

# МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ MEASUREMENT METHODS AND TECHNOLOGY

УДК 621.372.2

## Измерения электрофизических характеристик полупроводниковых структур с использованием СВЧ фотонных кристаллов

*Д.А. Усанов<sup>1</sup>, С.А. Никитов<sup>2</sup>, А.В. Скрипаль<sup>1</sup>,  
Д.В. Пономарев<sup>1</sup>, Е.В. Латышева<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Саратовский национальный исследовательский государственный  
университет им. Н.Г. Чернышевского*

<sup>2</sup>*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова  
Российской академии наук*

## Measurements of Electrophysical Characteristics of Semiconductor Structures Using Microwave Photonic Crystals

*D.A. Usanov<sup>1</sup>, S.A. Nikitov<sup>2</sup>, A.V. Skripal<sup>1</sup>,  
D.V. Ponomarev<sup>1</sup>, E.V. Latysheva<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Saratov State University Named after N.G. Chernyshevsky*

<sup>2</sup>*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian  
Academy of Sciences, Moscow*

Предложен метод измерений электрофизических характеристик полупроводниковых структур: удельной электропроводности  $n$ -слоя, играющего роль подложки полупроводниковой структуры; толщины и удельной электропроводности сильнолегированного эпитаксиального  $n^+$ -слоя. Метод основан на использовании одномерного СВЧ фотонного кристалла с нарушением периодичности, содержащего исследуемую полупроводниковую структуру. Приведены измеренные данным методом характеристики эпитаксиальных арсенид-галлиевых структур, состоящих из эпитаксиального слоя и полупроводниковой подложки.

*Ключевые слова:* СВЧ фотонный кристалл; полупроводниковые слоистые структуры; многопараметровые измерения; толщина; удельная электропроводность.

The method of the multiparameter measurements of characteristics of semiconductor structures: the electrical conductivity of the  $n$ -layer, which acts as a substrate of the semiconductor structure, the thickness and conductivity of the

highly doped epitaxial n-layer, has been proposed. The method is based on using the one-dimensional microwave photonic crystal with the periodicity defect, which contains the investigated semiconductor structure. The characteristics, measured by this method, of epitaxial arsenide-gallium structures, consisting of the epitaxial layer and semi-insulating substrate, have been presented.

*Keywords:* microwave photonic crystal; semiconductor multilayer structures; multiparameter measurements; thickness; electrical conductivity.

**Введение.** В процессе создания современных устройств микро- и нанoeлектроники одним из важных этапов является многопараметровый контроль электрофизических характеристик и толщин многослойных полупроводниковых структур. Контролировать электрофизические параметры полупроводниковых структур позволяют СВЧ-методы. Они могут представлять интерес при исследовании материалов и структур, используемых при создании приборов СВЧ-электроники, так как информации, полученной с помощью низкочастотных методов, при переходе в СВЧ-диапазон может оказаться недостаточно для конструирования СВЧ-устройств с заданными характеристиками.

Для одновременного определения электропроводности и толщины полупроводниковых слоев можно использовать одномерные волноводные СВЧ фотонные кристаллы (рис. 1). При наличии в такой структуре дефекта, нарушающего периодичность, в фотонной запрещенной зоне проявляется резонансная особенность [1], называемая примесной модой колебаний [2] и имеющая высокую чувствительность к параметрам де-

