

**Температурные зависимости электрофизических свойств  
твёрдого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ )***Х. М. Мадаминов*

*Исследованы вольт-амперные характеристики  $p\text{-Si-n-Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ) структур, в температурном диапазоне от 293 до 453 К. Определено, что начальные участки прямых ветвей ВАХ при всех температурах описываются экспоненциальной зависимостью тока от напряжения, а затем следует квадратичный участок, который описывается дрейфовым механизмом переноса носителей в режиме омической релаксации объёмного заряда. Были определены энергии активации двух глубоких уровней со значениями 0,21 эВ и 0,35 эВ, которые приписываются междоузельным атомам Sn и А-центрам, соответственно. Обоснована перспективность использования твёрдых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ), полученных на кремниевых подложках, в качестве активного материала при изготовлении инжекционных диодов.*

*Ключевые слова:* жидкофазная эпитаксия, твёрдый раствор, вольт-амперная характеристика, переходной слой, энергия активации.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2021-1-63-68

**Введение**

Твёрдые растворы замещения  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  являются одним из перспективных материалов для полупроводниковой микроэлектроники. На их основе могут быть разработаны оптоэлектронные приборы, работающие как в ближней, так и в дальней инфракрасной области спектра излучения. Получение различных структур на основе  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  на доступных Si подложках, исследование их структурных и электрофизических свойств представляет практический интерес. В работе [1] показана возможность выращивания твёрдого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$ , а в [2] приведены результаты структурного и фотоэлектрического исследования структур  $p\text{-Si-n-Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ), в частности показано, что слои  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  имеют со-

вершенную монокристаллическую структуру с ориентацией (111), обнаружено влияние температуры на фоточувствительность исследованных структур в примесной области поглощения.

К началу наших исследований не были подробно изучены электрофизические свойства переходной области, образующая между кремниевой подложкой и эпитаксиальной пленкой твёрдого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  при жидкофазной эпитаксии. Известно, что такая переходная область может существенно влиять на электронные процессы в структуре в целом, в том числе и на механизм переноса тока [3]. В соответствии с вышеизложенными была поставлена задача, как исследования электрофизических свойств методом анализа вольт-амперных характеристик (ВАХ) твёрдых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$ , и установить роль переходного слоя между подложкой и эпитаксиальной пленкой в формировании электрофизических свойств данного материала.

**Подготовка образцов**

Исследуемые в данной работе структуры изготавливались выращиванием на  $p\text{-Si}$  моно-

---

**Мадаминов Хуршиджон Мухамедович**, доцент,  
к.ф.-м.н.  
E-mail: khurmad@mail.ru  
Андижанский государственный университет,  
Узбекистан, 170100, г. Андижан, ул. Университетская,  
129.

Статья поступила в редакцию 30 ноября 2020 г.

© Мадаминов Х. М., 2021

кристаллических подложках с толщиной 400 мкм и удельным сопротивлением 1 (Ом см) твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ )  $n$ -типа проводимости методом жидкофазной эпитаксии из оловянного раствора-расплава. Выращенные слои  $n\text{-Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  в зависимости от начала и окончания температуры кристаллизации и скорости охлаждения имели толщину от 15 до 45 мкм, удельное сопротивление  $\sim 0,6\text{--}1,0$  (Ом см) и концентрацию носителей  $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

Для снятия ВАХ в структуре методом вакуумного напыления создавались омические контакты – сплошные с тыльной стороны и четырехугольные с площадью 9 мм<sup>2</sup> из серебра со стороны эпитаксиального слоя. ВАХ, представленные на рис. 1, регистрировались в температурном диапазоне 293–453 К.

