

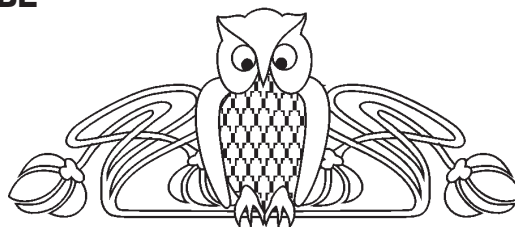


УДК 621.382.032.27

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, плоско-заостренная, 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 концентрированию 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° . 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.

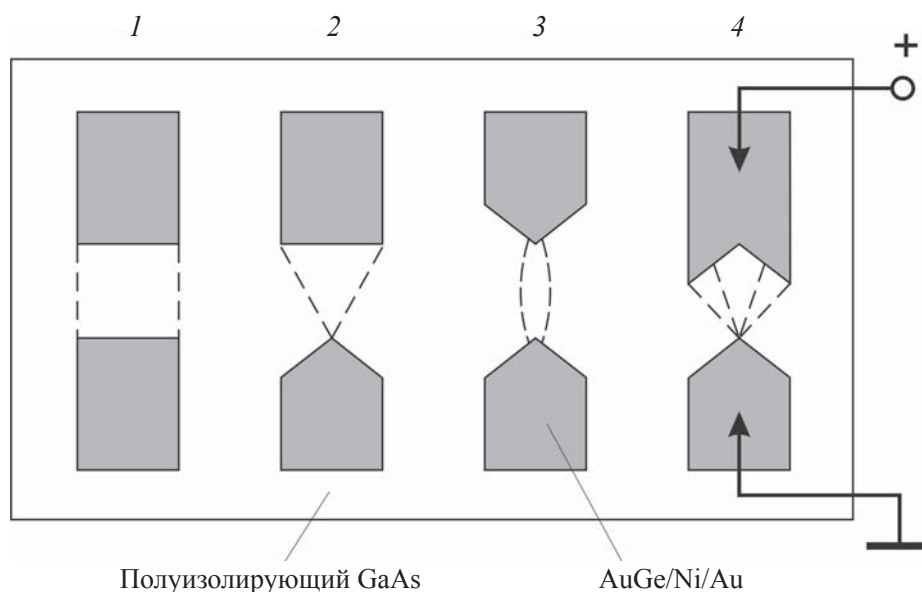


Рис. 1. Варианты топологии контактных площадок исследуемых планарно-эпитаксиальных мезоструктур: 1 – плоскопараллельная, 2 – плоско-заостренная, 3 – встречно-заостренная, 4 – вогнуто-заостренная; и предполагаемые области протекания тока (пунктирная линия)

