

**Измерение эффективных масс
электропроводности и плотности состояний
бесконтактными сверхвысокочастотными методами**

Д.А. Усанов, А.Э. Постельга, К.А. Гуров

*Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия*

usanovDA@info.sgu.ru

Для изучения зонной структуры полупроводника, моделирования процессов проводимости и разработки реальных полупроводниковых приборов необходимо знание эффективной массы квазичастиц. Поэтому задача по определению эффективной массы носителей в конкретном образце остается актуальной.

На примере кремния показана возможность определения эффективных масс электропроводности и плотности состояний по измеренному спектру СВЧ-отражения в качестве совокупности информационных параметров. Решена обратная задача, состоящая в нахождении условий минимума разности квадратов значений, соответствующих известным теоретической и измеренной экспериментально спектральным зависимостям. Расчет и эксперимент проведены для интервала температур 130–190 К, в котором обеспечивалась наибольшая точность измерений. Для кремния *p*-типа, легированного Ga, и кремния *n*-типа, легированного Sb, получены значения искомым эффективным масс, хорошо совпадающие со значениями, приведенными в литературе.

Предложенный бесконтактный метод позволяет одновременно определять эффективные массы электропроводности и плотности состояний носителей заряда с использованием стандартной аппаратуры. Метод может быть использован для измерения параметров полупроводников других типов, в том числе малоисследованных.

Ключевые слова: полупроводник; электропроводность; эффективная масса электропроводности; эффективная масса плотности состояний; метод наименьших квадратов; сверхвысокочастотное излучение.

Для цитирования: Усанов Д.А., Постельга А.Э., Гуров К.А. Измерение эффективных масс электропроводности и плотности состояний бесконтактными сверхвысокочастотными методами // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 1. – С. 5–14. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-1-5-14

Measurement of Effective Masses of Electric Conductivity and Density of States by No-Contact Microwave-Frequency Methods

D.A. Usanov, A.E. Postelga, K.A. Gurov

Saratov National Research State N.G. Chernyshevsky University,
Saratov, Russia

usanovDA@info.sgu.ru

For studying the semiconductor zone structure, the simulation of the conductivity processes and development of real semiconductor devices the knowledge of the effective mass of quasi-particles is necessary. Therefore, the problem of determining the effective mass of the carriers in a specific sample remains to be urgent.

On an example of silicon the possibility of determining the effective mass of conductivity and density of states, using the measured spectrum of microwave reflection, has been shown as the set of the information parameters. To implement this, the solution of the corresponding inverse problem has been carried out, consisting in finding the conditions of minimum of the difference of the squares of the values, corresponding to known theoretical and measured experimental spectral dependencies. The calculation and the experiment have been carried out for a range of temperatures, in which the greatest accuracy of the measurements (130–190) had been ensured. For silicon *p*-type (Ga doped) and *n*-type (Sb doped) obtained values for the desired effective mass are in good agreement with the values given in literature.

Keywords: semiconductor; conductivity; effective mass of conductivity; effective mass of states density; the least-squares method; microwave radiation.

For citation: Usanov D.A., Postelga A.E., Gurov K.A. Measurement of effective masses of electric conductivity and density of states by no-contact microwave-frequency methods // Proc. of Universities. Electronics. – 2018. – Vol. 23. – № 1. – P. 5–14. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-1-5-14

Введение. При отработке технологии изготовления полупроводниковых материалов, конструировании новых типов полупроводниковых приборов, выяснении условий их эксплуатации необходимо знание физических параметров исходных материалов. К таким параметрам, в частности, относятся электропроводность, диэлектрическая проницаемость, концентрация, подвижность, эффективная масса носителей заряда и др. Эти параметры зависят от температуры, частоты и напряженности приложенных электрического и магнитного полей, размеров полупроводникового образца и других факторов.

Отметим, что методам определения проводимости, концентрации и подвижности носителей заряда посвящено много работ [1–3], а методам измерения таких фундаментальных параметров, как эффективная масса электропроводности m^* и эффективная масса плотности состояний m_d^* , которые характеризуют квантовомеханические свойства материалов, – значительно меньше. Знание эффективной массы квазичастиц необходимо для изучения зонной структуры полупроводников, моделирования процессов

проводимости и разработки реальных полупроводниковых приборов. Поэтому задача определения эффективной массы носителей в конкретном образце остается актуальной.