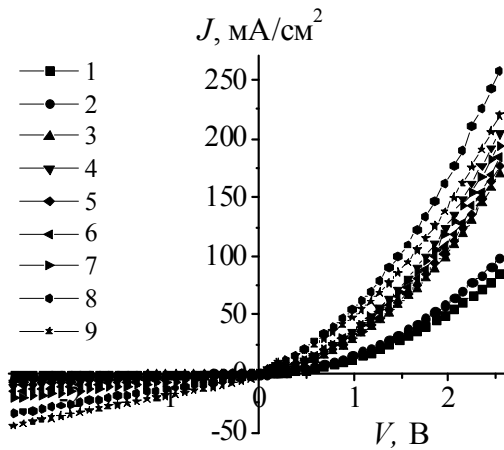


Рис. 1. ВАХ структуры  $p\text{-Si-n-Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ) при температурах ( $T$ , К): 1 – 293; 2 – 313; 3 – 333; 4 – 353; 5 – 373; 6 – 393; 7 – 413; 8 – 433; 9 – 453.

## Обсуждение экспериментальных и расчетных результатов

Исследования ВАХ показали, что данная структура обладает весьма аномальными свойствами по прохождению тока с температурными зависимостями, которые объяснены в рамках представлений об интенсивном рождении вакансий и дефект-примесных комплексов с ростом температуры, который является определяющим для скорости рекомбинации неравновесных носителей [4].

Начальный участок ВАХ (от 0,02 В до 0,08 В) хорошо описывается экспоненциальной зависимостью Стафеева [5] характерной для «длинного» диода (т. е. когда  $d/L_p > 1$ , где  $d$  – линейный размер базы,  $L_p$  – значения длины диффузии неосновных зарядоносителей), усовершенствованной в [6] для  $p\text{-i-n}$ -структур:

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{ckT}\right), \quad (1)$$

$$c = \frac{2b + ch(d/L_p) + 1}{b + 1}, \quad (2)$$

где  $b = \mu_n/\mu_p$  – отношение подвижностей электронов и дырок. Значения показателя  $c$  в экспоненте и предэкспоненциального множителя –  $J_0$ , вычисленные из данных ВАХ для различных температур, приведены в таблице.

Таблица

Результаты расчета параметров ВАХ рассматриваемой структуры

$T$ , К	$c$	$J_0$ , мкА/см <sup>2</sup>	$L_p$ , мкм	$N_d$ , $10^{10} \times \text{см}^{-3}$
293	2,78	41	9,57	3,05
313	2,77	63	9,59	3,51
333	2,66	110	10,21	6,21
353	2,62	176	10,43	7,71
373	2,85	286	9,15	10,51
393	2,93	471	8,96	13,14
413	3,23	720	8,14	17,85
433	3,13	1373	8,34	24,33
453	3,18	2043	8,27	23,92

Примечание.  $L_p$  – диффузионная длина неосновных носителей твердого раствора  $n\text{-Si}_{1-x}\text{Sn}_x$ ;  $N_d$  – концентрация некомпенсированных доноров компенсированного переходного слоя твердого раствора  $n\text{-Si}_{1-x}\text{Sn}_x$ .

Подвижность основных носителей – электронов, определенная методом Холла, составляла при комнатной температуре  $\mu_n \approx 538 \text{ см}^2/(\text{В с})$ . Предполагая, что, как обычно, в материалах группы  $A^{IV}$  подвижность дырок не на много меньше, чем подвижности электронов, для оценки принималось  $b = 3$  [7]. Толщина высокоомной базы  $n\text{-Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  составляла  $d \approx 20 \text{ мкм}$ . Зная значения  $c$ , из (2) можем найти отношение  $d/L_p = 2,1$ , которое, действительно, оказывается  $> 1$ . Затем можно найти  $L_p$ , которая принимает значение при 293 К  $L_p \approx 9,57 \text{ мкм}$ . Это позволяет определить произведение подвижности на время жизни неосновных носителей –  $\mu_p \tau_p = qL_p^2/kT$ , значения которого для различных температур приведены в рис. 2. Как видно из рис. 2 в диапазоне температур от 293 до 353 К произведение  $\mu_p \tau_p$  слабо зависит от температуры, затем до 453 К убывает. Анализ этих данных показывает, что в диапазоне температур от 373 до 453 К зависимость  $\mu_p \tau_p = f(1/T^{3/2})$  носит линейный характер.