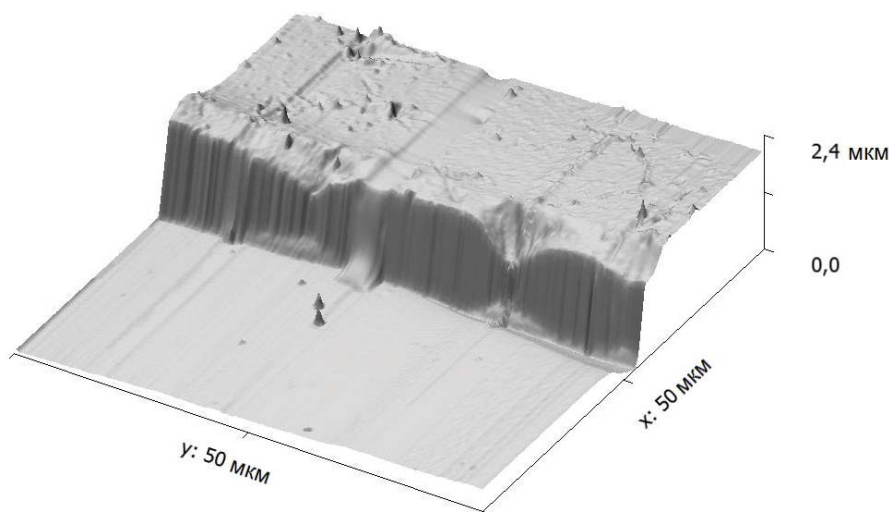


Рис. 2. Изображение АСМ края контактной площадки плоской формы

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

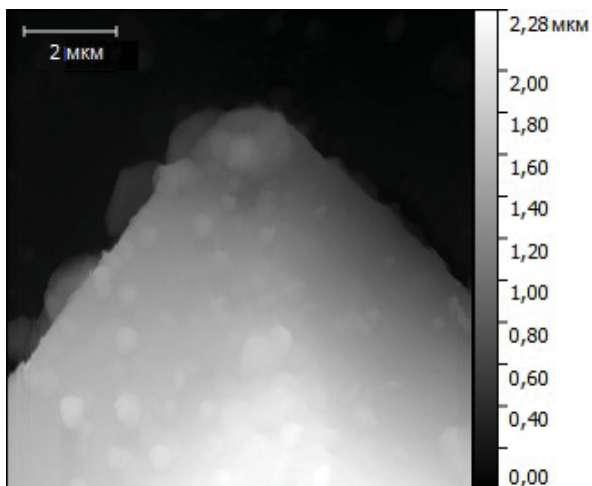


Рис. 3. Изображение АСМ острия контактной площадки заостренной формы

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.

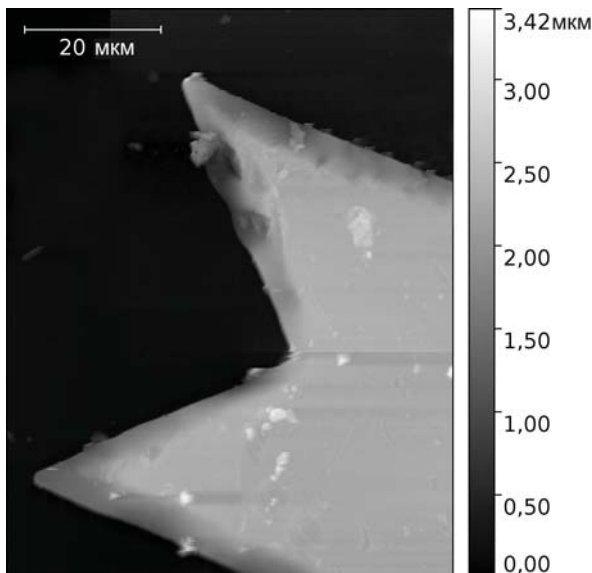


Рис. 4. Изображение АСМ контактной площадки вогнутой формы

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

той ~ 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.