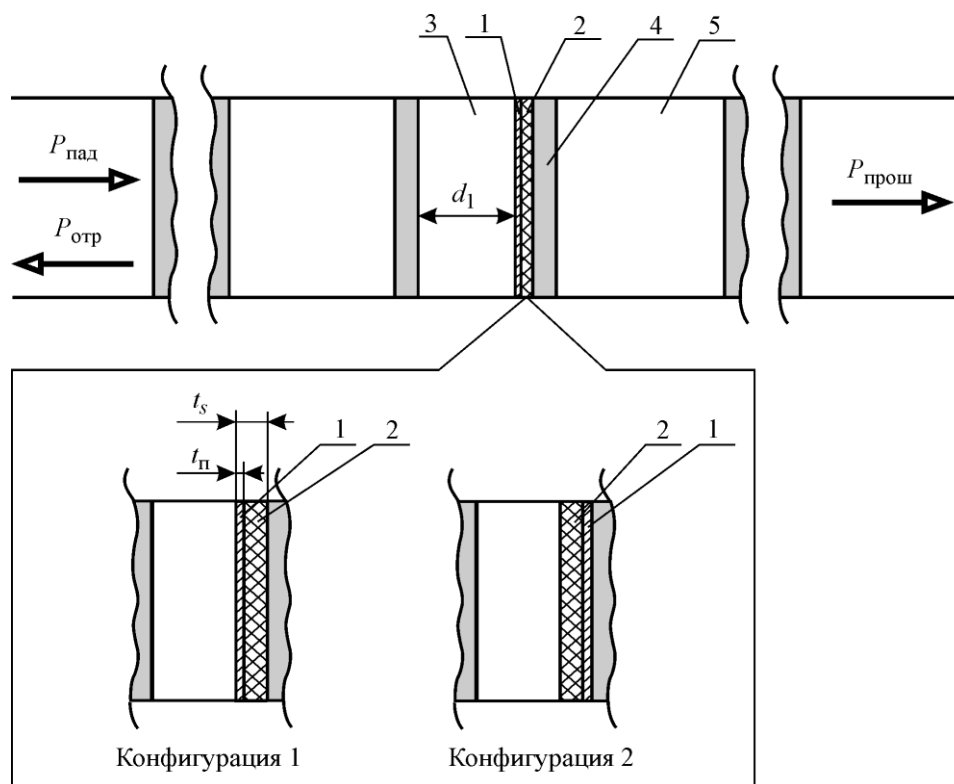


Рис. 1. Расположение полупроводниковой структуры относительно нарушенного слоя в волноводном СВЧ фотонном кристалле: 1 – сильнолегированный полупроводниковый слой; 2 – высокоомная подложка; 3 – нарушенный центральный слой; 4, 5 – периодически чередующиеся слои с различными значениями диэлектрической проницаемости ( $P_{пад}$ ,  $P_{отр}$  и  $P_{прош}$  – падающая, отраженная и прошедшая СВЧ-мощность соответственно;  $d_1$  – длина центрального слоя)

фекта. Авторы работ [3–5] предложили проводить двухпараметровые измерения при двух различных положениях вводимого в структуру фотонного кристалла в качестве дефекта высоколегированного полупроводникового слоя, нанесенного на полуизолирующую подложку, или при изменении размеров нарушения периодичности фотонного кристалла, содержащего исследуемый образец. При этом предполагалось, что толщина подложки может быть измерена предварительно, а электропроводность подложки вследствие ее малой величины не влияет на результаты измерений и ею можно пренебречь. К таким структурам относятся структуры типа кремний на сапфире, используемые, например, при производстве радиационно стойких электронных компонент и тензомодулей. Однако при использовании полупроводниковых структур, представляющих собой  $n^+n$ -структуры, возникает необходимость измерения параметров как  $n^+$ -слоя, так и  $n$ -слоя.

В настоящей работе с использованием одномерного СВЧ фотонного кристалла обосновывается способ одновременного измерения трех параметров  $n^+n$ -структур: удельной электропроводности  $n$ -слоя, играющего роль подложки полупроводниковой структуры, толщины и удельной электропроводности сильнолегированного эпитаксиального  $n^+$ -слоя.

#### Модель фотонного кристалла с измеряемой полупроводниковой структурой.

Рассматривался одномерный волноводный фотонный кристалл, составленный из одиннадцати слоев, которые образуют структуру из периодически повторяющихся элементов. Каждый элемент включает в себя два слоя. Нечетные слои выполнены из поликора ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\varepsilon = 9,6$ ), четные – из тефлона ( $\varepsilon = 2,0$ ). Длина нечетных отрезков 1,0 мм, четных – 9,0 мм. Нарушение создавалось посредством изменения длины центрального слоя. Длина центрального нарушенного (тефлонового) слоя выбиралась равной 4,0 мм.