Нетрудно показать, что в стационарном режиме, когда  $\Delta n \approx \Delta p$  и при малых уровнях инжекции –  $\Delta n \ll n_0, p_0$ , время жизни неравновесных носителей описывается известным выражением [8]:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_n = \tau_p = \\ &= \frac{1}{C_p N_R} \times \frac{n_0 + n_1}{n_0 + p_0} + \frac{1}{C_n N_R} \times \frac{p_0 + p_1}{n_0 + p_0}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $N_R$  – концентрация рекомбинационных центров;  $C_n, C_p$  – сечения захвата электронов и дырок, соответственно;  $n_0, p_0$  – равновесные концентрации свободных электронов и дырок, соответственно;  $n_1, p_1$  – статистические факторы Шокли-Рида. Из уравнения (3) следует, что при малых уровнях инжекции время жизни неравновесных носителей не зависит от температуры. Следовательно, линейный характер зависимости  $\mu_p \tau_p = f(1/T^{3/2})$  свидетельствует о рассеянии носителей на тепловых колебаниях решетки (см. рис. 2).

Известно, что предэкспоненциальный множитель в (1) описывается выражением из [5]:

$$J_0 = \frac{kT \times b \times ch(d/L_p)}{2q(b+1)L_p \rho \times tg(d/2L_p)}, \quad (4)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $q$  – элементарный заряд;  $\rho$  – удельное сопротивление высокоомной базы.

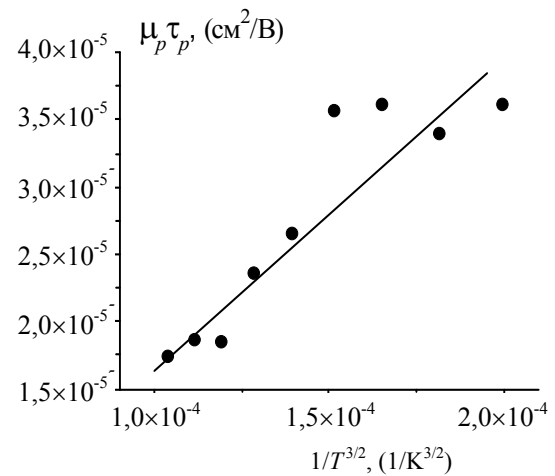


Рис. 2. Зависимость произведения  $\mu_p \tau_p$  от  $1/T^{3/2}$  для твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ).

С помощью выражения (4) была построена зависимость  $\ln(1/\rho) = f(1/T)$ , которая представлена на рис. 3. Из рис. 3 видно, что в исследованном диапазоне температур удельная проводимость ( $1/\rho$ ) высокоомного слоя  $n\text{-Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  имеет активационный характер с двумя экспоненциальными участками.

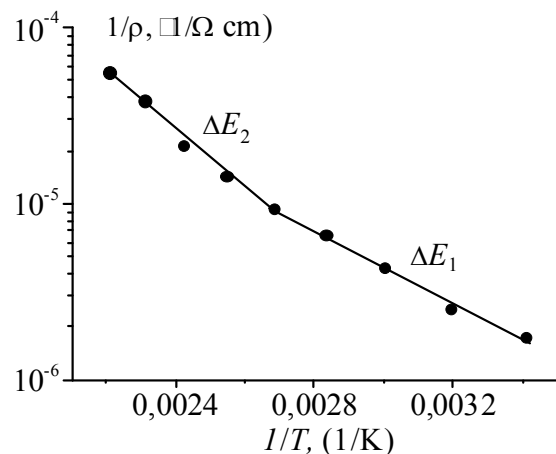


Рис. 3. Зависимость удельной проводимости –  $1/\rho$  от обратной температуры –  $1/T$  высокоомного слоя твердого раствора  $n\text{-Si}_{1-x}\text{Sn}_x$ .

