



Экспериментальная проверка построенного метода расчета показала хорошее соответствие измеренной функции передачи ФК и расчетных значений для первой зоны не пропускания. Выбор для численного моделирования более точных материальных параметров ФК позволит более точно прогнозировать и вторую запрещенную зону.

Полученная информация о прохождении ПАВ через рассмотренные ФК может быть использована для проектирования резонаторов и полосовых фильтров.

Авторы выражают благодарность С. Г. Сучкову за полезные комментарии к работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Правительства Российской Федерации (№ 11.G34.31.0030 и № 14.B37.21.1988).

Список литературы

1. Sigalas M., Economou E. N. Band structure of elastic waves in two dimensional systems // Solid State Communications. 1993. Vol. 86, № 3. P.141–143.
2. Tanaka Y., Tamura S. Surface acoustic waves in two-dimensional periodic elastic structures // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 58. P. 7958–7965.
3. Craster R. V., Guenneau S. Acoustic Metamaterials. Dordrecht : Springer Series in Materials Science, 2013.
4. Pennec Y., Vasseur J. O., Djafari-Rouhani B., Dobrzyński L., Deymier P. A. Two-dimensional phononic crystals : Examples and applications // Surface Science Reports. 2010. Vol. 65. P. 229–291.
5. Wu T.-T., Wu L.-C., Huang Z.-G. Frequency band-gap measurement of two-dimensional air/silicon phononic crystals using layered slanted finger interdigital transducers // J. of Applied Physics. 2005. Vol. 97. 094916.
6. Dissanayake D. W. Acoustic Waves. Croatia : Sciyo Publ., 2010. P. 91–124.
7. Wu T.-T., Wang W.-S., Sun J.-H., Hsu J.-C., Chen Y.-Y. Utilization of phononic-crystal reflective gratings in a layered surface acoustic wave device // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 94. 101913.
8. Laude V., Wilm M., Benchabane S., Khelif A. Full band gap for surface acoustic waves in a piezoelectric phononic crystal // Phys. Rev. E. 2005. Vol. 71. 036607.
9. Benchabane S., Khelif A., Rauch J.-Y., Robert L., Laude V. Evidence for complete surface wave band gap in a piezoelectric phononic crystal // Phys. Rev. E. 2006. Vol. 73. 065601.
10. Khelif A., Achaoui Y., Benchabane S., Laude V., Boujema A. Locally resonant surface acoustic wave band gaps in a two-dimensional phononic crystal of pillars on a surface // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 81. 214303.
11. Achaoui Y., Khelif A., Benchabane S., Robert L., Laude V. Experimental observation of locally-resonant and Bragg band gaps for surface guided waves in a phononic crystal of pillars // Phys. Rev. B. 2011. Vol. 83. 104201.
12. Никитов С. А., Григорьевский А. В., Григорьевский В. И., Котелянский И. М., Лузанов В. А., Миргородская Е. Н., Сучков С. Г. Особенности распространения поверхностных акустических волн в двумерных фоновых кристаллах на поверхности кристалла ниобата лития // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56, № 7. С. 876–888.

УДК 537.87; 621.3.09

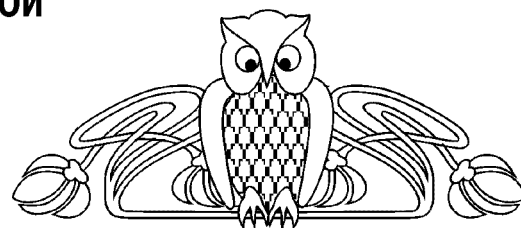
АНАЛИЗ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНОЙ АНТЕННЫ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ МЕТКИ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 5.5–6.5 ГГц

С. Г. Сучков, В. А. Николаевцев, Д. С. Сучков, В. В. Ермишин, А. В. Россошанский

Саратовский государственный университет
E-mail: nikolaevcev@ya.ru

Методом конечных элементов проведен численный анализ эффективности и диаграммы направленности интегральной антенны радиочастотной идентификационной метки на поверхностных акустических волнах. Найдены оптимальные параметры антенны, согласованной с встречно-штыревым преобразователем на диапазоне 5.5–6.5 ГГц.

Ключевые слова: система радиочастотной идентификации, радиочастотная идентификационная метка, акустоэлектроника, интегральная антенна.



