладных задачах подразумевает точную интерпретацию всех нормальных колебаний донора, акцептора и их Н-комплекса. Такая возможность появилась только в последнее время благодаря совершенствованию квантовомеханических методов, учитывающих электронную корреляцию: теория возмущений Меллера–Плессе [21], различные варианты теории функционала плотности [22] и методы конфигурационного взаимодействия [23, 24].

Целью данной работы была теоретическая интерпретация низкотемпературного матрично-изолированного ИК-спектра молекулы пиридина с учетом межмолекулярного взаимодействия на основе квантово-механических расчетов геометрических параметров, силовых полей и интенсивностей полос в ИК-спектре изолированного пиридина и его самоассоциатов методом функционала плотности.



### Методика расчета

Расчет геометрических параметров, дипольных моментов, абсолютных ИК-интенсивностей и частот нормальных колебаний изолированных молекул пиридина и его водородосвязанных димеров был выполнен в приближении B3LYP/6-311+G(d, p) [25, 26] по программе [27]. Для эффективного учета ангармоничности вычисленные колебательные частоты масштабировались по методу [28]. Для интерпретации и разделения колебаний на внутримолекулярные и межмолекулярные использовалась программа визуализации форм колебаний Molekel [29]. Термодинамические характеристики самоассоциатов пиридина вычислялись по методике, описанной в [30].

Молекула пиридина относится к классу ароматических азациклов, легко образующих водородную связь за счет наличия в своем кольце третичного атома азота. ИК-спектр пиридина в матрице твердого азота при  $T = 5\text{K}$  в концентрациях 1/4000 и 1/1500 был зарегистрирован в работе [20] и там же была дана эмпирическая интерпретация наблюдаемых частотных сдвигов на базе предположения о парной ассоциации пиридина. Парные самоассоциаты сэндвичевого типа, или  $\pi$ -комплексы, образование которых в матрице азота предполагалось в [20], стабилизируются преимущественно ван-дер-ваальсовыми силами. Рассмотрение таких взаимодействий лежит за рамками приближения DFT/B3LYP, что в данной работе не рассматривалось.

При моделировании теоретического спектра с учетом образования димеров отношение концентраций изолированных молекул пиридина и димера с самой большой константой равновесия Д3 было выбрано исходя из приближенной оценки отношения интегральных интенсивностей полос, соответствующих колебанию  $\nu_{ba}$ , которое оказалось равным 1:2. Относительная концентрация димеров рассчитывалась исходя из отношения вычисленных констант равновесия. Моделирование ИК-спектра осуществлялось путем сложения контуров индивидуальных полос. Форма контура описывалась функцией Лоренца, нормированной на интегральную интенсивность полосы. Полуширины для всех полос полагались равными  $0.5\text{ см}^{-1}$ .

### Результаты и их обсуждение

#### Структура и термодинамика

Молекула пиридина принадлежит к группе симметрии  $C_{2v}$  и имеет три неэквивалентных положения протона. Таким образом, возможно образование пяти различных водородосвязанных парных самоассоциатов, трех в плоской конфигурации и двух в неплоской, когда пиридиновые кольца имеют угол между собой относительно оси, проходящей через водородную связь. Пространственное строение водородосвязанных димеров (циклического димера Д1) и четырех типов односвязных димеров (Д2, Д2(X), Д3, Д3(X)) показано на рис. 1.

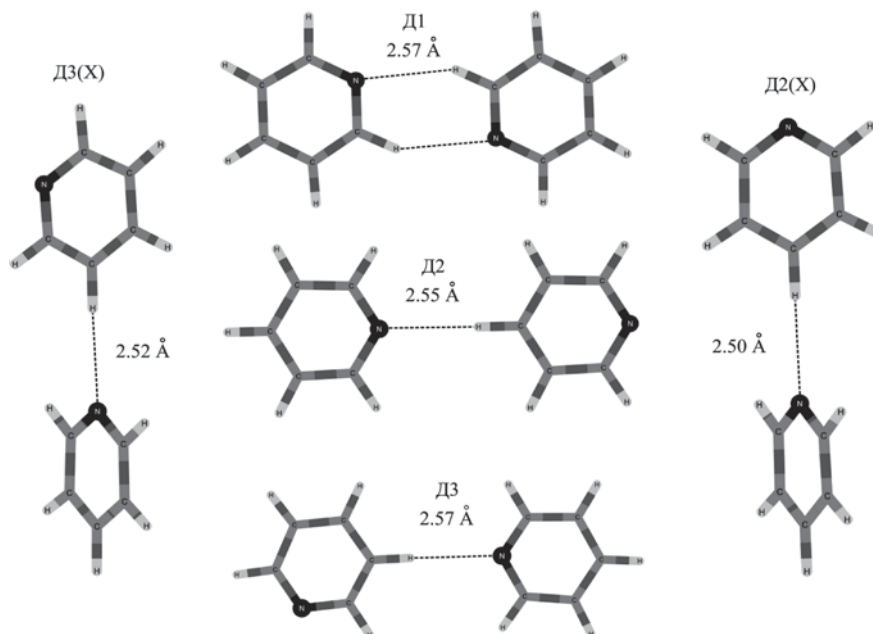


Рис. 1. Пространственное строение водородосвязанных димеров пиридина: Д1 (группа симметрии  $D_{2h}$ ), Д2 (группа симметрии  $C_{2v}$ ), Д3 (группа симметрии  $C_s$ ), Д2(X) и Д3(X) (группа симметрии  $C_1$ ), рассчитанные методом B3LYP/6-311+G(d, p). Цифрами на рисунке указаны значения длин водородных связей





Изменения в структуре донорной и акцепторной молекулы пиридина для этих димеров сосредоточены в области С-Н и СN связей, атомы которых участвуют в образовании водородных связей. Изменение длин этих связей незначительное и не превышает по величине 0.005 ангстрем. Изменение внутренних валентных углов пиридинового кольца также небольшие и не превышает 0.5 градусов, аналогичные по величине изменения претерпевают

и внешние углы при С-Н связях. Длины водородных связей лежат в пределах от 2.5 ангстрем для димера Д2(Х) до 2.57 ангстрем для циклического димера Д1. Как видно из табл.1, температурная энтальпия образования водородосвязанных димеров пиридина находится в интервале от  $-2.88$  до  $-0.48$  кДж/моль. Такие значения длин водородных связей и величины энтальпии характеризуют водородную связь как слабую.

Таблица 1

**Термодинамические характеристики (кДж/моль) образования парной ассоциации пиридина, рассчитанные методом B3LYP/6-311+G(d,p) для водородосвязанных димеров и методом B3LYP/6-311+G(d,p) для ван-дер-ваальсовых при  $T = 298.15$  К**

Комплекс	$\Delta E$	$\Delta ZPE$	$BSSE$	$\Delta H_0$	$\Delta H_{298}$	$T\Delta S$	$\Delta G_{298}$	$K_{298} \times 10^3$
Д1	-9.59	2.36	1.00	-6.23	-2.88	-30.23	27.35	0.016
Д2	-7.30	1.71	0.93	-4.66	-0.89	-23.85	22.96	0.095
Д2(Х)	-8.51	1.55	0.84	-6.12	-2.24	-20.43	18.19	0.650
Д3(Х)	-7.82	1.47	0.81	-5.54	-1.64	-18.26	16.63	1.222
Д3	-6.70	1.48	0.82	-4.40	-0.48	-16.88	16.41	1.334

Наибольшие значения констант равновесия были получены для низкосимметричных односвязанных димеров. Как видно из табл. 1, изменения констант равновесия при переходе от комплекса к комплексу обусловлены в основном изменением энтропийного вклада.

### Колебательный спектр

Экспериментальный и теоретический ИК-спектр пиридина и его изотопомера  $D_5$  в различных частотных областях показан на рис. 2. Результаты моделирования в подавляющем большинстве случаев хорошо согласуются с экспериментом, что позволило интерпретировать 15 из 19 экспериментально наблюдаемых колебательных полос сателлитов.

Отнесение и интерпретация экспериментально наблюдаемых полос в этих частотных областях представлены в табл. 2. Видно, что часто в образование одной колебательной полосы вносят свой вклад в колебания, принадлежащие различным типам димеров, поэтому значения  $\nu_{\text{выч}}$ , приведенные в табл. 2, соответствуют не вычисленным значениям волновых чисел, а положению максимумов полос в теоретическом спектре.

Из данных, приведенных в табл. 2, видно, что рассчитанные значения частотных сдви-

гов хорошо согласуются с экспериментально наблюдаемыми как по знаку, так и по величине. Исходя из этого, а также опираясь на результаты проведенного нами моделирования ИК-спектра поглощения пиридина с учетом образования водородосвязанных димеров, можно заключить, что выбранные нами молекулярные модели являются адекватными для детального описания большинства особенностей низкотемпературного ИК-спектра пиридина в азотной матрице.

Наблюдаемые в ИК-спектре пиридина- $H_5$  полосы  $\nu_{\text{экср}} = 706 \text{ см}^{-1}$  и  $702.2 \text{ см}^{-1}$ , а также полосы  $\nu_{\text{экср}} = 530.5 \text{ см}^{-1}$  и  $527.6 \text{ см}^{-1}$ , наблюдаемые в спектре дейтерированного пиридина, нам не удалось интерпретировать на основании рассмотренных моделей. Данное обстоятельство позволяет сделать предположение, что эти полосы образованы колебаниями ван-дер-ваальсовых димеров пиридина. В дальнейшем авторы статьи предполагают рассмотреть димеры такого типа, рассчитав их спектральные и термодинамические характеристики в рамках теоретического метода WB97XD, который специально адаптирован для такого типа молекулярных систем.

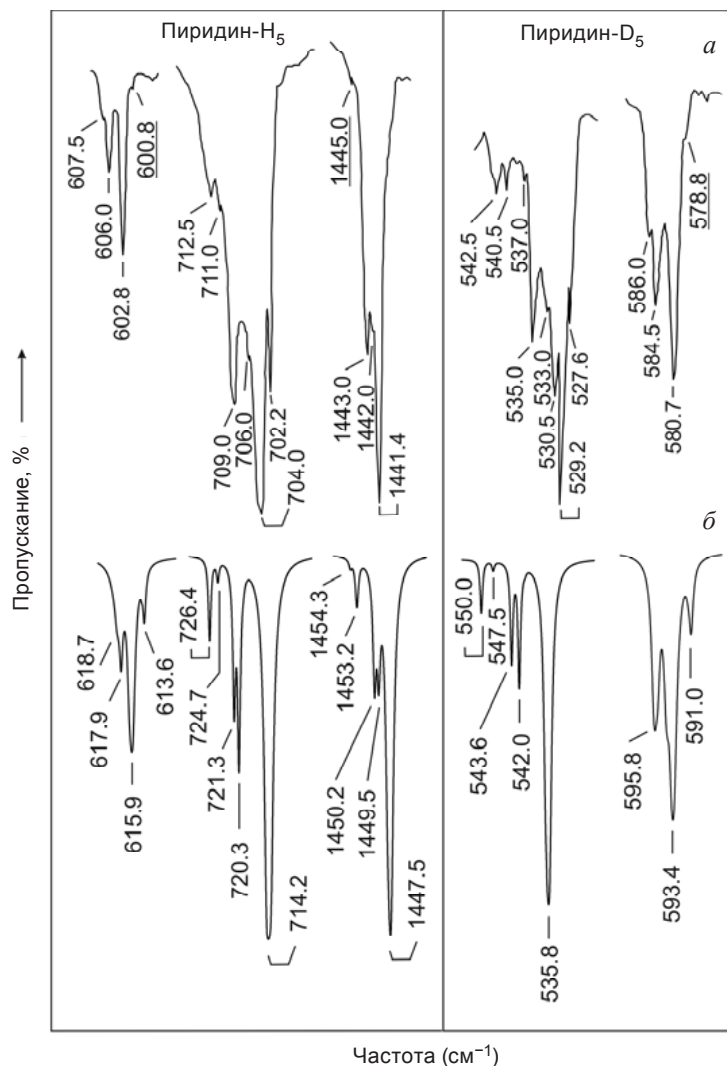


Рис. 2. Экспериментальные ИК-полосы поглощения пиридина  $-H_5$  и  $-D_5$ , зарегистрированные в азотной матрице при температуре  $\sim 5$  К для молекулярного соотношения пиридин/азот – 1/1500 (а) и теоретические, построенные с учетом образования трех водородосвязанных самоассоциатов (б)

Таблица 2

**Отнесение и интерпретация ряда экспериментально наблюдаемых полос в матрично-изолированном ИК-спектре пиридина  $-H_5$  и пиридина  $-D_5$  при  $T = 5$  К, для молекулярного соотношения пиридин/азот – 1/1500**

Пиридин H <sub>5</sub>				Пиридин D <sub>5</sub>				Интерпретация
$\nu_{\text{эксп}}$ [41]	$\nu_{\text{выч}}$	$\Delta\nu_{\text{эксп}}$ [41]	$\Delta\nu_{\text{выч}}$	$\nu_{\text{эксп}}$ [41]	$\nu_{\text{выч}}$	$\Delta\nu_{\text{эксп}}$ [41]	$\Delta\nu_{\text{выч}}$	
1445.0	1453.2	+3.6	+5.7	–	–	–	–	19b (B <sub>2</sub> ) Д2Х Д2
1443.0	1450.2	+1.6	+2.7	–	–	–	–	19b (A') ДЗ ДЗХ
1442.0	1449.5	+0.6	+2.0	–	–	–	–	19b ДЗ, ДЗХ Д1
1441.4	1447.5	0.0	0.0	–	–	–	–	19b (B <sub>2</sub> ) Пир.
712.5	726.4	+8.5	+12.2	540.5	547.5	+11	+11.7	4 (B <sub>1</sub> ) Д2Х Д2
711.0	721.3	+7.0	+7.1	537.0	543.6	+7.5	+7.8	–ДЗХ



Окончание табл. 2

Пиридин H <sub>5</sub>				Пиридин D <sub>5</sub>				Интерпретация
$\nu_{\text{эксп}}$ [41]	$\nu_{\text{выч}}$	$\Delta\nu_{\text{эксп}}$ [41]	$\Delta\nu_{\text{выч}}$	$\nu_{\text{эксп}}$ [41]	$\nu_{\text{выч}}$	$\Delta\nu_{\text{эксп}}$ [41]	$\Delta\nu_{\text{выч}}$	
709.0	720.3	+5.0	+6.1	535.0	542.0	+5.5	+5.2	4 (A <sub>g</sub> )ДЗ Д1
706.0	–	+2.0	–	530.5	–	+1.0	–	–
704.0	714.2	0.0	0.0	529.5	535.8	0.0	0.0	4 (B <sub>1</sub> ) Пир.
702.2	–	–1.6	–	527.6	–	–1.9	–	–
607.5	618.7	+4.7	+2.8	586.0	–	–	–	6а Д2Х
606.0	617.9	+3.2	+2.0	584.5	595.4	–	–	6аДЗ, ДЗХ, Д2Х
602.8	615.9	0.0	0.0	580.7	593.4	0.0	0.0	6а Пир.
600.8	613.6	–2.0	–2.3	578.8	591.4	–	–	6а ДЗ, Д2Х, ДЗХ

### Выводы

Методом функционала плотности с использованием обменного функционала Бекке и корреляционного функционала Ли–Янга–Парра (B3LYP) с базисным набором 6-311+G(d, p) выполнен расчет структуры, частот нормальных колебаний и интенсивностей полос в ИК-спектрах пяти димеров пиридина. Установлены структуры димеров с водородной связью. Проведен анализ изменения структуры, частот фундаментальных колебаний и абсолютных ИК-интенсивностей пиридина при образовании димеров с водородной связью. Выполнено моделирование ряда сложных колебательных контуров в ИК-спектре пиридина с учетом межмолекулярного взаимодействия. Показано, что большой вклад в формирование полос спутников, усложняющих структуру колебательных полос мономерного пиридина в матрично-изолированном низкотемпературном ИК-спектре, вносят водородосвязанные парные самоассоциаты. Предложена детальная интерпретация низкотемпературного матрично-изолированного ИК-спектра поглощения пиридина H<sub>5</sub> и D<sub>5</sub> в ряде частотных областей. Вычислены термодинамические характеристики образования комплексов в рамках теоретического метода B3LYP/6-311+G(d, p) с учетом базисной суперпозиционной ошибки (BSSE).

### Список литературы

1. Klaboe P., Nielsen C. J. Recent advances in infrared matrix isolation spectroscopy // *Analyst* (Cambridge, United Kingdom). 1992. Vol. 117, № 3. P. 335–341.
2. Пиментел Дж. Колебательная спектроскопия / под ред. А. Барнса и У. Орвилл-Томаса. М. : Мир, 1981. 480 с.
3. Барри Ф. М., Тохадзе К. Г. Водородная связь / под ред. Н. Д. Соколова. М. : Наука, 1981. 286 с.
4. Bürger H., Schneider W., Sommer S., Thiel W., Willner H. Generation of gold ions in the solid state or in fluorosulfuric acid solution and their identification by ESR // *J. Chem. Phys.* 1991. Vol. 95, № 8. P. 5660-9.
5. Shepherd R. A., Graham W. R. M. Formation and Identification of Interstellar Molecule Linear C<sub>5</sub>H from Photolysis of Methane Dispersed in Solid Neon // *J. Chem. Phys.* 1987. Vol. 86. P. 2600–2605.
6. Goodman M. A., Sweany R. L., Flurry R. L. Jr. Infrared spectra of matrix-isolated, crystalline solid, and gas phase C<sub>3</sub>-C<sub>6</sub> n-alkanes // *J. Phys. Chem.* 1983. Vol. 87, № 10. P. 1753–1757.
7. Engdahl A., Nelander B. Infrared spectrum of cis-glyoxal // *Chem. Phys. Lett.* 1988. Vol. 148, № 2–3. P. 264–275.
8. Шапетько Н. Н., Базов В. П. Проявление туннельных эффектов в инфракрасных спектрах ацетилацетона в матричной изоляции при 14 К // *Журн. физ. химии.* 1989. Т. 63, № 10. С. 2832–2835.
9. Destexhe A., Smets J., Adamowicz L., Maes G. Matrix-Isolation FT-IR Studies and AbInitio Calculations of Hydrogen-Bonded. Complexes of Molecules Modeling Cytosine // *J. Phys. Chem.* 1994. Vol. 98, № 5. P. 1506–1514.
10. Szczesniak M., Nowak M. J., Szczepaniak K., Chin S., Scott I., Person W. B. Matrix isolation studies of nucleic acid constituents-III. 1-Methyluracil, 3-methyluracil and 1,3-dimethyluracil monomers // *Spectrochim. Acta. A.* 1985. Vol. 41, № 1–2. P. 233–236.
11. Степаньян С. Г., Шеина Г. Г., Радченко Е. Д., Благой Ю. П. Инфракрасные спектры и таутомерия изоцитозина в аргонной матрице // *Журн. физ. химии.* 1989. Т. 63, № 11. С. 3008–3014.



12. Nowak M. J., Lapinski L., Kwiatkowski J. S., Leszczyński J. Molecular Structure and Infrared Spectra of Adenine. Experimental Matrix Isolation and Density Functional Theory Study of Adenine (<sup>15</sup>N) Isotopomers // *J. Phys. Chem.* 1996. Vol. 100, № 9. P. 3527–3534.
13. Stepanian S. G., Reva I. D., Radchenko E. D., Adamowicz L. Conformational Behavior of Alanine. Matrix-Isolation Infrared and Theoretical DFT and ab Initio Study // *J. Phys. Chem. A.* 1998. Vol. 102, № 24. P. 4623–4629.
14. Ivanov A. Yu., Sheina G., Blagoi Yu. P. FTIR spectroscopic study of the UV-induced rotamerization of glycine in the low temperature matrices (Kr, Ar, Ne) // *Spectrochim. Acta. A.* 1999. Vol. 55, № 1. P. 219–228.
15. Kincaid J. R., Urban M. W., Watanabe T., Nakamoto K. Infrared Spectra of Matrix-Isolated Metal Complexes of Octaethylporphine // *J. Phys. Chem.* 1983. Vol. 87, № 16. P. 3096–3101.
16. Radziszewski J. G., Nepraš M., Balaji V., Waluk J., Vogel E., Michl J. Polarized Infrared Spectra of Photooriented Matrix-Isolated Free-Base Porphyrin Isotopomers // *J. Phys. Chem.* 1995. Vol. 99. P. 14254–14260.
17. Молекулярные взаимодействия / под ред. Г. Ратайчика, У. Орвилла-Томаса : в 2 т. М. : Мир, 1984. Т. 2. 600 с.
18. Fujimoto N., Toyama A., Takeuchi H. Effect of hydrogen bonding on the UV resonance Raman bands of the adenine ring and its C8-deuterated analog // *J. Mol. Struct.* 1998. Vol. 447, № 1–2. P. 61–69.
19. Efremov R. G., Feofanov A. N., Dzhandzhugazyan K. N., Modyanov N. N., Nabiev I. R. Study of ATP binding in the active site of Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> ATPase as probed by ultraviolet resonance Raman Spectroscopy // *FEBS Lett.* 1990. Vol. 260, № 2. P. 257–260.
20. Taddei G., Castellucci E., Verderame F. D. Pair Association in Matrix Isolated Pyridine // *J. Chem. Phys.* 1970. Vol. 53, № 6. P. 2407–2411.
21. Moller C., Plesset M. S. Note on an approximation treatment for many – electron system // *Phys. Rev.* 1934. Vol. 46, № 7. P. 618–622.
22. Кон В. Электронная структура вещества – волновые функции и функционалы плотности // *УФН.* 2002. Т. 172, № 3. С. 336–348.
23. Krishnan R., Schlegel H. B., Pople J. A. Self-consistent orbital methods. XX. A basis set for correlated wave functions // *J. Chem. Phys.* 1980. Vol. 72, № 1. P. 650–654.
24. Pople J. A., Head-Gordon M., Raghavachari K. Quadratic configuration interaction. A general technique for determining electron correlation energies // *J. Chem. Phys.* 1987. Vol. 87, № 10. P. 5968–5975.
25. Becke A. D. Density-functional thermochemistry. III. The role of exact exchange // *J. Chem. Phys.* 1993. Vol. 98, № 7. P. 5648–5652.
26. Lee C., Yang W., Parr R. G. Development of the Colle-Solvetti correlation-energy formula into a functional of the electron density // *Phys. Rev.* 1988. Vol. 37B, № 2. P. 785–789.
27. Frisch M. J., Trucks G. W., Schlegel H. B. et al. Gaussian 98 / Gaussian Inc. Pittsburgh, PA, 1998.
28. Yoshida H., Ehara A., Matsuura H. Density functional vibrational analysis using wavenumber-linear scale factors // *Chem. Phys. Lett.* 2000. Vol. 325, № 4. P. 477–483.
29. Portmann S., Fluekiger P.F. URL: <http://www.cscs.ch/molekel/>
30. Березин К. В., Березин В. И., Курносов Н. А., Березин М. К. Учет межмолекулярного взаимодействия в рамках современных квантовомеханических методов расчета структуры и колебательных спектров многоатомных молекул // *Проблемы оптической физики и биофотоники : материалы 12-й Международ. Молодежной науч. школы по оптике, лазерной физике и биофотонике.* Саратов : Новый ветер, 2009. С. 181–188.





УДК 6:539.2-022.532

## THE INFLUENCE OF MORPHOLOGY, CONDITIONS OF PRODUCTION AND EXTERNAL EFFECTS ON NANOPARTICLES' (IN TERMS OF IRON) DIELECTRIC PROPERTIES

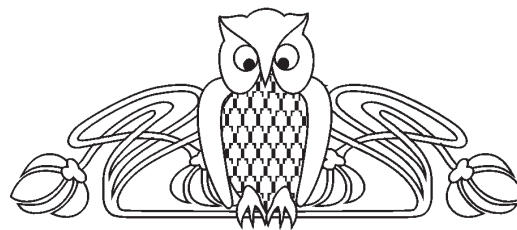
D. I. Bilenko<sup>1</sup>, D. V. Terin<sup>1</sup>, O. Tozkoparan<sup>2</sup>, O. Yildirim<sup>2</sup>, V. V. Galushka<sup>1</sup>, I. Dincer<sup>2</sup>, E. K. Dobrinskii<sup>3</sup>, Y. Elerman<sup>2</sup>, S. B. Venig<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saratov State University, Russia

<sup>2</sup>Ankara University, Turkey

<sup>3</sup>State Research Institute for Chemistry and Technology of Organoelement Compounds, Saratov, Russia

E-mail: lab32@mail.ru



It was shown that the complex research of iron nanoparticles properties by different methods, supplemented each other, permit to receive the data about the interior sizes of nanoparticles, a number of physical properties of particles, their dependence on frequency and changes produced by various influences. It was found that the conductivity of nanoparticles changed under the square dependence  $\sigma = \sigma_0 \omega_2$ .

**Key words:** nanoparticles, core-shell parameters, iron nanoparticles properties, real and imaginary dielectric permittivity and conductivity, SEM, EDX.

**Влияние морфологии, условий получения и внешних воздействий на диэлектрические свойства наночастиц на основе железа**

Д. И. Биленко<sup>1</sup>, Д. В. Терин<sup>1</sup>, О. Тозкопаран<sup>2</sup>, О. Йлдырым<sup>3</sup>, В. В. Галушка<sup>1</sup>, И. Динкер<sup>2</sup>, Э. К. Добринский<sup>3</sup>, Я. Элерман<sup>2</sup>, С. Б. Вениг<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный университет

<sup>2</sup>Анкарский университет, Турция

<sup>3</sup>Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений, Саратов

E-mail: lab32@mail.ru

Комплексное исследование свойств наночастиц железа различными дополняющими друг друга методами позволило получить данные о внутренних размерах, диэлектрических и физических свойствах наночастиц и их зависимости от частоты и изменений, производимых с помощью различных воздействий. Обнаружено, что проводимость наночастиц железа имеет квадратичную частотную зависимость –  $\sigma = \sigma_0 \omega_2$ .

**Ключевые слова:** наночастицы, параметры ядро-оболочка, свойства наночастиц на основе железа, действительные и мнимые части диэлектрической проницаемости и проводимости, сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионный анализ.

### 1. Introduction

In recent years research of different production methods of nanomaterials and investigation of their properties causes a great interest [1, 2]. Thanks to

specific properties of superdispersed powders such as significant contribution of surface properties, internal stress, peculiar magnetic characteristics, appearing due to similar structure; size factor, defining a higher level of extra energy; high catalyst properties – those materials can find a great amount of potential application in metal manufacture, electronics, biological, chemical and pharmaceutical industries [3–12].

The gap between the opportunities of creating objects and the abilities of getting knowledge about their properties and data of nanoparticles is widening. This gap is becoming an inhibitive factor in nanostructure research and more over in their practical application. To our opinion we should mention some specific applications that characterize the breadth and range of this problem.

To reach electromagnetic compatibility in aircraft special materials absorbing electromagnetic radiation are used; and one of extenders used in absorbers is superdispersed and powder carbonyl iron [3]. Magnetopolymer composition of micro- or/ and nanosize, distributed in highly elastic polymeric matrix, having the ability to deform to hundreds percent under the action of external magnetic field are widely used [4].

Wide-range research showed high efficiency of iron nanopowders application in plant cultivation, animal husbandry, poultry farming, fishery and in feeding stuff [5]. It is stated that application of aqueous suspension on the basis of nano crystal iron promotes the immunological index adjustment of animals infected with a virus just a like the man's T-cell leukemia. Stimulating effect is obvious in seeds germinability [6, 7]. Great interest is arising out of developing and perfecting the



methods of magnetic nanoparticles (in the terms of iron) production. They might serve as target drug carrier in chemotherapy [8]. Not less important seems the problem of predicting and evaluating of the future probable influence of new materials on a man's health and the environment, so the task is to develop new appropriate security standards. Nanoparticles can penetrate unchangeable through blood-brain barrier and cumulate in organs and tissues, toxicity of nanoparticles is defined by their shape and size [9].

The problem of nanoparticles' diagnosis is in their instability, high reactivity and internal inhomogeneity. Nowadays there is no common method or complex of methods in scientific literature for multiparametric investigation, calibration and classification of nanoparticles.

The problem of identification the form, structure, size and the character of size distribution, structure and inner properties of nanoparticles and also their static and dynamic, electric and magnetic properties is thought to be fundamental. The solution of those tasks is determined by the field of superdispersed powders application.

One of the informative ways getting these data is the research of frequency dependences of complex dielectric and magnetic permeability, which are the basis to multivariate multiparametric investigation of nanoparticles. Those investigations are necessary to establish the correlation between their properties and the effectiveness of application in different fields. The aim of this work is a complex research of iron nanoparticles properties.

## 2. Samples and production methods

Some dozens methods of NP production are known nowadays. There are three kinds of methods that are of great interest from technological point of view. They are mechanical method, chemical and plasma ones. To get the investigated materials we used the reactor 25 kW. Plasma reactor is the electroarc evaporator-condenser with stabilized plasma flow. Gas system permitted to delete moisture and oxygen, imported with the stuff and when the apparatus was opened, from technological gas. The system was hermetically assembled and vacuumized up to residual pressure 0.05 kg/cm<sup>2</sup> and filled in with inert gas—argon up to pressure 1.2 kg/sm<sup>2</sup>. Electric arc was burned up between the electrodes of reactor and under the influence of stabilizing (vortical) technological stream it localized in the centre of the

reactor. The stuff of the powder had physicochemical composition: carbon 0.6–0.8; nitrogen 0.5–0.8; oxygen 0.8–1.2; iron 98.10–97.20 (fraction of total mass, %).

The average diameter of spherical stuff particles was 2.2 μm. The delivery of raw material was performed with pneumotransport method. The produced aerosol proceeded into the electric arc zone and the particles are exposed by 5000–6000 K plasma discharge. Gas-vapor stream with evaporated material were mixed with hardening and stabilizing gas on the output from the reactionary zone and was cooled up to temperature 50–60 °C. Then separation of large-scale fraction from nanopowder was done. The nanopowder collected on the filter was put into the storage filled in with inert gas. This method permits to produce powders of narrow fractional composition. Large surface of material contact with plasma increases the effectiveness and rises the process efficiency. Specific surface area of produced iron nanopowder was determined by the method of nitrogen thermal desorption.

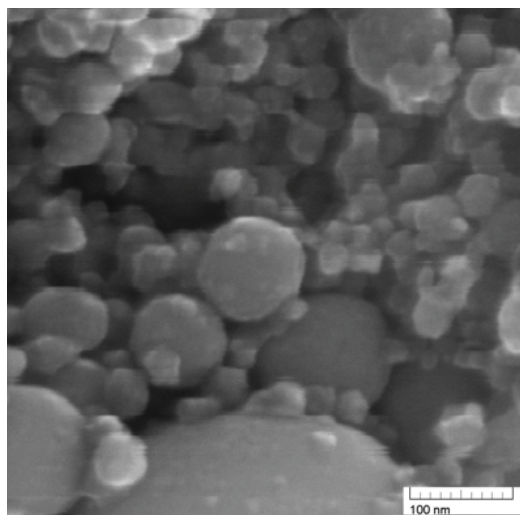
## 3. Scanning electron microscopy (SEM)

To investigate the morphology characteristics with the help of scanning electron microscopy the samples were subjected to preliminary preparation. SEM images were got just by simply pilling the powder or by monitoring the pressed pills. Material consumption for one pill 3 mm diameter was from 40 to 200 μgm. The pressure of forming pills varied from 500 to 600 MPa but it didn't exceed 700 MPa. After that the pill was kept in the press for 30–50 min. We have got series of typical SEM images containing somewhere about 500–1200 spherical particles, represented on Fig. 1. Analyzing SEM images we have got differential distribution curves of nanoparticle sizes. Apart from distribution diagrams polydispersion systems could be described with the following parameters: number-average diameter  $\bar{D}_n$ , surface-average diameter  $\bar{D}_s$ , volume-average diameter  $\bar{D}_v$  and polydispersion coefficient  $K$

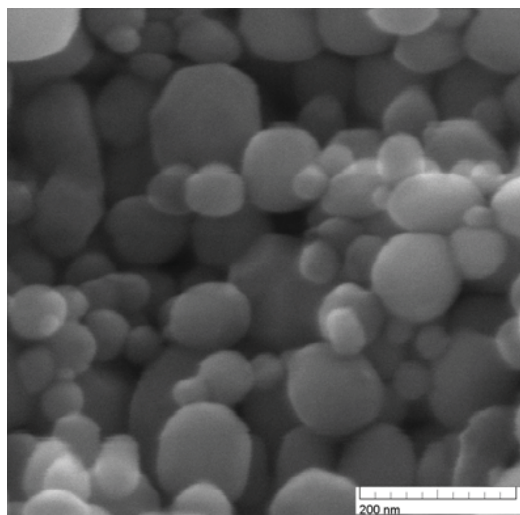
$$\bar{D}_n = \frac{\sum D_i n_i}{\sum n_i}, \bar{D}_s = \frac{\sum n_i D_i^3}{\sum n_i D_i^2}, \quad (1)$$

$$\bar{D}_v = \left( \frac{\sum n_i D_i^6}{\sum n_i D_i^3} \right)^{1/3}, K = \bar{D}_n / \bar{D}_v,$$

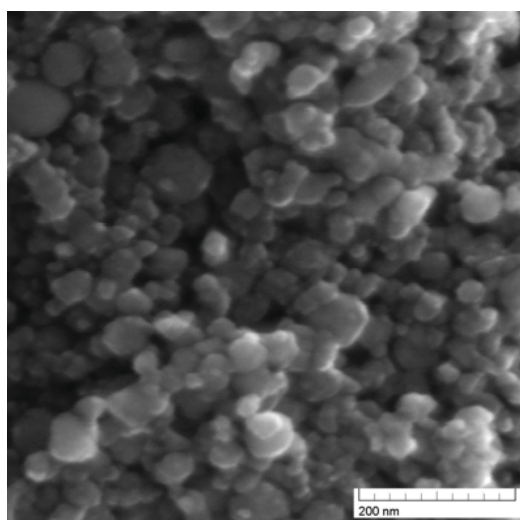
where  $n_i$  – the number of globule fractions with average diameter. The results are represented in Table 1.



a



b



c

Fig. 1. SEM images of nanopowders SSA=15 m<sup>2</sup>/gm (a), SSA =15.3 m<sup>2</sup>/gm (b), SSA=100 m<sup>2</sup>/gm (c)

Table 1

Calculation results

Parameters	Specific surface area SSA, m <sup>2</sup> /gm		
	15	15.3	100
SEM number-average diameter $D_n$ , nm	41.1	95.3	35.8
SEM surface-average diameter $D_S$ , nm	45.3	111.2	40.0
SEM volume-average diameter $D_V$ , nm	56.2	144.5	43.7
K	0.7	0.7	0.8
$N_{Fe} / N_O$	6.14	10.49	7.14
ECM $d$ , nm	26.95	76.72	24.90
PDM $d$ , nm	27	73.61	24
ECM $l$ , nm	7.03	9.29	5.43
PDM $l$ , nm	7	10.84	5.9

4. Elemental composition-based method (ECM) of determining core-shell parameters

Nanoparticles (NP) can be indicated by a great number of different parameters and the most significant among them is their core-shell structure. Recently, a considerable interest has been drawn to the creation of methods that could provide the ability of reliable and nondestructive detection of the topology of NP [13]. Particularly, the identification of the shell thickness  $l$  and core diameter  $d$  are of interest. However, they are difficulty determined by the fact that the models of NP are a priori unknown and, moreover, their properties can differ from the properties of a solid material. That is why it seems reasonable to use several independent methods which will permit to confirm the applicability of the proposed model, to check if the findings are reliable and to obtain more specific data in case of need. So this study presents a determination of the oxide layer thickness and the diameter of the core in core-shell iron NP using three independent methods. The first of them is based on elemental composition of NP, the second one relies on NP density and the last is grounded on frequency impedometry.

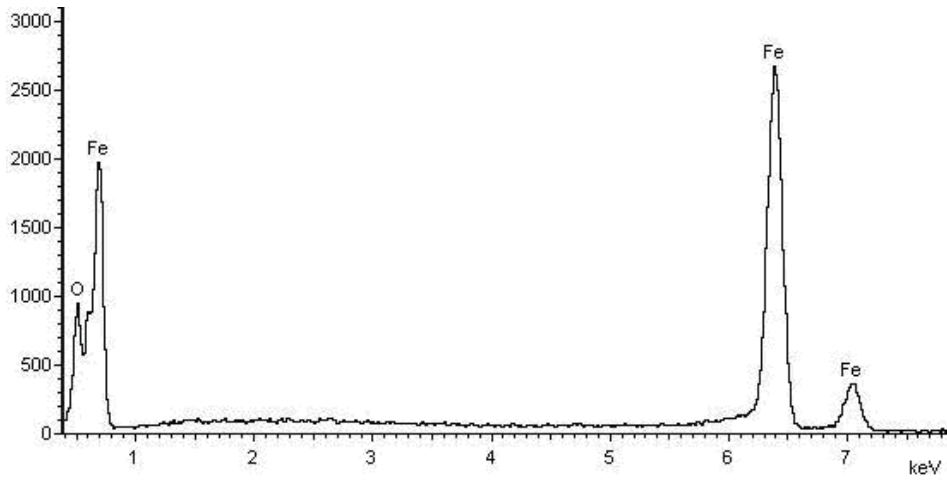
In the majority of possible cases when the shell is generated due to the oxidation process the usage of EDX analysis data (Fig. 2) permit to find a concentration ratio  $N_{Fe} / N_O$  (for instance, for the iron NP):

$$d = D \left( A \frac{N_{Fe}}{N_O} - C \right)^{1/3} \left( A \frac{N_{Fe}}{N_O} + B - C \right)^{-1/3}, \quad (2)$$

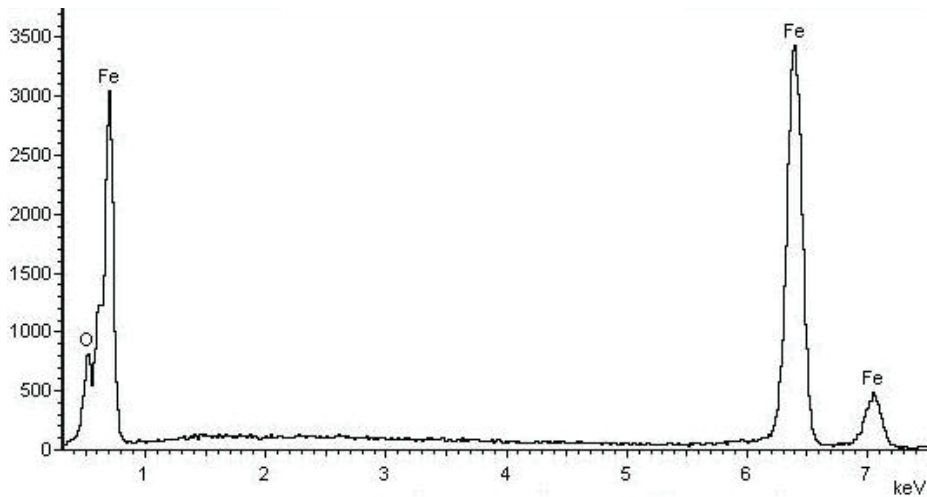


where  $d$  is diameter of the core;  $D$  is external diameter of the shell or diameter of nanoparticle;  $N_{\text{Fe}}, N_{\text{O}}$  are concentrations iron and oxygen in nanoparticle,

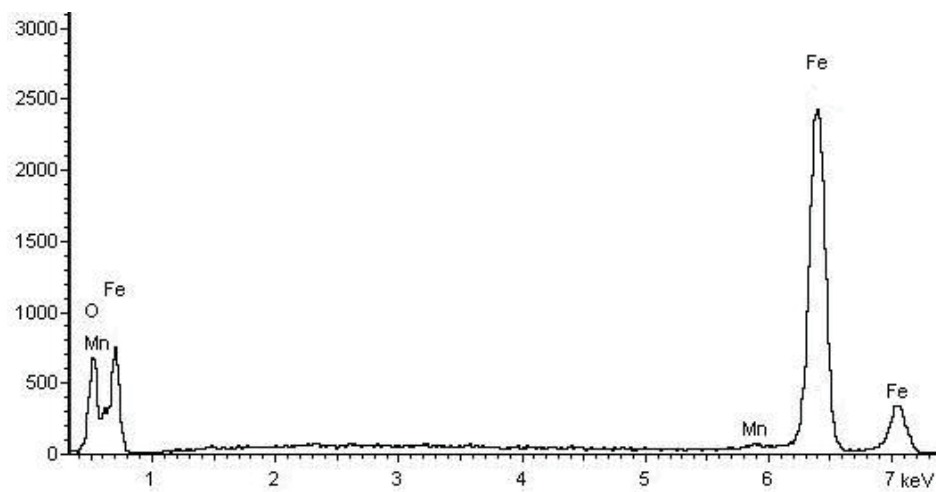
$M_{\text{Fe}}, M_{\text{O}}, M_{\text{FeOx}}$  are molecular weights Fe, O, FeO;  $\rho_{\text{Fe}}, \rho_{\text{FeO}}$  are densities Fe, FeO. Diameter of nanoparticle  $D$  is number-average diameter  $\bar{D}_n$  from SEM.



a



b



c

Fig. 2. EDX results of nanopowders:  $\tilde{SSA} = 15 \text{ m}^2/\text{gm}$  (a),  $SSA = 15.3 \text{ m}^2/\text{gm}$  (b),  $SSA = 100 \text{ m}^2/\text{gm}$  (c)





### 5. Particle density-based method (pdm) of determining core-shell parameters

A single particle density is connected with the values of its sizes by means of the following correlation:

$$\rho_{NP} = \frac{\rho_1 d^3 + \rho_2 (D^3 - d^3)}{d^3 + (D^3 - d^3)}, \quad (3)$$

where  $\rho_1$  and  $\rho_2$  are the core and the shell densities, respectively. Connecting experimental density  $\rho_e$  with referred  $\rho$ , we have got the expression for the core diameter  $d$ :

$$d = D \left( \frac{\rho_{NP} - \rho_2}{\rho_1 - \rho_2} \right), \quad (4)$$

then thickness of the shell is  $l = (D - d) / 2$ .

Iron powder samples were investigated using scanning electron microscope (SEM). After respective calculations it was found that the shell thickness  $l$  founded with ECM virtually coincide with PDM thickness (Table 1). Calculating error amounts to 1.25 nm, which confirms the validity of the proposed methods.

### 6. Frequency impedometry method

For the realization of this method the formula for the effective permittivity obtained in [14] was applied:

$$p\alpha \frac{\varepsilon_2(3\varepsilon_1 + (\alpha - 1)(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2)) - \varepsilon_{eff}(3\varepsilon_2 + (\alpha - 1)(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2))}{2\varepsilon_{eff}((\alpha - 1)\varepsilon_1 + 2(\alpha + 1)\varepsilon_2) + \varepsilon_2((\alpha + 2)\varepsilon_1 + 2(\alpha - 1)\varepsilon_2)} + (1 - p\alpha) \frac{\varepsilon_g - \varepsilon_{eff}}{\varepsilon_g + 2\varepsilon_{eff}} = 0, \quad (5)$$

where  $\alpha = D^3 d^{-3}$ ,  $\varepsilon_1$  is the effective permittivity of metallic core,  $\varepsilon_2$  is the effective permittivity of the shell,  $\varepsilon_{eff}$  is the permittivity of composite medium,  $p$  is the volume fraction of metal in the effective medium,  $\varepsilon_g$  is the permittivity of paraffin. In our experiment the iron spherical core-shell particles were randomly distributed in a dielectric matrix – paraffin. Firstly, 10% and then 20% of composite was located between two glass slices covered with the conductive layer of InxSnyOz. This set up was fulfills the role of the capacitor.