На основе данных рис. 3, по методике, описанной в [9], были оценены энергии активации удельной проводимости, которые имели значения, равные  $\Delta E_1 = 0,21 \text{ эВ}$  и  $\Delta E_2 = 0,35 \text{ эВ}$ . Как известно, Sn и A-центры в Si образуют

уровни с  $E_{Sn} = 0,25$  эВ и  $E_A = 0,35$  эВ, соответственно [10]. По-видимому, энергетический уровень межузельных атомов Sn расположен на 0,21 эВ ниже потолка зоны проводимости твердого раствора  $Si_{1-x}Sn_x$ . Разница  $E_{Sn} - \Delta E_1 = 0,04$  эВ возможно обусловлена отличием энергии взаимодействия межузельных атомов Sn с кристаллическими решетками Si и твердого раствора  $Si_{1-x}Sn_x$ . Однако,  $A$ -центры как в Si, так и в  $Si_{1-x}Sn_x$  имеют одинаковый энергетический уровень. Это, возможно, связано с тем, что энергия связи вакансии с кислородом сильнее и влияние энергии упругих искажений кристаллических решеток Si и твердого раствора, возникающее за счет присутствием  $A$ -центров не существенно.

Следовательно, с учетом рассеяния носителей на тепловых колебаниях решетки и на основе данных таблицы была построена зависимость  $n$  от обратной температуры  $1/T$  (рис. 4).

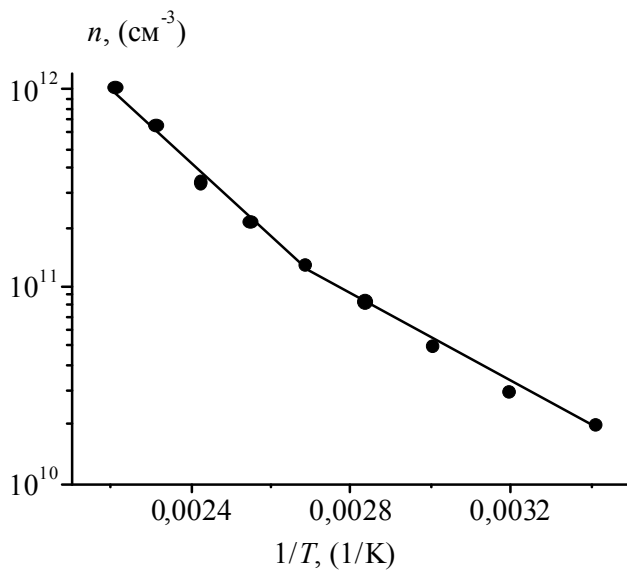


Рис. 4. Зависимость концентрации основных носителей –  $n$  от обратной температуры –  $1/T$  высокоомного слоя твердого раствора  $n-Si_{1-x}Sn_x$ .

Из рис. 4 видно, что концентрация свободных носителей в высокоомной базе при 293 К имеет значение  $\sim 2 \times 10^{10}$  см<sup>-3</sup> и растет с ростом температуры, достигая  $\sim 1 \times 10^{12}$  см<sup>-3</sup> при 453 К. Отсюда следует, что промежуточный слой  $n-Si_{1-x}Sn_x$ , формирующийся между  $p-Si$  и  $n^+-Si_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ) слоями, действительно является сильно компенсированным материалом, и он в основном определяет электронные процессы в структуре в целом, в том числе и механизм переноса тока.

За экспоненциальной зависимостью ВАХ в исследованном диапазоне температур появляется протяженный сублинейный участок, где ток слабо меняется с ростом приложенного напряжения. Этот участок ВАХ подробно рассмотрен в [11] в рамках теории эффекта инжекционного обеднения.