Для определения эффективной массы носителей заряда обычно используются методы плазменного, циклотронного резонансов [4, 5], метод Фарадея [2, 6]. Однако данные методы имеют следующие недостатки: использование различного рода приближений, вследствие чего увеличивается погрешность измерений; необходимость проведения измерений при низких температурах, что усложняет условия эксперимента; необходимость использования образцов, прозрачных для электромагнитного излучения видимого диапазона, что значительно сужает круг исследуемых материалов.

В настоящей работе разрабатывается бесконтактный метод измерения полупроводниковых структур, позволяющий проводить одновременные измерения эффективных масс электропроводности и плотности состояний с применением стандартной измерительной аппаратуры. Предлагается основываться на результатах измерений спектров отражения и прохождения СВЧ-излучения, которые могут быть получены для широкого круга объектов. В частности, в работах [3, 7, 8] такой подход использовался для определения параметров металлической пленки, полупроводников и магнитной жидкости. Построение правильной теоретической модели спектров отражения и прохождения, совпадающих с соответствующими экспериментальными спектрами, делает возможным определение любой величины данного спектра. Проведение нескольких измерений при различных температурах и решение обратной задачи позволяет определять параметры исследуемого образца с высокой точностью. Добавление в исследуемую структуру слоя диэлектрика известной толщины дает возможность получать явно выраженный минимум на частотной зависимости коэффициента отражения, что значительно повышает точность определения искомых параметров. Так как эффективная масса в значительной степени определяет электропроводность образца, которая в свою очередь влияет на спектр отражения, то она может быть определена предлагаемым методом.

Теоретическое обоснование метода. Для реализации метода измерения эффективных масс необходимо измерять электропроводность при различных температурах: от значения, для которого изменение электропроводности происходит в основном за счет ионизации примеси, до значения, при котором наблюдается преимущественное рассеяние носителей заряда на акустических фононах. Используя результаты измерений и известные соотношения для температурных зависимостей концентрации и подвижности носителей заряда [6], можно путем решения обратной задачи с применением численных методов определить значения искомых эффективных масс. В частности, для нахождения значений m^* или m_d^* может быть применен метод наименьших квадратов, при котором определяется такой набор искомых параметров, когда функция невязок вида

$$S(m^*, m_d^*) = \sum_i (\sigma_{\text{теор}}(T_i, m^*, m_d^*)^2 - \sigma_{\text{exp}}(T_i)^2)^2 \quad (1)$$

принимает минимальное значение. Здесь $\sigma_{\text{exp}}(T_i)$ – экспериментально полученные значения электропроводности при температурах T_i ; $\sigma_{\text{теор}}(T_i, m^*, m_d^*)$ – расчетные значения.

Для нахождения глобального минимума функции невязок в выбранной области температур решается система уравнений, определяемых из условия равенства нулю частных производных функции невязок по искомому параметру:

$$\begin{cases} \partial S(m^*, m_d^*) / \partial m^* = 0, \\ \partial S(m^*, m_d^*) / \partial m_d^* = 0. \end{cases}$$

Определение значений электропроводности образца возможно проводить по частотным зависимостям коэффициента отражения СВЧ-излучения [3, 9] или контактными методами [10].

Предлагаемый метод основан на сопоставлении экспериментально полученной температурной зависимости электропроводности образца с теоретической зависимостью, учитывающей температурные зависимости концентрации и подвижности и наличие двух механизмов рассеяния носителей заряда: на фононах и ионах примеси.

В простых полупроводниках зависимость концентрации свободных носителей заряда от температуры имеет вид [6]

$$n, p(T) = 2N \left[1 + \sqrt{1 + 8N \frac{\exp(\frac{\Delta W}{kT})}{N_{c,v}(T)}} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где N – концентрация атомов примеси (донорной N_D или акцепторной N_A); ΔW – энергия активации примеси; k – постоянная Больцмана; $N_{c,v}(T) = [2\pi m_d^* kT / (2\pi\eta)^2]^{3/2}$ – эффективная плотность состояний в энергетической зоне (в зоне проводимости $N_c(T)$ или в валентной зоне $N_v(T)$); η – приведенная постоянная Планка.