Измеряемая структура размещалась на границе нарушенного центрального слоя тефлона и следующего за ним слоя поликора и ориентировалась двумя способами относительно направления распространения электромагнитной волны. Расположение образца внутри нарушенного слоя и его ориентация относительно нарушенного слоя (конфигурация 1 и 2) в фотонном кристалле представлены на рис. 1.

Исследуемые образцы представляют собой эпитаксиальные арсенид-галлиевые структуры с суммарной толщиной  $t_s = t_n + t_{\text{под}}$ , состоящие из сильнолегированного полупроводникового эпитаксиального  $n^+$ -слоя толщиной  $t_n$  и электропроводностью  $\sigma_n$ , а также полупроводниковой подложки толщиной  $t_{\text{под}}$  и электропроводностью  $\sigma_{\text{под}}$ .

Для расчета частотной зависимости коэффициентов отражения  $R(\omega)$  и прохождения  $D(\omega)$  электромагнитной волны при ее нормальном падении на многослойную структуру, полностью заполняющую волновод по поперечному сечению и имеющую плоскости слоев, перпендикулярные направлению распространения излучения, использовались выражения

$$R = \frac{\mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]}, \quad (1)$$

$$D = \frac{\mathbf{T}_N[1,1] \cdot \mathbf{T}_N[2,2] - \mathbf{T}_N[1,2] \cdot \mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]}, \quad (2)$$

в которых элементы  $\mathbf{T}_N[1,1]$ ,  $\mathbf{T}_N[1,2]$ ,  $\mathbf{T}_N[2,1]$  и  $\mathbf{T}_N[2,2]$  матрицы передачи  $\mathbf{T}_N$  структуры, состоящей из  $N$  слоев, определяются из соотношения

$$\mathbf{T}_N = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_N[1,1] & \mathbf{T}_N[1,2] \\ \mathbf{T}_N[2,1] & \mathbf{T}_N[2,2] \end{pmatrix} = \prod_{j=N}^0 \mathbf{T}_{j,(j+1)} = \mathbf{T}(z_{N,N+1}) \cdot \mathbf{T}(z_{N-1,N}) \dots \mathbf{T}(z_{1,2}) \cdot \mathbf{T}(z_{0,1}),$$

$$\mathbf{T}(z_{j,j+1}) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1}-\gamma_j)z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1}+\gamma_j)z_{j,j+1}} \\ \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1}+\gamma_j)z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1}-\gamma_j)z_{j,j+1}} \end{pmatrix}.$$

Постоянные распространения электромагнитной волны в полупроводниковых слоях рассчитывались с использованием выражения [6–8]

$$\gamma_{\text{п. под}} = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_{\text{п. под}}^* \varepsilon_0 \mu_0},$$

где  $\varepsilon_{\text{п. под}}^* = \varepsilon_{\text{п. под}}' - j\varepsilon_{\text{п. под}}''$  – комплексные диэлектрические проницаемости сильнолегированного полупроводникового  $n^+$ -слоя и полупроводниковой подложки;

$\varepsilon_{\text{п. под}}' = \varepsilon_{\text{п. под}} - \frac{\sigma_{\text{п. под}}^2 m_{\text{п. под}}^*}{\varepsilon_0 e^2 n_{\text{п. под}}}$ ,  $\varepsilon_{\text{п. под}}'' = \frac{\sigma_{\text{п. под}}}{\varepsilon_0 \omega}$  – действительная и мнимая части комплекс-

ной диэлектрической проницаемости сильнолегированного полупроводникового  $n^+$ -слоя и полупроводниковой подложки;  $\varepsilon_{\text{п. под}}$ ,  $\sigma_{\text{п. под}}$  – относительная диэлектрическая проницаемость решетки и электропроводность сильнолегированного полупроводникового  $n^+$ -слоя и полупроводниковой подложки соответственно;  $m_{\text{п. под}}^*$ ,  $n_{\text{п. под}}$  – эффективная масса и концентрация электронов в сильнолегированном полупроводниковом  $n^+$ -слое и полупроводниковой подложке;  $a$  – размер широкой стенки волновода;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота электромагнитной волны;  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума.