А затем, за сублинейным участком на всех ВАХ (рис. 1) следуют квадратичные участки (от 1,8 В до 2,6 В) со степенными зависимостями тока от напряжения типа  $I \sim V^2$ . Квадратичный участок ВАХ может быть описан дрейфовым механизмом переноса носителей тока в режиме двойной инжекции и омической релаксации объемного заряда [12]:

$$J = \frac{9}{8} \times \frac{q\mu_p \tau_p \mu_n N_d}{d^3} \times V^2, \quad (5)$$

где  $N_d$  – концентрация нескомпенсированных доноров. Используя выражение (5), из квадратичного участка ВАХ была оценена концентрация нескомпенсированных донорных центров, значения которых представлены в таблице. Из табличных данных видно, что с ростом температуры концентрация нескомпенсированных доноров в высокоомном слое  $n-Si_{1-x}Sn_x$  растет от  $N_d \approx 3 \times 10^{10}$  см<sup>-3</sup> (при комнатной температуре) до  $\sim 2,4 \times 10^{11}$  см<sup>-3</sup> (при 453 К).

На основе этих результатов и рис. 3 можно предположить, что энергетический уровень  $\Delta E_1 = 0,21$  эВ обусловлен однократно положительно ионизованными межузельными атомами  $Sn^+$ , концентрация которых составляет  $\sim 3 \times 10^{10}$  см<sup>-3</sup>, а также уровень  $\Delta E_2 = 0,35$  эВ соответствует уровню  $A$ -центров, концентрация которых при температурах больших 400 К составляет  $2,4 \times 10^{11}$  см<sup>-3</sup>.

## Заключение

Полагаясь на полученные результаты можно установить, что перенос тока в  $p-Si-nSi_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ) структуре с толщиной эпитаксиального  $n-Si_{1-x}Sn_x$  слоя  $d = 20$  мкм при малых напряжениях в диапазоне от 0,02 В до 0,08 В описывается диффузионным механизмом, а его зависимость от напряжения при этом подчиняется экспоненциальному закону –  $J = J_0 \times \exp(qV / ckT)$  с параметрами

$J_0 = 41$  мкА/см<sup>2</sup> и  $c = 2,78$ , а при больших напряжениях в диапазоне от 1,8 В до 2,6 В, перенос тока описывается дрейфовым механизмом в режиме омической релаксации объемного заряда и имеет место квадратичная зависимость вида  $J = \frac{9}{8} \times \frac{q\mu_p\tau_p\mu_n N_d}{d^3} \times V^2$  с параметрами  $\mu_p\tau_p = 3,62 \times 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/В,  $\mu_n = 538$  см<sup>2</sup>/(В с) и  $N_d = 3 \times 10^{10}$  см<sup>-3</sup> при комнатной температуре.

А так же, проведенные исследования температурной зависимости ВАХ дали возможность установить, что при выращивании твердого раствора  $n\text{-Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ) на  $p\text{-Si}$ -подложке формируется  $p\text{-}n\text{-}n^+$ -структура с высокоомным компенсированным  $n$ -слоем, одновременно с этим основным механизмом рассеяния является рассеяние на тепловых колебаниях решетки. Интерпретация результатов проведенных исследований, дали также возможность определить два уровня активации удельной проводимости исследуемого твердого раствора, одним из которых является уровень А-центров (с концентрацией  $N_A \approx 2,4 \times 10^{11}$  см<sup>-3</sup>), а второй, по-видимому, обусловлен ионизованными межузельными атомами олова ( $N_{Sn^+} \approx 3 \times 10^{10}$  см<sup>-3</sup>).

Изученные нами эпитаксиальные пленки твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ), полученные на кремниевых подложках, могут быть использованы в качестве активного элемента при разработке инжекционных диодов. А структуры, полученные на их основе и описание механизмов протекающих в них электрофизических процессов, как в теоретическом, так и в практическом аспекте проявляет

интерес для полупроводниковой микроэлектроники.