We investigated frequency dependence of dielectric loss tangent and capacity of composite medium on the precision analyzer components WK 6440B (frequency range 20 Hz – 3 MHz). Special shielded container was used to reduce electromagnetic distortions. Dielectric loss tangent and capacity error was not less than 0.2%. We determined fre-

quency dependences of real and imaginary dielectric permittivity and conductivity on the base of  $C(\omega)$  and  $tg\delta(\omega)$  frequency dependences of investigated composites ( $C = \varepsilon' \varepsilon_0 S / h$ ,  $tg\delta = \varepsilon'' / \varepsilon'$ , where  $\varepsilon'$  is a real part complex dielectric permittivity of nanocomposite;  $\varepsilon_0$  – permittivity of vacuum,  $S$  is sample's area,  $h$  is the thickness of nanocomposite layer,  $\varepsilon''$  is an imaginary part complex dielectric permittivity of nanocomposite).

A special computer program was designed for solving the direct problem – to permit modeling of  $\varepsilon'$  and  $\varepsilon''$  frequency dependences subjected to the quantity of frequency dependences of NP conductivity, core-shell parameters, their volume fraction in composite and the properties of matrix material. As a result of modeling it was determined that real and imaginary parts of the complex permittivity of composite media depend on the shell thickness. For instance, the variation of the thickness within 0,5 and 4 nm produces changes of the real part from 100 to 20 (Fig. 3). The dependences of  $\varepsilon'$  and  $\varepsilon''$  on  $z$  and on  $l$  are essentially different over a various range of values  $z$ . Such relations make it possible to determine the parameters of NP as their thickness  $l$ , conductivity  $\sigma$  and its frequency dependence (Fig. 4).

Experimentally obtained frequency dependences of complex dielectric permeability components were the basis for solving the inverse problem - definition of NP properties. The parameters of NP were processed with a specially created computer program. NP frequency dependence conductivity was assigned as  $\sigma = \sigma_0 \omega^n$ . Sought quantities  $\sigma_0$ ,  $n$  и  $l$  were varied up to the best coincidence between rated and experimental dependences  $\varepsilon(\omega)$ .

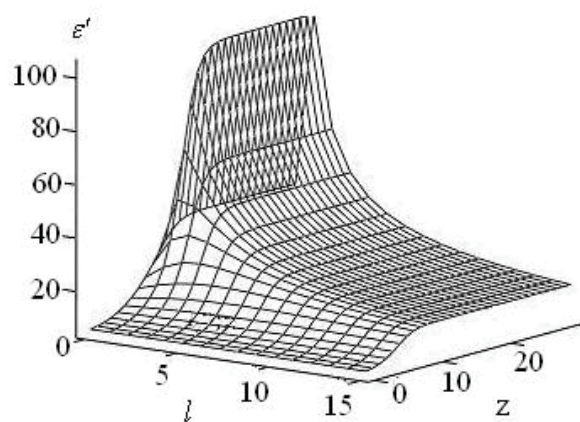


Fig. 3. The dependence of  $\varepsilon'$  from the shell thickness  $l$  (nm) and  $z$  ( $z = \sigma/\omega$ )

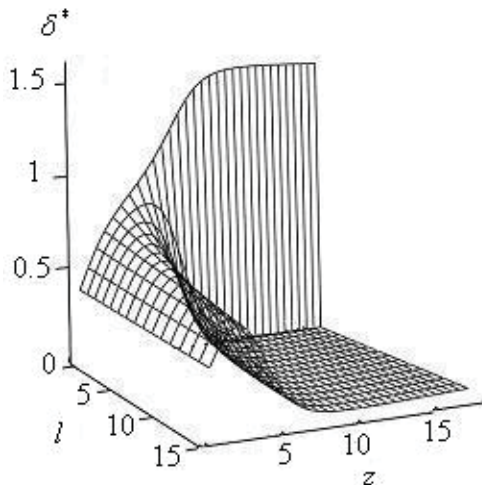


Fig. 4. The dependence of  $\delta^* = \arctg(\epsilon''/\epsilon')$  from the shell thickness  $l$  (nm) and  $z$  ( $z = \sigma/\omega$ )

The approximating line was drawn and the slope of this line  $n$  was determined (Table 2) to on the base plot of the conductivity-frequency of NP. We investigated composites with various volume fraction of nanoparticles –  $q$ . The coincidence of values  $\sigma_0$  and  $n$  of samples with various volume fraction  $q$  confirm the correctness of simulated results. The same value of  $n$  was predicted by [15].

Table 2

**Inverse problem solving results**

$q$	$n$	$\sigma_0, (\text{Om} \cdot \text{m})^{-1}$
0.1	1.99	$4.63 \cdot 10^{-18}$
0.2	2.16	$5.15 \cdot 10^{-19}$

It was found that the conductivity of NP changed under the following law  $\sigma = \sigma_0 \omega^2$ .

The methods suggested in the work supplement each other. The most informative is the method which permits to receive the data not only about the interior sizes of NP, but also about a number of physical properties of particles, their dependence on frequency and changes produced by various influences. Such the results can be obtained only by using the measurements of the impedance frequency dependences. More simple methods based on the elemental structure of NP and their density can serve for the data acquisition. These data facilitate appreciably the inverse solution of the multiparameter analysis based on the frequency dependence of complex permittivity.

**Conclusion**

The complex research of iron nanoparticles properties by ECM, SEM and PDM methods, supplemented each other, permit to receive the data about the interior sizes of NP, a number of physical properties of particles, their dependence on frequency and changes produced by various influences. It was found that the conductivity of NP changed under the square dependence  $\sim \omega^2$ .

*This work was performed as part of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation. Project №3468: Phase and structural modification of micro- and nanostructures by electromagnetic radiation of a wide range of energies. The registration number 114121550163.*

*Данная работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 3468: Фазовая и структурная модификация микро- и наноструктур электромагнитным излучением широкого диапазона энергий; номер регистрации в ЕГИСУ НИОКР 114121550163).*

**References**

1. Суздальев И. П. Многофункциональные наноматериалы // Успехи химии. 2009. Т. 78, № 3. С. 266–301.
2. Третьяков Ю. Д., Гудилин Е. А. Основные направления фундаментальных и ориентированных исследований в области наноматериалов // Успехи химии. 2009. Т. 78, № 9. С. 867–887.
3. Колпаков Н. С., Семенов А. А., Шепелев А. А., Бочаров А. В., Девин К. Л. Влияние состава и структуры порошков Fe-Co на их магнитные характеристики в СВЧ-диапазоне // Перспективные материалы. 2010. № 1. С. 16–23.
4. Петров А. В., Сафронов А. П., Терзиян Т. В., Бекетов И. В., Кудреватых Н. В. Влияние межфазного взаимодействия магнитных частиц наполнителя и полимерной матрицы на магнитные и механические свойства магнитоэластов // Перспективные материалы. 2010. № 5. С. 63–73.
5. Коваленко Л. В., Фолманис Г. Э., Вавилов Н. С. Биологически активные нанопорошки железа // Перспективные материалы. 2005. № 2. С. 39–43.
6. Арсентьева И. П., Э. Л.Дзидзигури, Захаров Н. Д., Павлов Г. В., Ушаков Б. К., Фолманис Г. Э., Арсентьев А. А. Закономерности строения и биологической активности нанокристаллических порошков железа // Перспективные материалы. 2004. № 4. С. 64–67.
7. Староверов В. М., Апрашкин В. П., Чечелев А. И., Фолманис Г. Э. Перспективные органоминеральные композиции с наноразмерным железом для растениеводства // Перспективные материалы. 2008. № 6. С. 60–63.
8. Галанов А. И., Юрмазова Т. А., Митькина В. А, Савельева Г. Г., Яворовский Н. А., Лобанова Г. Л. Магнитные наночастицы, получаемые электроимпульсным



- методом, их физико-химические свойства и взаимодействие с доксорубицином и плазмой крови // Перспективные материалы. 2010. № 4. С. 49–55.
9. Глушкова А. В., Радлов А. С., Рембовский В. Р. Нанотехнологии и нанотоксикология – взгляд на проблему // Токсикологический вестник. 2007. № 6. С. 4–6.
  10. Морохов И. Д., Петрунин В. И., Трусов Л. И., Петрунин В. Ф. Структура и свойства малых металлических частиц // УФН. 1981. Т. 133, вып. 4. С. 653–692.
  11. Нагаев Э. Л. Малые металлические частицы // УФН. 1992. Т. 162, вып. 9. С. 49–124.
  12. Губин С. П., Кокшаров Ю. А., Хомутов Г. Б., Юрков Г. Ю. Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства // Успехи химии. 2004. Т. 74, № 6. С. 539–574.
  13. Martin J. E., Herzing A. A., Yan W., Li X., Koel B. E., Kieley C. J., Zhang W. Determination of the oxide layer thickness in core-shell zerovalent iron nanoparticles. *Langmuir*, 2008. Vol. 24, iss. 8. P. 4329–4334.
  14. Buchelnikov V. D., Louzguine-Luzgin D. V., Xie G., Li S., Yoshikawa N., Sato M., Anzulevich A. P., Bychkov I. V., Inoue A. Heating of metallic powders by microwaves: experiment and theory // *J. App. Phys.* 2008. Vol. 104. P. 113505-1–113505-10.
  15. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 624 с.

УДК 537.635; 537.622

## СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ И РЕЗОНАНСНЫЕ ЧАСТОТЫ СТРУКТУРЫ «МАГНИТНОЕ НАНОКОМПОЗИТНОЕ ПОКРЫТИЕ – МИКРОПОЛОСКОВАЯ ЛИНИЯ»

Д. В. Воронин, Е. Н. Бегинин

Саратовский государственный университет  
E-mail: denis.voronin@gmail.com

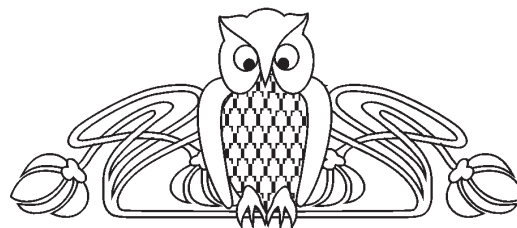
В работе проведены результаты исследования спектров поглощения СВЧ-мощности в структуре «магнитное нанокomпозитное покрытие – микрополосковая линия», содержащей наночастицы магнетита  $Fe_3O_4$ . По полученным спектрам поглощения определены характерные для структуры резонансные частоты, соответствующие максимуму поглощения СВЧ-мощности, и рассчитаны материальные параметры нанокomпозитного покрытия: эффективная намагниченность, объемная фракция и поле магнитной кристаллографической анизотропии магнитных наночастиц в покрытии. Полученные в работе результаты могут быть использованы при создании магнитных материалов, содержащих наноразмерные (порядка нескольких десятков нанометров) частицы магнетита, для приборов и устройств, работающих в СВЧ-диапазоне радиоволн.

**Ключевые слова:** наночастицы магнетита, магнитные нанокomпозитные покрытия, поглощение СВЧ, микрополосковая линия передачи.

### Microwave Absorption Spectra and Resonance Frequencies of a «Magnetic Nanocomposite Coating – Microstrip Line» Structure

D. V. Voronin, E. N. Beginin

This paper aims to look into microwave absorption spectra of «magnetic nanocomposite coating – microstrip line» structure, containing magnetite  $Fe_3O_4$  nanoparticles. The resulted spectra allowed to define the specific resonance frequencies of the structure under investigation and to figure out the material parameters of the nanocomposite coating, that are, an effective magnetization, a volume fraction of



magnetic nanoparticles in the coating as well as a magnetic crystalline anisotropy field. The results of this work may be used to design new magnetic materials containing magnetite nanoparticles for novel microwave devices with enhanced properties.

**Key words:** magnetite nanoparticles, magnetic nanocomposites, microwave absorption, microstrip line.

Магнитные нанокomпозитные структуры, представляющие собой дисперсные магнитные наноразмерные частицы, включенные в диэлектрические матрицы, являются перспективными средами для создания новых СВЧ-устройств [1, 2]. Высокочастотными свойствами таких материалов можно управлять в широких пределах, варьируя величину внешнего магнитного поля, геометрические размеры и материальные параметры покрытий (концентрация магнитных частиц, намагниченность, поле анизотропии) [3, 4]. Поэтому важной задачей является определение резонансных частот магнитных возбуждений и материальных параметров нанокomпозитных структур в СВЧ-диапазоне радиоволн. В данной работе приведены результаты исследования спектров поглощения СВЧ-мощности в структуре «магнитное нанокomпозитное покрытие – микрополосковая СВЧ-линия передачи» (МПЛ). Использование МПЛ дает преимущество по



сравнению с более распространенным методом ферромагнитного резонанса (ФМР) в СВЧ-резонаторе, поскольку позволяет проводить исследования в широком диапазоне частот и магнитных полей.

Магнитное нанокompозитное покрытие было получено на поверхности монокристаллической Si подложки (Silchem; 5×5 мм; [111]; p-тип, легирован бором;  $\rho = 20$  мОм/см) методом последовательной адсорбции из раствора [5] молекул полиэлектролита полиэтиленimina PEI (водный раствор с концентрацией 2 мг/мл) и наночастиц магнетита Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Sigma-Aldrich, стабилизированных олеиновой кислотой и диспергированных в гептане; концентрация 5.6 мг/мл,  $d \approx 30$  нм). Подробно методика получения покрытий описана в [6]. Для формирования нанокompозитного покрытия было проведено

20 циклов адсорбции наночастиц Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Подложка с полученным на ней образцом покрытия помещалась на МПЛ, которая располагалась между полюсами электромагнита так, чтобы внешнее поле  $H_0$  было ориентировано касательно к плоскости покрытия и параллельно МПЛ или нормально относительно плоскости подложки (рис. 1, а). В качестве источника СВЧ-сигнала использовался СВЧ-анализатор цепей Agilent PNA E8362C с диапазоном рабочих частот 10 МГц – 20 ГГц. Измеряемой величиной является частотная зависимость  $S_{21}(\omega)$  компоненты матрицы рассеяния структуры, устанавливающая связь между мощностью входного и выходного СВЧ-сигнала. Спектр поглощения определялся по амплитудно-частотной характеристике  $|S_{21}(\omega)|$  (АЧХ) структуры, перестраиваемой по частотному диапазону внешним магнитным полем  $H_0$ .

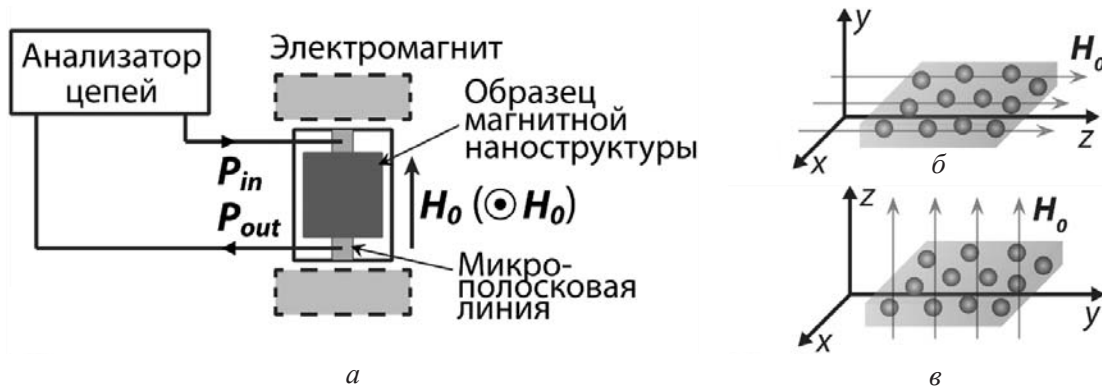


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и расположение образца при исследовании ферромагнитного резонанса в структуре «магнитное нанокompозитное покрытие – микрополосковая СВЧ-линия передачи» (а) и направление осей прямоугольной декартовой системы координат при касательном (б) и нормальном намагничивании нанокompозитного покрытия (в)

Динамика прецессии намагниченности  $\mathbf{M}$  в безграничной однородной ферромагнитной среде описывается уравнением Ландау – Лифшица с диссипативным членом в форме Гильберта (уравнение Ландау – Лифшица – Гильберта) [7]:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} + \frac{\alpha}{M} \cdot \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{H}_{eff}$  – эффективное внутренне магнитное поле, представляющее собой сумму внешнего постоянного магнитного поля  $\mathbf{H}_0$  (для безграничного ферромагнетика внешнее постоянное поле совпадает с внутренним), переменного магнитного поля  $\mathbf{h}(t)$  и полей анизотропии магнитного кристалла;  $\alpha$  – безразмерный параметр диссипации.

Для однородных ферромагнетиков, имеющих форму эллипсоида вращения и намагниченных до насыщения вдоль одной из осей, резонансная частота  $\omega_0$  прецессии намагниченности  $\mathbf{M}$  определяется формулой Киттеля [7]:

$$\omega_0 = \gamma \sqrt{[H_0 + (N_x - N_z) M_s] \times [H_0 + (N_y - N_z) M_s]}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение,  $M_s$  – намагниченность насыщения, а  $N_x$ ,  $N_y$  и  $N_z$  – компоненты тензора размагничивающих факторов  $\vec{N}$ , задающего связь внешнего магнитного поля  $\mathbf{H}_0$  с внутренним  $\mathbf{H}_{i0}$  в виде

$$\mathbf{H}_{i0} = \mathbf{H}_0 - \vec{N}\mathbf{M}.$$

Для нанокompозитных покрытий, состоящих из дискретных магнитных частиц, размагничивающие факторы определяются макроскопиче-





скими геометрическими параметрами покрытия в целом, геометрическими параметрами и объемной фракцией наночастиц, входящих в покрытие [8]. Для дискретных ферромагнетиков вводятся эффективные размагничивающие факторы [8]:

$$N = N_{NP}(1 - \varphi_{NP}) + N_G \varphi_{NP}, \quad (3)$$

где  $N_{NP}$  – размагничивающий фактор наночастицы,  $N_G$  – общий размагничивающий фактор, определяемый формой образца покрытия,  $\varphi_{NP}$  – объемная фракция наночастиц в покрытии.

В случае нанокompозитного покрытия в виде тонкого слоя, намагниченного касательно (рис. 1, б), входящие в выражение (3) величины  $N_{NP}$  и  $N_G$  принимают следующие значения: вдоль оси  $x$  и оси  $z$  –  $N_{NP} = \frac{4}{3}\pi$  (размагничивающий фактор сферической наночастицы) и  $N_G = 0$  (размагничивающий фактор тонкой пластины, намагниченной касательно, в плоскости приложения  $\mathbf{H}_0$ ); вдоль оси  $y$  –  $N_{NP} = \frac{4}{3}\pi$  и  $N_G = 4\pi$  (размагничивающий фактор тонкой пластины, намагниченной касательно, в плоскости, перпендикулярной плоскости приложения  $\mathbf{H}_0$ ). Тогда соответствующие компоненты тензора размагничивающих факторов  $\vec{N}$  согласно (3) можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} N_x &= \frac{4}{3}\pi(1 - \varphi_{NP}), \\ N_y &= \frac{4}{3}\pi(1 - \varphi_{NP}) + 4\pi\varphi_{NP}, \\ N_z &= \frac{4}{3}\pi(1 - \varphi_{NP}). \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя полученные значения компонентов  $\vec{N}$  в формулу Киттеля (2), получаем выражение для резонансной частоты ФМР исследуемых нанокompозитных покрытий, намагниченных касательно:

$$\omega_0 = \gamma \sqrt{H_{рез}(H_{рез} + 4\pi M_s \varphi_{NP})}. \quad (5)$$

В случае, когда внешнее магнитное поле  $\mathbf{H}_0$  направлено нормально к плоскости исследуемого образца (рис. 1, в), компоненты тензора размагничивающих факторов  $\vec{N}$  можно определить аналогично (4) согласно выражению (3) как

$$\begin{aligned} N_x &= \frac{4}{3}\pi(1 - \varphi_{NP}), \\ N_y &= \frac{4}{3}\pi(1 - \varphi_{NP}), \\ N_z &= \frac{4}{3}\pi(1 - \varphi_{NP}) + 4\pi\varphi_{NP}. \end{aligned} \quad (6)$$

Подставляя полученные компоненты  $\vec{N}$  (6) в формулу Киттеля (2), получаем выражение для резонансной частоты ФМР исследуемых нанокompозитных покрытий, намагниченных нормально:

$$\omega_0 = \gamma (H_{рез} - 4\pi M_s \varphi_{NP}). \quad (7)$$

Выражения (5) и (7) устанавливают связь между резонансной частотой  $\omega_0$ , величиной резонансного магнитного поля  $H_{рез}$  и материальными параметрами покрытий ( $M_s$  и  $\varphi_{NP}$ ). Величина поля  $H_{рез}$  может отличаться от величины внешнего магнитного поля, в частности, из-за влияния полей магнитной кристаллографической анизотропии наночастиц. Магнетит характеризуется кубической магнитной кристаллографической анизотропией [9, 10]. В общем случае для неструктурированных композитных покрытий, каждая наночастица имеет различную ориентацию кристаллической решетки относительно направления внешнего магнитного поля и, как следствие, различную величину поля кристаллографической анизотропии. Однако, как было показано в [7, 11], различную ориентацию частиц можно учесть путем введения поправки к резонансному внешнему полю  $H_0$ :

$$(\delta H)_a = \frac{1}{2} \cdot \frac{K_1}{M_s}, \quad (8)$$

где  $K_1$  – константа кристаллографической анизотропии (для магнетита  $K_1 = -1.3 \cdot 10^5$  эрг/см<sup>3</sup> [9, 12]). Учет анизотропии приводит к смещению резонансных частот в область более низких магнитных полей на величину (8), т.е. в выражениях (5) и (7) резонансное магнитное поле определяется величиной  $H_{рез} = H_0 + (\delta H)_a$ , а сами выражения окончательно принимают вид:

$$\omega_0 = \gamma \sqrt{[H_0 + (\delta H)_a][H_0 + (\delta H)_a + 4\pi M_s \varphi_{NP}]}, \quad (9)$$

$$\omega_0 = \gamma (H_0 + (\delta H)_a - 4\pi M_s \varphi_{NP}). \quad (10)$$

Входящая в выражения (9) и (10) величина  $M_s \varphi_{NP} = M_{eff}$  представляет собой эффективную намагниченность нанокompозитного покрытия, определяемую объемной фракцией магнитных наночастиц в покрытии  $\varphi_{NP}$ .

На рис. 2 приведен характерный вид АЧХ структуры «нанокompозитное покрытие – МПЛ» при касательном (рис. 2, а) и нормальном (рис. 2, б) намагничивании, полученном при различных значениях внешнего поля  $H_0$ . Из приведенных данных видно, что провал на АЧХ, соответствующий поглощению структурой



СВЧ-мощности, перестраивается в зависимости от величины внешнего магнитного поля. Полученные спектры позволяют оценить величину поглощения нанокompозитного покрытия на единицу длины микрополосковой линии исходя из геометрических размеров исследуемых образцов. При касательном намагничивании величина поглощения составляет 2 дБ/см, в то

время как при нормальном намагничивании – порядка 1 дБ/см. Такой характер поглощения нанокompозитным покрытием СВЧ-мощности обусловлен тем, что при касательном намагничивании компоненты переменного магнитного СВЧ-поля более эффективно связываются с компонентами переменной намагнитченности покрытия.

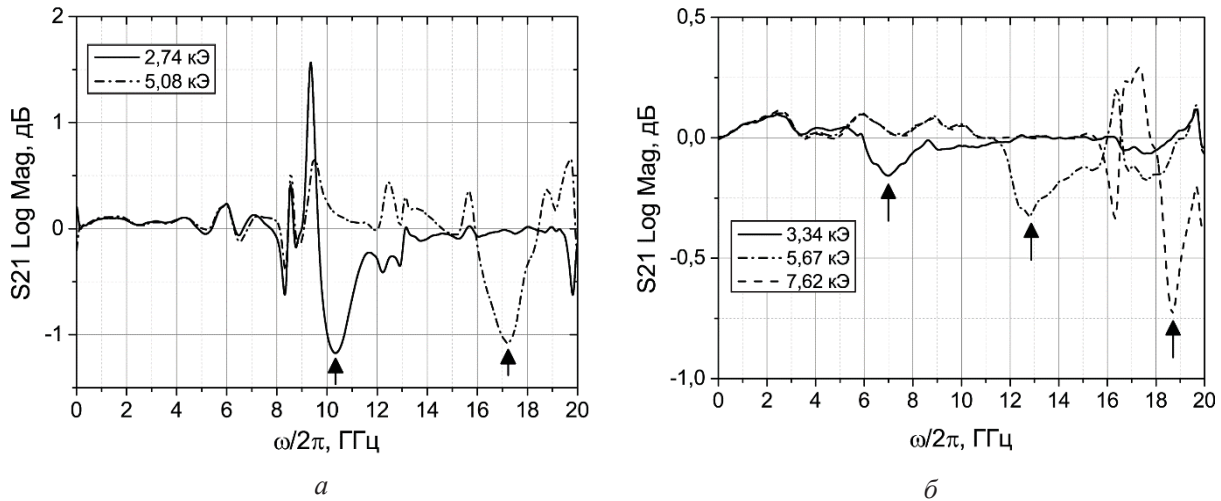


Рис. 2. Характерный вид АЧХ структуры «нанокompозитное покрытие – МПЛ» при касательном (параллельно МПЛ) (а) и нормальном (б) намагничивании образца, полученном при различных величинах внешнего магнитного поля  $H_0$ . Стрелками указано положение максимума спектра поглощения при данной величине поля  $H_0$

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости положения частотного максимума спектра поглощения от внешнего магнитного поля  $H_0$  для исследуемого образца нанокompозитного покрытия, которые с хорошей точностью аппроксимируются теоретическими кривыми, полученными согласно выражениям для резонансной частоты ФМР (9) и (10) с учетом эффективных размагничивающих факторов композитной среды (4) и (6).

Подставляя в выражения (9) и (10) полученные экспериментально значения  $\omega_0$  и  $H_0$  и решая полученную систему из двух уравнений, можно оценить эффективную намагнитченность композитного покрытия  $M_{eff}$  и вклад  $(\delta H)_a$ , который дает внутреннее поле магнитной кристаллографической анизотропии. Расчет проводился только с учетом результатов, полученных при величинах  $H_0 > 3$  кЭ в случае касательного намагничивания и  $H_0 > 5$  кЭ в случае нормального намагничивания, так как при данных величинах магнитных полей образец намагнитчен до насыщения.

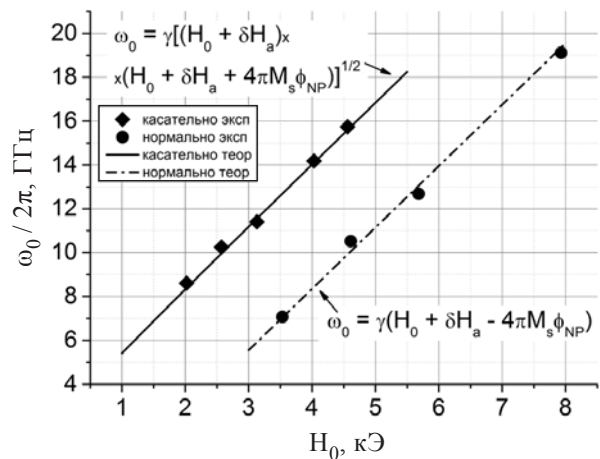


Рис. 3. Зависимость положения частотного максимума  $\omega_0$  спектра поглощения структуры «нанокompозитное покрытие – МПЛ» от внешнего магнитного поля  $H_0$ . Символы (◆) и (●) обозначают экспериментальные точки, полученные при касательном и нормальном намагничивании образца соответственно. Линии (—) и (---) показывают ход соответствующих теоретических зависимостей  $\omega_0(H_0)$

Для исследуемого нанокompозитного покрытия рассчитанные значения эффективной



намагниченности и добавки, учитывающей влияние поля кристаллографической анизотропии, составили  $M_{eff} \approx 100$  Гс и  $(\delta H)_a \approx 0,32$  кЭ соответственно. Экспериментально полученное значение добавки к внешнему магнитному полю превышает величину  $(\delta H)_a \approx 0,135$  кЭ, определенную согласно выражению (8) с использованием константы кубической анизотропии для объемного магнетита  $K_1 = -1.3 \cdot 10^5$  эрг/см<sup>3</sup>. Данный факт объясняется возрастанием вклада поверхностных типов магнитной анизотропии в общую энергию наноразмерных частиц в магнитном поле. Известно, что магнитные поля, обусловленные поверхностными типами анизотропии, могут иметь величину, сравнимую с полем объемной кубической анизотропии [13–15], что оказывает существенное влияние на вид спектра поглощения СВЧ-мощности (сдвигает максимум в сторону более высоких частот).

По полученному значению эффективной намагниченности была рассчитана объемная фракция наночастиц Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> в нанокompозитном покрытии  $\varphi_{NP} \approx 0.25$ . Полученные значения  $\varphi_{NP}$  соответствуют величине объемной фракции наночастиц, рассчитанной для аналогичных нанокompозитных покрытий на основе наночастиц Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, сформированных методом последовательной адсорбции из раствора [16].

В работе показано, что зависимость положения частотного максимума спектра поглощения СВЧ-мощности структуры «нанокompозитное покрытие – МПЛ» от внешнего магнитного поля в широком диапазоне частот (7–19 ГГц) и магнитных полей (2–8 кЭ) с хорошей точностью определяется формулой Киттеля с учетом эффективных размагничивающих факторов композитной среды. По полученным спектрам поглощения определены материальные параметры нанокompозитных покрытий: эффективная намагниченность  $M_{eff} \approx 100$  Гс, объемная фракция магнитных наночастиц в покрытии  $\varphi_{NP} \approx 0.25$  и вклад поля магнитной кристаллографической анизотропии  $(\delta H)_a = 0.32$  кЭ. Полученное значение добавки, обуславливающей влияние поля магнитной анизотропии используемых в работе наночастиц размером 30 нм, больше, чем для объемного магнетита, что обусловлено вкладом поверхностных типов анизотропии. По АЧХ структуры «нанокompозитное покрытие – МПЛ» определена величина поглощения композитного покрытия на единицу длины МПЛ, которая со-

ставляла 2 дБ/см при касательном намагничивании и 1 дБ/см при нормальном. Полученные в работе результаты могут быть использованы при создании магнитных материалов, содержащих наноразмерные (порядка нескольких десятков нанометров) частицы магнетита, для приборов и устройств, работающих в СВЧ-диапазоне радиоволн.

Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией магнитоэлектроники СВЧ Саратовского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН» Ю. В. Хивинцеву за предоставленный макет микрополосковой СВЧ-линии передачи.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации в рамках гранта для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования, научных учреждениях государственных академий наук и государственных научных центрах Российской Федерации (грант № 14.Z50.31.0004).*

#### Список литературы

1. Valenzuela R., Alvarez G., Mata-Zamora M. E. Microwave Properties of Ferromagnetic Nanostructures // J. of Nanosci. Nanotechnol. 2008. Vol. 8, № 6. P. 2827–2835.
2. Mathúna C. Ó., Ningning W., Kulkarni S., Roy S. Review of Integrated Magnetics for Power Supply on Chip (PwrSoC) // Power Electronics, IEEE Trans. on. 2012. Vol. 27, № 11. P. 4799–4816.
3. Ramprasad R., Zurcher P., Petras M., Miller M., Renaud P. Magnetic properties of metallic ferromagnetic nanoparticle composites // J. Appl. Phys. 2004. Vol. 96, № 1. P. 519–529.
4. Apesteguy J. C., Damiani A., Digiovanni D., Jacobo S. E. Microwave absorption behavior of a polyaniline magnetic composite in the X-band // Physica B : Condensed Matter. 2012. Vol. 407, № 16. P. 3168–3171.
5. Decher G. Fuzzy Nanoassemblies : Toward Layered Polymeric Multicomposites // Science. 1997. Vol. 277, № 5330. P. 1232–1237.
6. Voronin D. V., Borisova D., Belova V., Gorin D. A., Shchukin D. G. Effect of Surface Functionalization of Metal Wire on Electrophysical Properties of Inductive Elements // Langmuir. 2012. Vol. 28, № 33. P. 12275–12281.
7. Гуревич А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М. : Наука, 1973. 592 с.



8. Skomski R., Hadjipanayis G. C., Sellmyer D. J. Effective Demagnetizing Factors of Complicated Particle Mixtures // IEEE Trans. Magn. 2007. Vol. 43, № 6. P. 2956–2958.
9. Sakuma H., Sato S., Gomimoto R., Hiyama S., Ishii K. Growth of magnetite epitaxial thin films by gas flow sputtering and characterization by FMR // IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering. 2007. Vol. 2, № 4. P. 431–435.
10. Charilaou M., Winklhofer M., Gehring A. U. Simulation of ferromagnetic resonance spectra of linear chains of magnetite nanocrystals // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 109, № 9. P. 093903-6.
11. Гуревич А. Г., Мелков Г. А. Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994. 464 с.
12. Guskos N., Anagnostakis E. A., Likodimos V., Bodziony T., Typek J., Maryniak M., Narkiewicz U., Kucharewicz I., Waplak S. Ferromagnetic resonance and AC conductivity of a polymer composite of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Fe<sub>3</sub>C nanoparticles dispersed in a graphite matrix // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 97, № 2. P. 024304-6.
13. Найден Е. П., Итин В. И., Магаева А. А., Терехова О. Г. Влияние старения на фазовый состав, структуру и магнитные свойства наноразмерных порошков оксидных ферритмагнетиков // ФТТ. 2009. Vol. 51, № 8. С. 1576–1579.
14. Shilov V. P., Bacri J.-C., Gazeau F., Gendron F., Perzynski R., Raikher Y. L. Ferromagnetic resonance in ferrite nanoparticles with uniaxial surface anisotropy // J. Appl. Phys. 1999. Vol. 85, № 9. P. 6642–6647.
15. Shilov V. P., Raikher Y. L., Bacri J. C., Gazeau F., Perzynski R. Effect of unidirectional anisotropy on the ferromagnetic resonance in ferrite nanoparticles // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 60, № 17. P. 11902–11905.
16. Grigoriev D., Gorin D., Sukhorukov G. B., Yashchenok A., Maltseva E., Möhwald H. Polyelectrolyte/magnetite Nanoparticle Multilayers: Preparation and Structure Characterization // Langmuir. 2007. Vol. 23, № 24. P. 12388–12396.

УДК 544.7

## ИЗМЕНЕНИЕ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК В ПРОЦЕССЕ СИЛАНИЗАЦИИ

В. В. Гофтман, А. М. Вострикова, И. Ю. Горячева

Саратовский государственный университет  
E-mail: goftman@bk.ru

Квантовые точки (КТ) – наночастицы полупроводников – обладают уникальными оптическими свойствами, которые позволяют их применять в самых разнообразных областях науки и техники. В том числе для биоприменения необходимо, чтобы КТ были устойчивы в водных средах. Один из подходов у гидрофиллизации – замена исходных лигандов на молекулы органосиланов – рассмотрен в данной статье. Изучено влияние скорости замены лигандов на флуоресцентные свойства КТ.

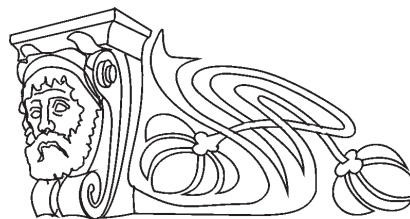
**Ключевые слова:** квантовые точки, замена лигандов, органосиланы, силанизация.

### Fluorescent Properties of Quantum Dots During Silanization Process

V. V. Gofman, A. M. Vostrikova, I. Yu. Goryachva

Quantum dots (QDs) are fluorescent semiconductor nanoparticles with unique optical properties. For bioapplication QDs have to be water-soluble. Here we describe one of common hydrophilization approaches – ligand exchange on silica precursors molecules and investigate fluorescent properties during this process.

**Key words:** quantum dots, ligand exchange, organosilanes, silanization.



Квантовые точки (КТ) – полупроводниковые нанокристаллы, обладающие уникальными оптическими свойствами, которые позволяют использовать их в различных областях промышленности. Например, уже существуют дисплеи (QD LED), работающие на квантовых точках, а также лазеры, солнечные батареи и светодиодные лампы, в которых уникальность свойств КТ находит свое применение.

Классическим методом получения качественных флуоресцентных КТ с узким распределением по размерам является высокотемпературный коллоидный синтез в высококипящем органическом растворителе в инертной атмосфере. Полученные таким методом частицы гидрофобны, и в таком виде их можно использовать непосредственно в вышеуказанных областях.

Одной из наиболее развивающихся областей применения нанотехнологий в целом является диагностика всевозможных заболеваний, а также контроль и доставка лекарственных средств.





Однако для биоприменения КТ необходимыми условиями по понятным причинам являются их высокая яркость и коллоидная стабильность КТ именно в водных буферных растворах, а также наличие на поверхности функциональных групп, доступных для связывания с биологическими молекулами [1, 2].

Для придания КТ гидрофильных свойств существует два подхода, один из которых подразумевает замену исходных стабилизирующих гидрофобных лигандов на гидрофильные, а другой – покрытие исходных лигандов амфифильными молекулами.

Вариантом метода замены лигандов является процесс так называемой силанизации, когда в роли замещающих лигандов выступают молекулы органосиланов, которые при гидролизе образуют вокруг КТ плотную, прозрачную, химически инертную гидрофильную оболочку [3]. Такая методика позволяет легко варьировать толщину и форму оболочки, а также дает возможность получать пористые структуры. Кроме того, силановая оболочка оптически прозрачна, что позволяет максимально использовать уникальные флуоресцентные свойства КТ. Также методика синтеза проста, воспроизводима, не требует сложного оборудования и дорогих реагентов [4].

Замена лигандов часто приводит к нарушению кристаллической структуры КТ, к появлению дефектов на их поверхности и соответственно к снижению интенсивности флуоресценции. Поэтому важным этапом в синтезе силанизированных КТ является оценка изменения интенсивности флуоресценции в процессе замены исходных гидрофобных лигандов на молекулы органосиланов.

Целью данной работы явились синтез КТ на основе селенида кадмия (CdSe) и выявление зависимости изменения флуоресцентных свойств в процессе замены исходных лигандов на поверхности КТ на молекулы органосиланов различного строения.

Научная новизна данной работы заключается в определении диапазона концентрации синтезированных КТ, в котором соблюдается линейность зависимости интенсивностей поглощения и испускания от концентрации КТ. Исследовано также влияние структуры органосилана на изменение флуоресцентных свойств в процессе силанизации.

Для синтезированных по методу [5] гидрофобных КТ структуры ядро – оболочка (ядро

селенида кадмия CdSe, покрытые оболочками из сульфида кадмия CdS и сульфида цинка ZnS: CdSe/CdS/ZnS) с максимумом эмиссии 611 нм осуществляли замену исходных лигандов на молекулы силанизирующего агента (тетраэтоксисилан (ТЕОС) или (3-меркаптопропил)триметоксисилан (МПС)) (рис. 1). Изучали влияние процесса замещения исходных лигандов на флуоресцентные свойства КТ. К раствору КТ в толуоле добавляли рассчитанное количество силанизирующего агента и оставляли перемешиваться в течение 24 ч. Отбирали аликвоты раствора через 5 мин, 1, 1.5, 2.5, 3.5 и 24 ч. Кроме того, варьировали мольные соотношения КТ : силанизирующий агент.

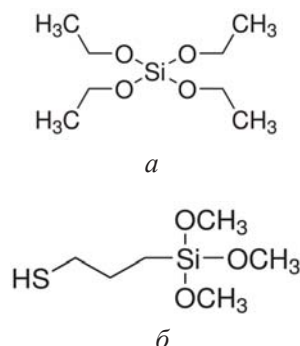


Рис. 1. Структурные формулы используемых органосиланов: тетраэтоксисилан (а) и (3-меркаптопропил)триметоксисилан (б)

Для того чтобы избежать возможных искажений в результате перепоглощения света предварительно определяли линейный диапазон изменения оптической плотности и флуоресценции. Для спектров поглощения должен соблюдаться закон Бугера–Ламберта–Бера. В то же время для спектров флуоресценции важно использовать разбавленные растворы КТ, чтобы избежать процесса перепоглощения.

Показано, что линейность оптической плотности соблюдается в широком диапазоне концентраций КТ (рис. 2).

В случае флуоресценции область линейности ожидаемо меньше – соблюдается только при низких концентрациях КТ от 0.2 до 1.6 нМ (рис. 3). Поэтому для изучения изменения флуоресцентных свойств КТ в процессе силанизации использовали сильноразбавленные растворы.

На рис. 4, 5 приведены зависимости изменения интенсивности флуоресценции раствора КТ во время процесса замены лигандов на молекулы ТЕОС и МПС.