Для одновременного нахождения электропроводности  $\sigma_{\text{под}}$  полупроводниковой подложки, толщины  $t_{\text{п}}$  и электропроводности  $\sigma_{\text{п}}$  сильнолегированного полупроводникового  $n^+$ -слоя по частотным зависимостям  $D(\omega)$  и  $R(\omega)$  использовался метод наименьших квадратов. При реализации данного метода находится такое значение параметров  $\sigma_{\text{под}}$ ,  $t_{\text{п}}$  и  $\sigma_{\text{п}}$ , при котором сумма  $S(\sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})$  квадратов разностей расчетных значений квадратов модулей коэффициентов прохождения и отражения  $|D(\omega, \sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})|^2$  и  $|R(\omega, \sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})|^2$  и экспериментальных (исходных)  $|D_{\text{эксп}}|^2$  и  $|R_{\text{эксп}}|^2$ , измеренных при двух различных конфигурациях (рис. 2) нарушенного фотонного кристалла, становится минимальной:

$$S(\sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}}) = \sum_{i=1}^K \left[ \begin{aligned} & \left( |D_1(\omega_i, \sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})|^2 - |D_{i1 \text{ эксп}}|^2 \right)^2 + \\ & + \left( |R_1(\omega_i, \sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})|^2 - |R_{i1 \text{ эксп}}|^2 \right)^2 + \\ & + \left( |D_2(\omega_i, \sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})|^2 - |D_{i2 \text{ эксп}}|^2 \right)^2 + \\ & + \left( |R_2(\omega_i, \sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})|^2 - |R_{i2 \text{ эксп}}|^2 \right)^2 \end{aligned} \right]. \quad (3)$$

Здесь  $K$  – число измеренных значений коэффициентов прохождения и отражения.