Analysis by Finite Element Method of Integral Antenna of RFID Tag at 5.5–6.5 GHz

S. G. Suchkov, V. A. Nikolaevtsev, D. S. Suchkov, V. V. Ermishin, A. V. Rossoshansky

Numerical analysis effective integral antenna of acoustoelectronic RFID tag was accomplished. Optimal parameters of the antenna compatible with interdigital transducer on a range of 5.5–6.5 GHz were obtained.



Key words: radiofrequency identification system, radiofrequency identification tag, acoustoelectronics, integrated antenna.

Введение

При создании системы радиочастотной идентификации, удовлетворяющей конкретным требованиям потребителя, зачастую размеры и конструкция антенны имеют первостепенное значение. Так, для областей применения, где требуется в первую очередь миниатюризация радиочастотной идентификационной метки (РИМ) [1, 2], антенну необходимо располагать в пределах размеров самого кристаллического чипа.

Для таких антенн размер кристалла, а значит, и его стоимость, увеличиваются в 2–3 раза по сравнению с внешней оптимальной антенной, однако наряду с уменьшением размеров и неоптимальностью антенны возникает возможность располагать отражатели ПАВ по разные стороны от встречно-штыревого преобразователя (ВШП) [3], что сразу снижает потери на 6 дБ и, кроме того, позволяет увеличить коэффициенты отражения отражателя, что также уменьшает потери сигнала РИМ ещё на 1–2 дБ. Часто обязательным требованием потребителя является независимость идентификации РИМ от её положения в пространстве относительно антенны ридера. Для этого необходимо добиваться диаграммы направленности (ДН), близкой к сферической. И в этом случае использование антенн, сформированных непосредственно на кристалле, весьма эффективно, так как размер излучателя уменьшается пропорционально $\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}}}$, где $\varepsilon_{\text{эфф}}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость полубесконечной пластины ниобата лития, а диэлектрическая проницаемость используемых кристаллов ниобата и танталата лития весьма велика (превышает 45). Таким образом, применение неоптимальных антенн, сформированных непосредственно на кристалле, практически целесообразно.

На рис. 1 представлены результаты расчетов (методом интегральных уравнений [4]) и измерений ДН интегральной антенны. Видно, что расчет методом интегральных уравнений только качественно описывает зависимость эффективности излучения от направления приёма. Кроме того, ДН антенны, используемой в эксперименте, дает перепад мощности по направлению на 3 дБ, что не всегда приемлемо потребителю. Поэтому необходимо исследовать антенны более сложных форм и применить метод конечных элементов.

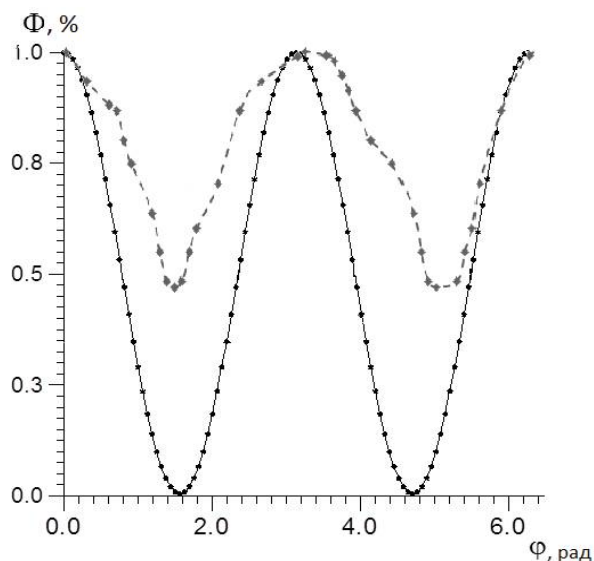


Рис. 1. Азимутальная ДН антенны «электрического» типа; непрерывная линия – расчет, штриховая линия – эксперимент

Расчет антенн сложной формы методом конечных элементов

Основным преимуществом РИМ на 6 ГГц является их миниатюрность по сравнению с более низкочастотными РИМ. Во всех известных РИМ используется внешняя по отношению к кристаллическому чипу антенна, которая и определяет общие размеры РИМ. В диапазоне 6 ГГц появляется возможность (и есть необходимость) использовать микроантенну, изготовленную непосредственно на кристаллической подложке, размеры которой снижаются за счет использования высокой диэлектрической проницаемости ниобата лития ($\varepsilon_{\text{ср}} = 46$). Для этого, конечно, потребуется увеличение размеров подложки, что удорожает РИМ, но в некоторых областях их использования более важным является размер, а не цена РИМ.