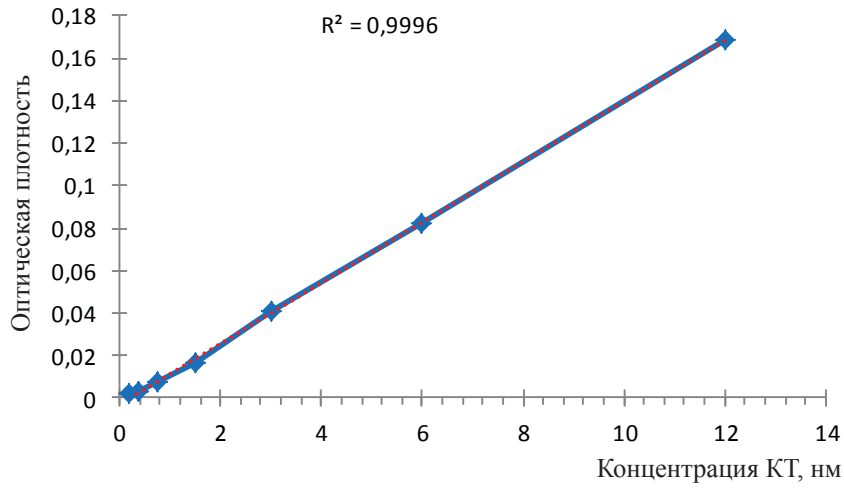


Рис. 2. Зависимость величины оптической плотности раствора квантовых точек от концентрации наночастиц

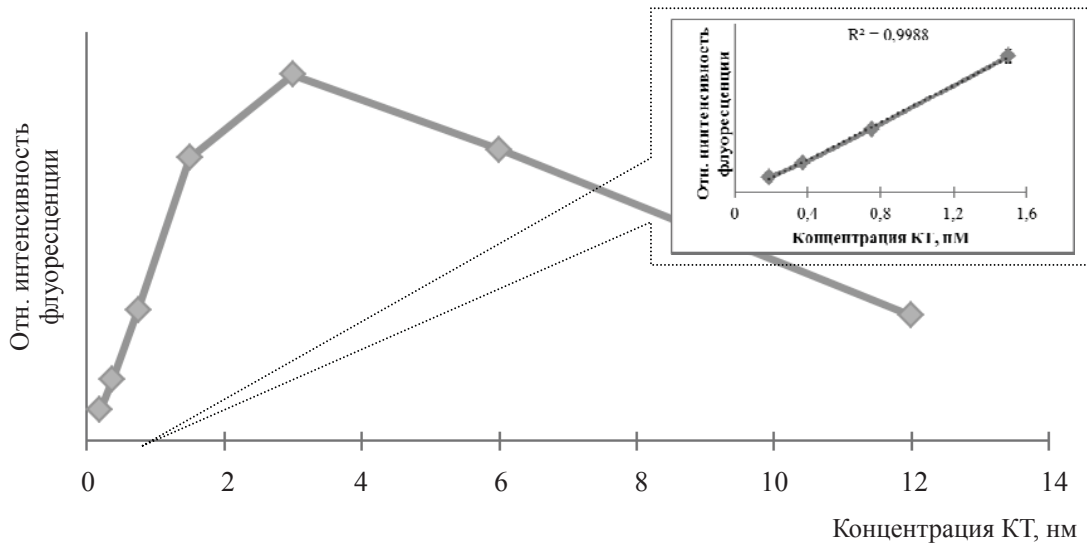


Рис. 3. Зависимость интенсивности флуоресценции от концентрации наночастиц в растворе в широком концентрационном диапазоне квантовых точек

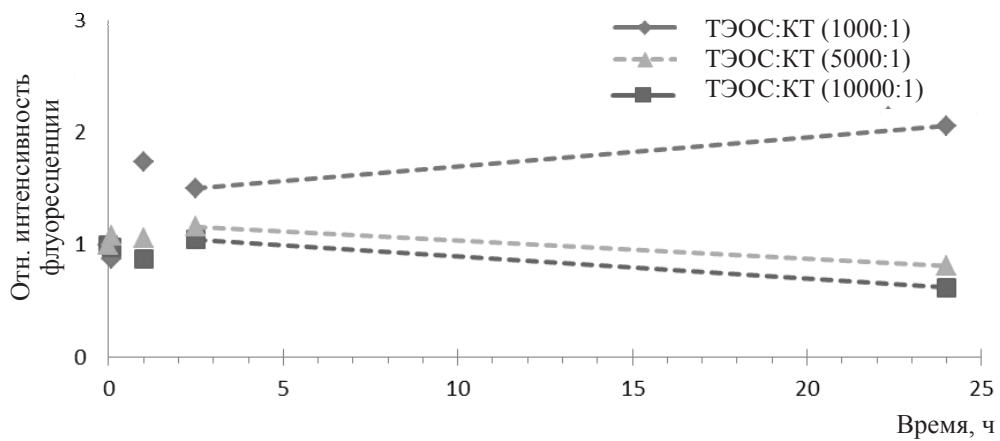


Рис. 4. Изменение интенсивности флуоресценции раствора квантовых точек во время процесса замены лигандов на молекулы тетраэтоксисилана

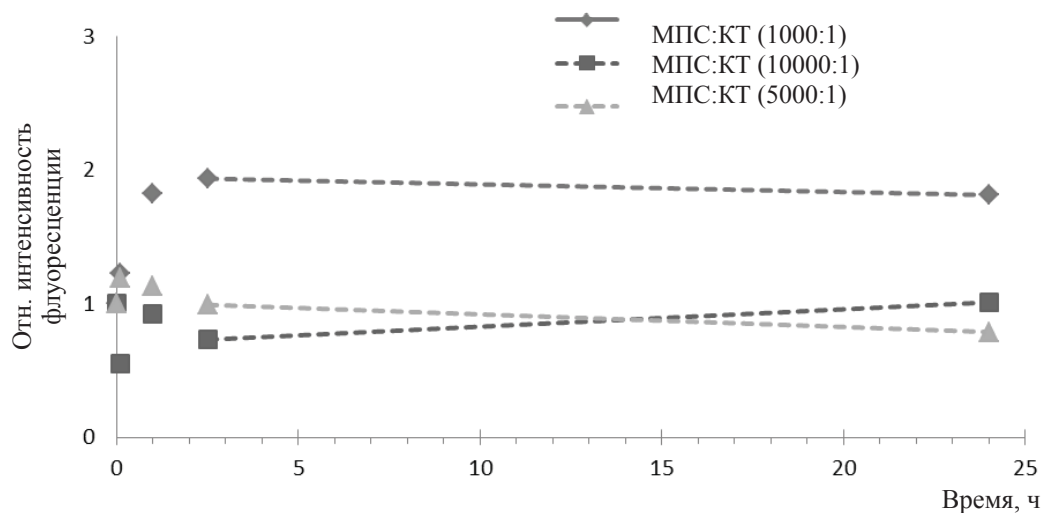


Рис. 5. Изменение интенсивности флуоресценции раствора квантовых точек во время процесса замены лигандов на молекулы (3-меркаптопропил)триметоксисилана

Показано, что чем больше избыток силанизирующего агента (ТЕОС или МПС), тем сильнее падает интенсивность флуоресценции с течением времени. Это можно объяснить тем, что при высокой концентрации силанизирующего агента скорость замены лигандов возрастает и соответственно больше вероятность окисления неорганического ядра КТ. Однако нельзя сказать, что после 24 ч процесса замены лигандов происходит критическое снижение интенсивности флуоресценции – максимальное снижение составляет 20%, что практически не сказывается на флуоресцентных свойствах конечного продукта.

По результатам данного исследования можно говорить о незначительном повреждении кристаллической структуры КТ, т.е. о невысокой скорости замены исходных лигандов на поверхности КТ, что приводит к незначительному снижению флуоресцентных свойств КТ в процессе силанизации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-13-00229).*

#### Список литературы

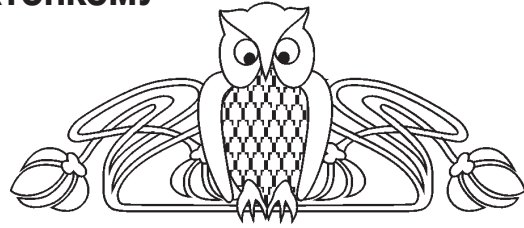
1. Goryacheva I. Yu., Lenain P., De Saeger S. Nanosized labels for rapid immunotests // Trends in Analytical Chemistry. 2013. Vol. 46. P. 30–43.
2. Biju V., Itoh T., Ishikawa M. Delivering quantum dots to cells: bioconjugated quantum dots for targeted and nonspecific extracellular and intracellular imaging // Chem. Soc. Rev. 2010. № 39. P. 3031–3056.
3. Knopp D., Tang D., Niessner R. Bioanalytical applications of biomolecule-functionalized nanometer-sized doped silica particles // Analytica Chimica Acta. 2009. Vol. 647. P. 14–30.
4. Wang S., Li C., Yang P., Ando M., Murase N. Silica encapsulation of highly luminescent hydrophobic quantum dots by two-step microemulsion method // Colloids and Surfaces A : Physicochem. Eng. Aspects. 2012. Vol. 395. P. 24–31.
5. Speranskaya E., Beloglazova N., Lenain P., De Saeger S., Wang Z., Zhang S., Hens Z., Knopp D., Niessner R., Potapkin D., Goryacheva I. Yu. Polymer-coated fluorescent CdSe-based quantum dots for application in immunoassay // Biosensors and Bioelectronics. 2014. № 53. P. 225–231.



УДК 621.382.029.6

## КВАЗИПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ ПОДХОД К СВЕРХТОНКОМУ РАСЩЕПЛЕНИЮ В МЮОННОМ ВОДОРОДЕ

А. А. Бойков, Н. А. Бойкова

Саратовский государственный университет  
E-mail: boykova\_na@mail.ru

Применяется релятивистская амплитуда рассеяния для описания спектров двухчастичных атомов в квазипотенциальном подходе. Анализируется дополнительная логарифмическая поправка шестого порядка по константе тонкой структуры в сверхтонкий сдвиг основного уровня, возникающая от учета эффекта запаздывания.

**Ключевые слова:** связанное состояние, сверхтонкий сдвиг, однофотонный обмен, мюонный атом, кулоновское взаимодействие, квазипотенциальный подход, логарифмический вклад.

### The Quasipotential Approach to the Superfine Splitting of Muonic Hydrogen and Positronium

A. A. Boikov, N. A. Boikova

For the description of the two-partial atoms spectrum in quasipotential approach the relativistic amplitude is used. The interrelation of scattering amplitude expressions, corresponding to quantoelectrodinamic corrections in various orders is traced. Arising from the accounting of delay effect the additional logarithmic corrections of the sixth order to the constant of fine structure in the bound level superfine shift are analyzed.

**Key words:** bound state, fine shift, energy level, hydrogen-like atom, Coulomb interaction, quasipotential approach, logarithmic contribution.

Важным направлением спектроскопии мюонных атомов является изучение интервалов сверхтонкой структуры с высокой точностью. Одним из наиболее эффективных теоретических методов исследования сверхтонкой структуры мюонных атомов является квазипотенциальный подход, предложенный А. А. Логуновым и А. Н. Тавхелидзе [1].

Основное уравнение квазипотенциального подхода представляется в виде [2]

$$(E - \varepsilon_{1p} - \varepsilon_{2p}) \varphi(\vec{p}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int V(\vec{p}, \vec{q}, E) \varphi(\vec{q}) d^3q, \quad (1)$$

где  $E$  – собственное значение полной энергии,  $\varepsilon_{ip} = \sqrt{p^2 + m_i^2}$ ,  $\varphi$  – описывающая систему волновая функция. Для определения квазипотенциала  $V(\vec{p}, \vec{q}, E)$  вводится оператор [3]

$$\tau_0 = F^{-1} T_0^+ F^{-1}, \quad F = (2\pi)^3 (E - \varepsilon_{1p} - \varepsilon_{2p}), \quad (2)$$

где  $T_0^+ = (\overline{G_0 T G_0})^+$ ,  $G_0$  – функция Грина для не-

взаимодействующих частиц. Релятивистская амплитуда рассеяния  $T(\vec{p}, \vec{q}, p_0, q_0, E)$  определяется из уравнения Бете – Солпитера [4]. Квазипотенциал системы двух фермионов [5] имеет вид

$$V = F^{-1} - (\widehat{G}^+)^{-1} = \frac{\tau_0}{(1 + F\tau_0)}, \quad (3)$$

где  $G$  – функция Грина для взаимодействующих частиц. На массовой поверхности  $E = \varepsilon_{1p} + \varepsilon_{2p} = \varepsilon_{1q} + \varepsilon_{2q}$  оператор  $\tau_0(\vec{p}, \vec{q}, E)$  и физическая амплитуда  $T_+(\vec{p}, \vec{q}, E)$  совпадают:

$$T_+(\vec{p}, \vec{q}, E) = u_1(\vec{p}) u_2(-\vec{p}) T(p_0 = 0, q_0 = 0, \vec{p}, \vec{q}, E) u_1(\vec{q}) u_2(-\vec{q}). \quad (4)$$

В работе [6] исследование сверхтонкой структуры  $S$  уровней мюонного водорода выполнялось на основе квазипотенциального уравнения шредингеровского типа. Однако значительно раньше получил известность другой подход к решению этой проблемы [7, 8]. Выясним, содержит ли всю информацию о связанной системе двух частиц способ построения квазипотенциала через амплитуду рассеяния (4) или квазипотенциал должен строиться на основе оператора  $\tau_0$  (3).

Выполняя замену оператора  $\tau_0$  амплитудой рассеяния  $T_+$ , используем разложение амплитуды  $T_+$  в ряд по степеням постоянной тонкой структуры  $\alpha$ :

$$T = T_+^{(2)} + T_+^{(4)} + \dots \quad (5)$$

Тогда для квазипотенциала получим

$$V = T_+ (1 - FT_+ + FT_+ FT_+ - \dots). \quad (6)$$

В низших порядках теории возмущений имеем:

$$V = \Delta V^{(2)} + \Delta V^{(4)} + v_c + \dots, \quad (7)$$

$$V^{(2)} = T_+^{(2)}, \quad V^{(4)} = T_+^{(4)} - T_+^{(2)} FT_+^{(2)}$$

Амплитуда рассеяния строится с помощью фейнмановской диаграммной техники. Квазипотенциал  $V(\vec{p}, \vec{q}, E)$  в низшем приближении, соответствующем однофотонному обмену между фермионами, определяется выражением





$$V(\vec{p}, \vec{q}, E) = K^{(1)}(\vec{p}, \vec{q}). \quad (8)$$

Обратимся теперь к обмену одним поперечным фотоном. Соответствующее аналитическое выражение, опираясь на амплитуду  $T_+$ , можно представить в виде

$$\Delta E_T = \langle \varphi_c(\vec{p}) | (K_T(\vec{p}, \vec{q}, E))_+ | \varphi_c(\vec{q}) \rangle, \quad (9)$$

$$\text{где } K_T(k) = -\frac{e^2}{(k_0^2 - \vec{k}^2)} \{ \vec{y}_1 \vec{y}_2 - (\vec{y}_1 \vec{k})(\vec{y}_2 \vec{k})(\vec{k})^{-2} \}.$$

$$\begin{aligned} \overline{G_0 K_T G_0}(\vec{p}, \vec{q}, E) &= -\frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} dt \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik(\tau-t)} dk'_0 \int_{-\infty}^{\infty} S_1(p_1) S_2(p_2) e^{ip_0 t} dp_0, \\ \int_{-\infty}^{\infty} K_T(k_0, k'_0, \vec{p}, \vec{q}) e^{-it(k_0 - k'_0)} dk_0 \int_{-\infty}^{\infty} S_1(q_1) S_2(q_2) e^{-it q_0} dq_0. \end{aligned} \quad (11)$$

Выполняя контурное интегрирование по переменным  $k_0, k'_0, \tau$ , а затем – проектиро-

Выясним, в чем причина различия в результатах  $\alpha^6 \ln \alpha$  на основе амплитуд  $T_+$  и  $\tau_0$ . Из амплитуды  $T_+$  для однофотонного поперечного обмена следует, что учет взаимодействия фермионов обеспечивает фактор

$$(K(\vec{p}, \vec{q}, E))_+ = \frac{4\pi\alpha}{|\vec{p} - \vec{q}|^2} M(\vec{p}, \vec{q}), \quad (10)$$

где  $M(\vec{p}, \vec{q})$  – матричная часть оператора. Применение амплитуды  $\tau_0$  при учете взаимодействия приводит к следующему оператору:

вание на положительно-частотные состояния, получим:

$$\begin{aligned} (\overline{G_0 K_T G_0})_+ &= u_1(\vec{p}) u_2(-\vec{p}) \overline{G_0 K_T G_0}(\vec{p}, \vec{q}, E) \gamma_{10} \gamma_{20} u_1(\vec{q}) u_2(-\vec{q}), \\ (\overline{G_0 K_T G_0})_+ &= \frac{2\pi\alpha}{|\vec{p} - \vec{q}|} F(\vec{p}) F(\vec{q}) B(\vec{p}, \vec{q}) M(\vec{p}, \vec{q}), \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} M(\vec{p}, \vec{q}) &= u_1(\vec{p}) u_2(-\vec{p}) (\alpha_1 \alpha_2 - \frac{(\alpha_1(\vec{p} - \vec{q}))(\alpha_2(\vec{p} - \vec{q}))}{(\vec{p} - \vec{q})^2}) u_1(\vec{q}) u_2(-\vec{q}), \\ B(\vec{p}, \vec{q}) &= \left( \frac{1}{(\varepsilon_{1p} - E_1 - E_2 + \varepsilon_{2q} + |\vec{p} - \vec{q}|)} + \frac{1}{(\varepsilon_{1q} - E_1 - E_2 + \varepsilon_{2p} + |\vec{p} - \vec{q}|)} \right). \end{aligned}$$

Теперь запишем аналитические выражения для сдвигов  $\Delta E_T^1, \Delta E_T^2$  и сравним их:

$$\Delta E_T^1 = \langle \varphi_c(\vec{p}) | \frac{4\pi\alpha}{(\vec{p} - \vec{q})^2} M(\vec{p}, \vec{q}) | \varphi_c(\vec{q}) \rangle, \quad (13)$$

$$\Delta E_T^2 = \langle \varphi_c(\vec{p}) | \frac{2\pi\alpha}{|\vec{p} - \vec{q}|} B(\vec{p}, \vec{q}) M(\vec{p}, \vec{q}) | \varphi_c(\vec{q}) \rangle. \quad (14)$$

Как видно, если пренебречь членами  $(\varepsilon_{1p} - E_1 - E_2 + \varepsilon_{2q})$  и  $(\varepsilon_{2p} - E_2 - E_1 + \varepsilon_{1q})$ , то получаем идентичные выражения для сдвига. Однако именно эти члены учитывают эффект

запаздывания при взаимодействии фермионов в экзотическом атоме. Данный эффект не является столь сильным, чтобы оказать влияние на основной вклад порядка  $\alpha^4$ , но весьма существен при исследовании логарифмических вкладов порядка  $\alpha^6 \ln \alpha$ .

Учитывая, что за сверхтонкое взаимодействие ответственны спиновые моменты фермионов, выделим в матричной структуре  $M(\vec{p}, \vec{q})$  члены  $M^{hfs}$ , пропорциональные произведению матриц Паули:

$$\Delta E_T^{hfs} = \frac{4}{3\pi^4} \alpha^6 \mu^5 \langle \vec{\sigma}_1 \vec{\sigma}_2 \rangle \int \frac{N_p d^3 p}{(p^2 + \alpha^2 \mu^2)^2} \int \frac{N_q d^3 q}{(q^2 + \alpha^2 \mu^2)^2} \frac{1}{(\vec{p} - \vec{q})^2} A(\vec{p}, \vec{q}), \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} A(\vec{p}, \vec{q}) &= [(\vec{p} - \vec{q})^2 \left( \frac{1}{M_{1p} M_{2q}} + \frac{1}{M_{1q} M_{2p}} \right) - \\ &- \frac{(p^2 - q^2)^2}{(\varepsilon_{1p} + \varepsilon_{1q})(\varepsilon_{2p} + \varepsilon_{2q})} \left( \frac{1}{M_{2p} M_{2q}} + \frac{1}{M_{1p} M_{1q}} + \frac{[\vec{p}\vec{q}]^2}{(\vec{p} - \vec{q})^2 M_{1p} M_{1q} M_{2p} M_{2q}} \right)]. \end{aligned}$$



Примечательной особенностью данного выражения является наличие вклада порядка  $\alpha^4$ , который содержится в первых двух членах и выделяется при заменах:

$$N_p N_q \rightarrow 1, \quad \frac{1}{M_{1p} M_{2q}} + \frac{1}{M_{1q} M_{2p}} \rightarrow \frac{1}{2m_1 m_2}, \quad (16)$$

$$\Delta E_{1T}^{hfs}(\alpha^4) = \frac{2}{3\pi^4} \frac{1}{m_1 m_2} \alpha^6 \mu^5 \langle \vec{\sigma}_1 \vec{\sigma}_2 \rangle \left( \int_{-\infty}^{\infty} \frac{N_p d^3 p}{(p^2 + \alpha^2 \mu^2)^2} \right)^2 = \frac{2}{3} \frac{\alpha^4 \mu^3}{m_1 m_2} \langle \vec{\sigma}_1 \vec{\sigma}_2 \rangle = E_F. \quad (17)$$

Отметим присутствие в выражении (15) логарифмического вклада  $\alpha^6 \ln \alpha$ :

$$\Delta E_T^{1hfs}(\alpha^6 \ln \alpha) = \frac{\mu^2 \alpha^2}{m_1 m_2} E_F \left( \frac{m_1}{m_2} + \frac{m_2}{m_1} \right) \ln \alpha^{-1}. \quad (18)$$

Итак, результат (16) определяет основной вклад в сверхтонкое расщепление от электромагнитного взаимодействия в мюонном водороде при  $m_1 = m_\mu$  и  $m_2 = m_p$ .

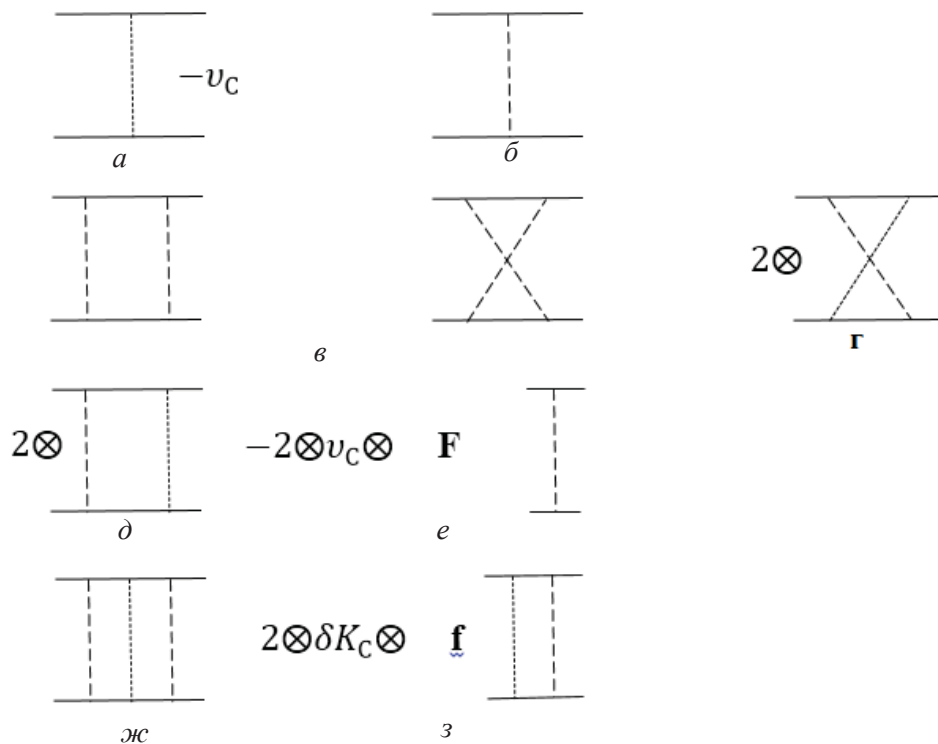
Однако формула (16) имеет более общий характер и может быть применена к любому двухфермионному экзотическому атому при описании сверхтонкой структуры спектра. При этом ее численное значение для различных ато-

мов существенно отличается в силу их массовых характеристик.

Проведем сравнительный анализ логарифмических вкладов порядка  $\alpha^6 \ln \alpha$  для мюонного водорода и позитрония для диаграмм, приведенных на рисунке, где схематично показаны обмены кулоновскими (точечная линия) и поперечными (пунктирная линия) фотонами. При анализе используем табл. 3 из работы [5], в которой представлены вклады от диаграмм рисунка. Составим таблицу логарифмических вкладов с учетом результата (18) от обмена поперечным фотоном:

$$\Delta E^{hfs} = \frac{\mu^2 \alpha^2}{m_1 m_2} E_F \ln \alpha^{-1} (K + ML), \quad M = \frac{m_1}{m_2} + \frac{m_2}{m_1}. \quad (19)$$

В таблице результаты представлены в виде совокупности безмассовых членов ( $K$ ) и логарифмических вкладов ( $L$ ), пропорциональных  $M$ . Для позитрония разделение вкладов на  $K$  и  $L$  условно, так как  $m_1 = m_2 = m$  и  $M = 2$ . В части  $L$  данная таблица аналогична табл. 3 из работы [5] при замене  $m_\mu \rightarrow m_e$  и  $m_p \rightarrow m_e$ . Заметим, что сумма вкладов ( $L$ ) равна 0 как для позитрония, так и для мюонного водорода. Результаты типа ( $K$ ) оказываются различными.



Диаграммы, дающие вклады порядка  $\alpha^6 \ln \alpha$  в сверхтонкое расщепление атома [5]



**Вклады в сверхтонкое расщепление**

Диаграмма	$p^+ \mu^-$		$e^+ e^-$	
	$K$	$L$	$K$	$L$
а	1/4	0	1/4	2
б	0	$M$	2	2
в	9/2	0	9/2	0
г	-2	$-M$	-2	-2
д	0	$3M$	0	6
е	-4	$-2M$	-4	-4
ж	5/4	0	5/4	0
з	0	$-M$	0	-2
$\Sigma$	0	0	2	0

Итак, как следует из данных, приведенных в таблице, в отличие от результатов для сверхтонкого сдвига с точностью  $\alpha^4$  при повышении точности до  $\alpha^6 \ln \alpha$  спектроскопия мюонного водорода не переходит в спектроскопию по-

зитрония при соответствующей замене масс в двухчастичной системе. Возникает вопрос: сохраняется ли сходство вкладов этих атомов при прецизионных вычислениях сверхтонких сдвигов? Сохраняется, но при условии, что определение квазипотенциала через амплитуду рассеяния  $T_+$  (4) рассматривается в качестве приближения выражение (3).

Проанализируем выражение для сверхтонкого сдвига от однофотонного обмена на основе определения (3), которое, как было показано, принимает вид (14). В отличие от выражения (13), исследование однофотонного взаимодействия на основе амплитуды (14) является более громоздким, но и более детальным, позволяющим учесть эффект запаздывания при взаимодействии фермионов. В результате вместо кулоновского потенциала  $v_c$ , соответствующего мгновенному взаимодействию, получаем операторное выражение, содержащее более точную зависимость от импульсов.

$$(K_T)_{OF} = \frac{2\pi\alpha}{|\vec{p}-\vec{q}|} \left( \frac{1}{(\varepsilon_{1p} - E_1 - E_2 + \varepsilon_{2q} + |\vec{p}-\vec{q}|)} + \frac{1}{(\varepsilon_{1q} - E_1 - E_2 + \varepsilon_{2p} + |\vec{p}-\vec{q}|)} \right) M(\vec{p}, \vec{q}). \quad (20)$$

Выясним, какое влияние окажет учет эффекта запаздывания на вклады порядка  $\alpha^6 \ln \alpha$ .

Выделяя члены в выражении  $\Delta E_T^{2f}$ , ответственные за сверхтонкое расщепление, получим:

$$\Delta E_T^{2hfs} = \frac{1}{12\pi^4} \frac{1}{m_1 m_2} \alpha^6 \mu^5 \langle \vec{\sigma}_1 \vec{\sigma}_2 \rangle \int \frac{d^3 p}{\varepsilon_{2p} \varepsilon_{1p} (p^2 + \alpha^2 \mu^2)^2} \int \frac{1}{(q^2 + \alpha^2 \mu^2)^2} \times \left[ 1 + \frac{2(\varepsilon_{1p} - m_1)(\varepsilon_{2q} - m_2)}{(\vec{p}-\vec{q})^2} \right] \left\{ \frac{p^2 q^2}{(\vec{p}-\vec{q})^2} \left( \frac{M_{1q} + M_{1p}}{(\varepsilon_{2p} + \varepsilon_{2q})} + \frac{M_{2p} + M_{2q}}{(\varepsilon_{1p} + \varepsilon_{1q})} \right) + 2M_{1p} M_{2q} \right\} d^3 q. \quad (21)$$

Анализ показывает, что первое слагаемое, в фигурных скобках, вносит вклады в сверхтонкое расщепление, начиная с членов порядка  $\alpha^6 \ln \alpha$ , а второе – с членов порядка  $\alpha^4$ . Отличие фактора  $(\varepsilon_{1p} - E_1 + \varepsilon_{2q} - E_2 + |\vec{p}-\vec{q}|)$  от  $|\vec{p}-\vec{q}|$  оказывается существенным для получения логарифмических поправок при наличии в выражении членов, обеспечивающих вклады порядка  $\alpha^4$ . Вклады  $\alpha^6 \ln \alpha$  вносят попарные произведения первых и вторых членов в квадратных и фигурных скобках. Используя значение стандартного интеграла, находим окончательно:

$$\Delta E_T^{2hfs} (\alpha^6 \ln \alpha) = \frac{\mu^2 \alpha^2}{m_1 m_2} E_F \left( \frac{m_1}{m_2} + \frac{m_2}{m_1} + 2 \right) \ln \alpha^{-1}. \quad (22)$$

Учет результата (22) в таблице приводит к изменению коэффициента  $K$  в строке б на 2,

так что суммарные результаты столбцов  $K$  для мюонного водорода и позитрония оказываются одинаковыми. Таким образом, восстанавливается общность результата  $\alpha^6 \ln \alpha$  при исследовании сверхтонкого расщепления для мюонного водорода и позитрония.

Из проведенного анализа следует, что для полного исследования сверхтонкого расщепления в двухчастичных атомах, содержащих частицы различных масс, необходимо использовать релятивистский квазипотенциал, что позволяет детально учесть эффект запаздывания.

### Список литературы

1. Logunov A. A., Tavkhelidze A. N. Quasioptical approach in quantum field theory // Nuovo cimento. 1963. Vol. 29, № 2. P. 380–390.



2. Фаустов Р. Н. Квазипотенциальный метод в задаче о связанных состояниях // ТМФ. 1970. Т. 3, № 2. С. 240–254.
3. Бойкова Н. А., Тюхтяев Ю. Н., Фаустов Р. Н. О вкладах порядка  $\alpha^6 \ln \left( \frac{m_1}{m_2} \right)$  в тонкий сдвиг S уровней энергии мюония // ЯФ. 1998. Т. 61, № 5. С. 866–870.
4. Бойкова О. А., Тюхтяев Ю. Н. Квазипотенциальная теория ряда экзотических атомов // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2011. Т. 11, вып. 1. С. 31–37.
5. Бойкова Н. А., Двоеглазов В. В., Тюхтяев Ю. Н., Фаустов Р. Н. Квазипотенциал в четвертом порядке теории возмущений и инфракрасные особенности // ТМФ. 1991. Т. 89, № 2. С. 228–237.
6. Мартыненко А. П., Фаустов Р. Н. Сверхтонкая структура основного состояния мюонного водорода // ЖЭТФ. 2004. Т. 125, вып. 1. С. 48–62.
7. Тюхтяев Ю. Н. Новый метод учета кулоновского взаимодействия в квазипотенциальном подходе Логунова–Тавхелидзе // ТМФ. 1982. Т. 53, № 3. С. 419–428.
8. Бойкова Н. А., Бойкова О. А., Тюхтяев Ю. Н. Электромагнитное взаимодействие в мюонии и мюоном водороде // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2011. Т. 11, вып. 1. С. 54–59.

УДК 538.975, 544.72.05, 539.216.2

## ПОЛУЧЕНИЕ И ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК ЛЕНГМЮРА – БЛОДЖЕТТ, СОДЕРЖАЩИХ КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ CdSe/CdS/ZnS

И. А. Горбачев, С. Н. Штыков, Е. Г. Глуховской

Саратовский государственный университет  
E-mail: iliyagorbachev@mail.ru



Методом флуоресцентной спектроскопии исследованы многослойные структуры на основе тонких пленок полупроводниковых квантовых точек (КТ) состава CdSe/CdS/ZnS, гидрофобизированных олеиновой кислотой, с пиками флуоресценции 525 и 631 нм, полученные по технологии Ленгмюра – Блоджетт. Экспериментально показано, что спектр флуоресценции наноразмерной пленки, состоящей из монослоев КТ разного типа, имеет сложный характер и может перестраиваться в зависимости от взаимного расположения перетяжки фокуса и слоев КТ в пленке, что открывает возможность управления интенсивностью флуоресценции каждого из слоев КТ.

**Ключевые слова:** ленгмюровские монослои, пленки Ленгмюра – Блоджетт, квантовые точки, оптические свойства, нанокompозитные структуры.

### Creating and Fluorescence of the Multilayer Langmuir – Blodgett Films of CdSe/CdS/ZnS Quantum Dots

I. A. Gorbachev, S. N. Shtykov, E. G. Glukhovskoy

Multilayered structures composed by Langmuir – Blodgett films of CdSe/CdS/ZnS quantum dots functionalized by oleic acid and fluorescent at 525 and 631 nm were prepared and studied by fluorescent spectroscopy. It was shown that fluorescent spectra of the nanosized multilayered film consisting of different QD layers have complex character and can be rearranged with relative positions of QD layer and laser beam that open possibility to operate the fluorescent intensity of every QD layer.

**Key words:** Langmuir monolayers, Langmuir – Blodgett films, quantum dots, optical properties, nanocomposite structure.

### Введение

Области применения квантовых точек с момента их создания и до настоящего времени стремительно расширяются. Наряду с использованием при проведении анализа в иммунологии и гистологических исследованиях, одним из направлений, где квантовые точки являются перспективным материалом, является оптоэлектроника. Так, квантовые точки являются перспективными материалами при создании светоизлучающих приборов, а также приборов фотовольтаики. На сегодняшний день существует ряд работ, в которых рассматривается использование квантовых точек как элементов светоизлучающих приборов [1–5]. Особенностью указанных способов использования квантовых точек в качестве элементов светоизлучающих приборов является их расположение в виде тонкого слоя, в ряде работ – монослоя. Распространенными для этого технологиями являются послойная адсорбция квантовых точек на поверхность из растворов [6], получение тонких пленок методом вращающейся подложки [7] и технология Ленгмюра – Блоджетт [8]. Одной из идей, продвигаемой авторами в работах, является создание светоизлучающего прибора с белым цветом излучения, для чего, как правило, используются квантовые точки с разной





длиной волны, а настройка цвета готового прибора осуществляется при помощи изменения концентрации точек соответствующего типа [1, 2].

В данной работе для изменения спектра флуоресценции многослойной структуры происходило изменение положения области фокусировки лазерного пучка, возбуждающего излучения, с одновременным изменением положения области сбора сигнала детектором установки Ntegra Spectra, в результате чего происходило изменение количества числа фотонов, приходящих на детектор с каждого из слоев. Этим способом была исследована пленка, состоящая из двух бислоев гидрофобных квантовых точек CdSe/CdS/ZnS, функционализированных олеиновой кислотой, с пиками флуоресценции на длинах волн 525 и 631 нм. Для получения пленки использовалась технология Ленгмюра – Блоджетт.

### Экспериментальная часть

Использовали растворы гидрофобных квантовых точек CdSe/CdS/ZnS в толуоле с концентрацией  $(4-6) \times 10^{-6}$  М, которые получали по методу, описанному в [9]. Квантовые точки, функционализированные олеиновой кислотой, флуоресцировали при 525 и 631 нм. Аликвоту раствора 25 мкл квантовых точек наносили на поверхность водной субфазы, которой являлась *деионизованная вода* с удельным сопротивлением 18 МОм×см. Через 8 мин после улетучивания толуола с поверхности воды монослой сжимали подвижными барьерами со скоростью 8 см<sup>2</sup>/мин. Изотермы сжатия растворов квантовых точек представлены на рис. 1. Монослой квантовых точек с максимумами длин волн флуоресценции 525 и 631 нм переносили по *методу Шеффера*

– *горизонтальным лифтом* на стеклянную подложку, предварительно обработанную этанолом и деионизованной водой при давлениях 25 и 35 мН/м соответственно. При получении наноразмерной организованной ПЛБ сначала наносили два слоя квантовых точек с максимумом флуоресценции 525 нм и после высушивания в течение 40 мин – сверху еще два слоя квантовых точек с максимумом флуоресценции 631 нм. При нанесении двух последних слоев подложку поворачивали на угол в 90 градусов с целью создания на ней трех областей. Первая область (1 на рис. 2) с бислоевой пленкой толщиной около 20 нм, состоящей из QD с пиком флуоресценции 525 нм. На этом же рисунке: 2 – область с пленкой толщиной около 45 нм, сформированной из двух бислоев разного состава (нижний бислой состоит из QD, с пиком флуоресценции 525 нм, верхний – из QD, с пиком 631 нм); 3 – область с пленкой толщиной 22 нм из QD, с пиком флуоресценции 631 нм; 4 – чистая область. Схематично полученная структура представлена на рис. 2. Такую ступенчатую гибридную структуру исследовали *методом флуоресцентной спектроскопии* на установке NT-MDT Ntegra Spectra. Спектры, полученные в ходе исследования области 2 структуры, представлены на рис. 3. Спектры записывали при температуре 24 °С, при возбуждении лазером с длиной волны 473 нм, мощностью 10 мВт; сигнал снимали за время, равное 0.1 с. Интенсивность флуоресценции слоев каждого вида квантовых точек изменяли перемещением области (глубины) фокусировки лазерного луча в ПЛБ, в результате чего больший вклад в общую флуоресценцию вносился одним из двух бислоев квантовых точек (рис. 3, 4).

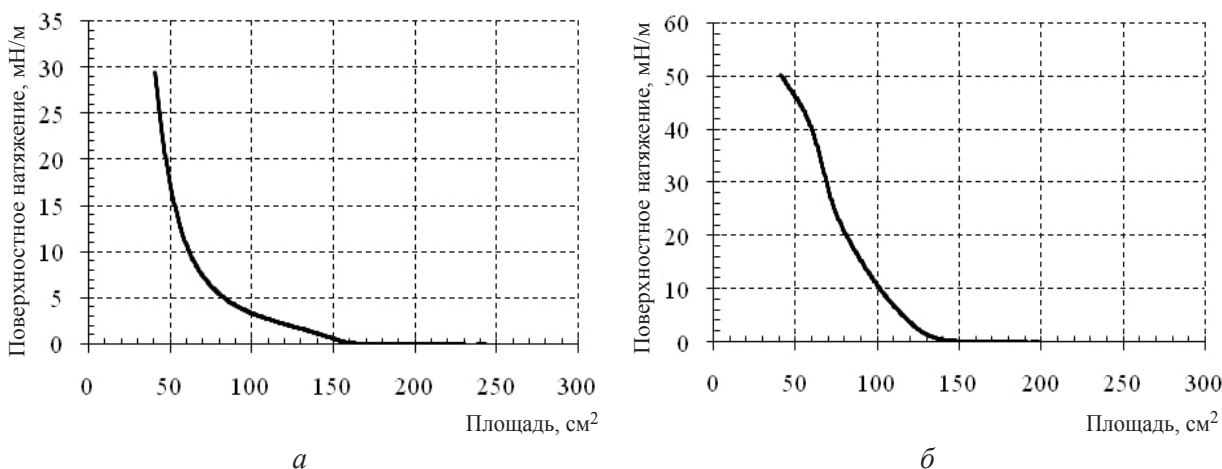


Рис. 1. Изотермы сжатия квантовых точек с длиной волны флуоресценции 525 нм (а) и 631 нм (б)

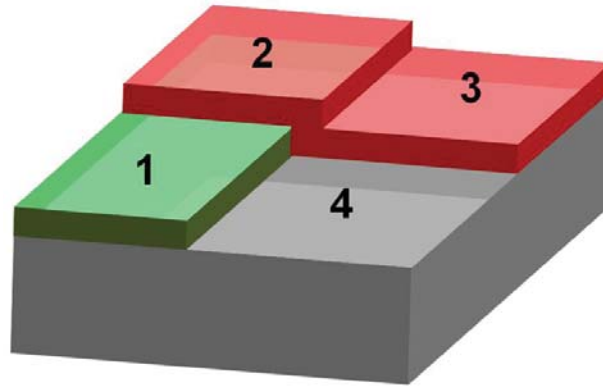


Рис. 2. Схематичное изображение полученной гибридной структуры: 1 – слой КТ с пиком флуоресценции 525 нм, 2 – область, содержащая два бислоя КТ двух разных типов, 3 – слой КТ с пиком флуоресценции 631 нм, 4 – область без нанесенных слоев

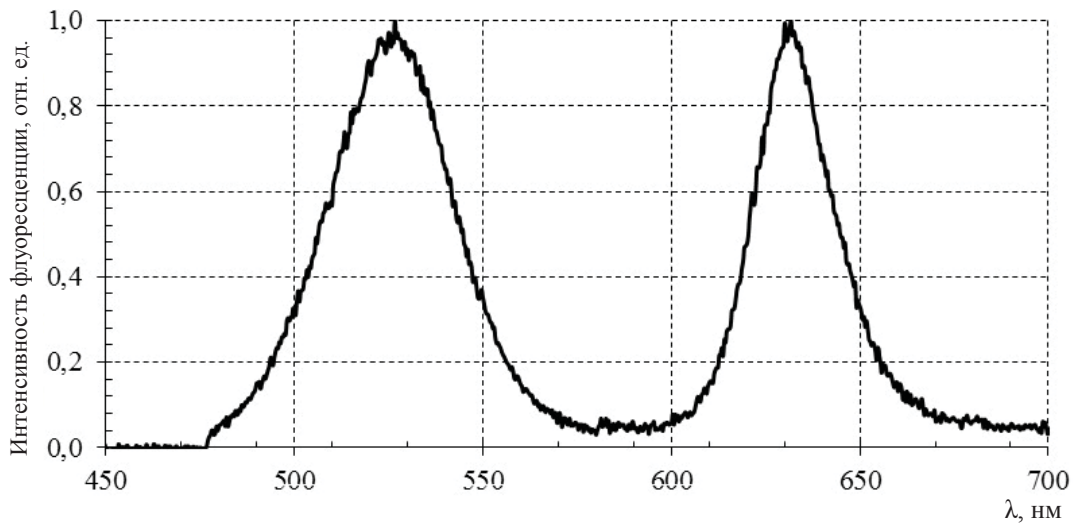


Рис. 3. Спектр флуоресценции 4-слойной ПЛБ, содержащей оба вида квантовых точек

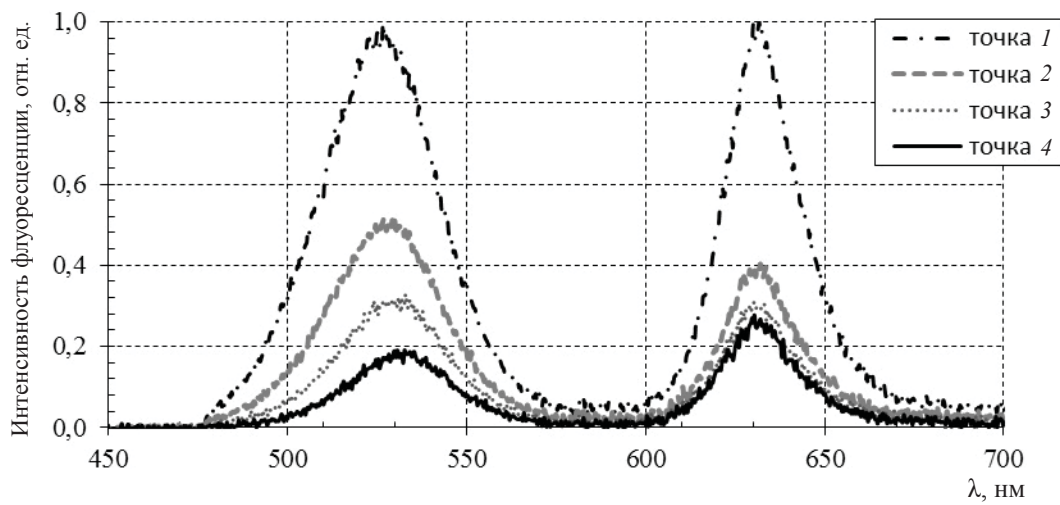


Рис. 4. Влияние изменения точки фокусировки лазерного луча на интенсивность флуоресценции квантовых точек в ПЛБ при изменении положения фокуса по высоте (точка 1 – фокус на обоих слоях, точка 4 – фокус частично захватывает верхний слой)



### Результаты и их обсуждение

Изотермы сжатия растворов квантовых точек представлены на рис. 1. Видно, что обе изотермы имеют протяженную газовую фазу при поверхностном давлении, близком к нулю, что говорит о формировании на поверхности истинного монослоя, состоящего из квантовых точек CdSe/CdS/ZnS. При давлениях в 0.1 мН/м и площадях 159 и 149 см<sup>2</sup> в монослоях, образованных квантовыми точками, происходит фазовый переход из газового в жидкорасширенное состояние, а при достижении давления 4 мН/м и 10 мН/м – переход в жидкоконденсированное состояние для квантовых точек, флуоресцирующих при 525 и 631 нм соответственно. При дальнейшем сжатии состояние монослоя, согласно классификации авторов [10], остается жидкоконденсированным. Все указанные изменения подтверждают взаимодействие олеиновой кислоты с квантовыми точками и образование монослоев продуктами их взаимодействия. Интересно, что чем меньше размер квантовых точек, тем при меньших значениях давления наблюдается жидкоконденсированный переход и затем – разрушение монослоя, т.е. более устойчивым является монослой с квантовыми точками, флуоресцирующими при 631 нм. Характерно, что, согласно литературным данным, монослой олеиновой кислоты, как правило, не достигает твердокристаллического состояния при сжатии [11].