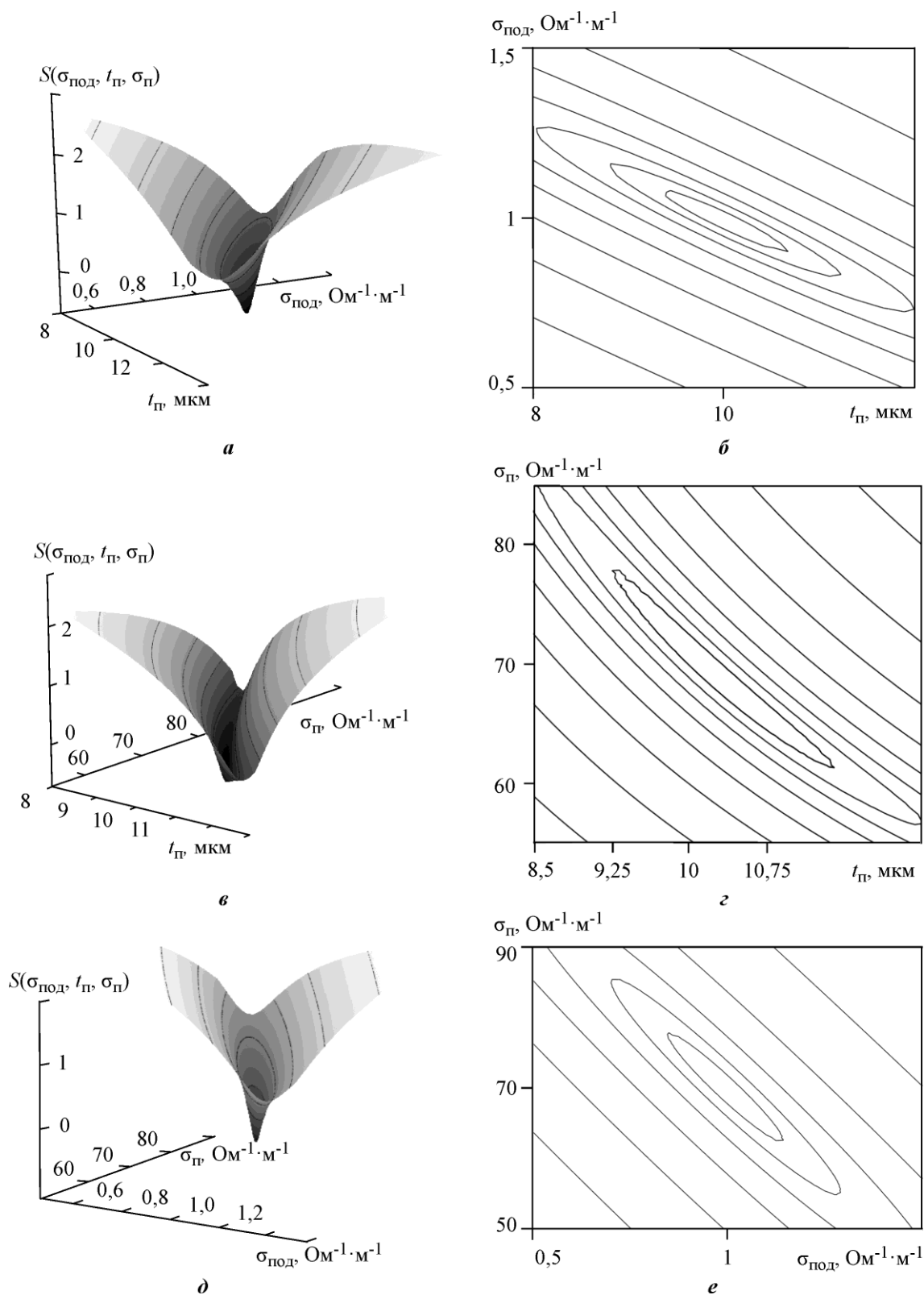


Рис.2. Вид функции невязок в пространстве и контурные карты в плоскостях искомых параметров  $a, б - \sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}$ ;  $в, г - \sigma_{\text{п}}, t_{\text{п}}$ ;  $д, е - \sigma_{\text{под}}, \sigma_{\text{п}}$  для образца арсенид-галлиевой структуры с эпитаксиальным слоем толщиной  $t_{\text{п}} = 10 \text{ мкм}$ , электропроводностью  $\sigma_{\text{п}} = 70,0 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ , выращенным на полупроводниковой подложке электропроводностью  $\sigma_{\text{под}} = 1,0 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$  и толщиной  $t_{\text{под}} = 480 \text{ мкм}$

**Результаты компьютерного моделирования.** Для отработки метода измерений решалась тестовая задача, которая заключалась в следующем. Задавались толщины и удельные электропроводности полупроводниковых слоев и рассчитывались частотные зависимости коэффициентов пропускания и отражения исследуемой структуры с использованием выражений (1) и (2), т.е. решалась прямая задача. Эти частотные зависимости выбирались в качестве исходных при решении обратной задачи по нахождению параметров полупроводниковой структуры, считающихся в этом случае неизвестными и подлежащими определению. Сравнение результатов решения обратной задачи с исходными значениями толщин и удельных электропроводностей полупроводниковых слоев позволяет оценить погрешность предложенного метода измерений.

Искомые значения параметров исследуемого образца определяются численным методом в результате решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial S(\sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})}{\partial \sigma_{\text{под}}} = 0; \\ \frac{\partial S(\sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})}{\partial t_{\text{п}}} = 0; \\ \frac{\partial S(\sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})}{\partial \sigma_{\text{п}}} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Для случая, когда электропроводность полупроводниковой подложки  $\sigma_{\text{под}} = 1,0 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ , толщина и электропроводность сильнолегированного полупроводникового  $n^+$ -слоя GaAs  $t_{\text{п}} = 10,0 \text{ мкм}$  и  $\sigma_{\text{п}} = 70,0 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ , функция невязок  $S(\sigma_{\text{под}}, t_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}})$ , определяемая выражением (3) и представленная на рис.2,а,в,д, имеет глобальный минимум в пространстве координат  $(t_{\text{под}}, \sigma_{\text{под}}, \sigma_{\text{п}}, S(t_{\text{под}}, \sigma_{\text{под}}, \sigma_{\text{п}}))$ , а контурные карты на рис.2,б,з,е характеризуются наличием замкнутых траекторий вблизи минимума. Это подтверждает возможность однозначно определять толщину и электропроводность полупроводникового слоя из решения системы уравнений (4).