В области пониженных температур (близких к азотным) преобладают два механизма рассеяния носителей заряда: на ионах примеси и на акустических фононах. Следовательно, общая подвижность носителей заряда равна [6]:

$$1/\mu = 1/\mu_L + 1/\mu_I, \quad (3)$$

где μ_L и μ_I – подвижности носителей заряда при рассеянии на акустических фононах и ионах примеси соответственно.

Температурная зависимость подвижности носителей заряда при рассеянии на фононах определяется соотношением [6]

$$\mu_L(T) = \frac{4e\sqrt{\pi}\eta^4 c_l E^{*-1/2}}{3\sqrt{2}E_I^2 m^{*5/2} (kT)^{3/2}}, \quad (4)$$

где e – заряд электрона; $c_l = 16,6 \cdot 10^{10}$ Н/м² – упругая постоянная кристалла при продольных колебаниях [11]; $E^* = 3kT/2$ – приведенная энергия рассеиваемого электрона; $E_I \approx 8$ эВ – константа деформации потенциала, характеризующая сдвиг края разрешенной зоны при однородной деформации кристалла [12].

При рассеянии на ионах примеси температурная зависимость подвижности носителей заряда имеет вид [6]

$$\mu_I(T) = \frac{8\sqrt{2}\varepsilon_L^2 (\frac{3kT}{2})^{3/2}}{\pi^{3/2} e^3 \sqrt{m^*} g(T) n, p(T)}, \quad (5)$$

где ε_L – диэлектрическая проницаемость решетки; $g(T) = \ln(1 + \eta(T)) - \eta(T)/(1 + \eta(T))$; $\eta(T) = 3m^* k^2 T^2 \varepsilon / \pi \eta^2 e^2 n, p(T)$; $n, p(T)$ – концентрация свободных носителей заряда, которая может быть определена по формуле (2) при известных N и ΔW (в эксперименте $N_A = 2,45 \cdot 10^{15}$ см⁻³; $\Delta W_A = 0,072$ эВ и $N_D = 7,9 \cdot 10^{16}$ см⁻³; $\Delta W_D = 0,043$ эВ).

Таким образом, путем подстановки зависимостей (4) и (5) в соотношение (3) может быть получена температурная зависимость подвижности дырок при действии двух механизмов рассеяния в следующем виде:

$$\mu(T) = \left(\frac{3\sqrt{2}E_I^2 m^{*5/2} (kT)^{3/2}}{4e\sqrt{\pi}\eta^4 c_I E^{*-1/2}} + \frac{\pi^{3/2} e^3 \sqrt{m^*} g(T) n, p(T)}{8\sqrt{2}\varepsilon_L^2 \left(\frac{3kT}{2}\right)^{3/2}} \right)^{-1} \quad (6)$$

Подставляя в соотношение для электропроводности $\sigma = en, p\mu$ [6] зависимости, определяющие подвижность носителей заряда (6) и их концентрацию (2), можно получить температурную зависимость электропроводности:

$$\sigma(T) = \left(1 + \sqrt{1 + 4N \left(\frac{2\pi\eta^2}{m_d^* kT}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{\Delta W}{kT}\right)} \right) \times \left(\frac{3\sqrt{2}NE_I^2 m^{*5/2} (kT)^{3/2}}{2\sqrt{\pi}\eta^4 c_I E^{*-1/2}} + \frac{N^2 \pi^{3/2} e^4 \sqrt{m^*} g(T)}{2\sqrt{2}\varepsilon_L^2 \left(\frac{3kT}{2}\right)^{3/2} \left[1 + \sqrt{1 + 4N \left(\frac{2\pi\eta^2}{m_d^* kT}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{\Delta W}{kT}\right)} \right]} \right)^{-1}$$

В данную зависимость одновременно входят эффективные массы электропроводности и плотности состояний, поэтому возможно их одновременное определение по экспериментальным температурным зависимостям электропроводности. Для этого достаточно двух измерений значений электропроводности, проведенных при температурах из интервала, в котором электропроводность сравнительно слабо зависит от концентрации примеси. Для повышения точности измерений необходимо проводить расчет по избыточному количеству значений электропроводности. При этом необходимо учитывать температурную зависимость концентрации носителей заряда.