Результаты, полученные при изучении структур методом флуоресцентной спектроскопии, представлены на рис. 3 и 4. Из рис. 3, на котором представлен спектр флуоресценции третьей области подложки с нанесенными двумя бислоями квантовых точек с разной длиной волны максимума флуоресценции, видно, что он содержит две полосы флуоресценции, характерные для квантовых точек каждого из типов. Поскольку область фокусировки представляет собой эллипсоид вращения с диаметром порядка 300 нм и высотой порядка 1 мкм, то, основываясь на толщине пленки, равной порядка 45 нм, можно сделать вывод, что при попадании в область фокусировки всей пленки интенсивность флуоресценции будет максимальной (см. рис. 3).

На рис. 4 представлены спектры флуоресценции этой пленки, полученные при изменении глубины точки фокусировки лазерного пучка в четырехслойной ПЛБ. При этом максимальная интенсивность флуоресценции обоих пиков

соответствует положению фокуса между двумя слоями, в результате чего фокусное пятно перекрывает в равной степени оба слоя (точка 1). При изменении положения фокусного пятна происходит движение точки фокуса в направлении нижнего слоя, содержащего квантовые точки с длиной волны флуоресценции 631 нм. Видно, что при движении фокусного пятна сквозь образец интенсивность флуоресценции обоих видов квантовых точек уменьшается. Это уменьшение интенсивности флуоресценции обоих видов квантовых точек графически представлено на рис. 5, где начальной точке соответствуют максимальные интенсивности каждого из пиков, которые изменяются вместе с движением точки фокусировки сквозь образец, что соответствует точкам 1–4 рис. 4. Видно, что эти зависимости пересекаются, а это говорит о разной степени падения интенсивности флуоресценции каждого из пиков. Возможно, что одной из причин уменьшения интенсивности флуоресценции при изменении области фокусировки является уменьшение плотности энергии сфокусированного лазерного излучения, возбуждающего пленку. В то же время влияние попадающих на пленку рассеянных и отраженных фотонов, которые также будут возбуждать флуоресценцию в образце, увеличивается. При движении области фокусировки сквозь образец наступит момент, при котором область фокусировки попадет на нижний бислой, и основной вклад в общую флуоресценцию пленки будет даваться квантовыми точками этого слоя, что проиллюстрировано на рис. 5 (точка пересечения двух графиков). В то же время из-за возбуждения квантовых точек другого бислоя несфокусированным лазерным пучком на результирующем спектре будут присутствовать пики, характерные для спектров флуоресценции обоих слоев. По мере изменения области фокусировки должно наблюдаться уменьшение интенсивности одного из пиков и рост интенсивности второго пика.

На рис. 6 представлены спектры флуоресценции обеих квантовых точек в ситуации, когда основной вклад в общую флуоресценцию структуры дается одним из бислоев. Наличие второго пика объясняется недостаточной толщиной структуры в сравнении с геометрическими размерами фокусного пятна, а также отсутствием какого-либо слоя наполнителя между бислоями квантовых точек с разной длиной волны излучения, например амфифильных молекул, внедрение которых увеличило бы толщину пленки.

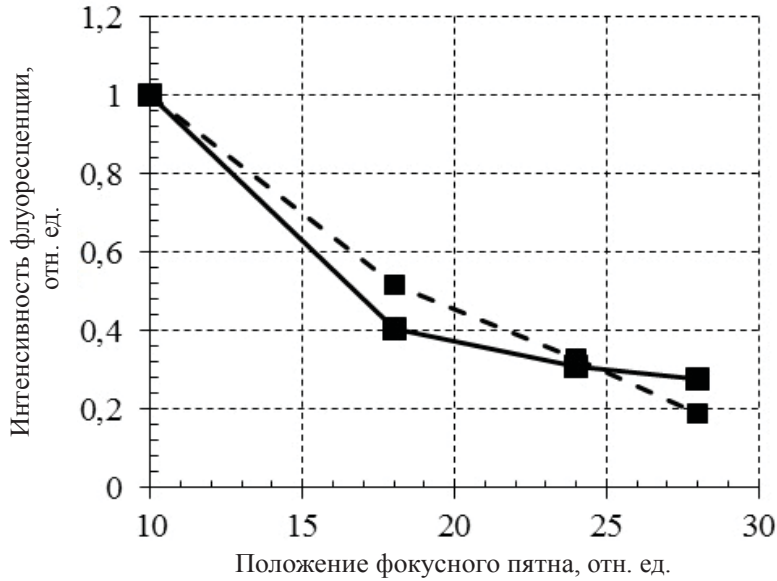


Рис. 5. Уменьшение интенсивности каждого из пиков флуоресценции при движении области фокусировки через образец (сплошная линия для нижнего слоя, пунктирная – верхнего)

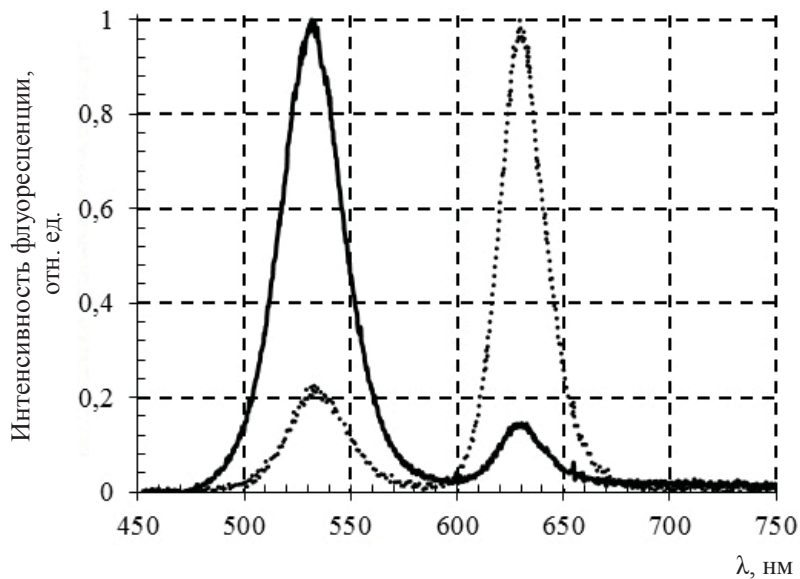


Рис. 6. Интенсивность, приведенные к единице, флуоресценции структуры при положении точки фокусировки на одном из бислоев (сплошная линия – фокус на верхнем слое, пунктирная линия – фокус на нижнем слое)

В работе впервые изучены условия формирования монослоев и получена многослойная ПЛБ, состоящая из двух бислоев квантовых точек CdSe/CdS/ZnS типа ядро/оболочка/оболочка с разными максимумами длин волн флуоресценции. Получены спектры флуоресценции указанной структуры отдельных бислоев каждого вида квантовых точек, флуоресцирующих при 525 и 631 нм, и спектры четырехслойной

ПЛБ. Показано, что варьирование положения фокусного пятна возбуждающего лазерного излучения на различной глубине четырехслойной ПЛБ позволяет изменять интенсивность спектров флуоресценции каждого вида квантовых точек. Разная степень изменения интенсивности свидетельствует о возможности управления интенсивностью флуоресценции каждого из видов квантовых точек указанным способом,





а следовательно, возможностью управления цветом излучаемого света.

Авторы выражают благодарность профессору И. Ю. Горячевой за предоставленные квантовые точки.

*Работа выполнена при поддержке гранта DAAD (шифр 11.9160.2014 «Изучение формирования монослоев со встроенными квантовыми точками»).*

### Список литературы

1. Chen H. S., Chen C. W., Wang C. H., Chu F. C., Chao C. Y., Kang C. C., Chou P. T., Chen Y. F. Color-Tunable Light-Emitting Device Based on the Mixture of CdSe Nanorods and Dots Embedded in Liquid-Crystal Cells // *J. Phys. Chem. C*. 2010. Vol. 114. P. 7995–7998.
2. Anikeeva P. O., Halpert J. E., Bawendi M. G., Bulovic V. Electroluminescence from a Mixed Red-Green-Blue Colloidal Quantum Dot Monolayer // *Nano Lett.* 2007. Vol. 7, № 8. P. 2196–2200.
3. Kim T. H., Cho K. S., Lee E. K., Chae J., Kim J. W., Kim D. H., Kwon J. Y., Lee S. Y., Choi B. L., Kuk Y., Kim J. M., Kim K. Full-colour quantum dot displays fabricated by transfer printing // *Nature photonics*. 2011. Vol. 5. P. 176–182.
4. Chen H. S., Hsu C. K., Hong H. Y. In GaN–CdSe–ZnSe Quantum Dots White LEDs // *Ieee photonics technology letters*. 2006. Vol. 18, № 1. P. 884–886.
5. Lin Y., Zhang Y., Zhao J., Gub P., Bib K., Zhanga Q., Chuc H., Zhangb T., Cuib T., Wanga Y., Zhaod J., Yu W. W. White-light-emitting diodes using GaN-excited CdSe/CdS/ZnS quantum dots // *China Particuology*. 2014. Vol. 15. P. 90–93.
6. Leck K. S., Divayana Y., Zhao D., Yang X., Abiyasa A. P., Mutlugun E., Gao Y., Liu S., Tan S. T., Sun X. W., Demir H. D. Quantum Dot Light-Emitting Diode with Quantum Dots Inside the Hole Transporting Layers // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2013. Vol. 5. P. 6535–6540.
7. Jaffar S., Nam K. T., Khademhosseini A., Xing J., Langer R. S., Belcher A. M. Layer-by-Layer Surface Modification and Patterned Electrostatic Deposition of Quantum Dots // *Nano Lett.* 2004. Vol. 4, № 8. P. 1421–1425.
8. Lambert K., Wittebrood L., Moreels I., Deresmesb D., Grandidierb B., Hens Z. Langmuir–Blodgett monolayers of InP quantum dots with short chain ligands // *J. Colloid Interface Sci.* 2006. Vol. 300. P. 597–602.
9. Li J. J., Wang Y. A., Guo W., Keay J. C., Mishima T. D., Johnson M. B., Peng X. Large-Scale Synthesis of Nearly Monodisperse CdSe/CdS Core/Shell Nanocrystals Using Air-Stable Reagents via Successive Ion Layer Adsorption and Reaction // *J. Amer. Chem. Soc.* 2003. Vol. 125. P. 12567–12575.
10. Абрамзон А. А., Голоудина С. И. Об агрегатном состоянии конденсированных монослоев на поверхности жидкости // *Успехи коллоидной химии. Л. : Химия. Ленингр. отд-ние*, 1991. С. 239–262.
11. Tomoaia-Cotisel M., Zsako J., Mocanu A., Lupea M., Chifu E. III. The Ionization Characteristics of Some Fatty Acids at the Air/Water Interface // *J. Colloid Interface Sci.* 1987. Vol. 117, № 2. P. 464–476.

УДК 539.14

## СПЕКТР ГАММА-КВАНТОВ В БЕРИЛЛИЕВОЙ МИШЕНИ

М. А. Клочков, Г. Н. Залесный

Саратовский государственный университет  
E-mail: klochkov@sgu.ru



Проанализированы изменения начального тормозного спектра гамма-квантов внутри образца. Показано, что основным механизмом, влияющим на форму спектра  $\gamma$ -квантов в образце бериллия, является эффект Комптона. В работе учитывается эта поправка при анализе выхода фотонейтронов. Однако в отличие от моделей, рассмотренных в других работах, при учете комптоновского рассеяния не используется параметризация.

**Ключевые слова:** фотонейтрон, спектр Шиффа, эффект Комптона, бетатрон.

### Range of Gamma Quanta in the Beryllium Target

М. А. Klochkov, G. N. Zalesny

Changes of an initial brake range of gamma quanta in a sample are analysed. It is shown that the main mechanism influencing  $\gamma$  quanta

range form in a sample of beryllium is Compton's effect. In work this amendment is considered in the analysis of an exit of photoneutrons. However unlike the models considered in other works at the accounting of Compton dispersion parametrization isn't used.

**Key words:** photoneutron, Schiff's range, Compton's effect, betatron.

Проведенные исследования сечения фотонейтронных реакций на  ${}^9\text{Be}$  с использованием пучка тормозного излучения 25 МэВ бетатрона Саратовского государственного университета показали, что в области энергий  $E \sim 4$  МэВ в сечении проявляются структурные особенности, не коррелирующие с хорошо изученным спектром низколежащих уровней этого ядра.



Для объяснения возможных причин их появления выдвигался ряд гипотез. Одна из гипотез – отличие реального тормозного спектра от теоретического спектра Шиффа [1] для тонкой мишени, который использовался в расчетах по восстановлению сечения из измеренного выхода. Возможными причинами, вызывающими такие отличия, могут быть характеристики пучка ускоренных электронов (флуктуации энергии от цикла к циклу, немонохроматичность пучка, изменение энергии электронов в процессе сброса их на тормозную мишень, наличие временных и температурных дрейфов геометрических параметров пучка и т.д.).

Для выявления отклонений экспериментального тормозного спектра от спектра Шиффа экспериментальные данные по выходу фотонейтронов из  ${}^9\text{Be}$  аппроксимировались модельной кривой выхода:

$$\int_{B_n}^{E_{\gamma\max}^i} \Phi(E_{\gamma\max}^i, E_{\gamma\max}, P) \sigma(E_{\gamma}) \varepsilon(E_{\gamma\max}^i - B_n) dE_{\gamma} = Y(E_{\gamma\max}^i),$$

где  $\Phi(E_{\gamma\max}, E_{\gamma}, P)$  – модельный спектр тормозного излучения;  $P$  – набор параметров;  $\sigma(E_{\gamma})$  – сечение фотопоглощения, для описания которого использовалась хорошо согласующаяся с теорией параметризации;  $\varepsilon(E_n)$  – рассчитанная методом Монте–Карло зависимость эффективности регистрации нейтронов детектором от их энергии.

В работе [2] рассматривались различные варианты спектров тормозного излучения: «чистый» спектр Шиффа для тонкой мишени; свертка спектра Шиффа с функцией Гаусса и ограниченная свертка спектра Шиффа с функцией Гаусса.

Из результатов, приведенных в таблице, следует, что использование модельных спектров значительно улучшает описание экспериментальных данных. Третий вариант спектра дает лучшее согласие между модельным и экспериментальным выходами фотонейтронов. Однако полученные значения параметров свидетельствуют о большой и асимметричной энергетической ширине пучка, что не соответствует условиям эксперимента.

Значения параметров и соответствующие величины  $\chi^2$

Модель спектра	Параметры	Значение $\chi^2$
Спектр Шиффа для тонкой мишени		324
Свертка спектра Шиффа с функцией Гаусса	$\delta=0.04$	66
Ограниченная свертка спектра Шиффа с функцией Гаусса	$\delta=0.069$ $\Delta=0.19$	33
Спектр Шиффа, изменяющийся в образце		74

Примечание.  $\delta$  – стандартное отклонение распределения Гаусса;  $\Delta$  – интервал ограничения свертки.

Другой причиной появления расхождений в определении сечений известных резонансов может быть изменение начального тормозного спектра квантов (спектра Шиффа) внутри образца. Как показал анализ, основным механизмом, влияющим на форму спектра  $\gamma$ -квантов в образце бериллия, может быть эффект Комптона. Сечения процессов – фотоэффекта и рождения электрон-позитронных пар – малы и ими можно пренебречь при анализе данного эксперимента. Расчет сечения эффекта Комптона производился с использованием методов квантовой электродинамики [3].

Результаты расчета выхода нейтронов с учетом изменения формы спектра  $\gamma$ -квантов внутри образца приведены в последней строке таблицы.

Как видно из таблицы, учет данной поправки дает результат, сопоставимый с результатом, полученным в модели со сверткой спектра Шиффа с функцией Гаусса.

На рис. 1 приведены кривые выхода нейтронов – экспериментальная и полученная с учетом изменения формы спектра, на рис. 2 – расчетные кривые спектра  $\gamma$ -квантов перед мишенью (спектр Шиффа) и внутри образца (середина мишени).

Как видно из рис. 2, спектр  $\gamma$ -квантов значительно меняет свою форму внутри образца бериллия. Учет этого дает существенную поправку при анализе выхода фотонейтронов в эксперименте. Однако в отличие от моделей, рассмотренных в работе [2], при учете комптоновского рассеяния не использовалось ни одного параметра.

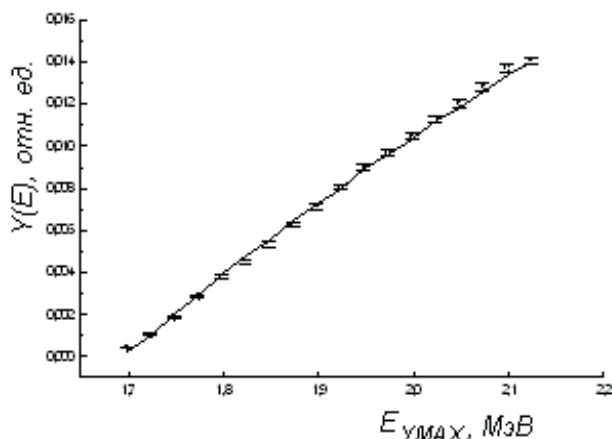


Рис. 1. Кривые выхода нейтронов – экспериментальная и полученная с учетом изменения формы спектра

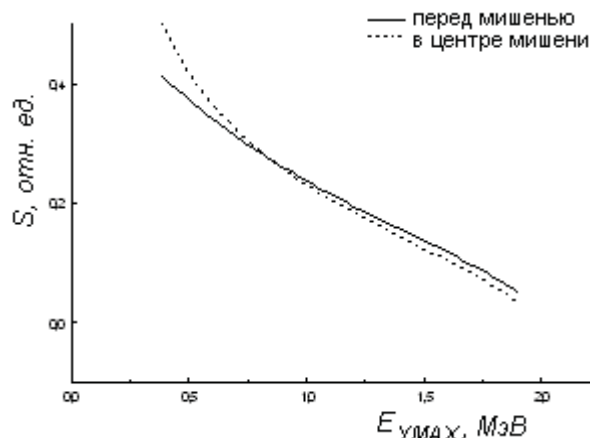


Рис. 2. Расчетные кривые спектра  $\gamma$ -квантов перед мишенью (спектр Шиффа) и внутри образца (середина мишени)

### Список литературы

1. Schiff L. Energy-Angle distribution of thin target bremsstrahlung // Phys. Rev. 1951. Vol. 83. P. 252.
2. Горячев А. М., Залесный Г. Н., Нечкин А. А., Сидоров В. И. Экспериментальная оценка формы тор-

мозного спектра  $\gamma$ -квантов в области максимальной энергии // Proc. of 6-th Intern. Workshop : BDO-99. Saratov, 2000. С. 32.

3. Берестецкий В. Б., Лифшиц Е. М., Путаевский Л. П. Квантовая электродинамика. М. : Наука, 1989. С. 720.

УДК 539.14

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ФОТОНЕЙТРОНОВ ИЗ $^{209}\text{Bi}$ ПРИ $E_{\gamma\text{max}} = 12$ МэВ

С. Н. Беляев, М. А. Клочков, А. А. Нечкин, В. И. Сидоров

Саратовский государственный университет  
E-mail: klochkov@sgu.ru

На пучке тормозного излучения бетатрона измерен энергетический спектр фотонейтронов из  $^{209}\text{Bi}$ . Измерения выполнены с помощью сцинтилляционного спектрометра на основе кристалла стильбена с дискриминацией  $\gamma$ -излучения по форме импульса. Полученные данные сравниваются с известными из литературы и анализируются на основе модели испарения.

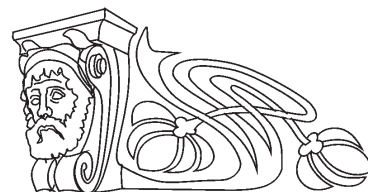
**Ключевые слова:** фотонейтрон, спектр, эмиссия, бетатрон, спектрометр.

**Power Range of Photoneutrons from  $^{209}\text{Bi}$  at  $E_{\gamma\text{max}} = 12$  MeV**

S. N. Belyaev, M. A. Klochkov, A. A. Nechkin, V. I. Sidorov

On a bunch of brake radiation of the betatron the power range of photoneutrons from  $^{209}\text{Bi}$  is measured. Measurements are executed by means of a scintillation spectrometer on the basis of a stilbene crystal with discrimination  $\gamma$ -radiations in an impulse form. The obtained data are compared with known of literature and analyzed on the basis of evaporation model.

**Key words:** photoneutron, range, issue, betatron, spectrometer.



### Введение

Известно, что анализ энергетических распределений продуктов распада атомных ядер среднего и тяжелого веса, в частности фотонейтронов, позволяет достаточно надежно выделить компоненты, обусловленные различными механизмами распада их возбужденных состояний. В большинстве случаев энергетические спектры фотонуклонов удается описать в рамках статистических моделей. Формирование их низкоэнергетической компоненты связывают с распадом ядра из равновесного состояния и описывают в рамках модели испарения, а жесткую часть – с распадом на стадии релаксации и интерпретируют в приближениях модели предравновесного распада [1, 2]. Однако в ряде работ, посвященных экспериментальному исследованию спектров фотонейтронов, наблюдались структуры, которые не удается описать в рамках вышеназванных представлений [3–5]. Такие экспериментальные данные немногочис-



ленны, разрознены и не позволяют установить природу наблюдаемых структур и описать их свойства. Решение таких задач требует дополнительных исследований. В качестве составной части таких исследований следует считать представляемую работу, посвященную изучению энергетического спектра фотонейтронов из ядра  $^{209}\text{Bi}$ , испущенных под углом  $\Theta = 90^\circ$  относительно направления пучка тормозных  $\gamma$ -квантов.

### Методика измерений

Эксперимент проводился на пучке тормозного излучения бетатрона Саратовского государственного университета при максимальной энергии  $E_{\gamma\text{max}} = 12$  МэВ. Энергетический спектр нейтронов измерялся с помощью сцинтилляционного спектрометра быстрых нейтронов на основе монокристалла стильбена (диаметр = 30 мм, высота = 20 мм) и фотоумножителя ФЭУ-93 с дискриминацией  $\gamma$ -излучения методом сравнения полного заряда на выходе фотоумножителя с его частью, обусловленной быстрой компонентой сцинтилляции. Для измерения спектра протонов отдачи использовался многоканальный амплитудный анализатор АИ-1024-4. Порог регистрации соответствовал энергии нейтронов  $\epsilon = 0,9$  МэВ.

Градуировка энергетической шкалы спектрометрического канала и ее контроль во время измерения проводились с помощью источников  $\gamma$ -излучения  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$  и Pu-Be источника нейтронов. Для восстановления энергетического спектра нейтронов из спектра протонов отдачи применялась процедура дифференцирования со сглаживанием в приближении прямоугольной формы функции отклика.

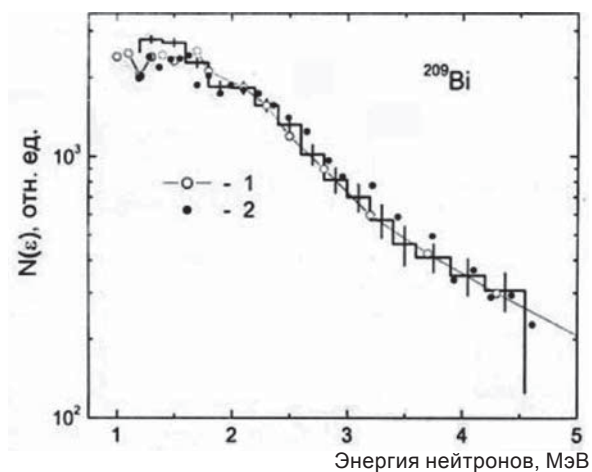


Рис. 1. Сравнение энергетических спектров фотонейтронов из  $^{209}\text{Bi}$ . Гистограмма – данная работа; 1 – [4]; 2 – [5]. Экспериментальные данные совмещены в интервале  $\epsilon = 2,2\text{--}2,4$  МэВ

При измерении энергетического спектра фотонейтронов из висмута образец, имеющий форму диска диаметром 40 мм и толщиной  $3,91$  г/см<sup>2</sup>, помещался в пучок коллимированных  $\gamma$ -квантов таким образом, чтобы оси пучка и образца совпадали. Чтобы уменьшить поток  $\gamma$ -квантов с энергией ниже порога  $(\gamma, n)$ -реакции, перед коллиматором помещался фильтр из графита толщиной 25 см. Детектор располагался на расстоянии 15 см от образца под углом  $\Theta = 90^\circ$ . Регистрация фотонейтронов обеспечивалась только в момент прохождения пучка тормозного излучения, длительность которого составляла 5 мкс. Для уменьшения фона  $\gamma$ -квантов детектор окружался свинцовым экраном толщиной 10 см. С фронтальной стороны толщина экрана составляла 5 см. При измерении фона на место образца помещался цилиндр из алюминия диаметром 40 мм и высотой 60 мм. При обработке экспериментальных данных вводилась поправка, учитывающая деформацию формы исходного спектра фотонейтронов в результате взаимодействия нейтронов со свинцовым экраном, расположенным перед нейтронным детектором. Поправочная функция определялась из вспомогательных измерений нейтронного спектра с испарительной формой. Также учитывалось изменение формы тормозного спектра  $\gamma$ -квантов в графитовом фильтре.

### Результаты измерений и их обсуждение

Энергетический спектр фотонейтронов из  $^{209}\text{Bi}$ , полученный в результате измерений, представлен на рис. 1, 2 в виде гистограммы, указанные погрешности – статистические.

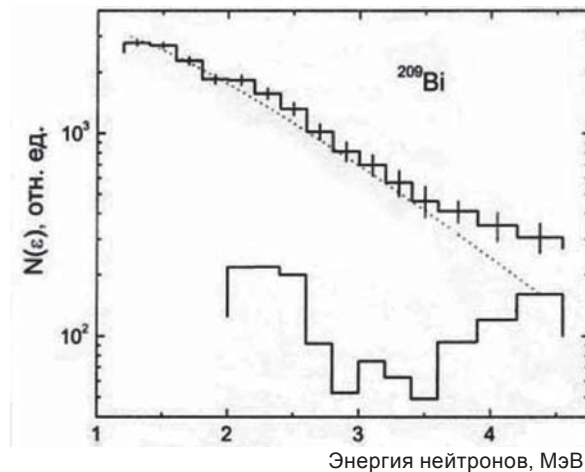


Рис. 2. Анализ энергетического спектра фотонейтронов из  $^{209}\text{Bi}$ . Штриховая линия «испарительная» компонента спектра. Нижняя гистограмма – неравновесная компонента





На рис. 1 полученный спектр фотонейтронов из  $^{209}\text{Bi}$  сравнивается с известными из измерений, выполненных методом времени пролета. Открытыми кружочками, соединенными ломаной линией, изображен энергетический спектр нейтронов, полученный в работе [4]. В этой работе нейтроны регистрировались камерой, деления, установленной под углом  $\Theta = 90^\circ$  относительно пучка электронов с энергией  $E_e = 16$  МэВ. Точками представлен спектр нейтронов, полученный на пучке тормозного излучения с максимальной энергией  $E_{\gamma\text{max}} = 14.3$  МэВ [5]. В этой работе энергия нейтронов, испущенных под углом  $\Theta = 120^\circ$ , определялась с помощью пластического сцинтиллятора.

Из рис. 1 видно, что сравниваемые данные хорошо согласуются. При этом энергетические распределения фотонейтронов имеют «испарительную» форму. Наблюдаемое поведение формы спектра свидетельствует о доминирующей роли механизма равновесного распада. В то же время в области  $\sim 2$  МэВ наблюдается отчетливый излом, указывающий на присутствие в спектрах нейтронов, обусловленных механизмами эмиссии, отличными от испарения. Такие энергетические спектры хорошо поддаются анализу на основе традиционных соотношений статистической теории ядерных реакций [6].

Согласно [6] энергетические спектры нейтронов, обусловленные равновесным механизмом распада, описываются соотношением:

$$N(\varepsilon) = \text{const } \varepsilon \sigma_c(\varepsilon) p(U), \quad (1)$$

где  $N(\varepsilon)$  – интенсивность вылета нейтрона с энергией  $\varepsilon$ ;  $\sigma_c$  – сечение обратной реакции;  $p(U)$  – плотность уровней остаточного ядра с энергией возбуждения  $U = U_0 - B_n - \varepsilon$ ;  $U_0$  – энергия возбуждения составного ядра;  $B_n$  – порог реакции. Плотность уровней представляется в приближении модели ферми-газа  $p(U) = 1/U^n \exp(2\sqrt{aU})$  или, когда энергетически возможен вылет только одного нуклона, в приближении постоянной температуры  $p(U) \sim \exp(-\varepsilon/T)$ .

В данной работе предполагалось, что спектр равновесных фотонейтронов можно описать выражением

$$N(\varepsilon) = \text{const } \varepsilon \exp(-\varepsilon/T_{\text{eff}}). \quad (2)$$

Здесь  $T_{\text{eff}}$  – некоторая эффективная температура остаточного ядра, зависящая как от термодинамических свойств ядра, так и от распределения

энергии возбуждения, определяемого сечением реакции  $\sigma_{\gamma n}(E_\gamma)$  и спектром тормозного излучения. В случае висмута сечение  $\sigma_c(\varepsilon)$  в рассматриваемой области является плавной функцией энергии и можно положить  $\sigma_c(\varepsilon) = \text{const}$ .

Анализ спектров испущенных частиц на основе соотношения (2) заключается в определении ядерной температуры. Затем по ядерной температуре вычисляется параметр плотности уровней остаточного ядра.

Ядерная температура  $T_{\text{eff}}$  находилась по наклону прямой  $\ln[N(\varepsilon)/\varepsilon] = \text{const} - \varepsilon/T_{\text{eff}}$ , которая проводилась через экспериментальные данные в интервале энергий 1.3–1.9 МэВ методом наименьших квадратов. Энергетический спектр равновесных фотонейтронов изображен на рис. 2 штриховой линией. Параметр плотности уровней остаточного ядра  $a$  вычислялся по ядерной температуре  $T_{\text{eff}}$  [7]:

$$a = \left( \frac{1}{T_{\text{eff}}} + \frac{n}{U_{\text{eff}}} \right)^2 U_{\text{eff}},$$

где  $n$  – показатель степени предэкспоненциального множителя для плотности уровней в модели ферми-газа;  $U_{\text{eff}}$  – эффективная энергия возбуждения остаточного ядра  $^{208}\text{Bi}$  после испускания нейтрона, определяемая следующим образом:

$$U_{\text{eff}} = \overline{E_\gamma} - (B_n + 2T_{\text{eff}}).$$

Средняя энергия  $E_\gamma$  определялась в приближениях, описанных в работе [8], на основе известного сечения фотовозбуждения  $\sigma(E_\gamma)$  [9] с учетом формы спектра тормозного излучения  $S(E_{\gamma\text{max}}, E_\gamma)$  [10].

Основные результаты анализа энергетического спектра фотонейтронов из  $^{209}\text{Bi}$  приведены в таблице. В этой же таблице полученные данные сравниваются с известными из анализа спектров фотонейтронов, измеренных на пучках тормозного излучения при  $E_{\gamma\text{max}} = 15.8$  МэВ [11] и  $E_{\gamma\text{max}} = 20$  МэВ [8], из измерений фотонейтронных сечений с применением квазимонохроматических  $\gamma$ -квантов [9] и из систематики [12]. Заметим, что в работе [11] значение  $T_{\text{eff}}$  определялось из анализа спектра, полученного в работе [5].

Из таблицы видно, что сравниваемые значения ядерных температур и параметров плотности уровней остаточного ядра  $^{208}\text{Bi}$  находятся в удовлетворительном согласии. Традиционно



отклонения экспериментальных данных от описываемых соотношением (2) связывают с вкладом нейтронов, обусловленных механизмами эмиссии, отличными от испарительного. Поэтому представляется целесообразным получить энергетический спектр неравновесных нейтронов и оценить их вклад в общее число испущенных частиц.

**Сравнение значений ядерной температуры  $T_{eff}$  и параметра плотности уровней  $a$  остаточного ядра  $^{208}\text{Bi}$ , полученных в данной работе, с известными из литературы**

$T_{eff}$ , МэВ	$a$ , МэВ <sup>-1</sup>			Источник
	$n = 5/4$	$n = 3/2$	$n=2$	
0.75±0.07	6.7	8.0	10.8	Данная работа [11]
0.76	–	–	–	
0.92±0.04	8.2	–	10.4	
	–	–	10.2±1.1	
0.83	–	9.92	–	[12]

Энергетический спектр таких фотонейтронов, полученный вычитанием из экспериментальных данных спектра, вычисленного с помощью соотношения (2), представлен в виде гистограммы в нижней части рис. 2. Видно, что в спектре неравновесных нейтронов, доля которых составляет ~ 7% от общего числа испущенных частиц с энергией  $\epsilon > 1.2$  МэВ, наблюдаются две группы частиц, локализованных в области энергий 2–2.8 МэВ и  $> 3.5$  МэВ. Такое поведение энергетического распределения невозможно объяснить в рамках существующих моделей, основанных на простых статистических представлениях и может быть связано с проявлением прямых или почти прямых процессов.

## Список литературы

1. Живописцев Ф. А., Кэбин Э. И., Сухаревский В. Г. Модели предравновесных ядерных реакций. М. : Изд-во МГУ, 1987. 253 с.
2. Лепесткин А. И., Селиверстов В. А., Сидоров В. И. Энергетические распределения фотонейтронов из тяжелых ядер при  $E_{\gamma\text{max}} = 28,5$  МэВ // Ядерная физика. 1985. Т. 42. С. 801.
3. McNeil K G., Hewitt J. S., Jury J. W. Fine structure in the fotonutron spectra from . prazeodynmr-141 and lead // Can. J. Phys. 1970. Vol. 48. P. 950.
4. Глазунов Ю. А., Савин М. В., Сафина И. Н., Хохлов Ю. А. Спектры фотонейтронов из платины, висмута, свинца и урана // ЖЭТФ. 1964. Т. 46. С. 1906.
5. Bertozzi W., Paolini F.R., Sargent C. P. Time-of-flight measurement of fotonutron energy spectra // Phys. Rev. 1958. Vol. 110. P. 790.
6. Блатт Дж., Вайскопф В. Теория ядерных реакций / пер. с англ. М. : Изд-во иностр. лит., 1954. 658 с.
7. Малышев А. В. Плотность уровней и структура атомных ядер. М. : Атомиздат, 1969. 144 с.
8. Лепесткин А. И., Сидоров В. И. Неравновесные фотонейтроны и статистические характеристики тяжелых ядер в фотоядерном эксперименте // Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1984. Т. 48. С. 355.
9. Harvey R. R., Caldwell J. T., Bramblet R. L., Fultz S. C. Photoneutron cross sections of 206-208Pb, 209Bi // Phys. Rev. 1964. Vol. 136B. P. 126.
10. Богданкевич О. В., Николаев Ф. А. Работа с пучком тормозного излучения. М. : Атомиздат, 1964. 247 с.
11. Ратнер Б. С. О некоторых особенностях энергетических спектров фотонейтронов из средних и тяжелых ядер // ЭЧАЯ. 1981. Т. 12. С. 1492.
12. Gilbert A., Cameron A. G. W. A composite nuclear-level density formula with shell corrections // Can. J. Phys. 1965. Vol. 430. P. 1446.

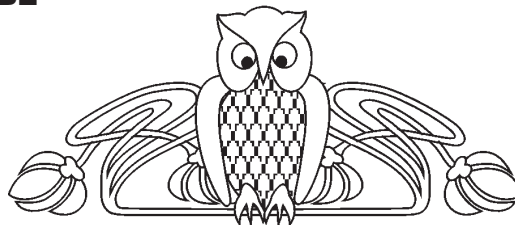


УДК 621.382.032.27

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОПОЛОГИИ КОНТАКТНЫХ ПЛОЩАДОК НА ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАНИЙ ТОКА В МЕЗАПЛАНАРНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ПОЛУИЗОЛИРУЮЩЕГО АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

И. О. Кожевников, А. И. Михайлов, Д. Н. Браташов

Саратовский государственный университет  
E-mail: kozhevnikov\_io@mail.ru



Приведены экспериментальные результаты исследования влияния характера распределения электрического поля между контактными площадками мезапланарных резисторных структур на основе пластин *n*-GaAs марки САГ-2БК посредством изменения их топологии (плоскопараллельная, плоскозаостренная, встречно-заостренная и вогнуто-заостренная) на воспроизводимость параметров возникающих в них токовых колебаний в сильном электрическом поле: величина порогового напряжения, частота и амплитуда токовых колебаний. Установлено, что структуры со встречно-заостренной топологией металлических площадок, способствующей концентрации электрического поля у острия и сужению области протекания тока, обладают наибольшей воспроизводимостью таких параметров, как величина порогового напряжения возникновения токовых колебаний и их амплитуда. Для структур с плоскопараллельной формой контактов воспроизводимость результатов экспериментальных измерений наименьшая вследствие высокого влияния краевых эффектов.

**Ключевые слова:** полуизолирующий арсенид галлия, рекомбинационная неустойчивость тока, функциональная электроника.

### Research of the Contact Pads Topology Influence on the Parameters Reproducibility of the Current Oscillations in Mesa-Planar Structures Based on Semi-Insulating Gallium Arsenide

I. O. Kozhevnikov, A. I. Mikhailov, D. N. Bratashov

Experimental results of research the influence of the electric field distribution between the pads of mesa-planar resistor structures based on semi-insulating *n*-GaAs are represented. These influence by changing pads topology (plane-parallel, flat-pointed, counter-pointed and concave-pointed) was studied for the current oscillations parameters (the threshold voltage, frequency and amplitude of current oscillations) reproducibility increasing. It was found that the structures with counter-pointed topology metal sites improves the concentration of the electric field at the tip and a narrows the field of current flow, has a highest reproducibility of parameters such as the magnitude of the current oscillations occurrence threshold voltage and the amplitude of oscillation. For structures with a plane-parallel contact form reproducibility of experimental measurements is the smallest due to the high influence of edge effects.

**Key words:** semi-insulating gallium arsenide, recombination current instability, functional electronics.

Одним из перспективных направлений развития современной полупроводниковой электроники является функциональная микроэлектроника. Динамические неоднородности в твердом теле, обеспечивающие несхемотехнические принципы работы устройств, представляют значительный интерес для создания принципиально новых приборов функциональной электроники [1, 2]. В работе [3] описываются фотоэлектрические функциональные приборы на основе кремния, принцип работы которых основан на одном из видов рекомбинационной неустойчивости тока – поверхностно-барьерной – приводящей к периодическим колебаниям тока во внешней электрической цепи, частота и амплитуда которых меняется при освещении вблизи поверхностно-барьерного перехода структуры.

Компенсированный GaAs является средой, в которой в сильных электрических полях в результате захвата электронов глубокими примесными центрами в объеме кристалла также возможно образование динамической неоднородности электрического поля и пространственного заряда, сопровождающееся колебаниями тока во внешней электрической цепи [4–6]. Значения амплитуды и частоты токовых колебаний, наблюдавшихся в работе [7], а также зависимости тока от напряжения, частоты токовых колебаний от интенсивности засветки активной полупроводниковой области оптическим излучением в диапазоне длин волн, соответствующем собственному поглощению GaAs, и отсутствие частотной зависимости от величины сопротивления нагрузочного резистора позволяют утверждать, что данный вид неустойчивости связан с неустойчивостью пространственного заряда в исследуемой структуре и относится к классу рекомбинационных неустойчивостей [5, 6].



Планарные фоторезисторные структуры, рассматриваемые в работе [7], имеют перспективу использования в качестве основы для создания функциональных оптоэлектронных приборов с частотным выходным сигналом и обладают высокой чувствительностью в видимом и ИК-диапазонах. Целью данной работы является повышение воспроизводимости основных выходных параметров функциональных приборов на основе планарно-эпитаксиальных резисторных мезоструктур полуизолирующего  $n$ -GaAs.

Приборы функциональной микроэлектроники, как правило, чувствительны к особенностям технологии изготовления. В большинстве случаев это обусловлено особенностями физических процессов, лежащих в основе работы конкретного функционального прибора. Наиболее важными выходными параметрами функционального прибора, рассматриваемого в данной работе, являются величина порогового напряжения возникновения токовых колебаний, их частота и амплитуда. В работе [7] установлено, что положение участка области отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) на  $N$ -образной вольт-амперной характеристике исследуемых структур, соответствующее напряжению возникновения колебаний тока, зависит от расстояния между контактными площадками. Поскольку динамическая неоднородность образуется и распространяется в межконтактной области полупроводника, форма распределения электрического поля в этой области должна оказывать влияние на характер поведения данной динамической неоднородности. Одним из способов воздействия на характер распределения электрического поля между контактными площадками является изменение их топологии. Таким образом, решались следующие задачи: создание мезопланарных структур  $n^+ - n - n^- - n - n^+$  с металлическими контактными площадками различной топологии (плоскопараллельная, плоско-заостренная, встречно-заостренная и вогнуто-заостренная); исследование влияния топологии контактных площадок структур на параметры возникающих колебаний тока (величина порогового напряжения, частота и амплитуда токовых колебаний); выбор топологии контактных площадок, обеспечивающей наибольшую воспроизводимость электрофизических параметров при производстве прибора.