Значения удельной электропроводности полупроводниковой подложки, сильнолегированного эпитаксиального слоя и его толщины, определенные из решения обратной задачи с использованием системы уравнений (4), составили:  $\sigma_{\text{под}} = 0,95 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ,  $t_{\text{п}} = 10,32 \text{ мкм}$  и  $\sigma_{\text{п}} = 70,1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ .

На рис. 3 представлены тестовые (исходные) и рассчитанные с использованием результатов решения обратной задачи частотные зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения и прохождения для двух конфигураций фотонной структуры (см. вставку на рис. 1), содержащей образец арсенид-галлиевой структуры с эпитаксиальным слоем толщиной  $t_{\text{п}} = 10,32 \text{ мкм}$  и электропроводностью  $\sigma_{\text{п}} = 70,1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ , выращенным на высокоомной подложке толщиной  $t_{\text{под}} = 480 \text{ мкм}$  и электропроводностью  $\sigma_{\text{под}} = 0,95 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ .

Относительная погрешность определения предложенным методом электропроводности полупроводниковой подложки, толщины полупроводникового слоя и его электропроводности составила  $\pm 4,0$ ,  $\pm 0,2$ ,  $\pm 2,6$  % соответственно.

С использованием предложенного метода измерены характеристики образцов эпитаксиальных арсенид-галлиевых структур, состоящих из эпитаксиального слоя (толщина 13,14 мкм, удельная электропроводность  $71,73 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ) и высокоомной подложки (толщина 480,3 мкм, удельная электропроводность  $0,01 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ).

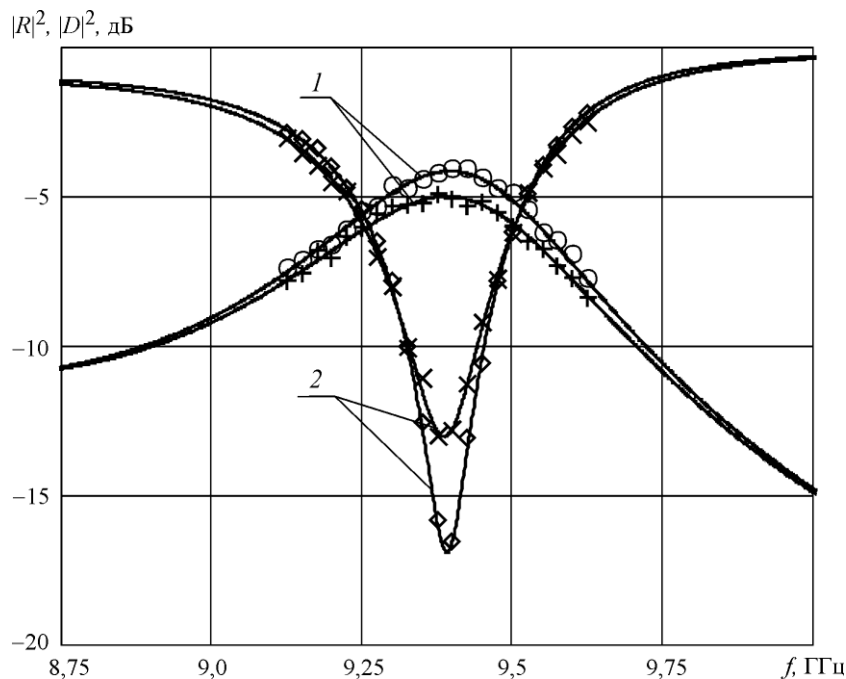


Рис.3. Исходные тестовые (точки) и рассчитанные (линии) с использованием результатов решения обратной задачи частотные зависимости  $|D|^2$  (кривые 1) и  $|R|^2$  (кривые 2) для фотонной структуры:  $\diamond, \circ$  – конфигурация 1;  $\times, +$  – конфигурация 2