В эксперименте для определения значений эффективных масс использовался метод наименьших квадратов. Сначала необходимо определить диапазон температур, в котором будет проводиться расчет для определения искоемых параметров. Правильный выбор диапазона обеспечивает наибольшую точность в определении значений эффективных масс. Проведенный модельный эксперимент показал следующее. При выборе диапазона температур, серединой которого является температура полной ионизации примеси, т.е. когда достигается максимальное значение электропроводности, функция невязок наиболее чувствительна к изменению эффективной массы. На рис.1 представлены зависимости значений десятичного логарифма функции невязок (1) от эффективной массы плотности состояний, полученные при расчете в диапазоне температур 50–150 К (рис.1,а) и 150–250 К (рис.1,б).

Из рис.1 видно, что при выборе диапазона температур 50–150 К разница между двумя соседними значениями функции невязок в минимуме ΔS значительно превышает аналогичную разницу при расчете в диапазоне температур 150–250 К. В первом случае ΔS составляет не менее 12 % от минимального значения, во втором – 3–5 %.

С использованием численных итерационных методов в предполагаемом диапазоне значений искоемых параметров проводился перебор всех возможных значений с шагом, определяемым требуемой точностью. Затем диапазон был сужен, а шаг уменьшен и т.д. В результате оказывалось возможным однозначно определить искоемые параметры полупроводника. На рис.2 представлена логарифмическая зависимость функции невязок (1) от эффективных масс. Видно, что существует единственная комбинация эффективных масс, при которой достигается минимум функции невязок, т.е. единственное решение.

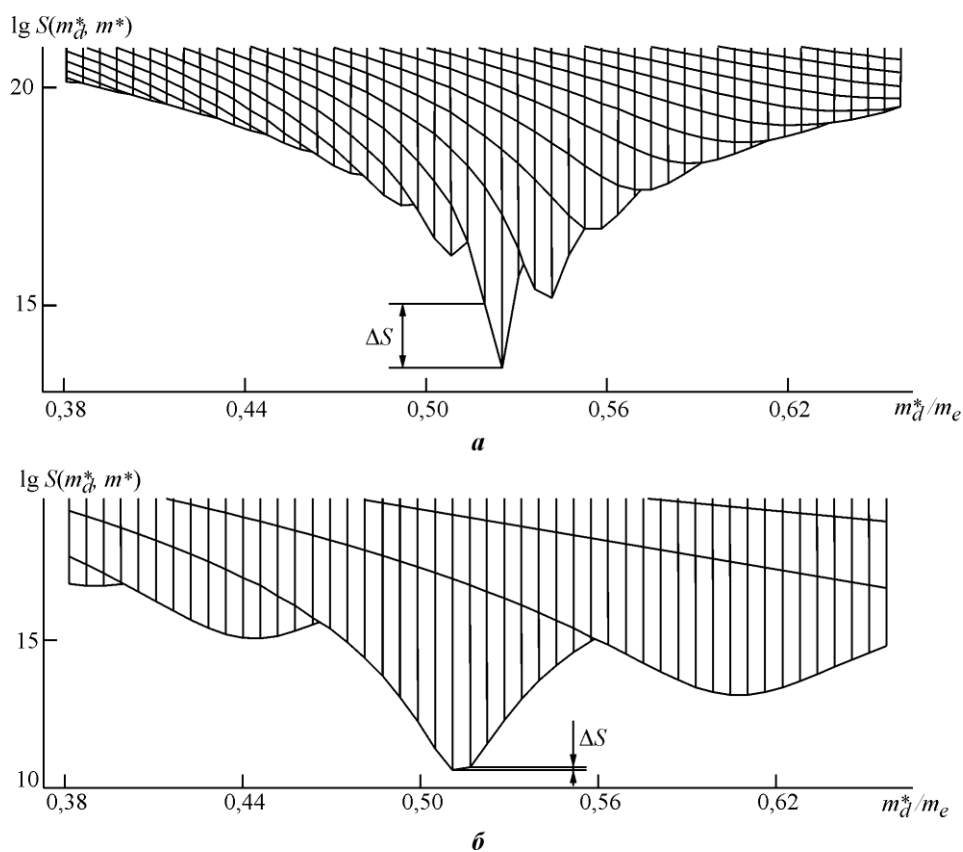


Рис.1. Логарифмическая зависимость функции невязок от эффективной массы плотности состояний при расчете в диапазоне температур 50–150 К (а) и 150–250 К (б)