Экспериментальные образцы изготовлены из эпитаксиальных пластин  $n$ -GaAs марки САГ-

2БК методом фотолитографии и представляют собой планарно-эпитаксиальные мезоструктуры  $n^+ - n - n^- - n - n^+$  с металлическими контактами на основе AuGe/Ni/Au. Параметры исходных эпитаксиальных пластин следующие: концентрация электронов в полуизолирующем слое  $n^- < 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , толщина слоя –  $350 \pm 25 \text{ мкм}$ , концентрация электронов в слое  $n = 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , толщина слоя –  $0,3 \pm 0,01 \text{ мкм}$ , концентрация электронов в контактном слое –  $n^+ = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , его толщина –  $0,2 \pm 0,01 \text{ мкм}$ . Согласно результатам анализа изображений атомно-силовой микроскопии (АСМ), проведенных с помощью программы Gwyddion 2.40, средняя по строкам шероховатость поверхности полуизолирующей области между металлическими контактными площадками структуры после травления в растворе  $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2$  (полирующий травитель) для создания мезоструктур составляет  $0,96 \pm 0,15 \text{ нм}$ .

На рис. 1 приведены варианты топологии контактных площадок исследуемых образцов планарно-эпитаксиальных мезоструктур (вид сверху). Темным цветом обозначены нестравленные участки с чередующимися слоями  $n$ ,  $n^+$  и металла, формирующие контактные площадки. Наименьшее расстояние между площадками составляет  $60 \pm 0,5 \text{ мкм}$ . Угол как заостренного, так и вогнутого контактов равен  $90^\circ$ . Пунктирной линией на рисунке обозначены предположительные границы областей протекания основного тока между контактными площадками различной топологии. Полярность прикладываемого напряжения соответствует указанной на рисунке. Влияние полярности прикладываемого напряжения на параметры токовых колебаний в данной работе не учитывалось.

Выбор представленных вариантов топологии (см. рис. 1) обусловлен следующими особенностями. Плоскопараллельная форма является наиболее распространенной и в идеальном случае предполагает однородное распределение электрического поля в межконтактной области (за исключением близким к краям областей, обозначенных пунктирной линией). Однако, как видно на изображении АСМ (рис. 2), реальная граница контактных площадок неравномерна, что в результате проявления краевых эффектов способствует непредсказуемому распределению электрического поля и формированию пути протекания тока между участками с наименьшим сопротивлением.



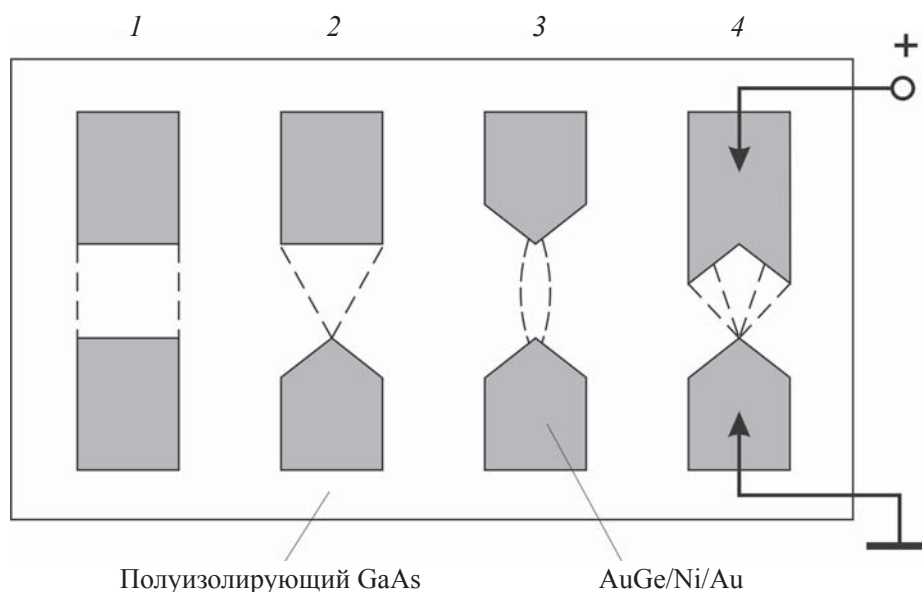


Рис. 1. Варианты топологии контактных площадок исследуемых планарно-эпитаксиальных мезоструктур: 1 – плоскопараллельная, 2 – плоско-заостренная, 3 – встречно-заостренная, 4 – вогнуто-заостренная; и предполагаемые области протекания тока (пунктирная линия)

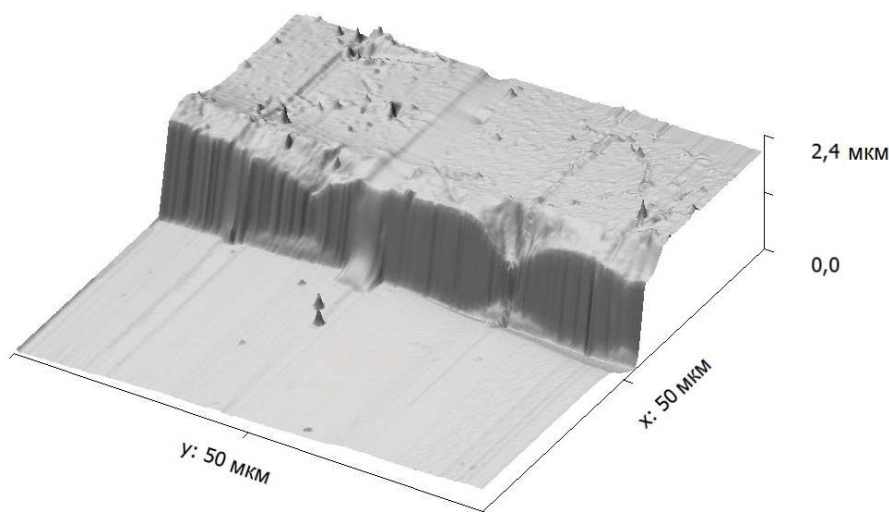


Рис. 2. Изображение АСМ края контактной площадки плоской формы

Для повышения локализации электрического поля в межконтактной области использовались контактные площадки заостренной формы с радиусом закругления острия 0.8 мкм (согласно результатам измерений АСМ, приведенным на рис. 3). Плоско-заостренная форма (см. рис. 1) характеризуется концентрированием электрического поля у острия одной контактной площадки при его однородном распределении у другой. В данном варианте возможно проявление краевых эффектов для плоской площадки.

Встречно-заостренная форма (см. рис. 1) предполагает концентрирование электрического поля на остриях обеих контактных площадок, что способствует протеканию тока в узкой области («шнуре») между ними, но приводит к большему увеличению сопротивления, чем в случае с плоско-заостренной топологией контактных площадок.

Вогнуто-заостренная форма (см. рис. 1) предполагает неоднородность распределения электрического поля в промежутке между контактными площадками вследствие концентрирования

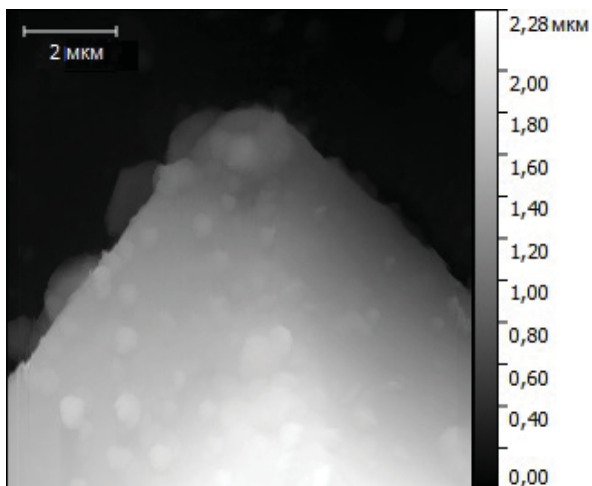


Рис. 3. Изображение АСМ острия контактной площадки заостренной формы

электрического поля у острия и двух выступающих областей второго контакта вогнутой формы. Величина сопротивления структуры с данной топологией соответствует случаю с плоскопараллельной формой контактных площадок. При этом согласно изображению АСМ на рис. 4 также вероятен вклад краевых эффектов из-за неровностей на границе контактной площадки вогнутой формы.

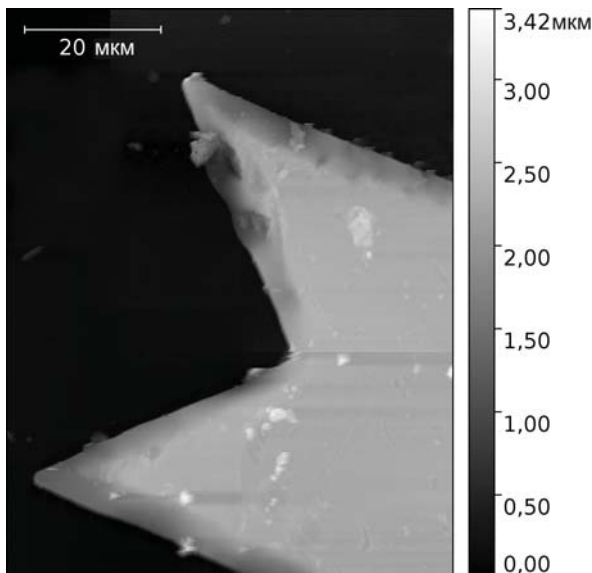


Рис. 4. Изображение АСМ контактной площадки вогнутой формы

Изображения АСМ были получены с помощью атомно-силового микроскопа NTEGRA Spectra (NTMDT, Зеленоград). Использовались зонды NSG10 (NTMDT) с резонансной частотой

той  $\sim 240$  кГц и паспортным радиусом закругления зонда  $< 10$  нм.

Для измерения параметров токовых колебаний, возникающих в исследуемых структурах, использовалась экспериментальная установка (рис. 5), состоящая из микроскопа МБС-1, предметного столика с вольфрамовыми зондами (диаметром 20 мкм), соединительной схемы с нагрузочным резистором, стабилизированного источника постоянного напряжения Б5-49 и осциллографа АКПП-4115/5А.

Порядок проведения экспериментального исследования состоял в следующем. С помощью вольфрамовых зондов к контактным площадкам исследуемой структуры прикладывалось постоянное смещение в диапазоне 10–50 В. При превышении порогового напряжения, соответствующего участку ОДС на  $N$ -образной вольт-амперной характеристике структуры, во внешней электрической цепи возникали колебания тока с частотой в диапазоне 5–100 кГц, которые фиксировались с помощью осциллографа как колебания напряжения на нагрузочном резисторе ( $R_n = 100$  Ом), включенном последовательно с исследуемой структурой.

Диаграммы распределений экспериментальных значений порогового напряжения возникновения токовых колебаний и их амплитуды для четырех вариантов топологии контактных площадок приведены на рис. 6, а и б соответственно. Количество образцов для каждого варианта составляло 50. Из приведенных на рис. 6 результатов измерений видно, что экспериментальные значения порогового напряжения возникновения токовых колебаний для вариантов структур с плоско-заостренной, встречно-заостренной и вогнуто-заостренной топологией контактных площадок, в отличие от плоскопараллельной, имеют нормальное распределение со схожими параметрами. Таким образом, можно утверждать, что принудительное создание локализации электрического поля между контактными площадками в результате использования контактных площадок заостренной формы, приводит к повышению воспроизводимости значений порогового напряжения возникновения токовых колебаний. При этом, как и следовало ожидать, наибольший процент повторяемости экспериментальных результатов (18%), а также наименьшее значение среднеквадратического отклонения ( $\sigma = 3.9$  В) и дисперсии ( $D = 15.5$  В) экспериментальных результатов характерны для структур с встречно-заостренной формой контактных площадок.

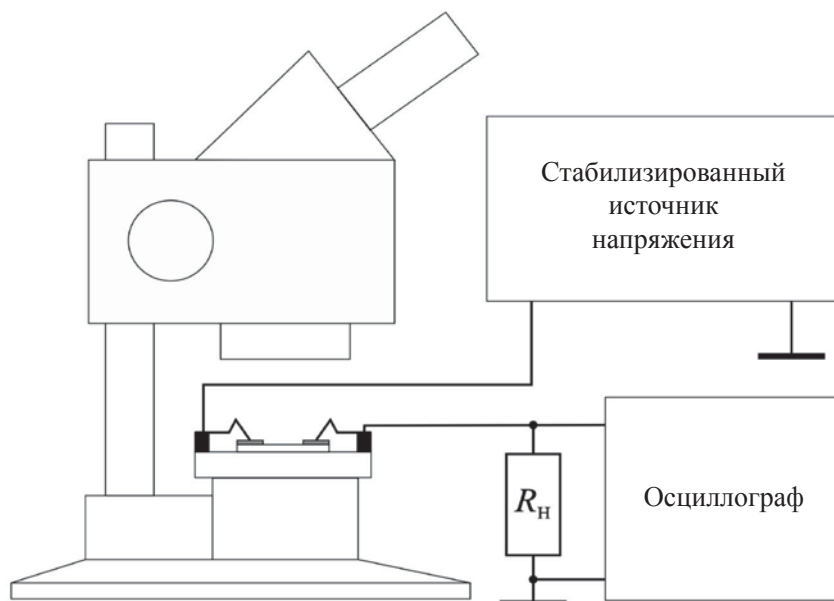


Рис. 5. Схема установки для измерения параметров токовых колебаний

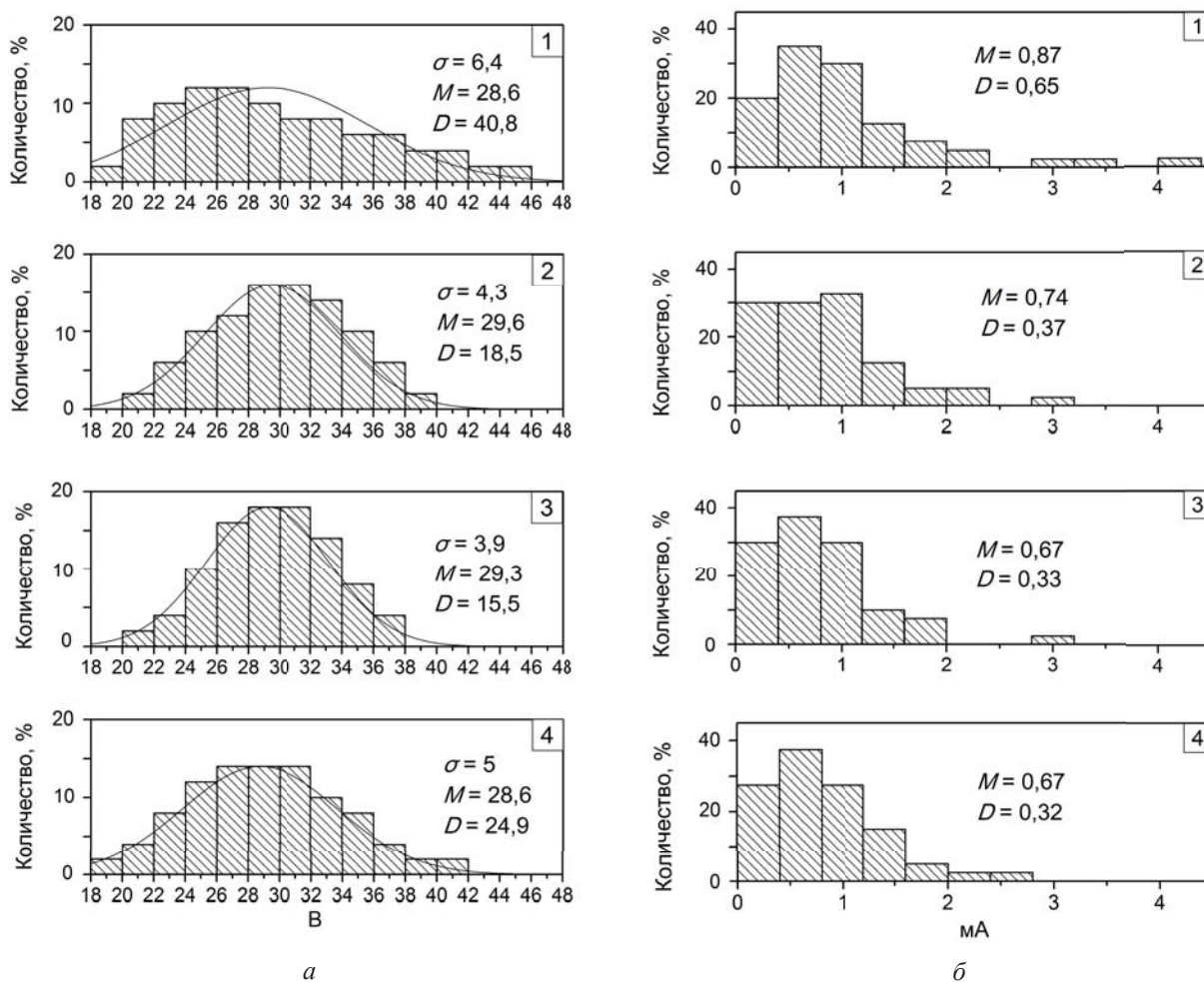


Рис. 6. Распределение экспериментальных значений порогового напряжения возникновения токовых колебаний (а) и их амплитуды (б) для четырех вариантов топологий контактных площадок: 1 – плоскопараллельная, 2 – плоско-заостренная, 3 – встречно-заостренная, 4 – вогнуто-заостренная



Отклонение значений математического ожидания  $M$  для всех четырех вариантов топологии контактных площадок не превышает 1 В.

Вид распределений экспериментальных значений амплитуды токовых колебаний отличен от нормального для всех вариантов топологии контактных площадок. При этом структуры с встречно-заостренной и вогнуто-заостренной формой контактных площадок имеют наименьшую дисперсию экспериментальных значений  $D = 0.33$  мА.

Распределения экспериментальных значений частоты токовых колебаний для всех вариантов топологии контактных площадок имеют неоднозначный вид и не поддаются статистическому анализу, что говорит об отсутствии влияния характера распределения электрического поля между контактными площадками на воспроизводимость данного выходного параметра.

Таким образом, установлено, что при создании мезапланарных структур  $n^+ - n - n^- - n - n^+$  на основе эпитаксиальных пластин марки САГ-2БК использование металлических площадок с топологией, способствующей концентрированию электрического поля и сужению области протекания тока, приводит к увеличению воспроизводимости таких выходных параметров, как величина порогового напряжения возникновения токовых колебаний и их амплитуда. В результате обобщения результатов проведенного анализа экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что для производства функционального фотоэлектрического прибора на основе пластин  $n$ -GaAs указанной марки наиболее применимыми являются структуры с встречно-заостренной формой контактных площадок, обладающие наименьшей дисперсией и среднеквадратическим отклонением экспериментальных значений: по пороговому напряжению –  $D = 15.5$  В и  $\sigma = 3.9$  В; по

амплитуде токовых колебаний –  $D = 0.33$  мА. Влияния топологии контактных площадок на воспроизводимость результатов экспериментальных измерений частоты токовых колебаний выявлено не было, что позволяет утверждать о невозможности повышения воспроизводимости данного выходного параметра с помощью изменения характера поверхностного распределения электрического поля в межконтактной области исследуемой структуры.

#### Список литературы

1. Гуляев Ю. В. Акустоэлектроника : исторический обзор // УФН. 2005. Т. 175, № 8. С. 887–895.
2. Шука А. А. Электроника / под ред. А. С. Сигова. СПб. : БХВ-Петербург, 2006. 800 с.
3. Муравский Б. С., Рубцов Г. П., Григорьян Л. Р., Куликов О. Н. Электрофизические и фотоэлектрические свойства транзисторных структур с распределенным эмиттером и функциональные приборы на их основе // Журнал радиоэлектроники : электрон. журн. 2000. № 10. URL: <http://jre.cplire.ru/alt/oct00/2/text.html> (дата обращения: 30.03.2014).
4. Neumann A. Slow domains in semi-insulating GaAs // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 90, № 1. P. 1–26.
5. Kiyama M., Tatsumi M., Yamada M. Electric-field-enhanced electron capture coefficient of EL2 level in semi-insulating GaAs // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 86, № 1. P. 012102.
6. Oliveira A. G. de, Ribeiro G. M., Albuquerque H. A., Moreira M. V. B., Rodrigues W. N., Gonzalez J. C., Rubinger R. M. Blockade of free carriers by hopping carriers leading to the low-frequency current oscillations in semi-insulating GaAs // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 74, № 3. P. 035204.
7. Михайлов А. И., Митин А. В., Кожевников И. О. Особенности возникновения устойчивых колебаний тока большой амплитуды в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах на основе арсенида галлия // Микроэлектроника СВЧ : Всерос. конф. : сб. тр. СПб. : СПбГЭТУ, 2012. Т. 1/2. С. 49–53.





УДК 621.372.2

## СВЧ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ. НОВЫЕ СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Д. А. Усанов<sup>1</sup>, М. К. Мерданов<sup>2</sup>, А. В. Скрипаль<sup>1</sup>, Д. В. Пономарев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный университет

<sup>2</sup>ОАО «НПЦ «Электронное приборостроение»

E-mail: usanovda@info.sgu.ru



Приведены результаты теоретического и экспериментального обоснования возможности применения СВЧ фотонных кристаллов для создания широкополосных согласованных СВЧ-нагрузок. Показана возможность использования СВЧ фотонных кристаллов для измерения толщины и проводимости нанометровых полупроводниковых слоистых структур. Экспериментально продемонстрирована возможность электрического управления амплитудно-частотными характеристиками СВЧ фотонных кристаллов. Определены пути уменьшения размеров устройств на фотонных кристаллах.

**Ключевые слова:** СВЧ фотонный кристалл, согласованные нагрузки, измерения толщины и электропроводности, нанометровые полупроводниковые структуры, управление амплитудно-частотными характеристиками, резонатор СВЧ-микроскопа.

### Microwave Photonic Crystals. New Application Areas

D. A. Usanov, M. K. Merdanov,  
A. V. Skripal, D. V. Ponomarev

The theoretical and experimental justifications of the possibility to use the microwave photonic crystals for the creation of broadband loads have been presented. The possibility to simultaneously determine the thickness and the conductivity of nanometer semiconductor layered structures by use of the microwave photonic crystals has been shown. The possibility of electrical control of the microwave photonic crystals amplitude-frequency characteristic has been experimentally demonstrated. The means to reduce the sizes of the devices based on the microwaves photonic crystals have been determined.

**Key words:** microwave photonic crystal, loads, measurements of thickness and conductivity, nanometer semiconductor structures, amplitude-frequency characteristic controlling, microwave microscope's resonator.

В одной из пионерских работ по фотонным кристаллам [1] авторы называют их метаматериалами, имеющими периодически изменяющуюся в пространстве диэлектрическую проницаемость. С этой периодичностью связано наличие так называемой запрещенной для распространения электромагнитных волн зоны в спектре частот. Отметим, что авторы [1] имели в виду применение такого вида структур для направления и формирования потоков света. Авторы [2] отмечали существование аналогии между электронными волнами в кристалле и волнами света в периодической структуре. Это открыло возможность при-

менения понятий зонной теории твердого тела к оптическим волнам. Запрещенные зоны могут чередоваться с разрешенными. Запрещенные и разрешенные зоны в периодических диэлектрических структурах можно считать своего рода аналогами запрещенных и разрешенных зон в полупроводниках. Дефект фотонного кристалла в виде нарушения периодичности так же, как и в полупроводниках, может приводить к появлению в зонах локализованных состояний [1]. Авторы [1] утверждали, что точечный дефект может действовать как микрорезонатор, линейный – как волновод, плоский – как зеркало.

Отметим, что аналогия свойств периодических структур в СВЧ-диапазоне со свойствами спектров кристаллов при рассмотрении их энергетических зон отмечалась еще в начале 1960-х гг. разработчиками замедляющих систем для вакуумных СВЧ-приборов [3]. Авторы [3, с. 15] называли замедляющие системы «как бы искусственными кристаллами, ячейки которых имеют большие размеры». Спецификой решаемых задач определялся выбор элементов замедляющих систем из металлов. Примерами таких периодических систем являются «меандр», «встречные штыри», системы с чередующимися диафрагмами и др.

В [1] отмечается возможность очень точного теоретического описания характеристик электромагнитной волны, направленной на фотонный кристалл. Такая возможность подробно описывалась, например, в [4].

Известны примеры создания фотонных кристаллов в оптическом, инфракрасном, ультрафиолетовом, СВЧ-диапазоне. Для СВЧ-диапазона создать фотонный кристалл наиболее просто.

Возможности практического применения СВЧ фотонных кристаллов рассматривались в [5–9]. В качестве примеров приводятся высоконаправленные резонансные антенны, резонансные полости для размещения полупроводниковых детекторов, различные типы СВЧ-фильтров, в том числе с управляемыми характеристиками.



В настоящей работе рассмотрены возможности новых практических применений свойств СВЧ фотонных кристаллов.

Известны широко применяемые в технике СВЧ-устройства, называемые СВЧ-нагрузками. Проблема конструирования широкополосных согласованных нагрузок, несмотря на продолжительную историю их существования, и сегодня остается одной из актуальных задач СВЧ-радиоэлектроники. СВЧ-нагрузки широко применяются как самостоятельно, так и в составе сложных функциональных устройств направленных ответвителей, сумматоров, измерителей мощности, измерительных мостов, фильтров и т. д. [10, 11]. Одной из основных задач, которую необходимо решить при создании согласованных нагрузок, предназначенных для работы на малых и средних уровнях мощности СВЧ-излучения, является обеспечение согласования в максимально широком диапазоне частот при минимальных габаритах конструкции. Для решения такой задачи, как показано в [12], можно использовать свойства СВЧ фотонных кристаллов. В [13, 14] для обеспечения согласования было предложено использовать частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона от фотонных кристаллов, со-

держащих нанометровые металлические слои. Показано, что коэффициент отражения в таких системах может изменяться в очень широких пределах при незначительных вариациях толщины металлической пленки, не превышающей нескольких десятков нанометров.

В качестве СВЧ-нагрузки в [12, 13] предложено использовать фотонный кристалл, выполненный в виде короткозамкнутого с одной стороны отрезка волновода с размещенным внутри него СВЧ фотонным кристаллом, представляющим собой полностью заполняющую по поперечному сечению волновода структуру из чередующихся нанометровых металлических слоев с различными значениями толщины и диэлектрической проницаемости. Плоскости слоев были ориентированы перпендикулярно направлению распространения электромагнитной волны.

Для расчета коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны при ее падении на слоистую металлodieлектрическую структуру, состоящую из  $N$  слоев, использовалась матрица передачи волны между областями с различными значениями постоянных распространения волны, подобно тому, как это было сделано в [14–16]:

$$T(Z_{j,j+1}) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} \exp((\gamma_{j+1} - \gamma_j)Z_{j,j+1}) \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} \exp((\gamma_{j+1} + \gamma_j)Z_{j,j+1}) \\ \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} \exp(-(\gamma_{j+1} + \gamma_j)Z_{j,j+1}) \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} \exp(-(\gamma_{j+1} - \gamma_j)Z_{j,j+1}) \end{array} \right\},$$

которая связывает амплитуды падающих  $A_j, A_{j+1}$  и отраженных  $B_j, B_{j+1}$  волн по обе стороны от границы  $Z_{j,j+1}$  соотношением

$$\begin{pmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{pmatrix} = T(Z_{j,j+1}) \cdot \begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix}.$$

Коэффициенты  $A_{N+1}$  и  $B_0$ , определяющие амплитуды волны, прошедшей через многослойную структуру (рис. 1) [13], и волны, отраженной от нее, связаны с коэффициентом  $A_0$ , определяю-

щим амплитуду падающей волны, соотношением

$$\begin{pmatrix} A_{N+1} \\ B_0 \end{pmatrix} = T_N \cdot \begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix},$$

где

$$T_N = \begin{pmatrix} T_N[1,1] & T_N[1,2] \\ T_N[2,1] & T_N[2,2] \end{pmatrix} = \prod_{j=N}^0 T_{j,j+1} = T(Z_{N,N+1})T(Z_{N-1,N}) \dots T(Z_{1,2})T(Z_{0,1})$$

– матрица передачи слоистой структуры, состоящей из  $N$  слоев (см. рис. 1).

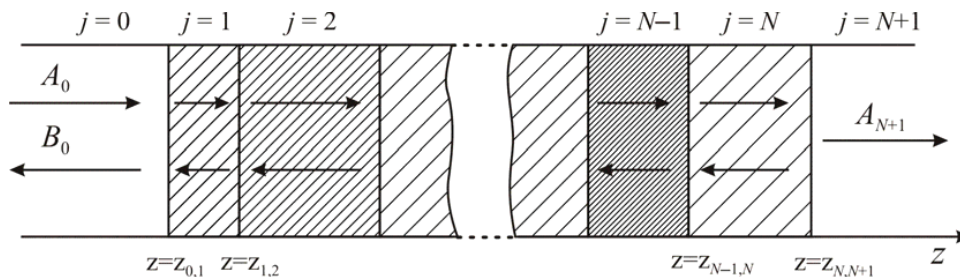


Рис. 1. Слоистая структура, состоящая из  $N$  слоев



Коэффициенты отражения  $R=B_0/A_0$  и прохождения  $D=A_{N+1}/A_0$  электромагнитной волны, взаимодействующей со слоистой структурой, определяются следующими соотношениями:

$$R = \frac{T_N[2,1]}{T_N[2,2]}, \quad D = \frac{T_N[1,1]T_N[2,2] - T_N[1,2]T_N[2,1]}{T_N[2,2]}.$$

Количество слоев, их толщины, диэлектрические проницаемости, электропроводности и порядок чередования слоев определялись в результате решения задачи по оптимизации таким образом, чтобы в заданном частотном диапазоне величины коэффициентов отражения и прохождения были меньше заданных значений. Оптимизация проводилась численно с использованием итерационного метода Левенберга – Марквардта.

Результаты расчетов  $|R|^2$  (сплошная кривая) и  $|D|^2$  (штриховая кривая) в диапазоне 8–12 ГГц при использовании СВЧ фотонного кристалла из 6 чередующихся слоев нанометровой металлической пленки, нанесенных на керамическую подложку ( $Al_2O_3$ ), представлены на рис. 2 [12, 13].

Аналогичные зависимости для диапазона 30–37 ГГц при использовании СВЧ фотонных кристаллов представлены на рис. 3.

Из результатов, приведенных на рис. 2, следует, что  $|R|^2$  менее –23 дБ получается в диапазоне 8.4 ÷ 11.2 ГГц,  $|D|^2$  менее –25 дБ в диапазоне 8 ÷ 12 ГГц,  $K_{сгУ} \leq 1.05$  – в диапазоне 8.4 ÷ 11.2 ГГц.

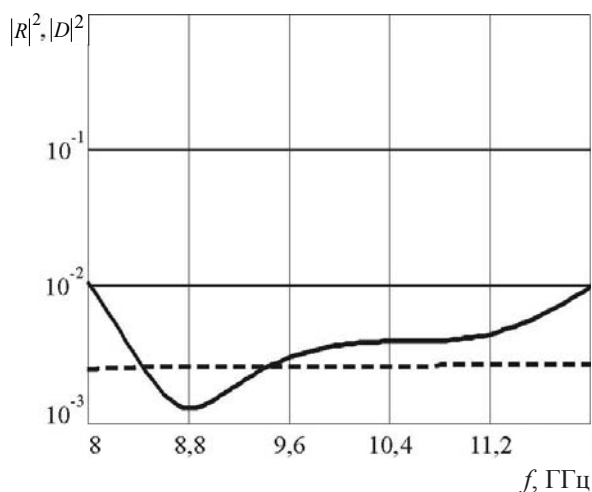


Рис. 2. Частотные зависимости  $|R|^2$  (—) и  $|D|^2$  (- - -) для согласованной нагрузки в трехсантиметровом диапазоне длин волн

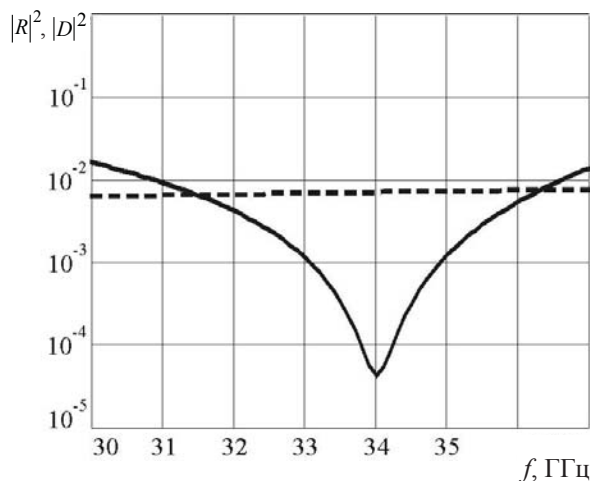


Рис. 3. Частотные зависимости  $|R|^2$  (—) и  $|D|^2$  (- - -) для согласованной нагрузки в восьмимиллиметровом диапазоне длин волн

В эксперименте использовались чередующиеся слои из поликора ( $\epsilon = 9.6$ ) и фторопласта ( $\epsilon = 2.1$ ) и нанослой металла (хром). Измерения проводились с помощью панорамного измерителя КСВН и ослабления Р2-61. Соответствующие экспериментальные зависимости приведены на рис. 4 [12, 13].

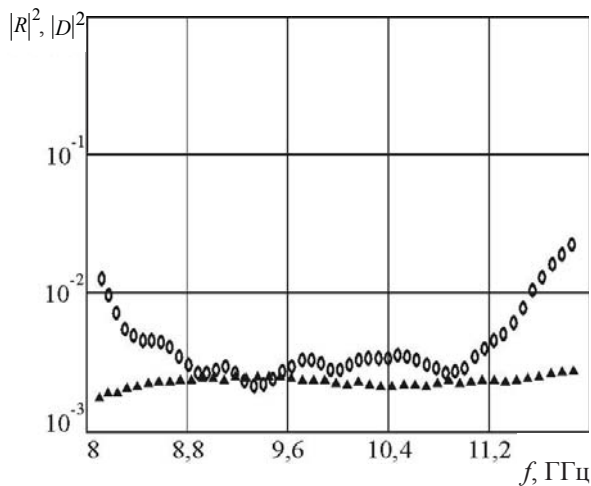


Рис. 4. Экспериментальные частотные зависимости  $|R|^2$  (○○○○) и  $|D|^2$  (▲▲▲▲) для согласованной нагрузки в трехсантиметровом диапазоне длин волн

Экспериментальные зависимости  $R$  и  $D$  от частоты в диапазоне 26–40 ГГц для 9-слойной структуры, состоящей из чередующихся слоев: фторопласт, поликор, нанометровый слой тантала, приведены на рис.5. Из экспериментальных



результатов следует, что значения  $R < 3.5\%$  и  $D < 1.8\%$  обеспечиваются при использовании этой структуры.

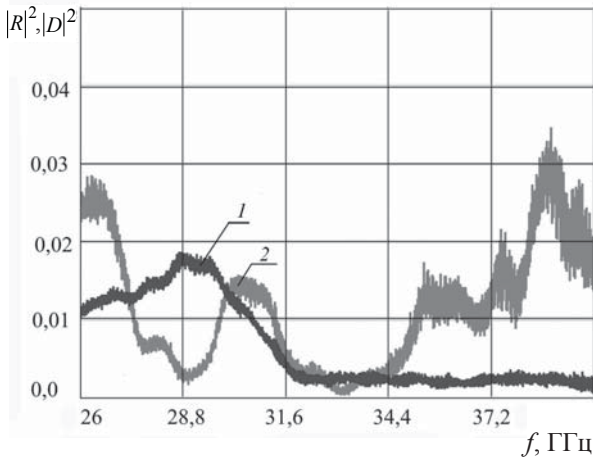


Рис. 5. Экспериментальные зависимости коэффициентов прохождения  $D$  (кривая 1) и отражения  $R$  (кривая 2) от частоты в диапазоне 26–40 ГГц

Измеренная зависимость  $|R|^2$  от  $f$  при нанесении пленки хрома на поликоровую подложку и размещении фотонного кристалла перед измеряемой структурой (рис. 6) и после неё (рис. 7) приведена в [17].

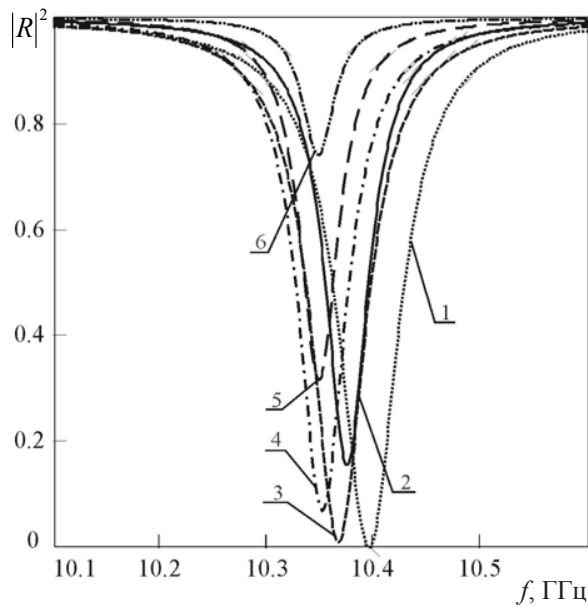


Рис. 6. Частотные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения фотонного кристалла для различных значений толщины нанометрового металлического слоя  $h$  при размещении фотонного кристалла перед измеряемой структурой ( $d_0 = 4$  мм): 2 – 0; 3 – 4; 4 – 20; 5 – 50; 6 – 200 (кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без измеряемой структуры)

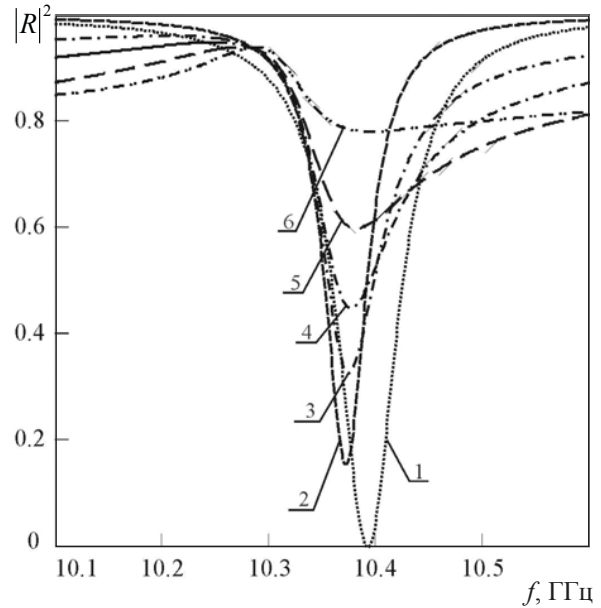


Рис. 7. Частотные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения фотонного кристалла для различных значений толщины нанометрового металлического слоя  $h$  при размещении измеряемой структуры перед фотонным кристаллом при толщине нарушенного шестого слоя  $d_0 = 4$  мм (пенопласт): 2 – 0; 3 – 2,5; 4 – 5; 5 – 10; 6 – 25 (кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без измеряемой структуры)

В [18] приведены частотные характеристики фотонного кристалла, реализованного в виде последовательности отрезков микрополосковой линии с периодически изменяющейся шириной верхнего полоска (рис. 8).

В качестве отдельного элемента фотонного кристалла в рассматриваемом случае выступают соединенные отрезки микрополосковых линий с различной шириной верхнего полоска. При моделировании рассматривалась структура из семи чередующихся отрезков микрополосковой линии, включенная в 50-омную линию передачи. Ширина полосков равнялась 2.5 и 0.5 мм. Длина широких отрезков 7 мм, узких – 7.6 мм. Диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon = 9.6$ . На рис. 9 [18] приведены результаты расчета зависимости квадрата модуля коэффициента пропускания  $|D|^2$  для рассматриваемой структуры для различных значений длины нарушенного четвертого отрезка с меньшей, чем у остальных, шириной.

Кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без нарушений, кривые 2–4 – различным значениям  $l$ . Видно, что наличие нарушений вызывает появление «окна» прозрачности.



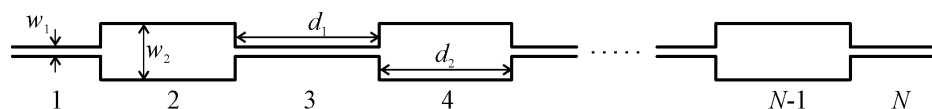


Рис. 8. Структура микрополоскового фотонного кристалла

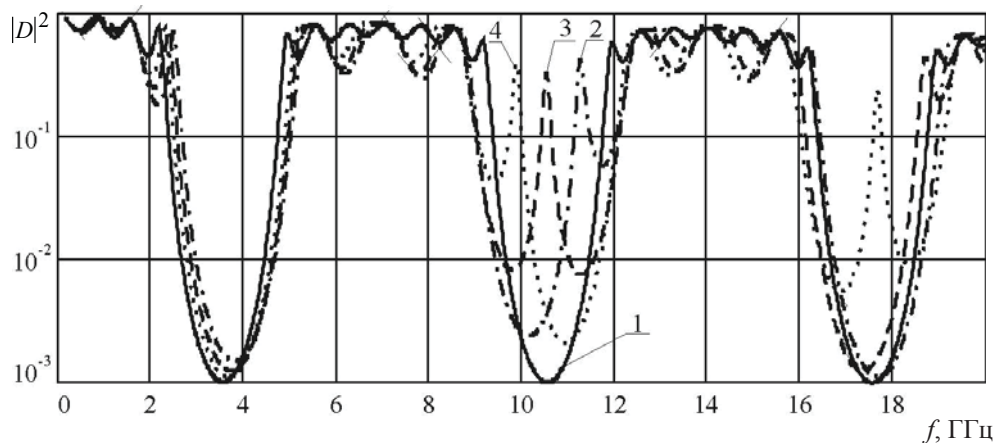


Рис. 9. Частотные зависимости квадрата модуля коэффициента пропускания микрополоскового фотонного кристалла для различных значений длины  $l_4$  нарушенного 4-го отрезка (отрезок с меньшей шириной): кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без нарушений, кривая 2 –  $l_4 = 4.2$  мм, 3 –  $l_4 = 5.1$  мм, 4 –  $l_4 = 6.0$  мм

При  $l = 5.1$  см центральная частота окна прозрачности составляла 10.5 ГГц. На рис. 10 приведены экспериментальные зависимости  $|D|^2$  для  $l_4 = 5.1$  и различных значений  $\epsilon$  образцов, размещенных над четвертым слоем.