Эффективная диэлектрическая проницаемость полубесконечной пластины ниобата лития

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = \frac{\varepsilon_{\text{ср}} + 1}{2} = 23,5,$$

следовательно, замедленная длина волны

$$\lambda_{\text{зам}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}}}} = 12,4 \text{ мм},$$

а характерный размер одного простого вибратора равен $\lambda_{\text{зам}}/4 = 3,1$ мм. Поэтому максимальный размер антенны составляет 6,2 мм. Однако реальная пластина имеет толщину не более 2 мм, вследствие чего эффективная диэлектрическая проницаемость уменьшается. Поэтому



будем считать допустимым максимальный размер кристалла 12 мм.

Кроме того, лишь в ограниченном числе применений можно обеспечить заранее фиксированное положение РИМ с заранее известным направлением максимального излучения ее антенны. В большинстве требований к характеристикам РИМ предусматривается независимость ее идентификации от ее пространственного расположения относительно антенны ридера. Для этого требуется обеспечить ДН близкой к сферической. Отклонения от сферичности связаны с расстоянием идентификации и осуществимостью некоторых антиколлизий алгоритмов. Допустимым будем считать максимальное отклонение ДН от сферичности 3 дБ.

Ввиду сложности теоретического расчета такой антенной системы (и зачастую невозможности проведения аналитических расчетов) и доступности численного моделирования с последующим расчетом основных характеристик антенны с заданной точностью для оптимизации конструкции антенны выбран именно метод численного моделирования. Моделирование проведено в среде Comsol Multiphysics 4.3b, реализующей метод конечных элементов.

Общее описание модели, допущения и ограничения

Моделирование антенны проводилось следующим образом. Считается, что антенна в виде пленочной структуры расположена на поверхности параллелепипеда из ниобата лития $Y+128^\circ$ -срезы, материал антенны – алюминий. В разрыв между вибраторами включен порт, моделирующий ВШП. Пьезоэлектрические свойства ниобата лития в расчет не принимаются, поскольку при расчете электродинамических характеристик антенны влиянием пьезоэффекта можно пренебречь, но учитывается анизотропия диэлектрических свойств кристалла.

Выбор параметров оптимизации и целевой функции

Основными расчётными характеристиками антенны, рассматриваемыми в ходе оптимизации, были входной импеданс антенны и её ДН. Как известно, для лучшего согласования антенны с ВШП, а следовательно, передачи максимума энергии от антенны к ВШП и в обратном направлении, ее входной импеданс должен иметь величину, комплексно сопряженную величине импеданса ВШП.

Параметры, влияющие на характеристики антенны, при условии неизменности материала подложки и типа антенны – это набор параметров, характеризующих ее топологию, толщину металлизации и размеры подложки. Большое количество параметров приводит к огромному числу их возможных сочетаний, что не только вызывает затруднения в моделировании из-за больших временных затрат на расчет, но и, как будет говориться далее, не является целесообразным, поскольку необходимый результат можно получить и при использовании меньшего числа параметров. Поэтому желательно задавать топологию антенны как можно более простой, с постепенным введением дополнительных параметров только ввиду необходимости.

Целевая функция, по значению которой можно судить об оптимальности того или иного сочетания параметров, должна включать величину, являющуюся мерой отклонения от сферической симметрии ДН, поскольку важен равномерный отклик антенны по всем направлениям ввиду произвольности положения РИМ в пространстве по отношению к считывающему устройству. Также должна быть взята в расчет и величина, характеризующая отличие импеданса антенны от значения, комплексно сопряженного значению импеданса ВШП, поскольку именно при таком значении импеданса антенны достигается наилучшее ее согласование с ВШП. Принято, что импеданс ВШП на частоте 6 ГГц $Z_{IDT} = 50 - i300$.