Fig.1. Logarithmic dependence of the residual function on the effective mass of the density of states when calculated in the temperature range from 50–150 K (a) and 150–250 K (b)

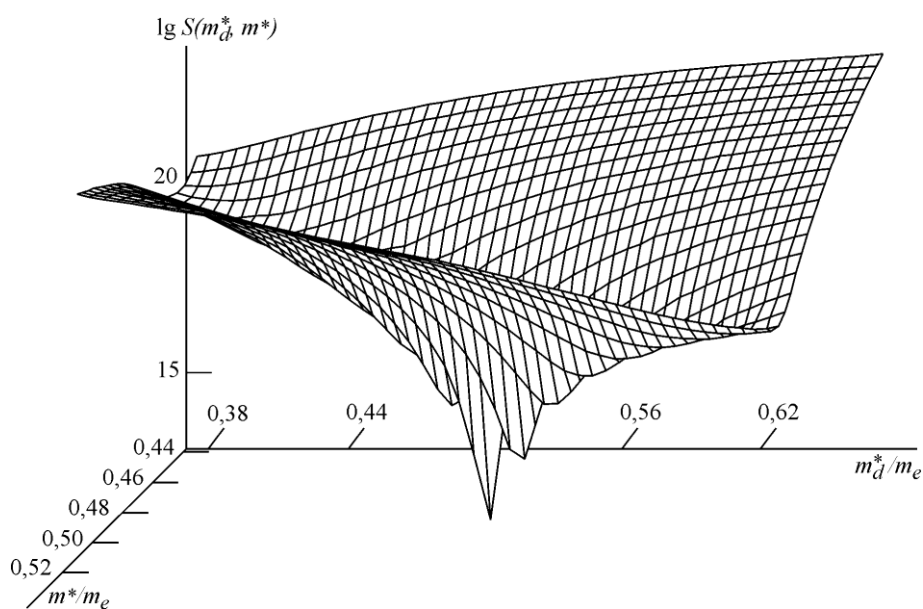


Рис.2. Логарифмическая зависимость функции невязок от эффективных масс
Fig.2. The logarithmic dependence of the residual functions on the effective masses

Для оценки погрешности используемого метода измерений проводился компьютерный эксперимент: построена температурная зависимость электропроводности при искусственно заданной погрешности в определении $\sigma_{\text{exp}}(T_i)$ в пределах $\pm 5\%$. По результатам эксперимента установлено, что погрешность определения эффективных масс m^* и m_d^* рассматриваемым методом не превышает 3% (при использовании как минимум 20 значений $\sigma_{\text{exp}}(T_i)$).

Результаты экспериментальных исследований. Экспериментальное исследование проводилось на установке, схема которой приведена на рис. 3. СВЧ-излучение от генератора качающейся частоты 1 панорамного измерителя КСВН и ослабления направлялось через коаксиально-волноводный преобразователь 2, вентиль 3 и два направленных ответвителя 5 в волновод 6 и на структуру, полностью заполняющую поперечное сечение волновода и включающую в себя диэлектрический слой 7 и полупроводниковый слой 8, параметры которого необходимо определить. Падающее и отраженное от измеряемой структуры электромагнитное излучение через направленные ответвители 5 направлялось на детекторы 4, сигналы с которых поступали на индикаторный блок 10 и через АЦП 9 – в ПК 11 для анализа.