Эти зависимости демонстрируют высокую чувствительность вида частотной зависимости  $|D|^2$  от  $\epsilon$  образцов. Известно, что при наличии нарушений в периодичности слоистой структуры в запрещенной зоне фотонного кристалла

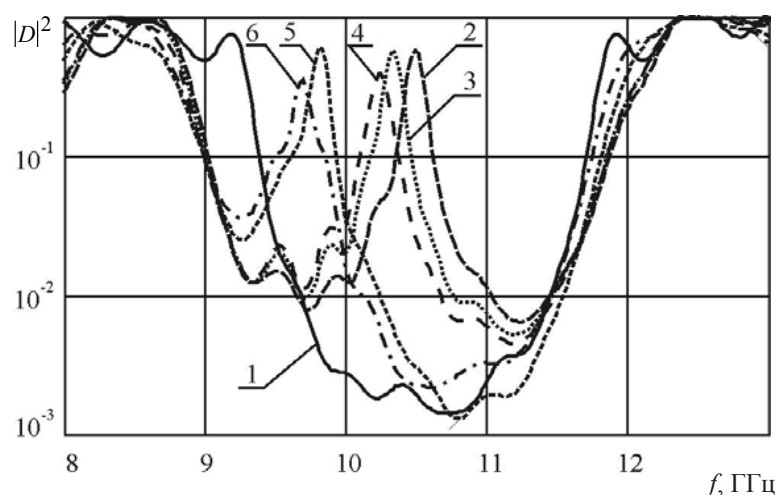


Рис. 10. Экспериментальные зависимости  $|D(f)|^2$  фотонного кристалла при наличии нарушения его периодичности в виде изменения длины четвертого слоя  $l_4 = 5.1$  мм для различных значений  $\epsilon$  образцов, размещаемых над четвертым высокоомным отрезком микрополосковой линии: 3 –  $\epsilon = 2.1$ , 4 –  $\epsilon = 2.5$ , 5 –  $\epsilon = 9.6$ , 6 –  $\epsilon = 11.8$ . Кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без нарушений, кривая 2 – фотонному кристаллу с нарушением при отсутствии измеряемого образца



могут возникать узкие «окна» прозрачности [19]. Известна также высокая чувствительность частотной зависимости «окон» прозрачности в запрещенной зоне фотонного кристалла к изменению характеристик нарушения периодичности. Авторами [20] была показана возможность использования этого свойства СВЧ фотонных кристаллов для измерения диэлектрической проницаемости слоистых диэлектриков. Для измерения параметров диэлектриков на СВЧ существует множество других методов. Гораздо менее разработаны СВЧ-методы измерения металлодиэлектрических и металлополупроводниковых структур, в особенности в области нанометровых толщин металлических покрытий.

Возможность использования волновых и микрополосковых фотонных структур для измерения параметров металлических слоев на изолирующих подложках была показана в [21, 22]. Это стало возможным благодаря тому, что частотные характеристики волны, распространяющейся в волноводной или микрополосковой структуре с СВЧ фотонным кристаллом, полученные расчетным путем и в результате измерений, могут находиться в хорошем соответствии, как это отмечалось авторами [1]. В [17] приведены результаты расчета зависимости  $|R|^2$  от 11-слойной структуры фотонного кристалла в 3-сантиметровом диапазоне длин волн при распространении волны типа  $H_{10}$  (рис. 11, кривая 1).

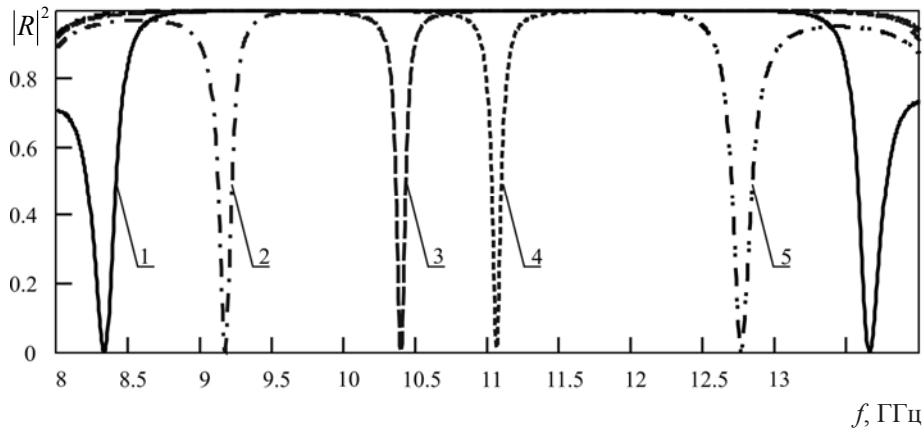


Рис. 11. Частотные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения фотонного кристалла для различных значений толщины нарушенного шестого слоя  $d_6$ , мм (слой пенопласта): 2 – 7.0; 3 – 4.0; 4 – 3.0; 5 – 1.0 (кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без нарушений)

На этом же рисунке приведены результаты расчетов аналогичной зависимости при наличии в структуре нарушения периодичности в виде одного «шестого» слоя меньшей толщины  $d_6$  (рис. 11, кривые 2–5). Как следует из результатов, приведенных на этом рисунке, наличие нарушений периодичности приводит к появлению «донорных» (кривая 5) или «акцепторных» (кривая 2) окон прозрачности в запрещенной зоне.

Величина  $|R|^2$  и его местоположение зависят от диэлектрической проницаемости одного из слоев (рис. 12) и толщины нарушенного слоя.

Частотные зависимости  $|R|^2$  вблизи окна прозрачности для различных значений толщины нанометрового металлического слоя  $h$  приведены на рис. 6.

Использование теоретической и экспериментальной зависимостей  $|R(\omega)|^2$  позволяет определить толщину  $t_{\text{м.иск}}$  нанометровой металлической пленки при известной ее электропроводности [23]. Для этого может быть использован метод наименьших квадратов, при котором  $t_{\text{м.иск}}$  аналогично тому, как это было сделано в [24, 25], находится из условия минимума суммы:

$$S = \sum (|R_{\text{эксп}}|^2 - |R(\omega, t_{\text{м.иск}})|^2)^2.$$

Толщина  $t_{\text{м.иск}}$  определяется в результате решения численным методом уравнения

$$\frac{\partial S(t_{\text{м.иск}})}{\partial t_{\text{м.иск}}} = \frac{\partial (\sum (|R_{\text{эксп}}|^2 - |R(\omega, t_{\text{м.иск}})|^2)^2)}{\partial t_{\text{м.иск}}} = 0.$$

Из результатов расчета, приведенных на рис. 13, следует, что  $|R(\omega)|^2$  существенным обра-

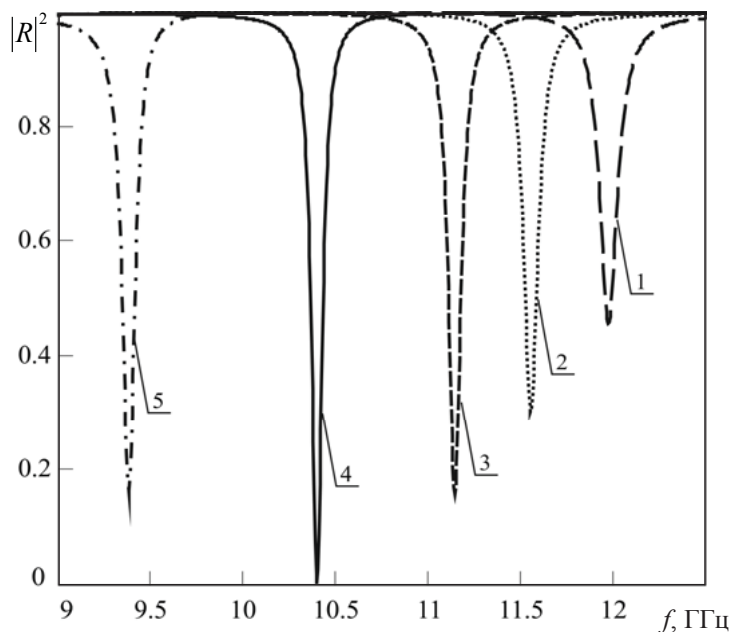


Рис. 12. Частотные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения фотонного кристалла для различных значений диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , седьмого слоя при толщине нарушенного шестого слоя  $d_6 = 4$  мм (пенопласт): 1 – 1; 2 – 3; 3 – 5; 4 – 9,6; 5 – 15

зом зависит от  $t_{\text{м.иск}}$  в окрестности минимума этой зависимости в диапазоне толщин металлической (хром) пленки 0–20 нм.

Измерения проводились в диапазоне частот 8–12 ГГц. В качестве СВЧ фотонного кристалла использовалась 11-слойная структура из череду-

ющихся слоев поликора ( $\epsilon = 9.6$ ) толщиной 1 мм и пенопласта ( $\epsilon = 1.1$ ) толщиной 12 мм. На рис. 13 приведены результаты измерений  $|R|^2$  от частоты  $f$  для различных значений толщины шестого слоя ( $\epsilon = 1.1$ ) и толщины пленки хрома, нанесенной на поликоровую подложку.

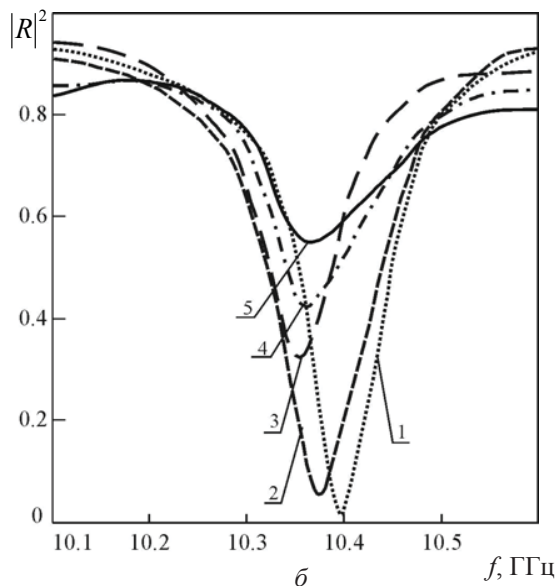
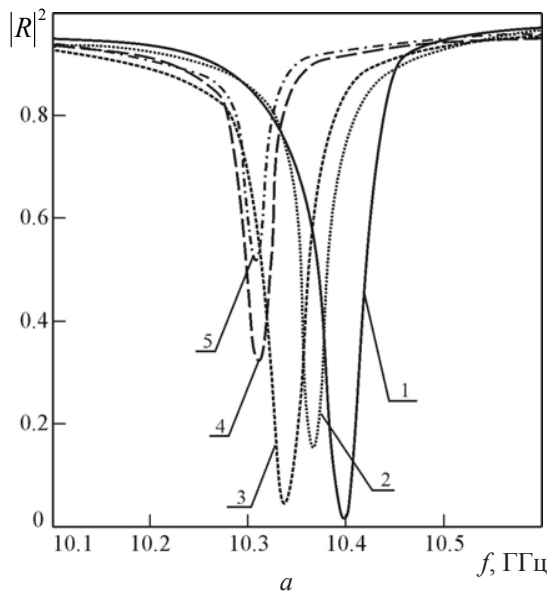


Рис. 13. Измеренные частотные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения фотонного кристалла при наличии в нем нарушения в виде шестого слоя (пенопласт) меньшей толщины ( $d_6 = 4$  мм) для различных значений толщины нанометрового металлического слоя  $h$  при размещении фотонного кристалла: а – перед измеряемой структурой: 2 – 0; 3 – 21; 4 – 76; 5 – 144; б – после измеряемой структуры: 2 – 0; 3 – 12; 4 – 18; 5 – 21. Кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без измеряемой структуры



Как отмечалось выше, наибольший интерес в процессе создания полупроводниковых структур представляет одновременное измерение их толщины  $t$  и электропроводности  $\sigma$ . Нахождение этих параметров в результате решения обратной задачи СВЧ-методами осложняется тем, что существуют различные сочетания значений указанных параметров, при которых наблюдаются одинаковые частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения СВЧ-излучения. Для устранения такого рода неоднозначности решения авторы [24, 25] предложили проводить измерения при различных температурах. Температурная зависимость электропроводности полупроводников хорошо изучена, а изменением толщины в ограниченных температурных интервалах можно пренебречь. В результате было показано, что по измеренным при разных температурах зависимостям спектров отражения удалось определить одновременно оба этих параметра в структурах полупроводник–диэлектрик. Однако разрешающая способность этого метода по совокупности параметров  $t$  и  $\sigma$  оказывается сравнительно низкой. Так, для электропроводности кремния  $\sigma = 1.087 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$  в [24] приведено

$$S(t, \sigma) = \sum \left( \left( D(f, t, \sigma(T_0)) - D_{T_0\text{экс}} \right) + \left( R(f, t, \sigma(T_0)) - R_{T_0\text{экс}} \right) + \right. \\ \left. \left( D(f, t, \sigma(T)) - D_{T_0\text{экс}} \right) + \left( R(f, t, \sigma(T)) - R_{T_0\text{экс}} \right) \right)^2.$$

Искомые значения  $t$  и  $\sigma$  определялись численным методом в результате решения системы уравнений

$$\frac{\partial S(\sigma)}{\partial \sigma} = 0, \quad \frac{\partial S(t)}{\partial t} = 0.$$

Для описания температурной зависимости  $\sigma$  для полупроводникового материала  $n$ -типа использовалось соотношение  $\sigma = en\mu_n$ , где  $e$  – заряд электрона,  $n$  – концентрация носителей заряда,  $\mu_n$  – подвижность электронов. В окрестности комнатной температуры преобладает рассеяние на фононах, концентрация  $n$  остается практически неизменной, электропроводность определяется температурной зависимостью подвижности  $\mu_n = AT^{-3/2}$ , где  $A$  – постоянная величина. Таким образом, выражение для электропроводности примет вид

$$\sigma(T) = enA \cdot T^{-3/2}.$$

Тогда соотношение, определяющее электропроводность  $\sigma(T)$  при температуре  $T$ , при извест-

ное значение  $t = 360$  мкм. При измерениях использовались структуры типа полупроводник–диэлектрик. В качестве диэлектрика использовался фторопласт. При толщинах, меньших 360 мкм, в рассматриваемом случае изменение температуры слабо изменяло частотную зависимость  $|R|^2$ .

В [26, 27] показано, что диапазон измеряемых толщин можно существенно расширить, если использовать одномерные СВЧ фотонные кристаллы, в которых роль дефекта, нарушающего периодичность, выполняет слой полупроводника с искомыми параметрами. Исследования проводились в диапазоне частот 8–12 ГГц, при расчете и в эксперименте использовался фотонный кристалл, состоящий из одиннадцати слоев. Нечетные слои выполнялись из поликора, четные – воздух. Толщина нечетных отрезков была 1 мм, а четных – 12 мм. Нарушение периодичности создавалось изменением толщины шестого слоя и введением между шестым и седьмым слоями полупроводникового материала (кремний). Толщина шестого слоя выбиралась равной 2 мм. Для определяемых искомой толщины  $t$  и электропроводности  $\sigma$  использовался метод наименьших квадратов с функцией невязки в виде

ной электропроводности  $\sigma_0$  для температуры  $T_0$  будет иметь вид

$$\sigma(T) = (T^{-3/2}/T_0^{-3/2}) \cdot \sigma_0.$$

На рис. 14 представлены частотные зависимости тестовых значений  $|R|^2$  при  $T = 298$  К и аналогичных расчетных зависимостей для одномерного 11-слоеного фотонного кристалла с толщиной его отрезков 1 мм.

Толщина нарушенного шестого слоя составляла 5 мм. Толщина измеряемого полупроводникового слоя при решении тестовых задач варьировалась от 0.1 до 10 мкм. Функция  $S$  для рассматриваемого случая представлена на рис. 15, а, соответствующая контурная карта, приведенная на рис. 15, б, характеризуется наличием замкнутых траекторий вблизи минимума, что подтверждает возможность одновременно определять толщину и электропроводность тонких полупроводниковых слоев описанным способом.



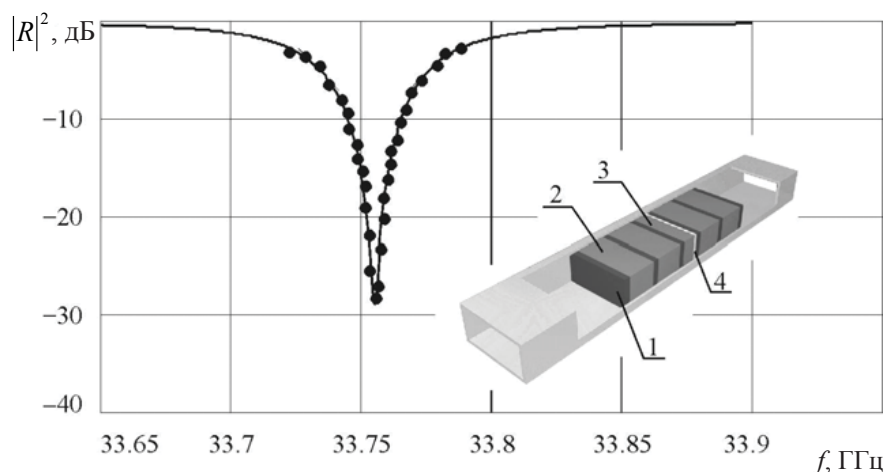


Рис. 14. Частотные зависимости тестовых (точки) и рассчитанных (линия) значений коэффициента отражения, полученные с использованием найденных значений параметров  $t_{\text{иск}} = 0.105$  мкм и электропроводностью  $\sigma_{\text{иск}} = 1008 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ . На вставке: одномерный волноводный фотонный кристалл: 1 – слой поликора, 2 – слой воздуха, 3 – нарушенный воздушный слой, 4 – полупроводниковый слой

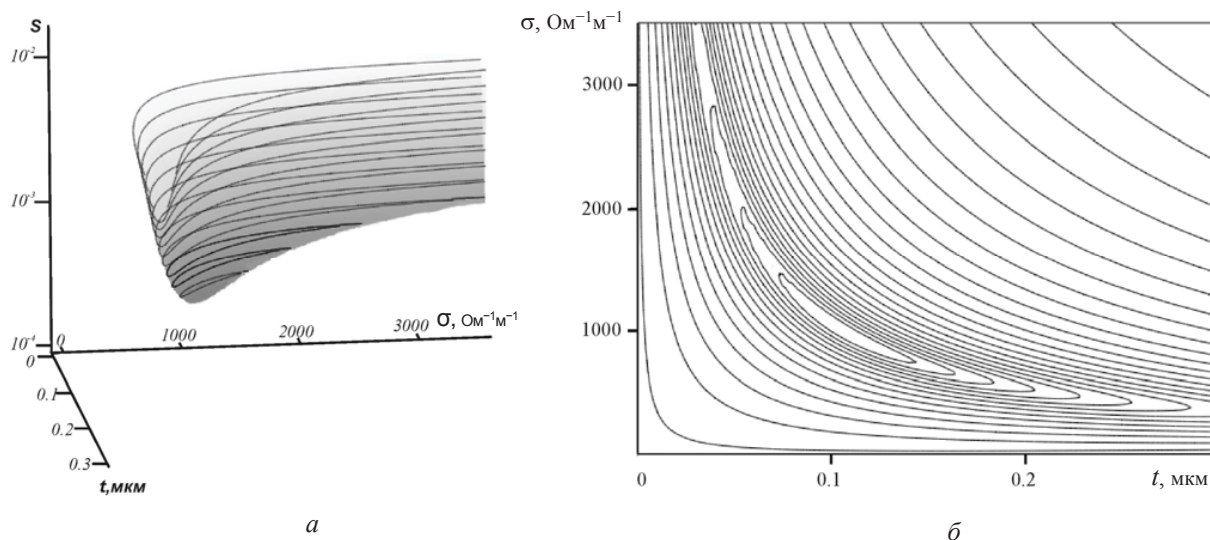


Рис. 15. Вид функции невязок в пространстве искомых параметров (а) и контурная карта функции невязок в плоскости искомых параметров  $t$  и  $\sigma$  (б) для полупроводникового слоя с толщиной  $t_{\text{иск}} = 0.105$  мкм и электропроводностью  $\sigma_{\text{иск}} = 1008 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$

В [28, 29] для измерения  $\sigma$  и  $t$  при фиксированной температуре предложено изменять размеры нарушения периодичности фотонного кристалла, содержащего исследуемый образец, и положение образца внутри ячейки кристалла. Первая возможность реализации этого предложения состоит в измерении частотных зависимостей  $R$  и  $D$  при фиксированных расстояниях полупроводникового слоя от границы нарушенного центрального слоя фотонного кристалла и нахождения  $\sigma$  и  $t$  из условия минимума невязки  $S$  рассчитанных и экспериментальных значений

этих зависимостей, полученных для двух различных расстояний между измеряемым слоем и границей нарушенного слоя. Вторая возможность – нахождение минимума  $S$  при фиксированном расстоянии от полупроводникового слоя до границы, но при двух различных длинах ячейки с нарушением периодичности.

Для  $t$  от 100 до 500 мкм и  $\sigma$  от 1 до  $10 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$  и для  $t$  менее 100 мкм и  $\sigma$  более  $1000 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$  на рис. 16 показано изменение конфигурации глобального минимума  $S$ , соответствующего искомым параметрам.

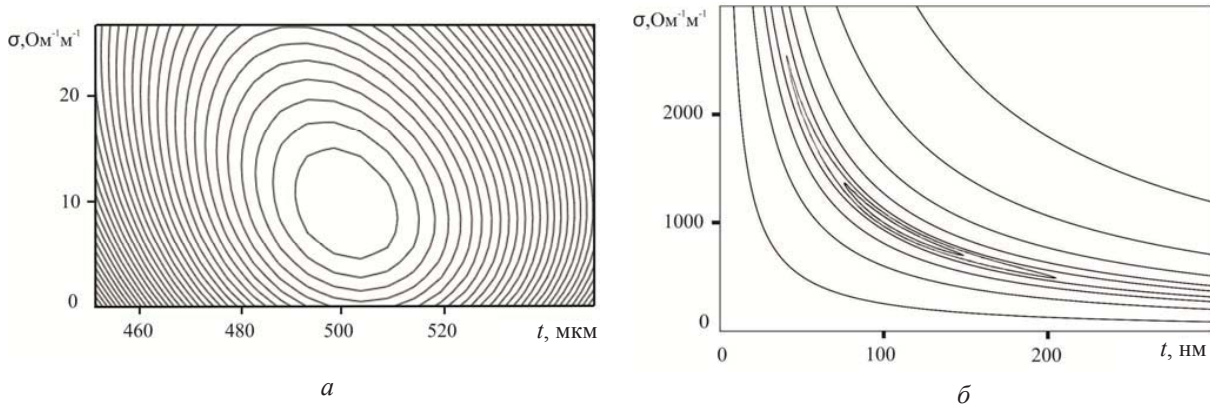


Рис. 16. Контурные карты функции невязки при изменении толщины и электропроводности полупроводникового слоя для случаев:  $a - t = 500$  мкм,  $\sigma = 10 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ ;  $b - t = 100$  нм,  $\sigma = 1000 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$

Сделан вывод о том, что при  $t < 100$  нм и  $\sigma > 1000 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$  определение  $\sigma$  и  $t$  этим методом становится невозможным.

Частотные характеристики СВЧ фотонных кристаллов, как отмечалось, например, в [28], при большом числе  $N$  образующих их элементов ( $N > 20$ ) слабо зависят от изменения этого числа. Размер отдельного элемента соизмерим с длиной волны электромагнитного излучения. В оптическом диапазоне размер фотонного кристалла мал, в том числе и при большом числе элементов. В СВЧ-диапазоне с целью уменьшения общих размеров устройств приходится обходиться минимальным числом элементов, достаточным для обеспечения функционирования. В то же время частотные характеристики таких устройств могут быть неоптимальными. Таким образом, задача создания СВЧ фотонных кристаллов, характеризующихся малыми размерами, представляет научный и практический интерес.

В [29] для решения такого рода задачи предложено в качестве элементов, периодическая последовательность которых образует СВЧ фотонный кристалл, использовать структуры, возбуждающие волны высших типов, длины волн которых существенно меньше длины волны основного типа. Примеры таких структур, названных низкоразмерными, приведены, в частности, в [30]. В [29] приведены результаты исследований характеристик СВЧ фотонных кристаллов, представляющих собой структуры из последовательных чередующихся диэлектрических слоев – четные элементы фотонного кристалла и тонких металлических пластин, частично перекрывающих сечение волновода

– нечетные элементы фотонного кристалла. Между пластинами и широкими стенками волновода имелись зазоры, одинаковые по ширине вдоль всей длины пластины. При этом зазоры между нечетными металлическими пластинами и волноводом создавались у одной из широких стенок волновода, а между четными – у противоположной стенки волновода. Таким образом, зазоры являлись источником высших типов волн, образующих в его окрестности ближнее поле. Изображение исследуемого СВЧ фотонного кристалла приведено на рис. 17.

Параметры элементов были выбраны таким образом, чтобы проявлялся «зонный» характер частотных зависимостей коэффициентов отражения и пропускания. Результаты расчета методом конечных элементов  $S_{12}$  и  $S_{11}$  девятислойного фотонного кристалла, состоящего из пяти чередующихся металлических пластин с зазорами и четырех диэлектрических слоев при различных значениях толщины диэлектрических слоев  $h$ , представлены на рис. 18.

Уменьшение  $h$ , так же как и увеличение ширины зазора  $S$ , приводило к смещению частотной характеристики в высокочастотную область. При уменьшении  $h$  ширина разрешенной зоны увеличивалась, глубина и ширина запрещенной зоны уменьшались.

Экспериментально исследовался фотонный кристалл, созданный в соответствии с описанной выше моделью. На рис. 19 и рис. 20 представлены результаты экспериментальных исследований (сплошные кривые)  $S_{12}$  и  $S_{11}$  СВЧ фотонных кристаллов, состоящих из тонких металлических пластин с зазорами и диэлектрических слоев из пенополистирола ( $\epsilon = 1.02$ ).

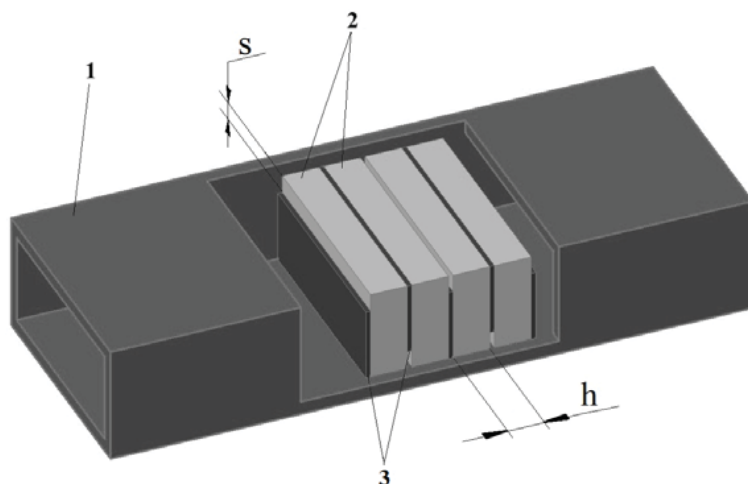


Рис. 17. Модель фотонного кристалла: 1 – отрезок прямоугольного волновода, 2 – слои диэлектрика, 3 – тонкие металлические пластины,  $S$  – ширина зазора,  $h$  – толщина слоя диэлектрика

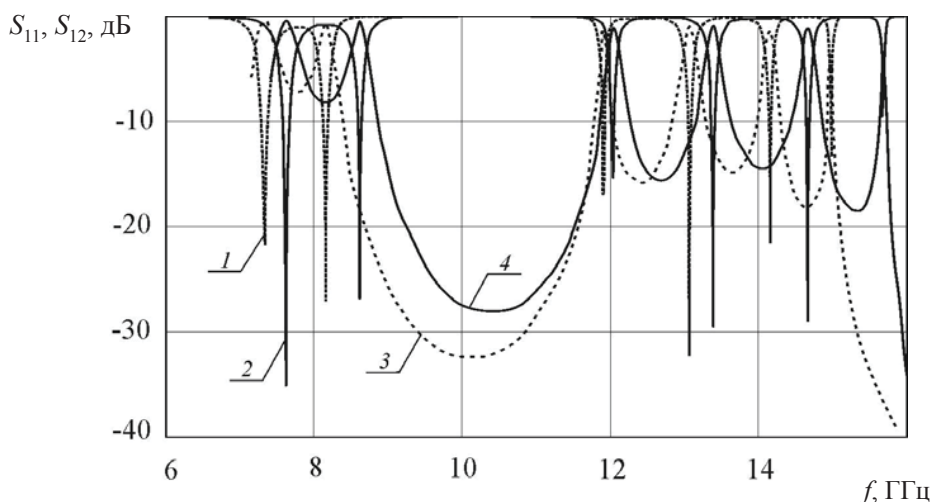


Рис. 18. Расчетные АЧХ коэффициентов отражения  $S_{11}$  (кривые 1 и 2) и пропускания  $S_{12}$  (кривые 3 и 4) 9-слойного фотонного кристалла, содержащего металлические пластины с шириной зазора  $S = 1$  мм, при различных толщинах  $h$  диэлектрических слоев (фторопласт,  $\epsilon = 2.1$ ). Кривые 1 и 3 –  $h = 3.5$  мм. Кривые 2 и 4 –  $h = 3$  мм

На этих же рисунках представлены результаты расчета частотных характеристик аналогичных фотонных кристаллов. Сравнение результатов расчета и эксперимента свидетельствует об их хорошем соответствии. Продольный размер созданного СВЧ фотонного кристалла составлял 12.25 мм, что примерно в пять раз меньше аналогичного размера структуры, рассчитанной для волны основного типа. СВЧ фотонные кристаллы в литературе часто называют структурами с запрещенной зоной.

Запрещенная зона может формироваться в результате многократного отражения от не-

однородности в микрополосковой структуре кольцевого типа [31]. Резонансная особенность в запрещенной зоне, называемая примесной модой колебаний [9, 32], или «окном прозрачности», достигается в [31] введением индуктивности, шунтирующей емкостной разрыв в верхней полоске микрополосковой линии. Размеры такого рода структур намного меньше размеров, описанных выше одномерных СВЧ фотонных кристаллов. Другая возможность уменьшения размеров периодических структур реализуется в системах встречно-штыревого типа, в том числе в микрополосковом исполнении [33, 34].

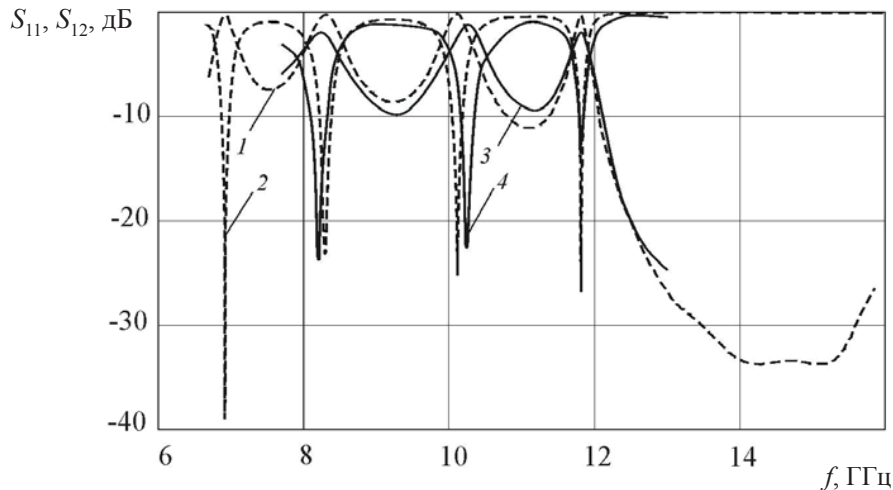


Рис. 19. Расчетные (штриховые кривые) и экспериментальные (сплошные кривые) АЧХ коэффициентов пропускания  $S_{12}$  (кривые 1 и 3) и отражения  $S_{11}$  (кривые 2 и 4) 9-слойного фотонного кристалла (число металлических пластин равно 5), содержащего диэлектрические слои из пенополистирола ( $\epsilon = 1.02$ ) толщиной  $h = 3$  мм, чередующиеся с металлическими пластинами с зазорами шириной  $S = 1$  мм

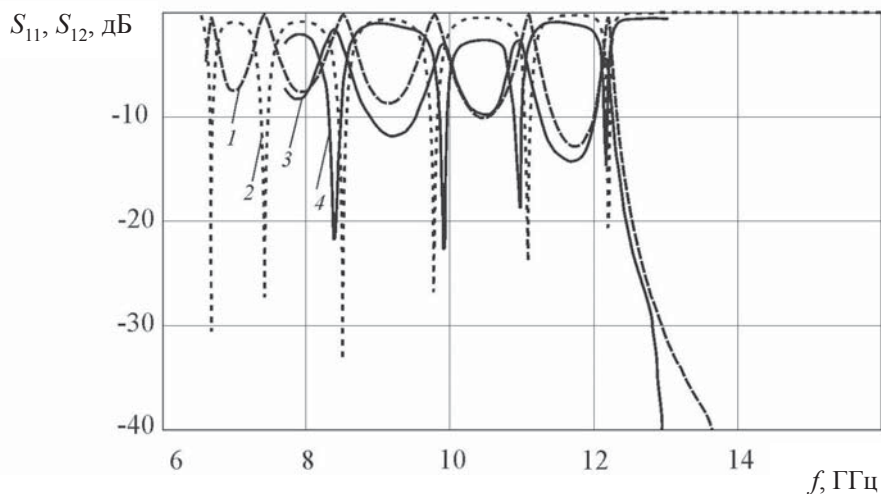


Рис. 20. Расчетные (штриховые кривые) и экспериментальные (сплошные кривые) АЧХ коэффициентов пропускания  $S_{12}$  (кривые 1 и 3) и отражения  $S_{11}$  (кривые 2 и 4) 9-слойного (число металлических пластин равно 5) фотонного кристалла, содержащего диэлектрические слои из пенополистирола ( $\epsilon = 1.02$ ) толщиной  $h = 3$  мм, чередующиеся с металлическими пластинами с зазорами шириной  $S = 1$  мм

Представляет интерес создание волнового устройства кольцевого типа с неоднородностью, которое характеризуется наличием запрещенной зоны. Для этого авторами [35] было предложено использовать волноводную линию передачи, содержащую диафрагму с системой рамочных элементов связи и неоднородности типа «штырь с зазором» (рис. 21).

Механизм их взаимодействия с СВЧ-излучением рассматривался, в частности, в [36,

37]. Наибольшее практическое значение такая конструкция может иметь для коротковолновой части СВЧ-диапазона. Численное моделирование системы проводилось с использованием метода конечных элементов в САПР HFSS ANSOFT. Из результатов расчетов, приведенных на рис. 22 [35], следует, что при длине рамки 21 мм и высоте 7 мм в диапазоне частот 8.8–10.2 ГГц в амплитудно-частотной характеристике образуется запрещенная зона.



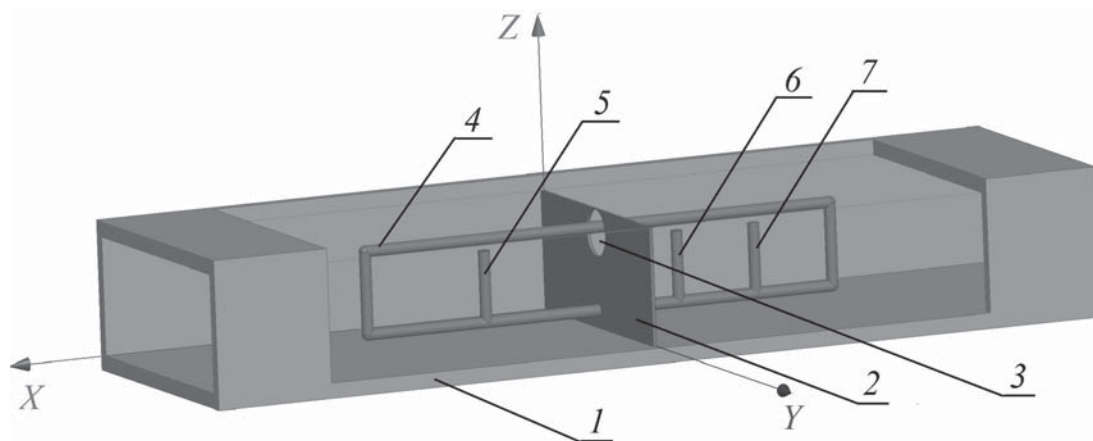


Рис. 21. Модель СВЧ-элемента на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов, содержащей неоднородность в виде конструкций типа «штырь с зазором»: 1 – волновод, 2 – диафрагма, 3 – отверстие, 4 – рамочный элемент, 5–7 – неоднородности типа «штырь с зазором»

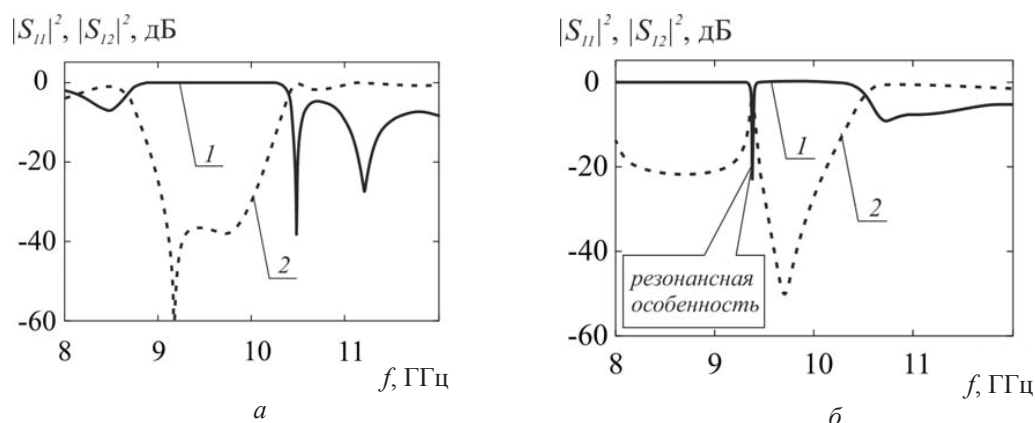


Рис. 22. Расчётные частотные зависимости коэффициента отражения (кривые 1) и коэффициента прохождения (кривые 2) СВЧ-устройства на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов: а – несодержащей неоднородности, б – содержащей неоднородности типа «штырь с зазором» [35]

Для создания в этой запрещенной зоне окна прозрачности (рис. 22, б) были введены неоднородности типа «штырь с зазором», выполненные из медной проволоки диаметром 1 мм.

В [35] расчетным путем показано, что при длине рамочных элементов 30 мм в диапазоне частот 8–12 ГГц возможна реализация «разрешенной зоны», в которой при наличии неоднородности в конструкции типа «штырь с зазором» возникает пик запираения. Результаты расчета амплитудно-частотных характеристик коэффициента прохождения вблизи пика запираения представлены на рис. 23.

Авторы [38] отмечали актуальность электронной перестройки спектральных зависимостей СВЧ фотонных кристаллов. В экспериментах в диапазоне частот 7.8÷12.5 Гц они исполь-

зовали слоистые структуры из металлических дисков и узких металлических (алюминиевых) полосок, пенопласта, пластин поликора толщиной 1 мм и поликристаллического железитриевого граната. В [38] показана возможность формирования узкой ( $\approx 0,5$  ГГц) полосы пропускания при потерях не более 6 дБ и запираения  $\sim 40\div 43$  дБ. Эти полосы могут перестраиваться изменением величины магнитного поля.

Для управления величиной пропускания в окне прозрачности фотонного кристалла авторами [39, 40] использовался одномерный 11-слойный фотонный кристалл, представляющий собой чередующиеся слои поликора и пенопласта. В кристалл вводилось нарушение в виде шестого слоя уменьшенной толщины. В качестве управляющего элемента в [39, 40]

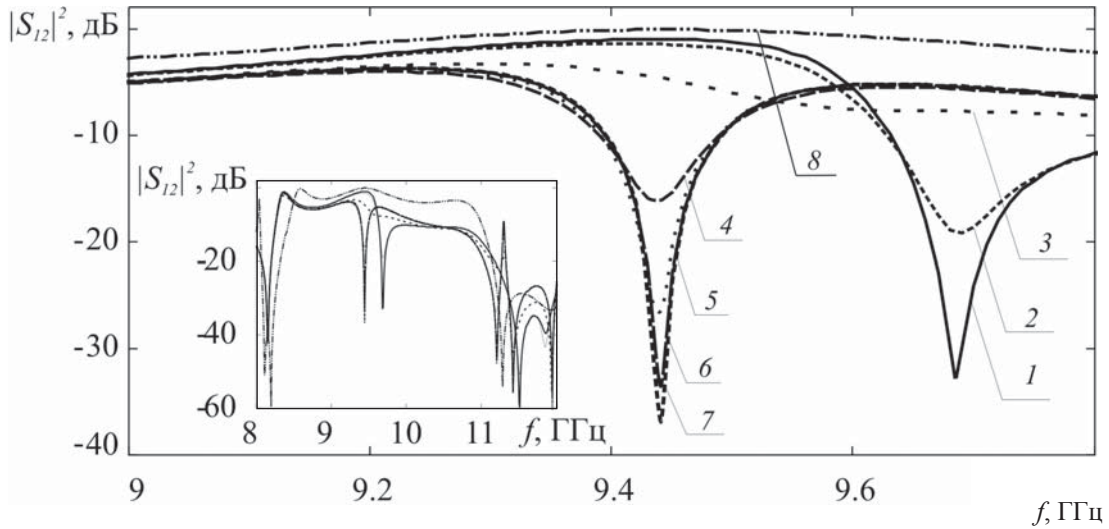


Рис. 23. Расчётные амплитудно-частотные характеристики коэффициента прохождения вблизи пика запирающей разрешённой зоны СВЧ-элемента с неоднородностью типа «штырь с зазором» и  $n-i-p-i-n$ -структурой: 1 –  $\sigma = 10^{-3}$  см/м, 2 –  $\sigma = 1.0$  см/м, 3 –  $\sigma = 10.0$  см/м, 4 –  $\sigma = 10^2$  см/м, 5 –  $\sigma = 10^3$  см/м, 6 –  $\sigma = 10^4$  см/м, 7 –  $\sigma = 10^5$  см/м, 8 – случай отсутствия штыря и управляющего элемента

использовалась  $p-i-n$ -диодная матрица типа М34216-1. К матрице прикладывалось управляющее напряжение  $U$  в диапазоне  $0 \div 700$  мВ.

Экспериментальные частотные зависимости модуля и фазы коэффициентов отражения приведены на рис. 24.