Мера отклонения от сферической симметрии ДН антенны задается коэффициентом несферичности, равным отношению максимального значения электрического поля на удаленной на требуемое расстояние сфере к минимальному:

$$C_E = E_{\max} / E_{\min}$$

Отличие импеданса антенны от оптимального значения задается модулем разности его расчетного значения и эталонного (ΔZ). Однако данная величина не дает полной информации об эффективности излучения антенны, поскольку антенна должна быть согласована не только с ВШП, но и с внешним пространством (вакуумом, импеданс которого равен 377 Ом).

Для того чтобы оценить эффективность излучения антенны, используем энергетическую характеристику, равную отношению излучаемой мощности к подводимой, выраженную в процентах:

$$\mathcal{E} = N_{\text{rad}} / N_{\text{inp}} \times 100\%$$

Будем считать допустимыми значения $\mathcal{E} > 20\%$.



Выбор типа антенны и результаты численных экспериментов

При проектировании антенн цель разработчика – получение антенны с заданными электрическими характеристиками. При этом ввиду громоздкости расчетов и накопленного в этой области опыта выбирается конструкция антенны, из общих соображений являющаяся наиболее эффективной и как можно более простой (и, по возможности, компактной для миниатюризации устройства).

Симметричная форма антенны является необходимым условием гладкости и равномерности ее ДН. Антенна с такой ДН, по форме максимально близкой к сфере, будет обеспечивать надежный прием и передачу сигнала независимо от ориентации РИМ в пространстве относительно антенны считывателя.

Простая полосковая антенна имеет ДН, существенно отличающуюся от сферической (рис. 2). Все ДН были рассчитаны для расстояния от РИМ 20 м, выбранного из практических соображений. В направлении, параллельном полоскам, электромагнитные волны не распространяются, и на ДН в этом направлении содержится «прокол», который видно на рис. 2. Здесь и далее светлые участки рисунка соответствуют большей плотности потока энергии, а более темные – меньшей.



Рис. 2. Вид ДН (половины ДН вследствие симметрии) антенны простого вибратора

Линейные размеры данной антенны выходят за допустимые рамки кристаллической

подложки РИМ. Следует учесть, что антенны, ориентированные вдоль различных направлений на кристалле, имеют разную протяженность. Разница обусловлена анизотропностью материала подложки. Для подложки из ниобата лития $Y+128^\circ$ – среза толщиной 3 мм – такие границы на общую протяженность антенны для одной ветви составляют 12 мм.

Результаты расчетов показывают, что антенна в виде простого вибратора не позволяет достичь вышеуказанных требований, поэтому требуется создание антенны, имеющей более сложную топологию. Вибраторы не должны иметь форму прямых отрезков микрополоска. Поэтому следующим шагом является исследование антенны, по форме напоминающей букву *H* (*H*-антенны).

Каждый из вибраторов имеет форму буквы *T*. Таким образом, при протекании токов в антенне одноименные заряды проходят одновременно в оба конца «шляпки» *T*-образного вибратора. Вследствие этого электромагнитные волны в направлении «ножки» *T*-образного вибратора тоже распространяются, частично заполняя «прокол» ДН. Однако в то же самое время в другом вибраторе распространяются заряды с противоположным знаком, т.е. течет ток в обратном направлении. Поэтому электромагнитные волны от обеих «шляпок» интерферируют в дальней зоне и гасят друг друга. Расчеты также это показывают. Поэтому такая конструкция антенны не подходит.

В качестве следующей формы антенны для оптимизации рассматривался полосковый симметричный вибратор, состоящий из двух идентичных симметрично расположенных относительно ВШП вибраторов, каждый из которых для придания компактности конструкции и улучшения сферичности ДН имеет два поворота на 90 градусов (рис. 3).

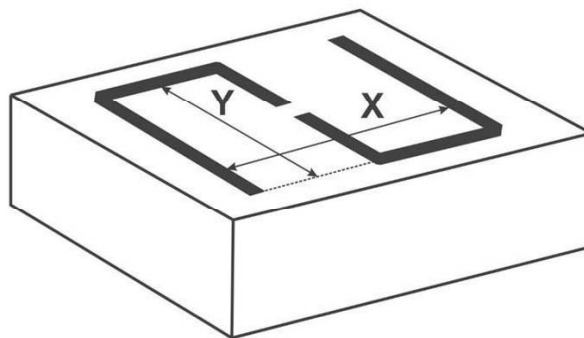


Рис. 3. S-образная антенна



Как видно из рис. 4, ДН для S-образной антенны с длиной вибратора $\lambda/4$ близка к ДН простого электрического диполя с той же длиной вибратора, т.е. тороида. Поэтому необходимо увеличение размеров антенны, чтобы ее геометрия начала влиять на форму ДН, и можно было бы добиться сферичности при определенных соотношениях между размерами «плеч» вибраторов и достаточной эффективности антенны.