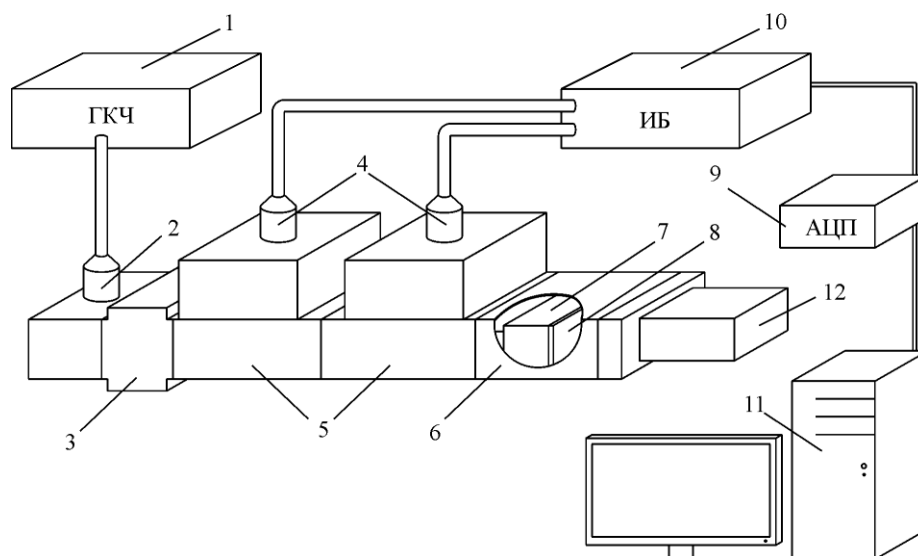


Рис.3. Схема установки для измерения частотной зависимости коэффициента отражения: 1 – генератор качающейся частоты (ГКЧ); 2 – коаксиально-волноводный преобразователь; 3 – вентиль; 4 – детекторы; 5 – направленные ответвители; 6 – волновод; 7 – слой диэлектрика; 8 – слой полупроводника; 9 – аналогово-цифровой преобразователь (АЦП); 10 – индикатор КСВН и ослабления (ИБ); 11 – ПК; 12 – согласованная нагрузка

Fig.3. The scheme of the installation for measuring the frequency dependence of the reflection coefficient: 1 – sweep generator; 2 – coaxial-waveguide converter; 3 – valve; 4 – detectors; 5 – directional couplers; 6 – waveguide; 7 – dielectric layer; 8 – semiconductor layer; 9 – analog-to-digital converter; 10 – VSWR and attenuation indicator; 11 – computer; 12 – matched load

Для экспериментального исследования использовались два образца: кремний толщиной 400 мкм, легированный галлием ($\Delta W_{\text{Ga}} = 0,072$ эВ [13]) и кремний толщиной 360 мкм, легированный сурьмой ($\Delta W_{\text{Sb}} = 0,043$ эВ [13]). В качестве диэлектрика применялся фторопласт ($\epsilon = 2$) толщиной 30 мм. Для измерения температуры применялся жидкий азот, регистрировалась температура с помощью термпары.

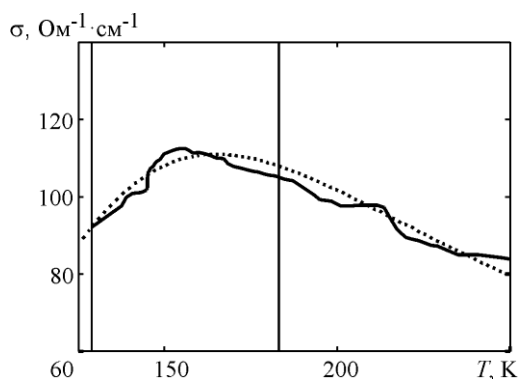


Рис.4. Температурные зависимости электропроводности: сплошная линия – экспериментальная зависимость; прерывистая линия – теоретическая зависимость; вертикальные линии – границы диапазона расчета

Fig.4. Temperature dependences of electrical conductivity: solid line – experimental dependence; discontinuous line – theoretical dependence

тивная масса электропроводности – $0,39 \cdot m_e$; для образца n -типа эффективная масса плотности состояний составляет $1,06 \cdot m_e$, эффективная масса электропроводности – $0,27 \cdot m_e$. Полученные значения в пределах погрешности соответствует табличным значениям эффективных масс [15]: $0,59 \cdot m_e$; $0,38 \cdot m_e$; $1,08 \cdot m_e$; $0,26 \cdot m_e$ соответственно.

Заключение. Полученные в работе результаты свидетельствуют о возможности применения бесконтактного метода измерения для контроля параметров полупроводниковых планарных структур. Метод позволяет одновременно определять эффективные массы электропроводности и плотности состояний носителей заряда с использованием стандартной аппаратуры.