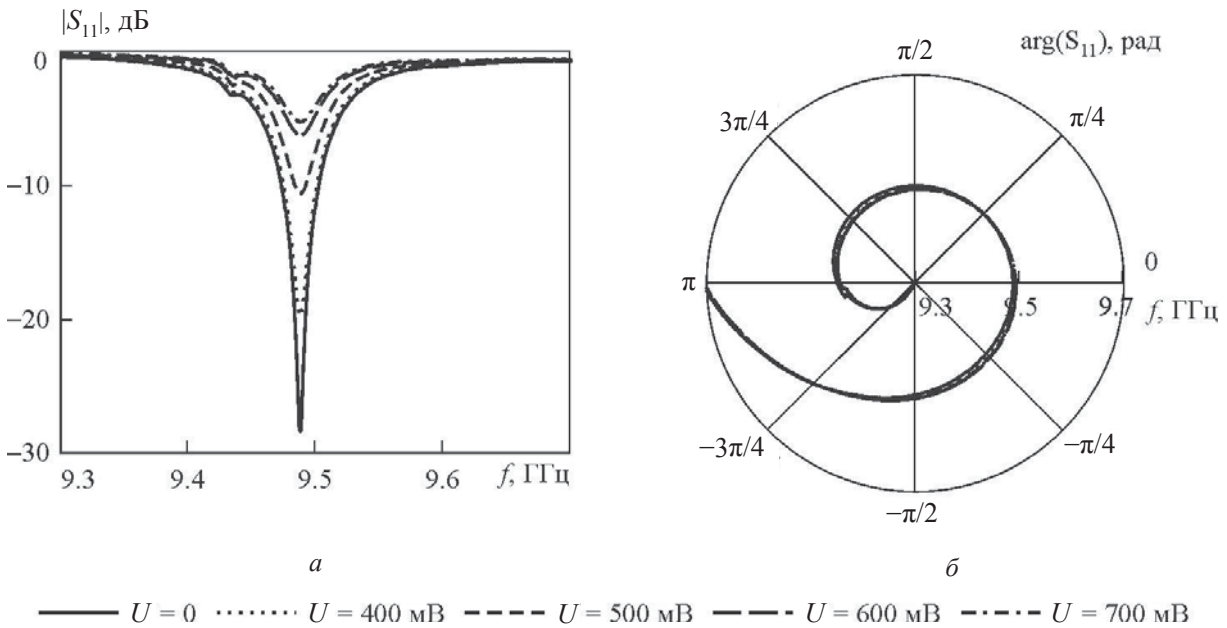


Рис. 24. Экспериментальные зависимости модуля (а) и фазы (б) коэффициента отражения электромагнитного излучения в области окна прозрачности фотонного кристалла для различных значений величины напряжения на  $p-i-n$ -диоде,  $d_6 = 5.0$  мм

Полученные результаты свидетельствуют о возможности регулирования пропусканием от 1.5 до 25 дБ с малой величиной фазовой ошибки. В [40] описана возможность электрического

управления частотными характеристиками микрополоскового фотонного кристалла. На частоте 6.9 ГГц наблюдалось переключение потерь затухания с максимальным значением более 60 дБ.



Введение в зазор стержневого держателя системы из связанных рамочных элементов описанной в [35]  $n-i-p-i-n$ -структуры позволило регулировать коэффициент пропускания на частоте 9.644 ГГц в диапазоне 1.5–25 дБ.

В последние несколько десятилетий получили распространение методы измерения параметров материалов и структур, основанные на использовании ближнеполевых сканирующих СВЧ-микроскопов. Основным элементом таких микроскопов авторы [41] назвали связанный с зондом СВЧ-резонатор. В [42] приведены ре-

зультаты исследований использования в качестве резонансной системы цилиндрического резонатора с рамочным элементом связи и одномерным фотонным кристаллом с нарушением периодичности (рис. 25).

Использование предложенного устройства позволило достичь чувствительности при измерении диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  в диапазоне значений  $\epsilon=1-2$  в 29.7 дБ/ $\epsilon$  и чувствительности при измерении толщины металлических пластин 1.35 дБ/нм в диапазоне толщин  $\leq 20$  нм.

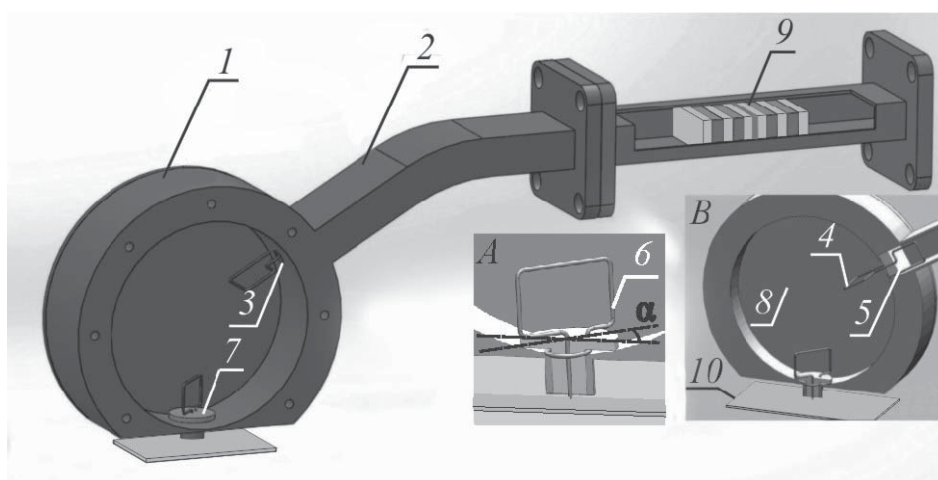


Рис. 25. Зонд ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе цилиндрического СВЧ-резонатора 1 с рамочным элементом связи 6 и одномерным фотонным кристаллом 9. Вставка А – рамочный элемент связи. Вставка В – цилиндрический СВЧ-резонатор с рамочным элементом связи и измеряемым образцом 10

В заключение можно отметить еще одну возможную сферу применения СВЧ фотонных кристаллов: использование результатов исследования их характеристик для объяснения эффектов, наблюдающихся в низкоразмерных периодических структурах. Здесь можно использовать имеющуюся аналогию между сверхрешетками, оптическими фотонными кристаллами и СВЧ фотонными кристаллами для постановки экспериментов, позволяющих наблюдать эффекты, характерные для полупроводниковых структур, в виде, свободном от многофакторного влияния технологии их изготовления, необходимости одновременного учета сосуществования большого числа эффектов, характерных для полупроводников. Использование такой аналогии может послужить основой для выработки полезных рекомендаций при

создании периодических наноструктур, выявления роли факторов, влияющих на их рабочие характеристики.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 1376 и 1575) и стипендии Президента РФ (СП – 2622.2015.3).*

#### Список литературы

1. Joannopoulos I. D., Villeneuve Pierre R., Fan S. Photonic crystals : putting a new twist on light // Nature. 1997. Vol. 386, № 13. P. 143–149.
2. Yablonovitch E., Gmitter T. J., Leung K. M. Photonic band structure : The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms // The American Physical Society. 1991. Vol. 67, № 17. P. 2295–2298.
3. Силин П. А., Сазонов В. П. Замедляющие системы. М. : Сов. радио, 1966. 631 с.



4. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М. : Наука, 1973. 342 с.
5. Ozbay E., Temelkuran B., Bayindir M. Microwave applications of photonic crystals // Progress in Electromagnetics Research. 2003. Vol. 41. P. 185–209.
6. Kuriazidou C. A., Contopanagos H. F., Alexopoulos N. G. Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. 2001. Vol. 49, № 2. P. 297–306.
7. Burns G. W., Thayne I. G., Arnold J. M. Improvement of Planar Antenna Efficiency When Integrated With a Millimetre-Wave Photonic // Proc. of European Conf. on Wireless Technology. Amsterdam, Netherlands, 2004. P. 229–232.
8. Wu Hsien-Shun, Tzuang Ching-Kuang C. Miniaturized High-Gain Synthetic Rectangular Waveguide Antenna of Near-Omnidirectional Radiation // Proc. of 34rd European Microwave Conf. Amsterdam, Netherlands, 2004. Vol. 2. P. 1189–1192.
9. Беляев Б. А., Волошин А. С., Шабанов В. Ф. Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах // Докл. АН. 2005. Т. 403, № 3. С. 319–324.
10. Helszajn J. Passive and Active Microwave Circuits. N.Y. ; Chichester ; Brisbane ; Toronto : John Wiley & Sons, 1978. 140 p.
11. Lee K. A., Guo Y., Stimson Ph. A., Potter K. A., Jung-Chih Chiao, Rutledge D. B. Thin-Film Power-Density Meter for Millimeter Wavelengths // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1991. Vol. 39, № 3. P. 425–428.
12. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С., Скворцов В. С., Мерданов М. К. Широкополосные волноводные согласованные нагрузки на основе фотонных кристаллов с нанометровыми металлическими слоями // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2009. № 1. С. 73–80.
13. Широкополосная волноводная согласованная нагрузка : пат. 2360336 Рос. Федерация : МПК H01P 7/00 / Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С., Скворцов В. С., Мерданов М. К.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского». – № 2008106244/09; заявл. 21.02.09; опубл. 27.06.09, Бюл. № 18. 8 с.
14. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С. Измерения толщины нанометровых слоев металла и электропроводности полупроводника в структурах металл–полупроводник по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения // ЖТФ. 2006. Т. 76, вып. 5. С. 112–117.
15. Чаплыгин Ю. А., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С. Методика измерения электропроводности нанометровых металлических пленок в слоистых структурах по спектрам отражения электромагнитного излучения // Изв. вузов. Электроника. 2006. № 6. С. 27–35.
16. Usanov D. A., Skripal A. V., Abramov A. V., Bogolyubov A. S., Kalinina N. V. Measurements of thickness of metal films in sandwich structures by the microwave reflection spectrum // Proc. of 36rd European Microwave Conf. Manchester, UK, 2006. P. 921–924.
17. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С., Скворцов В. С., Мерданов М. К. Использование волноводных фотонных структур для измерения параметров нанометровых металлических слоев на изолирующих подложках // Изв. вузов. Электроника. 2007. № 6. С. 25–32.
18. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58, № 20. P. 2059–2062.
19. Oliyik V., Makarov D., Danilov V. Dielectric permeability measurements with waveguide bragg structure usage // Proc. of 15th Int. Crimean Conf. «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2005). Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2005. P. 785–786.
20. Usanov D., Skripal A., Abramov A., Bogolubov A., Skvortsov V., Merdanov M. Measurement of the Metal Nanometer Layer Parameters on Dielectric Substrates using Photonic Crystals based on the Waveguide Structures with Controlled Irregularity in the Microwave Band // Proc. of 37rd European Microwave Conf. Munich, Germany, 2007. P. 198–201.
21. Usanov D. A., Skripal A. V., Abramov A. V., Bogolubov A. S., Kulikov M. Y. Application of waveguide and microstrip photonic crystals for measurement of parameters of materials and structures // XVII Intern. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications. Poland, Wroclaw, 2008. Vol. 3. P. 904–907.
22. Способ измерения электрофизических параметров структуры «нанометровая металлическая пленка–полупроводниковая или диэлектрическая подложка : пат. 2349904 Рос. Федерация : МПК G01N 22/00 / Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С., Скворцов В. С., Мерданов М. К.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского». – № 2007134239/09; заявл. 13.09.07; опубл. 20.03.09, Бюл. № 8. 8 с.
23. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С., Куликов М. Ю., Скворцов В. С., Мерданов М. К. СВЧ-фотонные структуры и их использование для измерения параметров материалов и создания функциональных устройств СВЧ-электроники // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2008. Т. 11, № 3. С. 51–59.
24. Способ определения электропроводности и толщины полупроводниковых слоев : пат. 2439541 Рос. Федерация : МПК G01N 22/00 / Усанов Д. А., Постельга А. Э.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского». – № 2010128130/07; заявл. 08.07.10; опубл. 10.01.12, Бюл. № 1. 10 с.





25. Усанов Д. А., Постельга А. Э., Сысоев Н. Ю. Определение электропроводности и толщины полупроводниковых слоев по спектру отражения СВЧ-излучения // Изв. вузов. Электроника. 2011. № 4(90). С. 71–77.
26. Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Постельга А. Э., Пономарев Д. В. Определение параметров тонких полупроводниковых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов // Докл. АН. 2012. Т. 443, № 3. С. 1–3.
27. Способ определения электропроводности и толщины полупроводниковых пластин или нанометровых полупроводниковых слоев в структурах «полупроводниковый слой–полупроводниковая подложка»: пат. 2517200 Рос. Федерация: МПК G01N 22/00, B82B 3/00, H01L 21/66 / Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского». – № 2012137649/07; заявл. 03.09.2012; опубл. 10.03.2014, Бюл. 15. 14 с.
28. Никитов С. А., Гуляев Ю. В., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В. Определение проводимости и толщины полупроводниковых пластин и нанометровых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов // Докл. АН. 2013. Т. 448, № 1. С. 35–37.
29. Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Посадский В. Н., Тяжлов В. С., Байкин А. В. Низкоразмерные волноводные СВЧ фотонные кристаллы // Докл. АН. Т. 448, № 4. Январь 2014. С. 406–409.
30. Усанов Д. А., Горбатов С. С. Эффекты ближнего поля в электродинамических системах с неоднородностями и их использование в технике СВЧ. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2011. 392 с.
31. Sung-II Kim, Mi-Young Jang, Chul-Sik Kee, Ikmo Park, H. Lim. Characteristics of microwave filters based on microstrip photonic bandgap ring structures // Current Applied Physics. 2005. № 5. P. 619–624.
32. Yablonovitch E., Gmitter T. J., Meade R. D., Rappe A. M., Brommer K. D., Joannopoulos J. D. Donor and acceptor modes in photonic band structure // Phys. Rev. Lett. 1991. Vol. 67, № 24. P. 3380.
33. Беляев Б. А., Сержантов А. М., Бальва Я. Ф., Лексиков А. А., Галеев Р. Г. Новая конструкция миниатюрного микрополоскового резонатора на основе встречно-штыревой структуры // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, вып. 22. С. 52–60.
34. Беляев Б. А., Сержантов А. М., Бальва Я. Ф., Лексиков А. А., Галеев Р. Г. Новая конструкция микрополоскового фильтра на микрополосковых резонаторах со встречно-штыревой структурой проводников // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 10. С. 89–96.
35. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Фролов А. П., Орлов В. Е. Волноводы, содержащие рамочные элементы с электрически управляемыми характеристиками разрешенных и запрещенных зон // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59, № 11. С. 1079–1084.
36. Усанов Д. А., Орлов В. Е., Безменов А. А. Рамочные элементы связи в волноводе // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1976. Вып. 5. С. 83–89.
37. Усанов Д. А., Орлов В. Е. Использование рамочной связи в полупроводниковых устройствах для управления СВЧ-мощностью // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1975. Вып. 1. С. 35–37.
38. Бритун Н. В., Данилов В. В. Электронное управление параметрами структур с фотонной запрещенной зоной // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29, вып. 7. С. 27–32.
39. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С., Скворцов В. С., Мерданов М. К. Волноводные фотонные кристаллы с характеристиками, управляемыми  $p-i-n$ -диодами // Изв. вузов. Электроника. 2010. № 1. С. 24–29.
40. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Куликов М. Ю. Управляемые  $pin$ -диодами фотонные кристаллы и их применение // Антенны. 2012. № 3. С. 9–14.
41. Anlage S. M., Steinhauer D. E., Feenstra B. J., Vlahacos C. P., Wellstood F. C. Near-field microwave microscopy of materials properties // Microwave Superconductivity / eds. H. Weinstock, M. Nisenoff. Amsterdam, Netherlands: Kluwer, 2001. P. 239–269.
42. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Фролов А. П. Ближнеполевой сверхвысокочастотный микроскоп на основе фотонного кристалла с резонатором и регулируемым элементом связи в качестве зонда // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58, № 12. С. 1071–1078.

## МЕТОДИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ

УДК 378

### О ПРЕДНАЗНАЧЕНИИ И ОСОБЕННОСТЯХ УНИВЕРСИТЕТСКОЙ СИСТЕМЫ ОБРАЗОВАНИЯ

**В. С. Анищенко**

Саратовский государственный университет  
E-mail: wadim@info.sgu.ru

В статье обсуждаются отличительные особенности организации учебной и научной работы современного университета. Представлены организационная структура, цели, задачи и основные результаты деятельности научно-образовательного центра Саратовского государственного университета «Нелинейная динамика и биофизика». Обосновывается эффективность работы подобных центров в реализации взаимосвязи фундаментальных научных исследований и образовательного процесса.

**Ключевые слова:** университет, университетская система образования, научная работа в университете, конкурсы проектов, научно-образовательный центр.

**On the Purpose and Features of the University Education System**

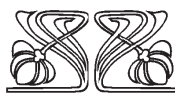
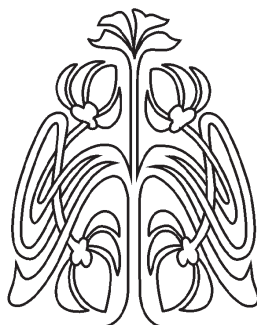
**V. S. Anishchenko**

The paper discusses the distinguishing features of organization of the educational and scientific work of a modern university. The organizational structure, goals, objectives and key results of the Research and Educational Center «Nonlinear Dynamics and Biophysics» of Saratov State University are presented. The effectiveness of such centers in the implementation of the relationship of fundamental scientific researches and the educational process is substantiated.

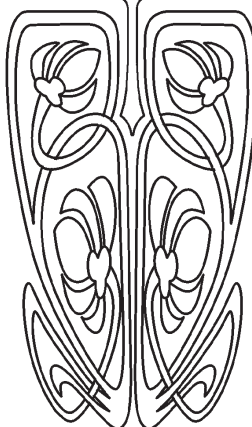
**Key words:** university, university education system, scientific work at the university, project competition, research and educational center.

#### **Введение**

К необходимости создания университетов человечество пришло много столетий назад. На территории нынешней Европы первый университет был создан в 1088 г. в Болонье, на севере Италии. В последующие годы появились университеты Оксфорд (1117 г.) и Кембридж (1209 г.) в Англии, университет Сорбонна (1215 г.) во Франции, университет Саламанка (1218) в Испании, Мадридский университет (1293 г.), университеты в Праге (1348 г.), Гейдельберге (1386 г.) и других европейских городах. В первых университетах студенты изучали теологию, философию, право, астрономию, арифметику, геометрию, литературу и медицину. Развитие и углубление знаний о природе и обществе естественно вело к открытию новых направлений подготовки в университетах и созданию новых специализированных факультетов. В процессе накопления приобретенного опыта постепенно формировались и утверждались основополагающие принципы организации жизни и деятельности университетов, базовые ценности и научно-про-



МЕТОДИЧЕСКИЙ  
ОТДЕЛ





светильские цели университетов. Результатом стало создание того, что сегодня мы называем университетской системой высшего образования.

Университетская система высшего образования – достаточно емкое понятие. Но можно выделить две наиболее отличительных и важных, на мой взгляд, компоненты этой системы. Уже на этапах создания университетов в основу была положена концепция неразрывной связи образовательного процесса и научных исследований по всем специальностям подготовки студентов. Было общепринято, что университетские преподаватели (профессора) должны подбираться из специалистов, являющихся в первую очередь учеными [1]. История университетов подтверждает, что многие университетские профессора действительно были выдающимися исследователями. Их вклад в науку увековечил их имена. Интересно напомнить, что при создании Московского университета 260 лет назад на должность первых профессоров были назначены исключительно ученые, имеющие признанные в то время опубликованные научные труды. Даже ученые звания не принимались во внимание!

А как же осуществляется общеобразовательный процесс подготовки студентов? Дело в том, что, вовлекая студентов в процесс научных исследований и решая с ними новые задачи, профессор обязан требовать от студента овладеть всем комплексом знаний, необходимых для исследований еще нерешенных проблем и задач. С целью получения нужных знаний студент слушает общеобразовательные лекции, работает на семинарах и в учебных лабораториях, сдает зачеты и экзамены. Но при этом он должен осознавать, что эти знания ему нужны для работы с профессором над научными задачами, которые решаются совместно со студентом. И здесь выявляется еще одна принципиальная особенность университетской системы, существенно отличающая университет от института или любого другого типа вуза. Студент в процессе приобретения необходимых знаний на лекциях профессоров других специальностей общается с преподавателями, которые также являются учеными в той науке, которую они преподают! Например, студент изучает физику и с руководителем исследует некие новые физические явления. Для их изучения и описания необходимым аппаратом, к примеру, служит теория дифференциальных уравнений. Студент посещает лекции профессора, читающего курс по дифференциальным уравнениям. А этот профессор сам является известным ученым

и работает со студентами над решением новых математических задач. Но свои исследования он проводит со студентами не физического, а математического факультета, который является соответствующим подразделением одного и того же университета. Современный университет включает в свой состав полный набор факультетов, профессора которых способны обеспечить подготовку студентов любого конкретного факультета по всей совокупности дисциплин, предусмотренных учебным планом специальности. Поэтому классический университет должен иметь в своем составе факультеты по фундаментальным научным направлениям (физический, химический, биологический, математический, исторический, философский, филологический и другие). Все сказанное относится не только к специальным дисциплинам, но и ко всему перечню научных дисциплин, обеспечивающих подготовку всесторонне образованных выпускников университетов.

Университетское сообщество с самых первых шагов создания системы университетской подготовки студентов добивалось автономии университетов. Автономия предполагает определенную самостоятельность и самоуправление в организации жизни университета, которые обеспечиваются использованием демократических норм в управлении и функционировании университетов. Жизнедеятельность университетов осуществляется и регулируется с помощью прописанных положений Устава. Устав разрабатывается коллективом университета, обсуждается и утверждается Ученым советом, который является представительным и законодательным органом любого университета. Уставы университетов на протяжении всей истории существования университетской системы пропитаны духом свободы и демократии. Это обусловлено тем важным фактом, что активная и плодотворная научная деятельность всего университетского сообщества немаловажна при отсутствии свободы личности и демократических норм, регулирующих все стороны жизни университета. Безусловно, важным в требовании автономии университетов являлось то, что университет включает любознательную молодежь, для которой демократия и свобода личности всегда были и будут основными приоритетами. Интересно отметить, что все профессора первого университета Европы в Болонье избирались и переизбирались студентами!

Подводя итог краткому введению, можно сказать, что каждый преподаватель современного



университета должен быть ученым, активно работающим специалистом в той дисциплине, которую он преподает. Что касается абитуриентов, решивших поступать в университет, то молодые люди должны глубоко осознавать, что они идут в университет не только для того, чтобы получить фундаментальные знания, но и для того, чтобы в процессе обучения под руководством профессоров получать и осмысливать новые знания по той специальности, которую они выбрали.

### **О реализации концепции университетского образования на практике**

Описанные выше отличительные особенности университетской системы высшего образования в некоторой степени могут восприниматься в качестве идеала, который недостижим в практической деятельности. В общем случае, наверное, это так и есть. Действительно, трудно, особенно сегодня, требовать активной научной работы от всех преподавателей [2], тем более от преподавателей физической культуры, иностранного языка и целого ряда других общеобразовательных дисциплин. Трудно также себе представить, что буквально каждый студент университета проводит серьезные научные исследования под руководством профессоров. Однако идеал на то и существует, чтобы к нему стремиться!

На протяжении долгих лет работы в Саратовском государственном университете им. Н. Г. Чернышевского (СГУ) я был свидетелем реализации широкого спектра программ, разработанных Министерством образования СССР, а затем Министерством образования и науки РФ, которые были направлены на развитие и совершенствование университетской системы образования с целью приближения российской системы к тому идеалу, о котором мы говорим. С середины 1990-х годов министерство стало объявлять конкурсы в рамках различных программ для поддержки университетов с выделением материальных ресурсов в виде грантов. Гранты выдавались на проведение научных исследований, технических разработок, на персональную поддержку продуктивно работающих университетских сотрудников, на покрытие расходов участия в международных конференциях молодых ученых и др. Программы министерства во многом способствовали улучшению положения части преподавателей и молодых ученых. К сожалению, эффективность их была явно недостаточной в силу малых объемов финансирования и относительно узкой направленности.

Главным достижением указанных программ было введение открытого конкурсного отбора лучших университетов, научных коллективов и отдельных преподавателей, которые становились получателями грантов. Если раньше господствовал принцип распределения бюджетных средств министерства без участия университетской общественности, то с некоторого времени определенная часть бюджета министерства стала распределяться на открытой конкурсной основе.

На моей памяти наиболее эффективной и значимой программой явилась программа «Фундаментальные исследования и высшее образование». Это был совместный проект Министерства образования и науки Российской Федерации и Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF), финансирование которого осуществлялось на паритетной основе. Эта программа оказалась одной из самых удачных и действенных программ, реально способствующих повышению уровня университетского образования [3]. Помимо уникального содержания самой программы, очень важную роль играл и тот факт, что она была международной, реализуемой под руководством компетентных специалистов из Америки и России. Одной из главных задач программы было создание на конкурсной основе 20 научно-образовательных центров (НОЦ) в лучших университетах России. Требования к НОЦ целиком и полностью отвечали современным представлениям о высшем университетском образовании. По своей сути НОЦ должны были стать малыми исследовательскими университетами высокого уровня, работающими внутри конкретного университета.

Каждый НОЦ был обязан проводить фундаментальные научные исследования с привлечением ведущих профессоров, молодых ученых и студентов. Необходимо было активно заниматься подготовкой кадров высшей квалификации (кандидатов и докторов наук). Требовалось обеспечить участие всех профессоров и доцентов (членов НОЦ) в педагогической работе с использованием в образовательном процессе самых современных достижений науки, включая научные результаты самих членов НОЦ. Требовалось разрабатывать учебные планы новых специальностей и специализаций и соответствующие программы курсов лекций. Необходимо было создавать новые учебно-научные лаборатории и практикумы, которые должны были обеспечивать не только учебный процесс, но и удовлетворять всем необходимым условиям





для научной работы студентов и аспирантов НОЦ под руководством ведущих профессоров. Наконец, третьей составной частью работы НОЦ была международная деятельность, направленная на обеспечение стажировок молодых ученых, участие в работе международных конференций с научными докладами, подготовку и публикацию совместных с зарубежными учеными научных статей и монографий. Для повышения эффективности международных связей в каждом НОЦ для преподавателей и студентов создавались группы изучения английского языка. Летом каждого года руководство программы организовывало школы английского языка для молодых ученых и аспирантов НОЦ с привлечением высококлассных педагогов, носителей языка.

Приведенный перечень целей и задач, которые ставились перед НОЦ, отражает хорошо известное содержание работы любого классического университета и не содержит ничего принципиально нового. Это так и есть. Огромная значимость программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» именно в этом и состояла! Но при этом программа имела существенные отличия от всех программ, которые реализовывались в нашей стране ранее. Во-первых, программа предусматривала достаточно весомое финансирование (порядка 400 тыс. долларов в год на каждый НОЦ), позволяющее на высоком уровне решать поставленные задачи. Во-вторых, в отличие от других программ, обеспечивающих финансирование на срок от 1 до 3 лет, эта программа обеспечивала долгосрочное финансирование НОЦ на срок до 10 лет. Конечно, при условии, что полный отчет за каждый год работы НОЦ получал положительную оценку экспертной группы программы.

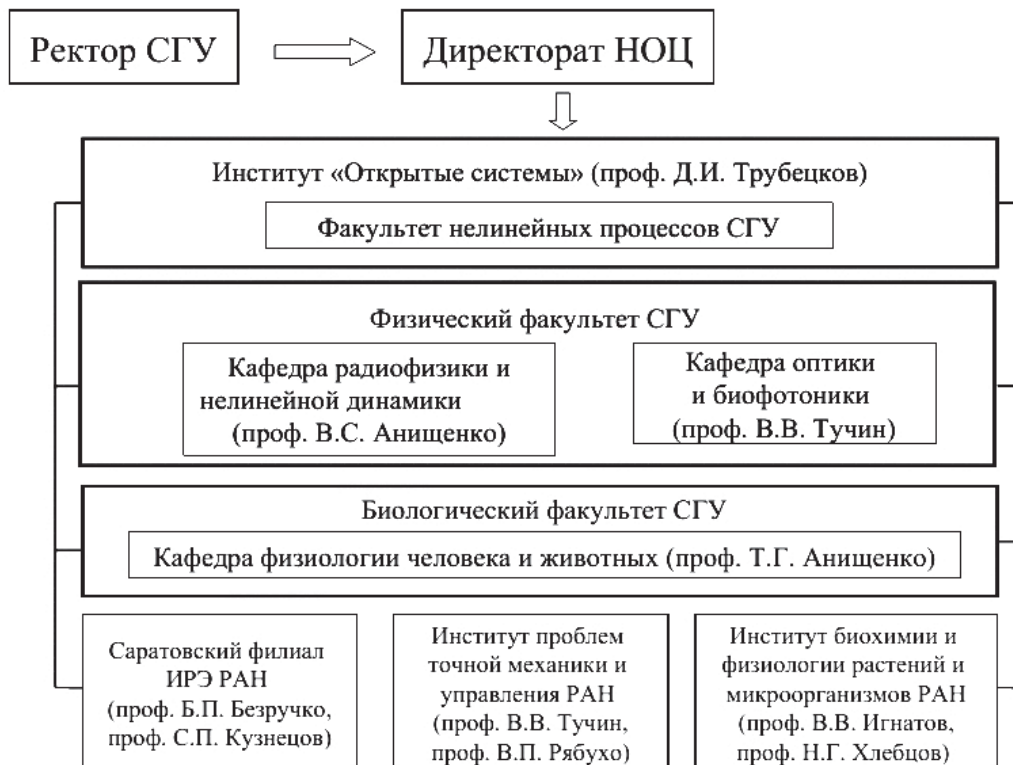
**Научно-образовательный центр  
«Нелинейная динамика и биофизика»  
при Саратовском государственном  
университете**

Программа «Фундаментальные исследования и высшее образование» стартовала 30 сентября 1998 г. Совет программы поручил Нижегородскому университету представить пилотный проект с целью отработать механизм создания НОЦ в университетах России. В результате был основан первый Научно-образовательный центр, который с 2002 г. получил название «Физика твердотельных нанострук-

тур». Затем последовательно были объявлены конкурсы на создание НОЦ при университетах. В каждом конкурсе победителями становились 4 университета, представившие наиболее содержательные проекты.

Саратовский университет подал на конкурс проект создания НОЦ «Нелинейная динамика и биофизика» и получил поддержку Совета программы летом 2000 г. Сегодня наш НОЦ отмечает юбилей – 15 лет со дня основания. Основу проекта составили имеющиеся к тому времени достижения в области науки и образования трех коллективов: кафедры оптики (руководитель профессор В. В. Тучин), кафедры электроники и волновых процессов (профессор Д. И. Трубецков) и кафедры радиофизики и нелинейной динамики (профессор В. С. Анищенко). Как уже говорилось, проект обязан был включать планы работ по трем направлениям. Необходимо было представить программы фундаментальных научных исследований (научная компонента), планы работ по повышению уровня и качества образовательного процесса в СГУ, включая подготовку специалистов высшей квалификации (образовательная компонента), и программу по развитию взаимодействия в области науки и образования с ведущими зарубежными и российскими университетами и научными организациями (компонента внешних связей). Несколько позже по требованию Совета программы в планы работ НОЦ был включен раздел по трансферу технологий (разработки объектов интеллектуальной собственности). Таким образом, проект был направлен на создание и практическое освоение реальной модели современного исследовательского университета, удовлетворяющего основным международным стандартам. Отметим, что в то время наш университет еще не входил в число национальных исследовательских университетов России.

Для реализации проекта Советом программы был утвержден руководящий состав НОЦ-006, включающий директора, руководителей каждой из трех компонент проекта (научной, образовательной и внешних связей), координатора по финансовым вопросам и ученого секретаря. Директором НОЦ-006 был назначен автор настоящей статьи, который руководит центром со дня его основания все последующие годы. Директорат НОЦ осуществлял свою деятельность в тесном контакте с ректором СГУ. Структурно-функциональная схема НОЦ представлена на рисунке.



Структурно-функциональная схема НОЦ-006 Саратовского государственного университета

Видно, что НОЦ представляет собой межфакультетское, межкафедральное объединение, взаимодействующее с тремя институтами Российской академии наук. Созданная при организации НОЦ структура с самого начала отвечала нашим представлениям о модели исследовательского университета. Отмечу, что эта структура и на сегодняшний день не претерпела изменений, что подтверждает ее жизнестойкость.

**Несколько слов о кадровом составе НОЦ-006.**

Общая численность преподавателей, аспирантов, молодых ученых и студентов в среднем по годам составляла 100–120 человек. Из них профессоров и доцентов было примерно 35–40, молодых ученых 25–30, аспирантов от 20 до 35. Количество студентов, привлекаемых к работе НОЦ, менялось в пределах 25–35 человек в год. На постоянной основе в НОЦ работали 30–35 профессоров и доцентов СГУ. За годы существования коллектив центра проделал большую работу по всем направлениям проекта, подробное описание результатов которой невозможно отразить в рамках статьи. Отметим лишь основные, наиболее важные и значимые достижения.

**Научные исследования.** Сотрудниками центра проводились исследования по целому ряду фундаментальных научных направле-

ний, включая нелинейную теорию колебаний и волн, статистическую радиофизику, теорию динамического хаоса, нелинейную оптику и биофотонику, а также приложения методов нелинейной динамики к решению задач медицинской физики и биофизики. Главной задачей проводимых исследований являлось получение новых фундаментальных результатов, конструктивное внедрение их в образовательный процесс и, конечно, подготовка докторов и кандидатов наук из числа молодых ученых и аспирантов центра. Показателем достижений в научной деятельности центра служат публикации научных статей и тезисов докладов на конференциях. Ежегодно публикуется от 200 до 400 научных работ. Из них научных статей в среднем 130, не менее 50% из которых публикуются в ведущих иностранных журналах с высоким рейтингом (результаты представлены в таблице). За время работы центра более 20 молодых ученых защитили докторские диссертации, более 120 аспирантов стали кандидатами наук. По итогам научной работы ведущими профессорами центра опубликовано 55 научных монографий и учебников, из которых около половины вышли в крупных мировых издательствах. Важной отличительной особенностью явилось то, что



научная продукция профессоров и доцентов целиком и полностью отвечала программам их лекционных курсов и планам научной работы с молодыми учеными и студентами. Директорату

НОЦ-006 удалось реализовать один из главных университетских принципов: каждый преподаватель – ученый в области той дисциплины, которую он преподает студентам!

#### Публикации сотрудников НОЦ в 2000–2010 гг.

Виды публикаций сотрудников НОЦ	Количество публикаций										
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Статьи в иностранных реферируемых журналах	28	48	91	122	110	150	29	41	24	34	44
Статьи в российских реферируемых журналах	35	54	63	83	103	101	46	34	44	70	82
Тезисы докладов на международных конференциях	6	34	67	149	107	59	25	108	55	127	73
Тезисы докладов на российских конференциях	9	61	84	94	84	19	25	96	30	51	47
Публикации с участием студентов	14	35	51	129	106	65	54	59	42	38	61
Общее количество публикаций	78	197	305	448	404	329	125	338	153	282	246

#### *Совершенствование учебного процесса.*

Реализация плана работ по образовательной компоненте проекта была ориентирована на достижение следующих основных целей: разработка и внедрение новых моделей образования на базе современных достижений науки; методическое обеспечение взаимосвязи научного и учебного процессов; создание и апробация образовательных стандартов и учебных планов по новым специальностям. Коллективом центра разработаны и внедрены в СГУ системы взаимосвязанных учебных дисциплин на базе общеобразовательных физико-математических курсов и специальных курсов, формирующих у студентов активное «нелинейное мышление». Разработаны и утверждены новые учебные планы по специальностям «Радиофизика», «Радиофизика и электроника», «Физика», «Медицинская физика» и «Биохимическая физика». Разработаны и введены в действие учебные планы 5 специализаций в рамках указанных выше специальностей. С целью эффективной реализации этих планов создано 9 новых лабораторных практикумов высокого уровня, 6 новых учебно-научных лабораторий, проведено переоснащение и модернизация 7 существующих практикумов с постановкой в них нового оборудования. Создан уникальный Учебно-научный компьютерный центр для студентов и аспирантов. Сотрудниками научно-

образовательного центра полностью модернизировано 3 компьютерных класса, в которых установлена новая вычислительная техника и электронные версии учебно-методических пособий. При создании учебно-научных подразделений НОЦ все помещения были отремонтированы и укомплектованы мебелью, офисным и презентационным оборудованием.

Важным достижением явилось создание новой модели научно-образовательного комплекса в виде института «Открытые системы», который включает факультет нелинейных процессов, Лицей прикладных наук, научный сектор и редакционно-издательский комплекс. Ежегодно сотрудниками центра разрабатывались и читались 13–15 (всего более 90) новых лекционных курсов, публиковалось 10–20 (всего более 120) учебников и учебных пособий, ставилось 5–7 новых лабораторных работ. Студенты каждый год представляли 20–30 научных работ по тематике НОЦ, 12–18 выпускников ежегодно защищали свои дипломные и магистерские работы.

**Внешние связи НОЦ-006.** Важными направлениями деятельности центра являлись установление и развитие тесных научных контактов с ведущими университетами и научными центрами как в России, так и за ее пределами. В результате активной деятельности ведущих профессоров НОЦ были установлены и продолжают



поддерживаться контакты с 15 университетами РФ, 35 образовательными и научными центрами стран бывшего СССР и 49 ведущими зарубежными университетами и научными институтами. Из них 12 центров в США, 25 в Европе и 12 в Азии. Это взаимодействие включает приглашение ведущих зарубежных ученых для чтения лекций, проведение конференций и семинаров в Саратове, научную работу по совместным грантам, написание совместных научных статей и монографий. За годы работы НОЦ наш университет посетили около 120 ведущих ученых из России и из университетов и научных организаций дальнего зарубежья. В свою очередь, сотрудники НОЦ выезжали в ведущие центры нашей страны и мира на стажировки, конференции, семинары и для проведения совместных исследований. Наш НОЦ совместно с зарубежными учеными организовывал каждый год от 1 до 4 международных конференций, примерно 15 совместных научных семинаров с использованием виртуального образовательного центра. Регулярно 5–6 молодых сотрудников центра проходили стажировку в организациях России, 12–14 ведущих сотрудников выезжали в командировки за рубеж, где регулярно проводили исследования 15–22 аспирантов и студентов. Разработана и запущена международная программа Bridge Project совместно с Крэнфилдским университетом Великобритании по реализации учебного плана магистров специальности «Менеджмент в биофотонике и биотехнологии». Три ведущих профессора из Германии, Испании и Польши получили звание почетного доктора Саратовского университета. Результатом проделанной работы стало то, что коллектив НОЦ-006 практически интегрировался в международную университетскую среду. Мы получили доступ к обсуждению научных результатов и планов работ в кругу непосредственных специалистов, на практике ознакомились и используем накопленный ими опыт организации университетской жизни.

#### **Финансирование и административное сопровождение проекта НОЦ-006**

Приведенный выше далеко не полный перечень достигнутых коллективом центра результатов, безусловно, стал реально возможным благодаря финансовому обеспечению проекта. Программа «Фундаментальные исследования и высшее образование» со стороны Америки финансировалась из частных средств Фонда

Джона Д. и Кэтрин Т. МакАртуров (США) и корпорации Карнеги в Нью-Йорке (50%). Министерство образования и науки РФ поддерживало работу программы из бюджета (25%). Оставшиеся 25% средств должны были выделять региональные власти, которые, как правило, своих обязательств не выполняли. Административное сопровождение всех проектов программы осуществляла специальная созданная структура из представителей Фонда CRDF и Министерства, офис которой находился в Москве. Коллективу, выигравшему конкурс, в первые три года выделялось 1 050 000 долларов США из Фонда CRDF (\$450 000 в первый, по \$300 000 во второй и третий годы). На четвертый и пятый годы выделялось по \$250 000 и далее суммы становились меньше. Соответственно Министерство выделяло половину указанных сумм в рублях. Это то, что касается базового финансирования НОЦ. В рамках программы со стороны CRDF финансировался целый ряд дополнительных подпрограмм и конкурсов. Например, объявлялись конкурсы исследовательских проектов на проведение ориентированных фундаментальных исследований (гранты объемом \$200 000), реализовывалась подпрограмма поддержки молодых кандидатов наук (гранты на 3 года по \$4 000 в год), конкурсы мини-грантов для аспирантов и студентов (\$5 000 в год), гранты на создание офисов трансфера технологий, на поддержку курсов по изучению английского языка. Отдельные конкурсы объявлялись на закупку высокотехнологического оборудования, которое необходимо для проведения фундаментальных исследований. НОЦ-006 успешно участвовал во всех дополнительных конкурсах и регулярно их выигрывал.

Таким образом, коллектив центра получал весомую финансовую поддержку, позволяющую вести многоплановую работу на высоком научном уровне. По грубой оценке общий объем финансирования НОЦ-006 за 10 лет составил примерно 120 миллионов рублей. В последующие годы регулярное финансирование центров было прекращено. Это было заложено в план программы, который предусматривал постепенный переход всех созданных центров на условия полного самофинансирования.

Административное управление центром осуществлялось руководством программы, которое опиралось на штатных сотрудников центрального офиса, обеспечивающих всю практическую деятельность центров. В нашем центре руководящим органом был директорат в





составе шести человек. Все члены директората работали, по сути, на общественных началах, так как они в первую очередь являлись руководителями и исполнителями разделов проекта в своих группах. Для работы с руководством программы (финансовая деятельность, отчеты и т.д.) директорат ввел должность помощника на постоянной оплате.

Директорат каждые полгода в результате открытого обсуждения принимал решения относительно выделения средств на закупку оборудования, оплату труда и другие статьи расходов. Наши предложения утверждались в центральном офисе. Оплата труда сотрудников осуществлялась на персональные счета в банке. Для закупки оборудования директором в центральный офис направлялись счета, которые оплачивались из средств CRDF без нашего участия. Все закупленное оборудование ставилось на учет в материальной бухгалтерии СГУ в обязательном порядке. Отметим, что средства поддержки центров с американской стороны освобождались от любых видов налогов. По требованию руководства программы не менее 50% всех средств центр должен был расходовать на закупку оборудования. Устанавливался также минимальный фонд поддержки молодых сотрудников центра. Вся система административного сопровождения проектов была продумана до мелочей, характеризовалась полной открытостью и исключала возможность нецелевого использования выделяемых средств. Условия освоения министерской компоненты подчинялись обычным правилам использования бюджетных средств на территории России.

Комиссии совета программы, включая 4–6 представителей Фонда CRDF из США, раз в год посещали каждый НОЦ и детально знакомились с результатами работы на месте. Руководящий совет программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» ежегодно проводил конференции всех НОЦ на базе одного из университетов. Каждый НОЦ обязан был делегировать на конференцию своих представителей в составе 8 человек, включая 3 студентов или аспирантов. На конференциях представлялись доклады руководителей НОЦ, научные доклады молодежи, проводились плодотворные дискуссии по проблемам совершенствования работы центров. Итоги работы конференции подводил совет программы на отдельном заседании. Конференция завершалась выступлением одного из руководителей программы, который останавливался на важных достижениях НОЦ,

отмечал недостатки и уточнял ключевые задачи на следующий год. Привожу подробное описание деятельности представителей руководства программы, чтобы отметить удивительную заинтересованность и искреннее желание с их стороны детально вникнуть в содержание деятельности каждого отдельного центра с целью помочь в практической работе по достижении главных целей программы. За 50 лет работы преподавателем университета ничего подобного я не наблюдал.

### **Заключение и основные выводы**

В результате многолетней работы по реализации проекта можно с уверенностью констатировать, что основная цель программы коллективом НОЦ-006 полностью достигнута. Разработана и реализована модель современного исследовательского университета, успешно работающего в составе большого университета, которым является СГУ. Руководством НОЦ внедрена на практике интеграция передовых научных исследований и образования с широким привлечением молодежи к науке, созданы все условия для эффективного международного сотрудничества. Обеспечен переход структурных подразделений НОЦ к режиму устойчивой работы с достаточным финансированием.