Рис. 4. ДН S-образной антенны с длиной вибратора, равной четверти длины замедленной электромагнитной волны

Оптимизация геометрии антенны и анализ чувствительности электрических параметров к варьированию геометрических размеров антенны

Оптимизация геометрии S-образной антенны осуществлялась перебором следующих параметров: соотношение размеров антенны X и Y (см. рис. 3), ширина полоска, толщина металла. Частота, на которой производилась оптимизация – центральная частота разрешенного диапазона [5], составляющая 6 ГГц. Результаты оптимизации сведены в таблицу.

Как можно видеть из данных, приведенных в таблице, характеристики антенны сильно зависят от размеров X и Y антенны. Однако, как показывают расчеты, они очень незначительно зависят от таких параметров, как ширина полоска вибратора и толщина металлического слоя. При изменении параметров на порядок характеристики меняются на величину менее 1%. Поэтому оптимизация по данным параметрам не отражена в таблице.

Таким образом, из таблицы видно, что входной импеданс антенны при изменении размеров X и Y может иметь как индуктивную, так и емкостную реактивные части. Очевидно, излучение антенны эффективнее при наличии индуктивной реактивной части импеданса. При этом эффективность излучения может достигать значений, больших 20%. Например, при

Оптимизация геометрии антенны

№ варианта	X , мм	Y , мм	Z , Ом	ΔZ , Ом	C_E	\mathcal{E} , %
1	2	2	$8 + 49i$	255	113.9	2.1
2	2	4	$21 - 169i$	469	2.6	1.5
3	2	6	$537 + 520i$	534	2.9	25
4	2	8	$6 - 38i$	340	5.1	0.6
5	4	2	$160 + 17i$	303	24	27
6	4	4	$6 - 59i$	362	2.1	0.8
7	4	6	$288 + 303i$	238	2.4	44
8	4	8	$14 + 25i$	278	16	2.7
9	6	2	$86 - 217i$	518	39	5.5
10	6	4	$5 - 9i$	312	1.6	0.8
11	6	6	$125 - 295i$	599	2.4	5.3
12	6	8	$36 + 132i$	168	3.6	17
13	8	2	$17 - 94i$	396	31	2.0
14	8	4	$39 + 56i$	245	19	10
15	8	6	$11 - 47i$	349	3.6	1.2
16	8	8	$227 + 437i$	224	2.6	39
17	10	2	$9 - 42i$	345	34	1.3
18	10	4	$141 + 306i$	91	18	3.6
19	10	6	$10 + 30i$	273	3.6	1.9
20	10	8	$459 - 317i$	740	11	10



значении параметров $X = 4$ мм, $Y = 2$ мм (вариант № 5), как видно из таблицы, достигается значение 27%. Однако при этом $C_E = 24$, и ДН существенно отличается от сферической. При значениях параметров $X = 6$ мм, $Y = 4$ мм (вариант № 10) достигается хорошая близость к сферической ДН. Поскольку отношение $C_E = E_{\max}^i / E_{\min}^i = 1.6$, то такое же отношение для модулей плотности потока энергии равно 2.56, поэтому отклонение ДН от сферической составляет 4 дБ, что близко к заданным выше требованиям. Однако эффективность излучения антенны в данном случае меньше 1%, поэтому данная конструкция не подходит по практическим соображениям, так как эффективность антенны \mathcal{E} не должна быть меньше 20% в соответствии с заданными выше

требованиями. То же самое утверждение справедливо и для $X = 4$ мм, $Y = 4$ мм (вариант № 6).

Рассмотрим антенну с параметрами $X = 4$ мм, $Y = 6$ мм (вариант № 7). Для определенности ширину полоска можно выбрать равной 100 мкм, а толщину металлической пленки – 5 мкм. С одной стороны, отношение максимальной мощности к минимальной, судя по данным из таблицы, составляет $\mathcal{E}^2 = 5.76$. Тогда отклонение ДН от сферической не превышает 7.6 дБ. Это отклонение выше допустимого. Однако эффективность возбуждения в данной конструкции антенны равна 44%, что в некоторых случаях может быть более существенным, чем сферичность ДН РИМ. ДН для этой конструкции антенны РИМ показана на рис. 5.