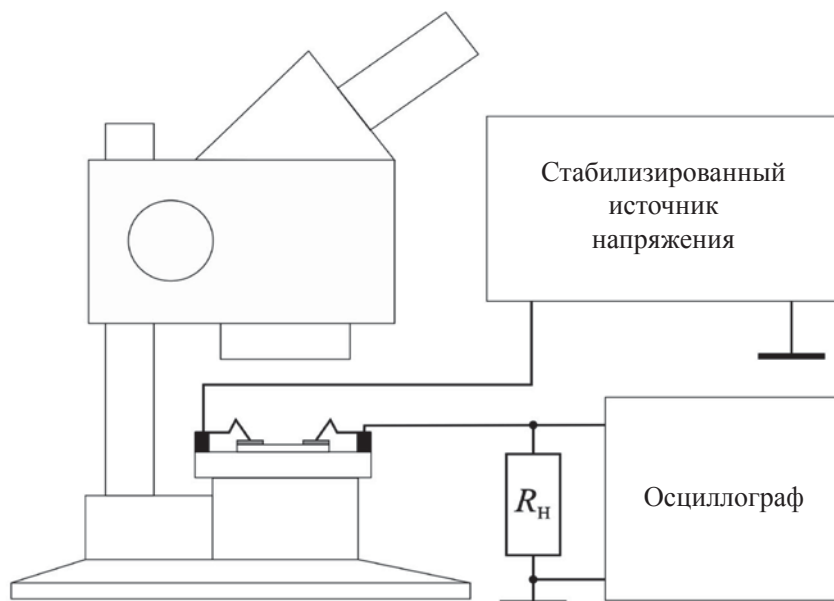


Рис. 5. Схема установки для измерения параметров токовых колебаний

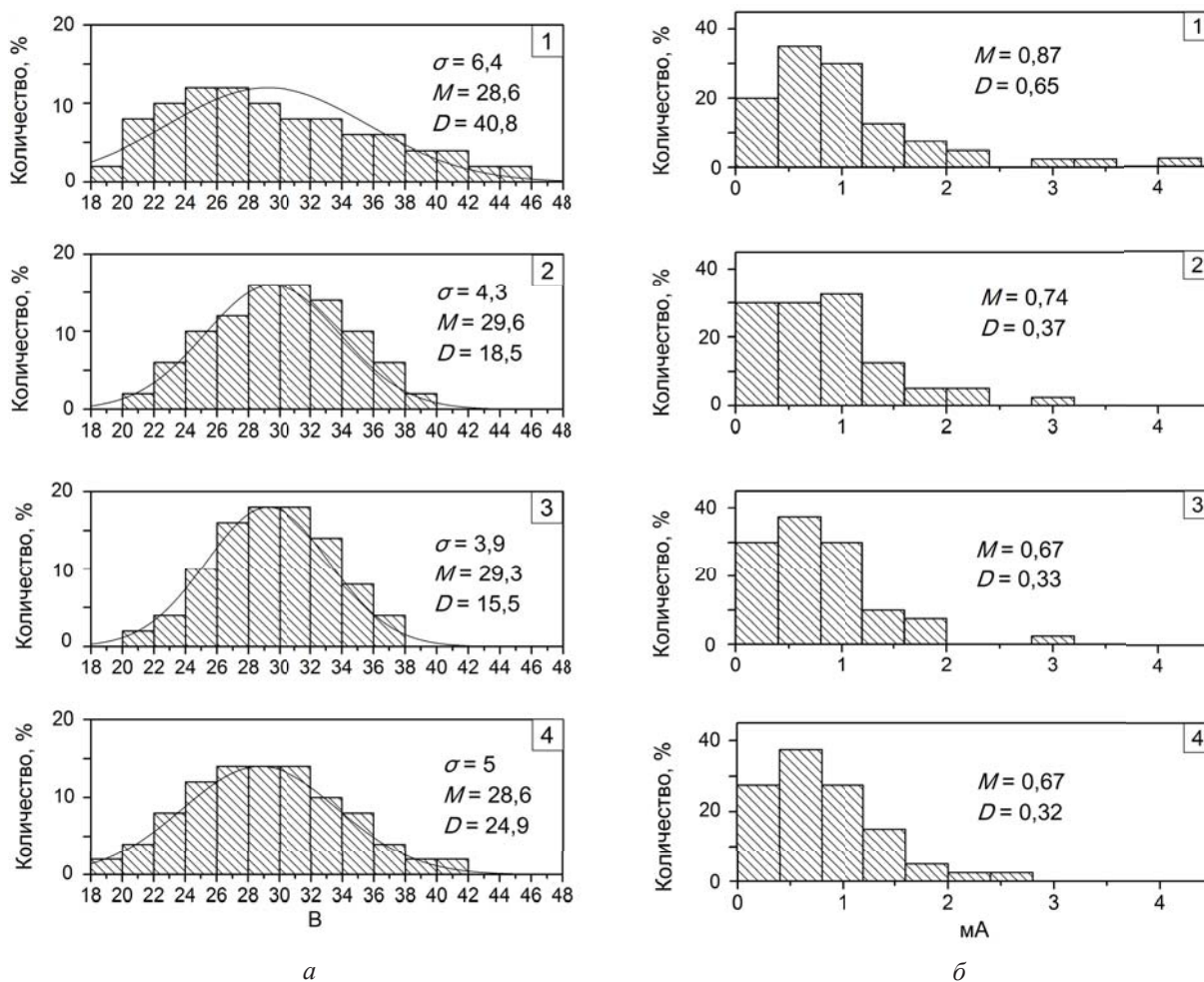


Рис. 6. Распределение экспериментальных значений порогового напряжения возникновения токовых колебаний (а) и их амплитуды (б) для четырех вариантов топологий контактных площадок: 1 – плоскопараллельная, 2 – плоско-заостренная, 3 – встречно-заостренная, 4 – вогнуто-заостренная



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 : Всероссий. конф. : сб. тр. СПб. : СПбГЭТУ, 2012. Т. 1/2. С. 49–53.