*Автор признателен своему научному консультанту академику АН РУз С. З. Зайнабидинову, а так же профессорам А. Ю. Лейдерману, А. С. Саидову, Ш. Н. Усмонову – за плодотворные дискуссии при подготовке данной статьи.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Саидов Б., Саидов А. С. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 22. С. 88.
2. Саидов А. С., Усмонов Ш. Н., Каланов М., Мадаминов Х. М. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 17. С. 104.
3. Зайнабидинов С. З., Мадаминов Х. М. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2020. Т. 91. Вып. 4. С. 58.
4. Leiderman A. Y., Stelmakh V. G., Sadykov M. // Applied Solar Energy. 2008. Vol. 44. P. 276.
5. Usmonov S. N., Mirsagatov S. A., Leyderman A. Y. // Semiconductors. 2010. Vol. 44. P. 313.
6. Адирович Э. И., Карагеоргий-Алкалаев П. М., Лейдерман А. Ю. Токи двойной инжекции в полупроводниках. – М.: Сов. радио, 1978.
7. Шалимова К. В. Физика полупроводников. – М.: Энергияатомиздат, 1985.
8. Shockley W., Read W. // Phys. Rev. 1952. Vol. 87. № 5. P. 835.
9. Яскин А. С., Махро И. Г., Агеева Е. Т., Левит Д. И. Физика твердого тела, атома и атомного ядра: Лабораторный практикум. – Братск: БрГУ, 2008.
10. Sheng S. L. Semiconductor Physical Electronics. Second Edition. – Springer, 2006.
11. Мадаминов Х. М. // Прикладная физика. 2020. № 5. С. 80.
12. Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. – М.: Мир, 1973.

PACS: 73.40.Lq, 77.55.df, 61.82.Fk

### Temperature dependences of the electrophysical properties of the solid solution $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$ ( $0 \leq x \leq 0.04$ )

*Kh. M. Madaminov*

Andijan State University  
129 University st., Andijan, 170100, Uzbekistan

Received November 30, 2020

*The current-voltage characteristics of  $p\text{-Si-n-Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0.04$ ) structures have been studied in the temperature range from 293 to 453 K. It was determined that the initial sections of*

*the direct branches of the I–V characteristic at all temperatures are described by the exponential dependence of the current on the voltage, and then a quadratic section follows, which is described by the drift mechanism of carrier transfer in the regime of ohmic relaxation of the space charge. We determined the activation energies of two deep levels with values of 0.21 eV and 0.35 eV, which are assigned to interstitial Sn atoms and A-centers, respectively. The prospect of using solid solutions  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0.04$ ), obtained on silicon substrates, as an active material in the manufacture of injection diodes is substantiated.*

*Keywords:* the method of liquid phase epitaxial, the solid solution, current-voltage characteristics, transition layer, the activation energy.

## REFERENCES

1. B. Sapayev and A. S. Saidov, *Technical Physics Letters* **29**, 88 (2003).
2. A. S. Saidov, Sh. N. Usmonov, M. U. Kalanov, and Kh. M. Madaminov, *Technical Physics Letters* **36**, 827 (2010).
3. S. Z. Zainabidinov and Kh. M. Madaminov, *Herald of Bauman MSTU, Series Natural Sciences* **91**, 58 (2020).
4. A. Y. Leiderman, V. G. Stelmakh, and M. Sadykov, *Applied Solar Energy* **44**, 276 (2008).
5. S. N. Usmonov, S. A. Mirsagatov, and A. Y. Leyderman, *Semiconductors* **44**, 313 (2010).
6. E. I. Adirovich, P. M. Karageorgi-Alkalayev, and A. Yu. Leiderman, *Dual injection currents in semiconductors*. (Sovetskoe radio, Moscow, 1978) [in Russian].
7. K. V. Shalimova, *Semiconductor physics*. (Energiyaatomizdat, Moscow, 1985) [in Russian].
8. W. Shockley and W. Read, *Phys. Rev.* **87**, 835 (1952).
9. A. S. Yaskin, I. G. Mahro, E. T. Ageeva, and D. I. Levit, *Solid State Physics, Atom and Atomic Nucleus: Laboratory Workshop*. (BrSU, Bratsk, 2008) [in Russian].
10. S. L. Sheng, *Semiconductor Physical Electronics*. Second Edition. (Springer, 2006).
11. Kh. M. Madaminov, *Applied Physics*, No. 5, 80 (2020) [in Russian].
12. M. Lampert and P. Mark, *Injection currents in solid state*. (Mir, Moscow, 1973) [in Russian].