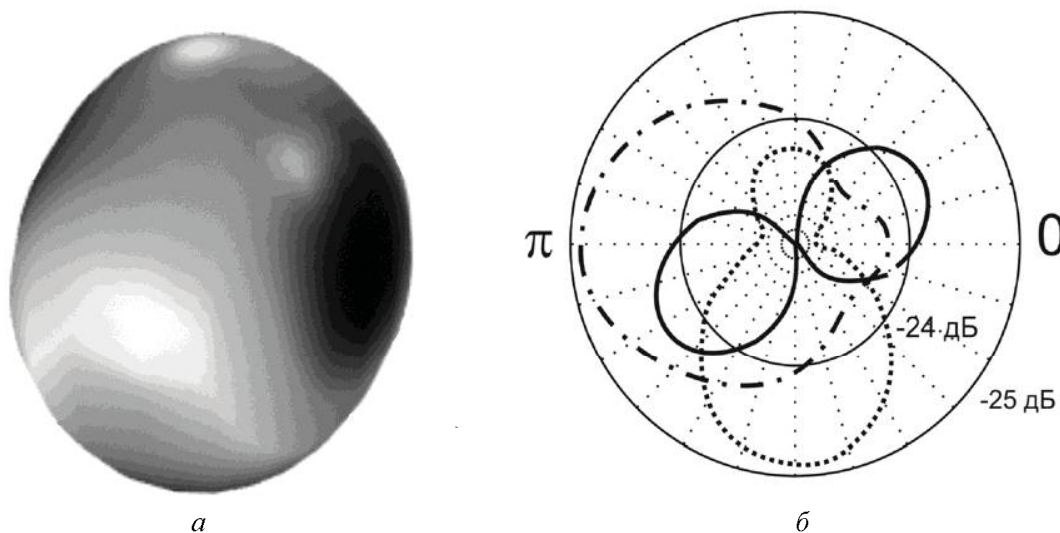


Рис. 5. ДН для выбранных параметров антенны на центральной частоте: *а* – трехмерная картина; *б* – проекции на базовые плоскости кристалла: сплошная линия – в плоскости антенны, штриховая и пунктирная – перпендикулярно плоскости антенны

Как показывают расчеты, на границах разрешенного диапазона частот (5.6 и 6.4 ГГц) значения плотности потока энергии отличаются не более чем на 0.5 дБ. Это позволяет с использованием такой антенны обеспечить надежный прием сигнала РИМ на считыватель при работе во всем разрешенном диапазоне частот.

В дальнейшем, оптимизируя форму вибраторов (окружность, эллипс и т.п.), видимо, можно будет улучшить и сферичность ДН до требуемого уровня.

Заключение

Таким образом, были проведены анализ и обоснование выбора конструкции интегральной антенны, которая должна обладать характеристиками, необходимыми для надежной работы

акустоэлектронной РИМ. Из практических соображений и проведенных теоретических расчетов была выбрана конструкция *S*-образной антенны, параметры которой оптимизировались.

В итоге определилась следующая конструкция антенны РИМ для диапазона 6 ГГц. Это *S*-образная антенна (см. рис. 3) на подложке ниобат лития $Y+128^\circ$ – среза толщиной 1 мм. Антенна имеет следующие размеры:

- а) разрыв между вибраторами – 80 мкм,
- б) ширина полоска вибратора – 100 мкм,
- в) толщина металлизации – 5 мкм,
- г) размер $X = 4$ мм, размер $Y = 6$ мм.

Такая антенна обеспечивает эффективность излучения сигнала 44% с коэффициентом несферичности ДН $10\lg(C_E) = 7.6$ дБ, и, следовательно, может быть использована для уверенного при-



ема сигнала РИМ считывателем при некоторых ограничениях в ориентации РИМ относительно антенны считывателя. В дальнейшем при оптимизации формы вибраторов возможно улучшение сферичности ДН до требуемого уровня при сохранении высокой эффективности излучения.