Действительно, центр сегодня превратился в три самостоятельных успешных коллектива, которые на этапе организации были объединены в один. Коллектив факультета нелинейных процессов вместе с институтом «Открытые системы», Лицеом прикладных наук и редакционно-издательским центром, по сути, сам является малым исследовательским университетом в составе СГУ (руководитель профессор Д. И. Трубецков). Два других подразделения НОЦ также основали институты: институт «Оптика и биофотоника» (руководитель профессор В. В. Тучин) и «Международный научно-исследовательский институт нелинейной динамики» (руководитель профессор В. С. Анищенко). Все три названных коллектива получили статус ведущих учебно-научных коллективов РФ и вошли в число ведущих научных школ РФ. Указанные коллективы «зарабатывают» научные деньги, выигрывая конкурсы научных проектов, как российские, так и международные. Общий объем финансирования указанных коллективов сегодня превышает объем первоначального финансирования НОЦ в рамках программы. Важно отметить то, что в числе наиболее успешных научных работников и преподавателей этих



коллективов сегодня много воспитанников НОЦ. Большая работа ведущих сотрудников центра по подготовке кадров высшей квалификации дала ощутимые результаты не только для СГУ, но и для региональных образовательных и научных организаций. Наши воспитанники сегодня заведуют кафедрами, работают деканами и заместителями деканов, руководят работой НИЧ как в СГУ, так и в других вузах региона. Многие из них являются ведущими научными сотрудниками исследовательских институтов Саратовского отделения РАН.

Среди преподавателей Саратовского университета сотрудники, прошедшие школу нашего НОЦ, имеют самые высокие показатели по количеству и качеству публикаций, по индексу научного цитирования, по индексу Хирша. Показатели лучших из них практически сравнимы с соответствующими показателями профессоров зарубежных университетов. Количество таких преподавателей сегодня не так велико и не превышает 3% от общего числа преподавателей нашего университета. Однако их суммарный рейтинговый балл, рассчитываемый в СГУ по итогам года, многократно больше и составляет более 35% суммарного рейтингового балла университетского коллектива в целом. С целью иллюстрации эффективности научной работы коллектива НОЦ-006 приведу следующие данные. Среднее количество научных статей в год составляет примерно 130, из которых не менее 65 в журналах с высоким рейтингом. При затратах в 12 млн руб. в год публикация одной статьи обходится примерно в 90 000 руб. Стоимость одной статьи в ведущих журналах соответственно в два раза дороже. Для сравнения: публикация одной статьи в институтах РАН требует около 1 млн руб. На \$1 млн затрат сотрудниками РАН публикуется 70 научных статей. Если оценивать стоимость публикаций РАН в журналах с высоким рейтингом, то она возрастает в три раза (2008 г. – 2.9 млн руб., 2011 г. – 3.5 млн руб.). Экспертная группа по реализации приоритетного направления «Науки о жизни» на 2014–2020 гг. оценивает вложения на публикацию одной статьи в журнале с импакт-фактором не менее 2 в 5 млн руб. в год! Приведу конкретный пример из личного опыта. В период 2013–2014 гг. моей группой выполнялся научный проект, финансируемый грантом РФФИ №13-02-00216 на общую сумму в 620 000 руб. В научный отчет вошли 6 статей, цитируемых в Web of Science: 3 статьи в журнале «Communication in Nonlinear Science and Numeri-

cal Simulation» (импакт-фактор 2.77), 2 статьи в журнале «Chaos» (2.19) и 1 статья в журнале «Успехи физических наук» (2.07). Затраты на публикацию одной такой статьи составили 103.3 тыс. руб., что даже меньше средних показателей по НОЦ за 10 лет работы. Приведенные цифры убедительно свидетельствуют об эффективности вложений в университетскую науку. При этом, безусловно, важным является именно конкурсный метод выделения финансовой поддержки научных исследований, как университетам, так и отдельным коллективам университетских работников.

Не могу не сказать о важном факте, который можно рассматривать и как достижение, и как недостаток нашей работы. Из числа молодых ученых, прошедших школу нашего НОЦ, около 20 получили постоянные позиции профессоров и научных сотрудников ведущих зарубежных университетов и научных центров. Сегодня в США работают 10 наших воспитанников, в европейских университетах – 9. Саратовский университет часто приглашает для чтения лекций в качестве ведущих западных ученых наших же учеников! Мы можем этим гордиться, так как они остались в науке, являются известными учеными и активно сотрудничают с родным университетом. Однако, наверное, было бы замечательно видеть всех этих талантливых ученых в стенах нашего университета. Ведь все они не просто лучшие наши воспитанники, они являются самыми лучшими. К сожалению, этого не удалось сделать.

В последние годы в России реализуется фундаментальная государственная программа Национальных исследовательских университетов. В число 29 университетов, выигравших конкурс, вошел и наш университет. Как мне представляется, программа НИУ должна базироваться на многих центральных положениях программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» [3]. Действительно, многие положения программы НИУ сходны. Более того, программа НИУ в некоторых положениях мощнее и объемнее программы НОЦ. Однако в плане методического и организационного обеспечения взаимосвязи учебного процесса и научной работы студентов под руководством преподавателей она уступает программе НОЦ. А это направление работы исследовательского университета, по моему мнению, является и должно быть одним из центральных. В связи с этим считаю целесообразным более подробно информирование



и обсуждение результатов работы НОЦ-006 в коллективе СГУ. Может показаться странным, но с докладом о работе НОЦ на совете СГУ я выступал всего лишь один раз много лет назад. Нашим опытом могут и должны воспользоваться пусть не все, но многие факультеты или кафедры СГУ. Именно для достижения этой цели и написана настоящая статья.

В заключение от имени сотрудников НОЦ-006 я хочу выразить огромную благодарность руководящему совету программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» за ее разработку и практическую реализацию. Итогом стало создание малых исследовательских университетов современного уровня в 20 ведущих университетах России, практически каждый из которых сегодня получил статус Национального исследовательского университета РФ.

## Список литературы

1. Анищенко В. С. Университетского образования без науки быть не может // *Alma mater* (Вестник высшей школы). 2013. № 2. С. 14–20.
2. Анищенко В. С. Высшая школа : проблемы и перспективы // *Общественное мнение*. 2009. № 12 (123). С. 38–43.
3. Научно-образовательные центры высшей школы. Этапы становления и развития / Министерство образования и науки Российской Федерации, Американский фонд гражданских исследований и развития. Тверь : Тверской государственный университет, Тверской Инно-центр, 2008.
4. Анищенко В. С., Елина Е. Г. Об опыте количественной оценки эффективности работы преподавателей в Саратовском национальном исследовательском университете // *Alma mater* (Вестник высшей школы). 2015. № 3. С. 30–37.

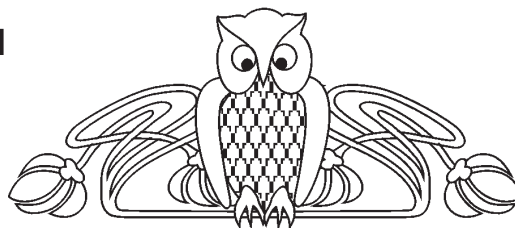
УДК 681.3(072)

## НАУЧНОЕ РУКОВОДСТВО АСПИРАНТАМИ: «ВНУТРЕННИЕ» И «ВНЕШНИЕ» РЕГУЛЯТОРЫ

В. М. Аникин<sup>1</sup>, Б. Н. Пойзнер<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный университет  
E-mail: AnikinVM@info.sgu.ru

<sup>2</sup>Томский государственный университет



О деятельности научного руководителя по мотивированию аспирантов к рефлексии над собственной творческой работой.

**Ключевые слова:** аспирантура, научный руководитель, критерии научности.

**Scientific Supervision by Graduate Students:  
«Internal» and «External» Regulators**

V. M. Anikin, B. N. Poizner

About the motivation of graduate students to reflect on their own creative work.

**Key words:** postgraduate studies, scientific supervisor, scientific criteria.

Мы не знаем, какой будет наука завтра.

Знаем только, что без будущего науки не имеет будущего современный мир.

*Профессор философии J. Mittelstraß, 1994*

Обучение аспирантов регламентируется основной образовательной программой (по

соответствующей специальности подготовки), которая включает учебный рабочий план, рабочие программы дисциплин и другие предусмотренные государственными образовательными стандартами компоненты. Ключевая роль в учебно-научном процессе в аспирантуре отводится научному руководителю. До принятия Федерального закона от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» доминировала такая установка на конечный результат обучения в аспирантуре: «на выходе» аспирант должен иметь написанную диссертацию. Хотя сейчас по закону об образовании защита диссертации после окончания аспирантуры не является строго обязательной для получения свидетельства об обучении, официальная и неофициальная оценка эффективности работы и аспирантуры, и научного руководителя, тем не менее, зависит от степени успешности обучения аспиранта.



Известно, что установка на защиту в сжатые сроки на практике в полном объеме никогда не реализовывалась, в том числе из-за того, что ни руководитель, ни аспирант по разным причинам не придерживались правил научно-взаимодействия. Поэтому в общем случае, возможно, полезно закреплять конвенционалистский характер принимаемых норм и правил взаимоотношения научных руководителей и аспирантов в соответствующих локальных актах образовательных учреждений, на базе которых функционирует аспирантура. Ясно, что формализация правил и содержания научного руководства может только до какой-то степени дисциплинировать и обогатить содержание работы научного руководителя, повысить компетентностный уровень аспиранта в ряде позиций «спектра» подготовки, но собственно «научный выход» определяется не столько типологией взаимоотношений, сколько типологией личностей, участвующих в образовательном процессе в аспирантуре. В данной статье рассматриваются составляющие деятельности научного руководителя, направленные на осознание аспирантами принципов и идеалов научности, а также формализованных правил представления нового знания.

### **Официальные целевые установки при работе с аспирантами**

Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации», введенный в действие с 1 сентября 2013 г.<sup>1</sup>, придал аспирантуре статус третьей, заключительной, ступени высшего образования, целью образовательного процесса в которой ставится подготовка научно-педагогических кадров<sup>2</sup>, приобретение выпускниками «необходимого для осуществления профессиональной деятельности уровня знаний, умений, навыков, опыта деятельности и подготовки

<sup>1</sup> Федеральный закон № 273-ФЗ от 29 декабря 2012 г.

<sup>2</sup> В статье 72 «Закона об образовании в Российской Федерации» определен общий контекст сочетания образовательно-научной деятельности: «Целями интеграции образовательной и научной (научно-исследовательской) деятельности в высшем образовании являются кадровое обеспечение научных исследований, повышение качества подготовки обучающихся по образовательным программам высшего образования, привлечение обучающихся к проведению научных исследований под руководством научных работников, использование новых знаний и достижений науки и техники в образовательной деятельности».

к защите научно-квалификационной работы (диссертации) на соискание ученой степени кандидата наук»<sup>3</sup>.

Центральная роль в осуществлении научно-исследовательской деятельности, предусмотренной аспирантскими программами подготовки, как и раньше, отводится научному руководителю: именно на него возлагается осуществление контроля «за выполнением обучающимися индивидуального учебного плана»<sup>4</sup>. Общие формальные требования к уровню научно-педагогической квалификации научного руководителя определяются федеральными государственными образовательными стандартами и сводятся, как правило, к наличию ученой степени доктора или (как исключение) кандидата наук, ведению активной научно-исследовательской деятельности, подтвержденной публикациями в ведущих отечественных и (или) зарубежных рецензируемых журналах и участием в национальных и международных конференциях.

Функции, регламент деятельности, права и обязанности научного руководителя в официальных документах прописаны очень сжато. Так, в пунктах 31 и 32 приказа Минобрнауки № 1259 от 19 ноября 2013 г. лишь отмечается, что:

а) научный руководитель назначается «распорядительным актом организации» не позднее трех месяцев с момента зачисления аспиранта на обучения;

б) таким же актом организации утверждается тема научно-исследовательской работы.

Заключительный «выход на сцену» научного руководителя прописан в «Положении о присуждении ученых степеней»: научный руководитель аспиранта должен представить письменный отзыв на диссертационную работу.

### **Принципы и идеалы научности как «внутренний» регулятор научной деятельности и руководства**

Деятельность руководителя должна иметь целевую направленность на подготовку компетентного выпускника аспирантуры, харак-

<sup>3</sup> Пункт 2 приказа Министерства образования и науки Российской Федерации (Минобрнауки России) «Об утверждении Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре)» № 1259 от 19 ноября 2013 г.

<sup>4</sup> Пункт 30 приказа Минобрнауки № 1259 от 19 ноября 2013 г.





теристика которого дана в первом абзаце предыдущего раздела статьи. Внутренним же, ценностным, стержнем этой работы, как представляется, должно стать усвоение (осознание) аспирантами прежде всего признаков и идеалов (высших целей и эталонов) научности, в соотношении с которыми развивается познавательная деятельность [1].

Идеалы научности как теоретические принципы выработаны в ходе эволюции познавательной деятельности, по мере осмысления способов выработки знания. Они представляют собой фактор, вносящий *единый порядок*, координацию в проведение исследований членами мирового научного сообщества. Тем самым идеалы научности консолидируют научное сообщество и обеспечивают *устойчивое развитие науки*. Социальное признание идеалов научности означает принятие некоторого (субъективного – с позиции временной шкалы) представления членов сообщества о том, что приемлемо или неприемлемо, корректно или некорректно, обоснованно или необоснованно использовать в научной деятельности (в первую очередь это касается выбора методологии научного исследования). И эта совокупность установок позволяет давать оценку результатов и своей, и чужой деятельности. Тем самым, идеалы научности могут быть выражены через *конкретные критерии* оценки творческих достижений.

Каковы же они, эти критерии? Германский социолог Н. Луман (1927–1998), один из авторитетов конца XX в. в теории эволюции социальных систем, считал, что науку как познавательную подсистему общества отличают следующие средства оперативного *внутреннего управления (самоуправления)* [1, с. 58–65]:

*А. Критерий истинности:* научное высказывание (умозаключение), сделанное на основе экспериментальных и (или) теоретических результатов исследования может иметь (в логическом представлении) либо значение «истина», либо «ложь».

*Б. Критерий всеобщности:* научные результаты не зависят от всех «внеаучных» факторов, они верны «для всех без различия, без исключений».

*В. Критерий воспринимаемости результатов:* результаты признаются истинными в результате апробации и дискуссии в рамках согласованных способов проведения исследований, описания их процедур и получения результатов.

*Г. Критерий верифицируемости результатов:* истинность научного результата подтверждается посредством его воспроизводимости в эксперименте, сопоставления с данными опыта других исследователей и (или) с положениями теории в рамках соответствующих модельных предположений.

*Д. Критерий фальсифицируемости результатов (по К. Попперу):* гарантированная возможность процедуры, но теперь, напротив, установления ложности полученных результатов по общепринятым правилам посредством опять же сопоставления с экспериментальными данными и (или) с фундаментальными положениями теории, которая принята в научном сообществе.

*Е. Критерий операционализируемости (по П. У. Бриджмену):* возможны действия в рамках методологической позиции, согласно которой содержание научных понятий и теоретических конструкций обуславливается совокупностями экспериментально-измерительных и (или) умственных (подобно процедурам счёта) *операций*.

*Ж. Критерий измеримости* как «универсальное средство количественного познания реальности, лежащее в основе всякого физического знания».

#### **«Внешние» регуляторы научного руководства**

Критерии научности, а также многолетние (если не сказать – вековые) традиции по представлению диссертаций на основе положений, выносимых на защиту, писанных и неписанных правил научной этики, форм профессионального общения (семинары, конференции, журналы – бумажные и электронные), других социальных механизмов [2–13], регулируют «жизнь науки», по выражению С. П. Капицы, *изнутри*, обеспечивая её самопрозрачность, самоорганизацию, самоочищение, самовоспроизведение. Философ и историк техники В. В. Чешев из внутренних регулятивов поведения исследователя явно выделяет мотивацию к постижению истины в процессе научного познания: «Истина, в том числе естественно-научная, представляет собой моральную ценность, или, по меньшей мере, такой ценностью является мотивация на поиск истины, тренировка мышления и сознания» (для этого поиска – *авт.*) [14, с. 38].

С другой же стороны, отечественная наука и все её «клетки» – лаборатории, кафедры, диссертационные советы и т.д. – испытывают и *внешнее давление-управление*, которое в по-



следнее время, в связи с перестройкой систем высшего образования и аттестации кадров высшей квалификации, становится все более сильным и широким. Но, как отмечается в [15, с. 13], «критерии и императивы науки и управления отнюдь не обязательно совпадают». Внешние управляющие действия в области диссертационных защит сопряжены с увеличением объемов различной отчетности и изменением формальных правил. Так, запрет официального оппонирования диссертаций членами диссертационных советов, в котором проходит защита, и профессорами университетов, где выполнялась работа, в случае «провинциальных» советов может привести не к повышению уровня объективности оценок, а, наоборот, к «однобокости» отзывов. Дело в том, что иногородние оппоненты нередко отсутствуют на защитах по разным причинам (формально защита диссертации разрешается в присутствии одного из официальных оппонентов). В этой связи отдельные ученые, *одновременно знающие предмет, удовлетворяющие формальным требованиям и имеющие возможность присутствовать на защите*, вынуждены ставить «стахановские» рекорды в диссертационных советах по числу прорецензированных работ. Когда занимались оппонированием владеющие соответствующей методикой члены диссертационных советов, отзывы могли быть, в целом, гораздо интереснее и «задиристее».

Тем не менее, разумные «внутренне-внешние» правила этического поведения при научном руководстве нужны, поскольку руководитель вместе со своим учеником нуждаются во внимании других людей, от которых в конечном счете зависит и признание научной работы состоявшейся, и фиксация этого факта посредством выдачи диплома кандидата наук.

#### **Функции научного руководителя на этапах представления и защиты диссертации**

На этапе представления диссертации в совет научный руководитель начинает играть в тандеме «научный руководитель – соискатель» особую представительскую роль. От него зависит окончательное «добро» диссертационной работе, успешная организация научного семинара, который принимает официальный документ – заключение организации, где выполнена работа. В организационных моментах многое определяется авторитетом и степенью известно-

сти руководителя, уровнем его коммуникабельности (такие качества «шефа», между прочим, иногда соискателями недооцениваются).

Диссертационный совет на заседании по принятию диссертации к защите оценивает качество работы и при ее соответствии прописанным в «Положении о присуждении ученых степеней» критериям утверждает ведущую организацию и официальных оппонентов (в соответствии с непростыми, как уже отмечалось выше, для реализации правилами), разрешает печатать автореферат диссертации, назначает дату защиты, размещает объявления о защите и автореферат диссертации на сайтах ВАК и организации, на базе которой функционирует совет. В интернете размещаются также полный текст диссертации и поступающие отзывы.

К моменту представления соискателем документов в совет руководитель должен написать и заверить подобающим образом отзыв о диссертации и соискателе. Существуют расхождения во взглядах на то, что должен содержать отзыв научного руководителя<sup>5</sup>. Достаточно устоявшимся является мнение о том, что в этом отзыве дается исключительно характеристика соискателя в контексте его уровня научно-педагогической подготовки. Думается, подобный подход к отзыву существенно обедняет его, а научный руководитель лишается возможности в кристаллизованном виде письменно высказать свое видение актуальности и способов разрешения научной проблемы, рассмотренной в диссертации. В результате важной информации лишаются и члены диссертационного совета, да и все те, кто заинтересуется работой и будет изучать материалы, представленные на сайте организации, на базе которой действует совет. Как представляется, оптимальным является отзыв, который отражает как суть научного содержания диссертации, так и личностные характеристики соискателя, его конкретный личный вклад в работу.

<sup>5</sup> Действующее «Положение о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, на соискание ученой степени кандидата наук» констатирует лишь необходимость наличия письменного отзыва руководителя в момент представления диссертации в совет (п. 24з) и необходимость его устного выступления на защите (п. 33). Содержательные компоненты отзыва научного руководителя (в отличие от заключения организации, где выполнена работа, отзывов ведущей организации и официальных оппонентов) не детализируются.



Процедура защиты предусматривает устное выступление научного руководителя после доклада соискателя и его ответов на заданные вопросы. Как правило, многие руководители отступают от заготовленного текста и в зависимости от хода дискуссии высказывают свое мнение по различным вопросам, касающимся и соискателя, и диссертации. Такие «отклонения» включаются в стенограмму защиты в дополнение к письменному отзыву.

Хотелось бы обратить внимание научных руководителей на их обязанность (вот она-то непременно должна фиксироваться в локальных актах о научном руководителе) давать «вводные» консультации для соискателей о документации и порядке ее представления в диссертационный совет, знакомить соискателей с процедурой защиты (например, посредством их участия в заседаниях совета, на которых проводятся защиты диссертаций).

Ведь как показывает практика, многие научные руководители полностью отстраняются от подобных забот и отправляют соискателей к руководству диссертационного совета за разъяснением самых элементарных вопросов (апофеозом наивной «безграмотности» стал однажды вопрос соискателя к ученому секретарю совета о том, как и где ему переплести диссертацию). Естественно, подобное «нахлебничество» (если не сказать более резко – «паразитирование») у загруженных людей, ведущих общественную работу в совете, восторгов вызвать не может. Прежде чем направлять соискателя за детальной консультацией в совет, научным руководителям следовало бы (хотя бы в целях поддержания собственной «респектабельности») предварительно освежить свои знания действующих нормативных документов о присуждении ученых степеней.

#### **Как защищали диссертации 100 и более лет назад**

Рассмотрим для сравнения некоторые подходы к высшему образованию и «подготовке кадров высшей квалификации» в России начала прошлого века.

Число студентов в университетах заметно уменьшалось от курса к курсу, и число выпускников могло составить 1/10 от числа поступавших (так, во всяком случае, было на физико-математическом факультете Московского университета в начале XX века). При этом часть введенных профессорских должностей оставалась не занятой.

Чтобы быть оставленным при университете «для подготовки к профессорскому званию», необходимо было продемонстрировать и хороший диплом, и действительное наличие способностей к научной деятельности (кстати, в университеты принимали *только выпускников гимназий*). Магистрант в процессе пребывания в университете должен был не только выполнить магистерскую диссертацию (первая ученая степень), но и пройти через сито «магистерских» экзаменов (на совете факультета), чтобы было непросто и из-за их *количества* (до 5-6), и из-за *объемистых программ*. Редко кто сдавал экзамены с первой попытки, иногда для этого требовались годы [16]. Магистрант, защитивший диссертацию, мог претендовать на должность приват-доцента или даже сверхординарного профессора провинциального университета; не запрещалось занятие профессорских должностей в периферийных университетах без защиты диссертации. Кроме того, защита магистерской диссертации давала право на командировку в граничные научные учреждения сроком до двух лет.

В конце XIX века в число магистерских испытаний входили и экзамены по древним языкам, чего, скажем, *не было* в западных университетах. Поэтому иногда выходцами из России практиковалась защита магистерской диссертации в зарубежных университетах, что, однако, *не давало прав* на занятие преподавательской должности в России. Необходимо было «перезащищать» магистерскую диссертацию (со всеми сопутствующими атрибутами) или в случае выдающихся достижений «выходить» сразу на защиту докторской диссертации. Это позволял Общий Устав Императорских Российских университетов 1884 года, но за всю историю российских защит в 1884–1917 гг. таким правом воспользовались не более 30 человек [16].

Акт защиты диссертации, предваряемый типографским изданием текста, происходил публично на заседании Совета факультета, на котором могли присутствовать все желающие. Предусматривались выступления оппонентов *из числа профессоров факультета* и вопросы со стороны присутствующих. Ученая степень присуждалась *Советом факультета*, а затем утверждалась *Советом университета*. Накануне защиты газеты печатали объявления и дополнительные *отзывы на диссертацию*, а после защиты – отчет о состоявшемся «диспуте».



\* \* \*

Признавая необходимым и полезным корректное и адекватное регулирование процесса подготовки научно-педагогических кадров, заметим, что «внешнее» воздействие на процессы диссертационных защит заметно усиливалось, когда вскрывались случаи недобросовестных присуждений ученых степеней. Первый такой случай в России произошел в Дерптском университете в XIX веке и получил название дерптской аферы (дерптского дела). В десятых годах нынешнего, XXI столетия, одним из катализаторов диссертационных реформ послужили массовые незаконные присуждения ученых степеней в одном из столичных вузов.

Положительная репутация диссертационного совета, формируемая годами его объективной и безупречной работы, является одной из истинных университетских ценностей.

#### Список литературы

1. *Измайлов И. В., Пойзнер Б. Н.* О науке, событиях в истории изучения света, колебаний, волн, об их исследователях, а также глоссы и этимоны : учеб. пособие / под ред. А. В. Войцеховского. Томск : Издательский дом ТГУ, 2014. 380 с.
2. *Аникин В. М., Усанов Д. А.* Диссертация в зеркале автореферата : метод пособие для аспирантов и соискателей ученой степени естественно-научных специальностей. Изд. 3-е, доп. и перераб. М. : ИНФРА-М, 2013. 128 с. (Серия «Менеджмент в науке»).
3. *Соснин Э. А., Пойзнер Б. Н.* Осмысленная научная деятельность: диссертанту – о жизни знаний, защищаемых в форме положений / под ред. А. В. Войцеховского. М. : ИНФРА-М, 2015. 144 с.
4. *Аникин В. М.* Физика и интеллектуальное саморазвитие личности // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 4. С. 117–120.
5. *Аникин В. М., Измайлов И. В., Пойзнер Б. Н.* Диссертанту о воспринимаемости, числовой оценке и защите научных результатов // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 6. С. 25–34.
6. *Аникин В. М., Пойзнер Б. Н.* «Предзащита» диссертации : формальные требования и традиции // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 2. С. 95–102.
7. *Аникин В. М., Пойзнер Б. Н.* Коммуникативная функция автореферата и уровень лингво-дисциплинарной компетенции диссертанта // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2013. Т. 13, вып. 1. С. 80–86.
8. *Аникин В. М., Пойзнер Б. Н.* Провокация магистранта на вербализацию защищаемого положения как прием когнитивного менеджмента // Вестн. Том. гос. ун-та. Философия. Социология. Политология. 2013. № 2. С. 15–20.
9. *Аникин В. М., Пойзнер Б. Н.* Какова природа интересного, или дефиниции науки и научности – эпистемологический компонент профессиональной компетенции (радио)физика как инженера-исследователя // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 10/3. С. 118–120.
10. *Аникин В. М., Пойзнер Б. Н.* Эпистемологические упражнения магистранта : формулировка и оценка научных положений в своей диссертации // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 8/3. С. 213–214.
11. *Аникин В. М., Пойзнер Б. Н.* Как диссертанту аргументировать достоверность научных положений и результатов, выносимых на защиту // Изв. вузов. Физика. 2011. Т. 54, № 6. С. 105–108.
12. *Аникин В. М., Пойзнер Б. Н., Усанов Д. А.* Схема поаспектной характеристики диссертации : правила, рекомендации, примеры // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, № 3. С. 137–150.
13. *Аникин В. М., Усанов Д. А.* Автореферат диссертации : функции, структура, значимость // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2008. Т. 8, вып. 2. С. 61–73.
14. Перспективы российской науки как социального и культурного института : материалы «круглого стола» // Вопр. философии. 2014. № 8. С. 3–43.
15. *Маяцкий М. А.* Университет называется // Логос. 2013. № 1 (91). С. 4–17.
16. *Аникин В. М.* Альберт Эйнштейн и Питирим Сорокин : история диссертационных защит // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 3. С. 52–76.





## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Аникин Валерий Михайлович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского (СГУ), физический факультет, профессор, декан; базовая кафедра компьютерной физики и метаматериалов физического факультета СГУ в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, зав. кафедрой. E-mail: AnikinVM@info.sgu.ru

**Анищенко Вадим Семенович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, физический факультет, профессор, кафедра радиофизики и нелинейной динамики, зав. кафедрой. E-mail: wadim@info.sgu.ru

**Бегинин Евгений Николаевич** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, факультет нелинейных процессов, кафедра нелинейной физики, доцент. E-mail: egbegin@gmail.com

**Беляев Сергей Никитич** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, НИИ механики и физики, лаборатория ядерной физики и ускорителей (ЛЯФиУ), научный сотрудник. E-mail: serg@sgu.ru

**Березин Валентин Иванович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, физический факультет, кафедра прикладной физики, профессор. E-mail: berezin@sgu.ru

**Березин Кирилл Валентинович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, физический факультет, кафедра оптики и биофотоники, профессор. E-mail: berezinkv@yandex.ru

**Березин Максим Кириллович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, физический факультет, аспирант. E-mail: berezin@sgu.ru

**Биленко Давид Исакович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, факультет нано- и биомедицинских технологий, кафедра материаловедения, технологии и управления качеством, профессор. E-mail: bil@sgu.ru

**Бойкова Наталья Адамовна** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, кафедра теоретической физики, доцент. E-mail: na.boykova@mail.ru

**Бойков Алексей Алексеевич** – Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, физический факультет, магистрант. E-mail: nemorra@mail.ru

**Браташов Даниил Николаевич** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, факультет нано- и биомедицинских технологий, кафедра физики полупроводников, ведущий инженер учебной лаборатории полупроводниковой электроники. E-mail: dn2010@gmail.com

**Вениг Сергей Борисович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, факультет нано- и биоме-

дицинских технологий, профессор, декан; кафедра материаловедения, технологии и управления качеством, зав. кафедрой. E-mail: sergey.venig@gmail.com

**Воронин Денис Викторович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Образовательно-научный институт наноструктур и биосистем, лаборатория «Дистанционно управляемые системы для тераностики», инженер. E-mail: denis.v.voronin@gmail.com

**Вострикова Анна Михайловна** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Институт химии, кафедра общей и неорганической химии, аспирант, младший научный сотрудник. E-mail: vostrikova2401@bk.ru

**Галушка Виктор Владимирович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Образовательно-научный институт наноструктур и биосистем, лаборатория диагностики наноматериалов и структур, инженер. E-mail: gwiktor@mail.ru

**Глуховской Евгений Геннадиевич** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, факультет нано- и биомедицинских технологий, кафедра материаловедения, технологии и управления качеством, доцент; Образовательно-научный институт наноструктур и биосистем, зав. лабораторией пленочных наноструктурированных материалов. E-mail: glukhovskoy@gmail.com

**Горбачев Илья Андреевич** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, факультет нано- и биомедицинских технологий, кафедра материаловедения, технологии и управления качеством, аспирант; Образовательно-научный институт наноструктур и биосистем, инженер. E-mail: iliyagorbachev@mail.ru

**Горячева Ирина Юрьевна** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Институт химии, кафедра общей и неорганической химии, профессор. E-mail: goryachevaiy@mail.ru

**Гофтман Валентина Вадимовна** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Институт химии, кафедра общей и неорганической химии, аспирант, младший научный сотрудник. E-mail: goftman@bk.ru

**Динкер Илкер** – Анкарский университет (Турция), инженерный факультет, доцент. E-mail: elerman@ankara.edu.tr

**Добринский Эдуард Константинович** – Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений (г. Саратов), ведущий научный сотрудник. E-mail: nirmsgau@mail.ru

**Залесный Георгий Николаевич** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, НИИ механики и физики, ЛЯФиУ, научный сотрудник. E-mail: serg@sgu.ru



**Йлдырым Огуз** – Анкарский университет (Турция), инженерный факультет, аспирант. E-mail: elerman@ankara.edu.tr

**Клочков Михаил Александрович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, физический факультет, кафедра теоретической физики, доцент. E-mail: mikhkluchkov@yandex.ru

**Кожевников Илья Олегович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, факультет нано- и биомедицинских технологий, кафедра физики полупроводников, зав. учебной лаборатории полупроводниковой электроники. E-mail: kozhevnikov\_io@mail.ru

**Козлов Олег Вадимович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, физический факультет, магистрант. E-mail: kozlovov85@mail.ru

**Мерданов Мердан Казимагомедович** – ОАО «НПЦ «Электронное приборостроение» (г. Москва), генеральный конструктор. E-mail: 3stan@3stan.ru

**Михайлов Александр Иванович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, факультет нано- и биомедицинских технологий, кафедра физики полупроводников, профессор, зав. кафедрой. E-mail: mikhailovai13@mail.ru

**Названов Василий Федорович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, факультет нано- и биомедицинских технологий, кафедра физики твердого тела, профессор. E-mail: nazvanva.36@mail.ru

**Нечаев Владимир Владимирович** – Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., физико-технический факультет, кафедра «Физика», доцент. E-mail: vl-nechaev@ya.ru

**Нечкин Анатолий Александрович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, НИИ механики и физики, ЛЯФиУ, научный сотрудник. E-mail: serg@sgu.ru

**Новоселова Анна Владимировна** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, физический факультет, магистрант; базовая кафедра компьютерной физики и метаматериалов, ведущий инженер. E-mail: nusena1975@mail.ru

**Новоселов Владимир Владимирович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, физический факультет, кафедра прикладной физики, доцент. E-mail: nusena1975@mail.ru

**Пойзнер Борис Николаевич** – Томский государственный университет, радиофизический факультет, профессор. E-mail: pznrg@mail.tsu.ru

**Пономарев Денис Викторович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, факультет нано- и биомедицинских технологий, кафедра физики твердого тела, доцент. E-mail: ponomarev87@mail.ru

**Сидоров Василий Иванович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, НИИ механики и физики, ЛЯФиУ, научный сотрудник. E-mail: serg@sgu.ru

**Скрипаль Александр Владимирович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, факультет нано- и биомедицинских технологий, кафедра физики твердого тела, профессор. E-mail: skripala\_v@info.sgu.ru

**Терин Денис Владимирович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, факультет нано- и биомедицинских технологий, кафедра материаловедения, технологии и управления качеством, доцент. E-mail: terinden@mail.ru

**Тозкопоран Онур** – Анкарский университет (Турция), инженерный факультет, аспирант. E-mail: elerman@ankara.edu.tr

**Усанов Дмитрий Александрович** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, факультет нано- и биомедицинских технологий, кафедра физики твердого тела, профессор, зав. кафедрой. E-mail: usanovda@info.sgu.ru

**Чернавина Мария Леонидовна** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, физический факультет, магистрант. E-mail: snake-naja@mail.ru

**Штыков Сергей Николаевич** – Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Институт химии, кафедра аналитической химии и химической экологии, профессор. E-mail: ShtykovSN@mail.ru

**Элерман Ялчин** – Анкарский университет (Турция), инженерный факультет, профессор. E-mail: elerman@ankara.edu.tr



## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Anikin Valery Michailovich** – Saratov State University (SSU), Physical Faculty, Professor, Dean; Base Department of Computational Physics and Metamaterials of Physical Faculty at Saratov Branch of Institute of Radioengineering of RAS, Head. E-mail: AnikinVM@info.sgu.ru

**Anishchenko Vadim Semenovich** – Saratov State University, Physical Faculty, Professor, Department of Radiophysics and Nonlinear Dynamics, Head. E-mail: wadim@info.sgu.ru

**Beginin Evgeny Nikolaevich** – Saratov State University, Faculty of Nonlinear Processes, Department of Nonlinear Physics, Associate Professor. E-mail: egbegin@gmail.com

**Belyaev Sergey Nikitich** – Saratov State University, Research Institute of Mechanics and Physics, Laboratory of Nuclear Physics and Accelerators, Researcher. E-mail: serg@sgu.ru

**Berezin Valentine Ivanovich** – Saratov State University, Physical Faculty, Department of Applied Physics, Professor. E-mail: berezin@sgu.ru

**Berezin Kirill Valentinovich** – Saratov State University, Physical Faculty, Department of Optics and Biophotonics, Professor. E-mail: berezinkv@yandex.ru

**Berezin Maxim Kirillovich** – Saratov State University, Physical Faculty, Postgraduate. E-mail: berezin@sgu.ru

**Bilenko David Isakovich** – Saratov State University; Faculty of Nano- and Biomedical Technology, Department of Material Science, Technology and Quality Management, Professor. E-mail: dibilenko@gmail.com

**Boykova Natal'ya Adamovna** – Saratov State University, Physical Faculty, Department of Theoretical Physics, Associate Professor. E-mail: na.boykova@mail.ru

**Boykov Aleksey Alekseevich** – Saratov State University, Physical Faculty, Undergraduate. E-mail: nemorra@mail.ru

**Bratashov Daniil Nikolaevich** – Saratov State University, Faculty of Nano- and Biomedical Technology, Department of Semiconductor Physics, Leading Engineer of Educational Laboratory of Semiconductor Electronics. E-mail: dn2010@gmail.com

**Chernavina Mariya Leonidovna** – Saratov State University, Physical Faculty, Undergraduate. E-mail: snake-naja@mail.ru

**Dincer Ilker** – Ankara University (Turkey), Faculty of Engineering, Associate Professor. E-mail: elerman@ankara.edu.tr

**Dobrinsky Eduard Konstantinovich** – State Research Institute for Chemistry and Technology of Organoelement Compounds (Saratov), Leading Researcher. E-mail: nirmsgau@mail.ru

**Elerman Yalcin** – Ankara University (Turkey), Faculty of Engineering, Department of Engineering Physics, Professor. E-mail: elerman@ankara.edu.tr

**Galushka Viktor Vladimirovich** – Saratov State University, Educational and Research Institute of Nanostructures and Biosystems, Laboratory of Diagnosis of Nanomaterials and Structures, Engineer. E-mail: gwiktor@mail.ru

**Glukhovskoy Evgeny Gennadievich** – Saratov State University, Faculty of Nano- and Biomedical Technologies, Department of Material Science, Technology and Quality Management, Associate Professor; Educational and Research Institute of Nanostructures and Biosystems, Laboratory of Film Nanostructured Materials, Head. E-mail: glukhovskoy@gmail.com

**Gorbachev Ilya Andreevich** – Saratov State University, Faculty of Nano- and Biomedical Technologies, Department of Material Science, Technology and Quality Management, Postgraduate; Educational and Research Institute of Nanostructures and Biosystems, Engineer. E-mail: iliyagorbachev@mail.ru

**Goryacheva Irina Yurievna** – Saratov State University, Chemistry Institute, Department of General and Inorganic Chemistry, professor. E-mail: goryachevai@mail.ru

**Goftman Valentina Vadimovna** – Saratov State University, Chemistry Institute, Department of General and Inorganic Chemistry, Postgraduate, Junior Researcher. E-mail: goftman@bk.ru

**Kozlov Oleg Vadimovich** – Saratov State University, Physical Faculty, Undergraduate. E-mail: kozlovov85@mail.ru

**Klochkov Mikhail Aleksandrovich** – Saratov State University, Physical Faculty, Department of Theoretical Physics, Associate Professor. E-mail: mikhklochkov@yandex.ru

**Kozhevnikov Ilya Olegovich** – Saratov State University, Faculty of Nano- and Biomedical Technology, Department of Semiconductor Physics, Educational Laboratory of Semiconductor Electronics, Head. E-mail: kozhevnikov\_io@mail.ru

**Merdanov Merdan Kazimagomedovich** – JCS «SPC «Electronic Engineering» (Moscow), Chief Designer. E-mail: 3stan@3stan.ru

**Mikhailov Aleksandr Ivanovich** – Saratov State University, Faculty of Nano- and Biomedical Technology, Professor, Department of Semiconductor Physics, Head. E-mail: mikhailovai13@mail.ru

**Nazvanov Vasily Fedorovich** – Saratov State University, Faculty of Nano- and Biomedical Technologies, Department of Solid State Physics, Professor. E-mail: nazvanva.36@mail.ru

**Nechaev Vladimir Vladimirovich** – Saratov State Technical University named after Gagarin Yu. A., Faculty of Physics and Technology, Department of Physics, Associate Professor. E-mail: vl-nechaev@ya.ru



**Nechkin Anatoly Aleksandrovich** – Saratov State University, Research Institute of Mechanics and Physics, Laboratory of Nuclear Physics and Accelerators, Researcher. E-mail: serg@sgu.ru

**Novoselov Vladimir Vladimirovich** – Saratov State University, Physical Faculty, Department of Applied Physics, Associate Professor. E-mail: nusena1975@mail.ru

**Novoselova Anna Vladimirovna** – Saratov State University, Physical Faculty, Undergraduate; Base Department of Computational Physics and Metamaterials of Physical Faculty at Saratov Branch of Institute of Radioengineering of RAS, Leading Engineer. E-mail: nusena1975@mail.ru

**Poizner Boris Nikolaevich** – Tomsk State University, Radiophysical Faculty, Professor. E-mail: pznr@mail.tsu.ru

**Ponomarev Denis Viktorovich** – Saratov State University, Faculty of Nano- and Biomedical Technologies, Department of Solid Body Physics, Associate Professor. E-mail: ponomarev87@mail.ru

**Sidorov Vasily Ivanovich** – Saratov State University, Research Institute of Mechanics and Physics, Laboratory of Nuclear Physics and Accelerators, Researcher. E-mail: serg@sgu.ru

**Skripal Alexander Vladimirovich** – Saratov State University, Faculty of Nano- and Biomedical Technologies, Department of Solid Body Physics, Professor. E-mail: skripala\_v@info.sgu.ru

**Shtykov Sergey Nikolaevich** – Saratov State University, Chemistry Institute, Department of Analytical Chemistry and Chemical Ecology, Professor. E-mail: ShtykovSN@mail.ru

**Terin Denis Vladimirovich** – Saratov State University, Faculty of Nano- and Biomedical Technologies, Department of Material Science, Technology and Quality Management, Associate Professor. E-mail: terinden@mail.ru

**Tozkoparan Onur** – Ankara University (Turkey), Faculty of Engineering, Postgraduate. E-mail: elerman@ankara.edu.tr

**Usanov Dmitry Aleksandrovich** – Saratov State University, Faculty of Nano- and Biomedical Technologies, Professor, Department of Solid Body Physics, Head. E-mail: usanovda@info.sgu.ru

**Voronin Denis Viktorovich** – Saratov State University, Educational and Research Institute of Nanostructures and Biosystems, Remote Controlled Theranostic Systems Laboratory, Engineer. E-mail: denis.v.voronin@gmail.com

**Vostrikova Anna Michailovna** – Saratov State University, Chemistry Institute, Department of General and Inorganic Chemistry, Postgraduate, Junior Researcher. E-mail: vostrikova2401@bk.ru

**Wenig Sergey Borisovich** – Saratov State University, Professor, Faculty of Nano- and Biomedical Technologies, Dean; Department of Material Science, Technology and Quality Management, Head. E-mail: sergey.wenig@gmail.com

**Yildirim Oguz** – Ankara University (Turkey), Faculty of Engineering, Postgraduate. E-mail: elerman@ankara.edu.tr

**Zalesny George Nikolaevich** – Saratov State University, Research Institute of Mechanics and Physics, Laboratory of Nuclear Physics and Accelerators, Researcher. E-mail: serg@sgu.ru





**Подписка на II полугодие 2015 года (3 выпуска)**

Индекс издания по каталогу ОАО Агентства «Роспечать» 36015,  
раздел 39 «Физико-математические науки. Химические науки».  
Журнал выходит 4 раза в год.

**Подписка оформляется** по заявочным письмам  
непосредственно в редакции журнала.

Заявки направлять по адресу:

410012, Саратов, Астраханская, 83.

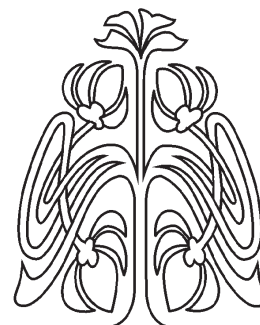
Редакция журнала «Известия Саратовского университета».

Новая серия».

Тел. (845-2) 51-45-49, 52-26-85; факс (845-2) 27-85-29;

e-mail: fizika.sgu@bk.ru

Каталожная цена одного выпуска 250 руб.



**ПОДПИСКА**

