

## Исследование особенностей токов двойной инжекции в $pSi-nSi_{1-x}Sn_x$ -структурах

Х. М. Мадаминов

*Исследованиями механизмов переноса тока в  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x$  структур в интервале температур 293–393 К было установлено, что в  $Si_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ) твердом растворе существенную роль в формировании электрических свойств играет рассеяние носителей заряда не только на сложных комплексах, но и на нанобразованиях. И этим доказано, что, эпитаксиальные пленки твердых растворов  $Si_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ), полученные на кремниевых подложках, могут быть перспективными при изготовлении диодов, работающих в режиме двойной инжекции.*

*Ключевые слова:* твердый раствор, жидкофазная эпитаксия, вольт-амперная характеристика, сублинейный участок, эффект инжекционного обеднения.

**Ссылка:** Мадаминов Х. М. // Прикладная физика. 2020. № 5. С. 80.

**Reference:** Kh. M. Madaminov, Applied Physics, No. 5, 80 (2020).

### Введение

Получение новых полупроводниковых материалов и расширение функциональных возможностей существующих является актуальной проблемой в области полупроводникового материаловедения.

В связи с этим поиск технологических возможностей получения новых полупроводниковых твердых растворов с управляемыми составами, кристаллическим совершенством, создание на их основе новых полупроводниковых гетероструктур с заданными параметрами и их исследования является важной задачей этой проблемы.

К началу наших исследований практически отсутствовали работы, посвященные исследованию влияния эффекта инжекционного обеднения на электрофизические свойства твердых растворов замещения  $Si_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ).

Так называемый эффект инжекционного обеднения был впервые теоретически предсказан для  $p-i-n$ -структур, работающих в режиме двойной инжекции [1]. Это эффект, что следует уже из его названия, в котором сочетаются два несовместимых понятия: инжекция (впрыскивание свободных носителей, обогащение ими базы структуры) и обеднение (убывание, удаление свободных носителей) [2]. Последние годы этот эффект наблюдался на многослойных структурах, изготовленных из различных твердых растворов, полученных методом жидкостной эпитаксии [3–6], а также на структурах с гетеропереходом CdS-CdTe [7].

Целью настоящей работы является, выяснить роль эффекта инжекционного обеднения в формировании электрических свойств  $pSi-n(Si)_{1-x}(Sn)_x$  гетероструктур, полученных на основе эпитаксиальной пленки твердого раствора замещения  $Si_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ), выращенных из оловянного раствора-расплава методом жидкофазной эпитаксии.

### Теоретическая часть

Как известно, в биполярных полупроводниках уравнения для переноса электронов и дырок, описывает так называемый амбипо-

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

Статья поступила в редакцию 13 августа 2020 г.

лярный перенос свободных носителей в базе  $p-n-n^+$ -структуры в виде:

$$D_a \frac{d^2 p}{dx^2} - v_a \frac{dp}{dx} - U = 0. \quad (1)$$

Здесь  $D_a$  – амбиполярный коэффициент диффузии, который равен

$$D_a = D_p \frac{2b(\gamma+1)}{b(\gamma+b+1)}, \quad (2)$$

$\gamma = N_t / p_{lt}$  – фактор прилипания;  $b = \mu_n / \mu_p$  – отношение подвижностей электронов и дырок;  $v_a$  – это амбиполярная скорость дрейфа, которая определяется выражением:

$$v_a = \frac{\mu_a}{(b\gamma+b+1)p} \left\{ N_t - \left[ \frac{dE}{dx} - p \frac{\partial}{\partial p} \left( \frac{\partial E}{\partial x} \right) \right] + N_t^+ \left( 1 - p \frac{\partial}{\partial p} \right) \right\} E_J, \quad (3)$$

где  $\mu_a = \frac{\mu_n \mu_p (n-p)}{\mu_n n - \mu_p p}$  – амбиполярная подвижность;

$E_J = \frac{J}{q\mu_p (b\gamma+b+1)p}$  – электрическое поле в базе;

$N_t$  – концентрация центров прилипания;  $N_t^+$  – количество центров прилипания, захвативших дырку;  $U = p/\tau$  – скорость рекомбинации неравновесных носителей, если она подчиняется статистике Шокли-Рида;  $\tau$  – время жизни неосновных носителей (в этом случае – дырок).

Отметим, что первое слагаемое в (3), пропорциональное  $N_t$ , описывает омическую релаксацию остаточного объемного заряда, второе слагаемое (пропорциональное  $dE/dx$ ) диэлектрическую релаксацию объемного заряда и, наконец, третье слагаемое связано с токовой модуляцией заряда глубоких центров прилипания (в данном конкретном случае – центров прилипания для дырок). Если мы ограничимся случаем, когда этот член является определяющим и в качестве такой примеси выступают центры прилипания для дырок, то выражение для амбиполярной скорости дрейфа примет вид:

$$v_a = \frac{I}{q} \frac{\mu_n \mu_p N_t}{(\mu_n + \mu_p)^2 (p_{lt}^*)^2}. \quad (4)$$

Здесь  $p_{lt}^* = p_{lt} + \frac{\mu_n}{\mu_n + \mu_p} N_t$ , где  $p_{lt} =$

$= N_v \exp(-\Delta E_t / kT)$  – статистический фактор Шокли-Рида для уровня центров прилипания,  $\Delta E_t = E_v - E_t$  – энергия активации уровня центров прилипания  $E_t$ . В условиях преобладающего влияния модуляции глубоких центров прилипания фактор прилипания которых  $\gamma = \frac{N_t}{p_{lt}} \gg 1$  и при  $p < p_{lt}^*$  выражения для ам-