Список литературы

1. *Sveshnikov B. V., Suchkov S. G., Yankin S. S., Nikitov S. A., Suchkov D. S., Plessky V. P.* Feasibility of SAW Tags in the 6 GHz Frequency Band // Proceedings of the 2013 IEEE International Ultrasonics Symposium. Prague, Czech Republic, 2013. P. 1408–1411.
2. *Сучков С. Г., Янкин С. С., Николаевцев В. А., Сучков Д. С., Шатрова Ю. А., Ермишин В. В., Никитов С. А.* Система радиочастотной идентификации на основе поверхностных акустических волн для нового

частотного диапазона 6 ГГц // Актуальные проблемы электронного приборостроения: сб. междунар. науч.-техн. конф. : в 2 т. Саратов, 2014. Т. 2. С. 307–312.

3. Пассивная радиочастотная идентификационная метка на поверхностных акустических волнах : пат. 135451 Рос. Федерация. № 2013128457/28 ; заявл. 24.06.13 ; опубл. 10.12.13, Бюл. № 34. 2 с.
4. *Давидович М. В.* Диаграммы направленности микрополосковых антенн : расчет с использованием разложений по Е- и Н- модам // Радиолокация, навигация, связь : сб. докл. VII междунар. науч.-техн. конф. : в 3 т. Воронеж, 2001. Т. 3. С. 572–574.
5. Решение Государственной комиссии по радиочастотам об использовании полос радиочастот 5150–5350 МГц и 5650–6425 МГц радиоэлектронными средствами фиксированного беспроводного доступа от 15 июля 2010 г. № 10-07-02. URL: http://minsvyaz.ru/common/upload/reshen_gkrch.pdf (дата обращения: 01.12.2014).

УДК 538.971

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭМИССИОННОЙ СПОСОБНОСТИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

О. Е. Глухова, И. В. Кириллова, А. Н. Савин, К. А. Гребенюк, М. М. Слепченков, А. С. Колесникова, А. А. Фадеев, Д. С. Шмыгин

Саратовский государственный университет
E-mail: graphene@yandex.ru

Дан обзор работ, посвященных исследованию эмиссионных свойств углеродных нанотрубок и выявлению способов управления этими свойствами. Выделены пять основных методов повышения эмиссионной способности углеродных нанотрубок. **Ключевые слова:** углеродная нанотрубка, автокатод, эмиссионная способность, работа выхода, синтезирование, плазма, допирование.

Methods for Enhancing Emissive Ability of the Carbon Nanotubes

O. E. Glukhova, I. V. Kirillova, A. N. Savin, K. A. Grebenuk, M. M. Slepchenkov, A. S. Kolesnikova, A. A. Fadeev, D. S. Shmygin

The analysis of papers devoted to study of the emission properties of the carbon nanotubes and to revealing ways for the control of these properties has been performed. Five main methods for enhancing emissive ability of the carbon nanotubes have been singled out. **Key words:** carbon nanotube, cathodes, emissive ability, work function, synthesizing, plasma, doping.

Введение

Одной из актуальных задач современной эмиссионной электроники является получение токов автоэмиссии высокой и сверхвысокой плотностей с автокатодов. Материал, на основе которого могут быть построены подобные устройства, должен отвечать таким требованиям, как

стабильность атомной структуры, высокие тепло- и электропроводность, способность выдерживать высокие температуры.

Долгое время материалами для создания автокатодов служили тугоплавкие металлы (вольфрам, молибден, рений, платина), а также металлы переходных групп (хром, ниобий, гафний). Однако автокатоды из таких материалов не могут работать длительное время, так как происходит разрушение микровыступов, определяющих автоэмиссию с рабочей поверхности катода. В связи с этим в настоящее время проявляется высокий интерес к созданию автоэлектронных эмиттеров на основе углеродных наноструктурированных материалов: наноалмазов, алмазоподобного углерода, фуллеренов, углеродных нанотрубок, графена.

Уникальной особенностью автокатодов, изготовленных на основе углеродных нанокластеров, является низкий порог возбуждения автоэлектронной эмиссии. Низкий порог наблюдается практически для всех наноуглеродных эмиттеров и соответствует электрическим полям, на два-три порядка более низким, чем для металлов и полупроводников. Среди углеродных наноматериалов, на базе которых проектируются модели источников автоэмиссионного тока, наибольшее распространение получили углеродные нанотрубки.