Литература

1. Белова И.М., Белов А.Г., Каневский В.Е., Лысенко А.П. Определение концентрации свободных электронов в n -InSb по спектрам отражения в дальней инфракрасной области с учетом плазмон-фононного взаимодействия // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т.22. – № 3. – С. 201–210.
2. Мадьяров В.Р. Измерение параметров электронного переноса в полупроводниках с помощью эффекта Фарадея в миллиметровом диапазоне // Труды БГТУ. – 2016. – № 6. – С.101–105.
3. Усанов Д.А., Постельга А.Э. Определение толщины, электропроводности и энергии активации примеси полупроводниковых слоев по спектру отражения СВЧ-излучения // Дефектоскопия. – 2014. – № 5. – С. 60–68.
4. Moss T.S., Burrell G.J., Ellis B. Semiconductor opto-electronics. – Butterworth&Co (Publishers) Ltd, 1973. – 441 с.
5. Гершензон Е.М. Циклотронный резонанс в полупроводниках // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – Т. 6. – № 10. – С. 87–94.
6. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1984.– 352 с.
7. 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 // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76. – Вып. 5. – С. 112–117.
8. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Алтынбаев С.В. Определение параметров магнитной жидкости по температурной зависимости сверхвысокочастотного спектра отражения // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – Вып. 11. – С. 30–33.

9. **Усанов Д.А., Постельга А.Э., Гуров К.А.** Способ определения толщины, электропроводности эффективной массы, коэффициентов рассеяния носителей заряда, концентрации и энергии активации легирующей примеси полупроводникового слоя // Патент России № 2619802. 2017. Бюл. № 14.
10. **Шупенев А.Е., Григорьянц А.Г.** Термоэлектрический измеритель электрических параметров термоэлектрических пленок // Патент России № 167784. 2017. Бюл. № 1.
11. **Ильинская Л.С., Подмарьков А.Н.** Полупроводниковые тензодатчики. – М. – Л.: Энергия, 1966. – 120 с.
12. **Скворцов А.А., Литвиненко О.В., Орлов А.М.** Определение констант деформационного потенциала n -Si, p -Si по концентрационному ангармонизму // Физика и техника полупроводников. – 2003. – Т. 37. – №1. – С.17–21.
13. **Шкловский Б.И., Эфрос А.Л.** Электронные свойства легированных полупроводников. – М.: Наука, главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 358 с.
14. **Усанов Д.А., Постельга А.Э.** Способ определения электропроводности и энергии активации примесных центров полупроводниковых слоев // Патент России № 2516238. 2014. Бюл. № 14.
15. **Бонч-Бруевич В.Л., Калашников К.Г.** Физика полупроводников. – М.: Наука, 1977. – 672 с.

Поступила 08.06.2017 г.; принята к публикации 09.11.2017 г.

Усанов Дмитрий Александрович – доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского (Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83), usanovDA@info.sgu.ru

Постельга Александр Эдуардович – кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры физики твердого тела Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского (Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83), sanyalace@list.ru

Гуров Кирилл Александрович – аспирант кафедры физики твердого тела Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского (Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83), kirill.gurov93@mail.ru

References

1. Belova I.M., Belov A.G., Kanevskij V.E., Lysenko A.P. Opredelenie koncentracii svobodnyh elektronov v n-InSb po spektram otrazheniya v dal'nej infrakrasnoj oblasti s uchetom plazmon-fononnoho vzaimodejstviya [Determination of the concentration of free electrons in n-InSb from reflection spectra in the far infrared region taking into account the plasmon-phonon interaction]. *Izvestiya vuzov. Elektronika – Proceedings of Universities. Electronics*, 2017, vol. 22, no.3 pp. 201–210. (In Russian).
2. Mad'yarov V. R. Izmerenie parametrov elektronnoho perenosa v poluprovodnikah s pomoshch'yu ehffekta Faradeya v millimetrovom diapazone [Measurement of electron transport parameters in semiconductors with the help of the Faraday effect in the millimeter range]. *Trudy BGTU – Proceedings of BSTU*, 2016, no. 6, pp. 101–105. (In Russian).
3. Usanov D.A., Postel'ga A.EH. Opredelenie tolshchiny, elektroprovodnosti i ehnergii aktivacii primesi poluprovodnikovyh sloev po spektru otrazheniya SVCH–izlucheniya [Determination of the thickness, electrical conductivity and activation energy of the impurity of semiconductor layers from the spectrum of microwave radiation reflection]. *Defektoskopiya – Defectoscopy*, 2014, no. 5, pp. 60–68. (In Russian).
4. Moss T.S., Burrell G.J., Ellis B. *Semiconductor Opto-Electronics*. Butterworth&Co Ltd Publ., 1973. 441 p.
5. Gershenson E.M. Ciklotronnyj rezonans v poluprovodnikah [Cyclotron resonance in semiconductors]. *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal – Soros Educational Journal*, 2000, vol. 6, no. 10, pp. 87–94. (In Russian).
6. Fistul' V.I. *Vvedenie v fiziku poluprovodnikov* [Introduction to the Physics of Semiconductors: 2nd edition, revised and supplemented. 2-e izd., pererab. i dop.]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1984. 352 p. (In Russian).
7. Usanov D.A., Skripal' A.V., Abramov A.V., Bogolyubov A.S. Izmereniya tolshchiny nanometrovyyh sloev metalla i elektroprovodnosti poluprovodnika v strukturah metall–poluprovodnik po spektram otrazheniya i prohozhdeniya elektromagnitnoho izlucheniya [Measurements of the thickness of nanometer metal layers and the electrical conductivity of a semiconductor in metal-semiconductor structures from the spectra of reflection