**Заключение.** Предложено и теоретически обосновано использование СВЧ фотонных кристаллов для измерений электрофизических параметров полупроводниковых структур. В случае, когда исследуемая  $n^+n$ -структура играет роль нарушения периодичности фотонного кристалла, возможно одновременное измерение электропроводности полупроводниковой подложки, толщины и удельной электропроводности сильнолегированного эпитаксиального слоя при ориентации полупроводниковой структуры двумя способами относительно распространения электромагнитной волны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (государственное задание № 1376 и 1575) и стипендии Президента РФ (СП-2622.2015.3).

### Литература

1. Donor and acceptor modes in photonic band structure / *E. Yablonovitch, T.J. Gmitter, R.D. Meade et al.* // Phys. Rev. Lett. – 1991. – Vol. 67. – № 24. – P. 3380–3383.
2. *Belyaev B.A., Voloshin A.S., Shabanov V.F.* Study of Q-factor of impurity mode resonance in microstrip model of 1D-photonic crystal // Doklady Physics (Doklady Akademii Nauk). – 2005. – Vol. 403. – № 3. – P. 319–324.
3. Определение проводимости и толщины полупроводниковых пластин и нанометровых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов / *С.А. Никитов, Ю.В. Гуляев, Д.А. Усанов и др.* // Доклады Академии наук. – 2013. – Т. 448. – № 1. – С. 35–37.
4. Microwave photonic structures and their application for measurements of parameters of thin semiconductor layers / *D.A. Usanov, A.V. Skripal, D.V. Ponomarev et al.* // Proc. of the 44th European Microwave Conf. (Rome, Italy, 6–9 Oct. 2014). – 2014. – P. 984–987.
5. New techniques of measurement parameters of thin semiconductor layers by means of microwave photonic crystals / *D. Usanov, A. Skripal, D. Ponomarev et al.* // Proc. of 20th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communications MİKON-2014 (Gdansk, Poland, 16–18 June 2014). – 2014. – Vol. 1. – P. 62–64.
6. *Усанов Д.А.* СВЧ-методы измерения параметров полупроводников. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1985. – 55 с.

7. Радиоволновые и оптические измерения толщины и электропроводности металлических пленок на полупроводниковых и диэлектрических подложках / Ю.А. Чаплыгин, Д.А. Усанов, Ал.В. Скрипаль и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2005. – № 1. – С. 68–77.

8. 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.

Статья поступила  
15 января 2016 г.

**Усанов Дмитрий Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (СГУ), заслуженный деятель науки РФ. *Область научных интересов:* твердотельная, микро- и наноэлектроника, радиофизика. **E-mail: UsanovDA@info.sgu.ru**

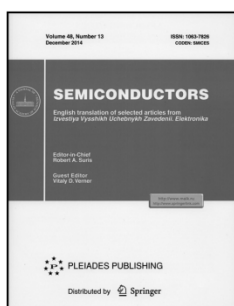
**Никитов Сергей Аполлонович** – доктор физико-математических наук, профессор, директор Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, член-корреспондент РАН. *Область научных интересов:* твердотельная, микро- и наноэлектроника.

**Скрипаль Александр Владимирович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела СГУ. *Область научных интересов:* твердотельная, микро- и наноэлектроника, радиофизика.

**Пономарев Денис Викторович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела СГУ. *Область научных интересов:* твердотельная, микро- и наноэлектроника, СВЧ- электроника, радиофизика.

**Латышева Екатерина Викторовна** – аспирант кафедры физики твердого тела СГУ. *Область научных интересов:* твердотельная, микро- и наноэлектроника, СВЧ-электроника, радиофизика.

## Уважаемые авторы и читатели!



Вышел в свет журнал  
**SEMICONDUCTORS**

English translation of selected articles from  
**Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektronika.** –  
Vol. 49, N 13, 2015. - ISSN: 1063-7826

<http://www.maik.ru>  
<http://www.springerlink.com>