and transmission of electromagnetic radiation]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*, 2006, vol. 76, no. , pp. 112–117. (In Russian).

8. Usanov D.A., Postel'ga A.E., Altynbaev S.V. Opredelenie parametrov magnitnoj zhidkosti po temperaturnoj zavisimosti sverhvysochastotnogo spektra otrazheniya [Determination of the parameters of a magnetic fluid from the temperature dependence of the microwave spectrum of reflection]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*, 2013, vol. 83, no. 11., pp. 30–33. (In Russian).

9. Usanov D.A., Postel'ga A.E., Gurov K.A. Sposob opredeleniya tolshchiny, elektroprovodnosti effektivnoy massy, koeffitsientov rasseyaniya nositelej zaryada, koncentracii i energii aktivatsii legiruyushchej primesi poluprovodnikovogo sloya [Method for determining the thickness, the electrical conductivity of the effective mass, the scattering coefficients of charge carriers, the concentration and activation energy of the dopant of the semiconductor layer]. Patent RF no. 2619802, 2017. (In Russian).

10. Shupenev A.E., Grigor'yanc A.G. *Termoelektricheskij izmeritel' elektricheskikh parametrov termoelektricheskikh plenok* [Thermoelectric measurer of electrical parameters of thermoelectric films]. Patent RF no. 167784, 2016. (In Russian).

11. Il'inskaya L.S., Podmar'kov A.N. *Poluprovodnikovye tenzodatchiki* [Semiconductor strain gauges]. Moscow – Leningrad: Energiya Publ., 1966. 120 p. (In Russian).

12. Skvorcov A.A., Litvinenko O.V., Orlov A.M. Opredelenie konstant deformatsionnogo potentsiala n-Si, p-Si po koncentracionnomu angarnonizmu [Determination of the deformation potential constants of n-Si, p-Si by concentration anharmonicity]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov. – Physics and Technology of Semiconductors*, 2003, vol. 37, no.1, pp.17–21. (In Russian).

13. Shklovskij B.I., Efros A.L. *Elektronnye svoystva legirovannykh poluprovodnikov* [Electronic properties of doped semiconductors]. Moscow, Nauka, 1979. 358 p. (In Russian).

14. Usanov D.A., Postel'ga A.E. *Sposob opredeleniya elektroprovodnosti i energii aktivatsii primesnykh centrov poluprovodnikovyh sloev* [Method for determining the electrical conductivity and the activation energy of impurity centers of semiconductor layers] Patent RF no. 2516238 RF, 2012. (In Russian).

15. Bonch-Bruevich V. L., Kalashnikov K. G. *Fizika poluprovodnikov* [Physics of semiconductors]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 672 p. (In Russian).

Submitted 08.06.2017; accepted 09.11.2017.

Usanov Dmitriy A. – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., head of the Solid State Physics Department, Saratov State University (Russia, 410012, Saratov, Astrakhanskaya str., 83), usanovDA@info.sgu.ru

Postelga Alexander E. – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Solid State Physics Department, Saratov State University (Russia, 410012, Saratov, Astrakhanskaya str., 83), sanyalace@list.ru

Gurov Kirill A. – PhD student of the Solid State Physics Department, Saratov State University (Russia, 410012, Saratov, Astrakhanskaya str., 83), kirill.gurov93@mail.ru