биполярной скорости дрейфа и амбиполярного коэффициента диффузии упрощаются:  $v_a \approx aJD_a$  и  $D_a \approx D_p$ . В этом случае уравнение (1) принимает достаточно простой вид:

$$\frac{d^2 p}{dx^2} - aJ \frac{dp}{dx} - \frac{p}{L_p^2} = 0, \quad (5)$$

где  $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$  – диффузионная длина неосновных носителей (дырок);  $J$  – плотность тока,

$$a = \frac{1}{2qkT\mu_n N_t} \quad (6)$$

– параметр, зависящий только от подвижности основных носителей – электронов ( $\mu_n$ ) и концентрации глубоких примесей –  $N_t$ . При этом следует иметь в виду, что обычно в  $p-n-n^+$ -структуре концентрация свободных носителей у  $p-n$ -перехода больше, чем у  $n-n^+$ -перехода и поэтому градиент концентрации  $\frac{dp}{dx} < 0$ , т. е. концентрация впрыснутых носителей убывает от  $p-n$  к  $n-n^+$ -переходу, а амбиполярные диффузия и дрейф направлены в одну сторону.

Когда концентрация свободных носителей у  $n-n^+$ -перехода будет больше, чем у  $p-n$ -перехода, тогда  $\frac{dp}{dx} > 0$ , т. е. градиент концентрации свободных носителей будет расти от  $p-n$  к  $n-n^+$ -переходу и амбиполярные диффузии и дрейф будут направлены навстречу друг другу. Именно в этом случае, когда при приложении к структуре напряжения, создающего инжекционный ток, концентрации носителей на границах базы будут расти с ростом тока, в то время как в средней части концентрация будет убывать (рис. 1).

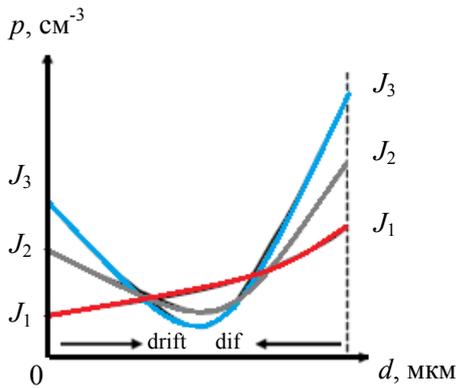


Рис. 1. Качественная оценка по формуле (7) изменения концентрации неравновесных носителей заряда по толщине базовой области  $p-n-n^+$ -структуры при:  $J_1 < J_2 < J_3$ .

При достаточно больших токах, когда  $Jad > 2$  приближенное решение уравнения (5) имеет вид [8]

$$p \sim \exp(-aJd), \quad (7)$$

т. е. с ростом тока концентрация убывает. Соответствующая вольт-амперная характеристика (ВАХ) диодных структур будут иметь вид:

$$V \approx V_0 \exp(aJd), \quad (8)$$

где  $V_0 = \frac{kT}{q} 2b \left[ \frac{qV_p^* (1+\gamma) N_t^2}{(b\gamma + b + 1) n_n J} \right]^{1/2}$ ;  $V_p^*$  – эффек-

тивная скорость утечки дырок через  $i-n$ -переход [8].

### Подготовка образцов и экспериментальные результаты

Для проведения исследований были изготовлены структуры  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ) путем выращивания твердого раствора  $Si_{1-x}Sn_x$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho \approx 0,8 \Omega \times \text{см}$  на кремниевых подложках  $p$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho \approx 1,0 \Omega \times \text{см}$ . Омические токосъемные контакты, сплошные с тыльной стороны и четырехугольные с площадью  $9 \text{ мм}^2$  со стороны эпитаксиального слоя, создавались путем вакуумного напыления серебра, при давлении  $\sim 10^{-5}$  Торр.

Для определения механизма переноса тока в данных  $p-Si-n-Si_{1-x}Sn_x$  структурах были исследованы вольтамперные характеристики при различных температурах (рис. 2).

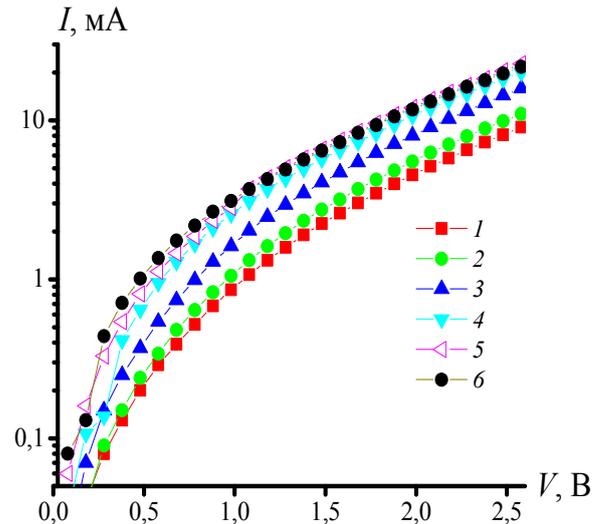


Рис. 2. Прямые ветви вольтамперных характеристик  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x$  гетероструктур в полулогарифмическом масштабе при различных температурах (1 – 293 К; 2 – 313 К; 3 – 333 К; 4 – 353 К; 5 – 373 К; 6 – 393 К).

Для этого образцы механически плотно закреплялись на металлическом криостате, который откачивался до остаточного давления  $\sim 10^{-3}$  Торр. Для приложения напряжения к образцу использовали блок питания Б5-45А и оно измерялось вольтметром В7-9. Для фиксирования тока, проходящего через структуру, применен комбинированный прибор Ц-300.

Как видно из рис. 2, ВАХ в прямом направлении при температурах 293–393 К состоит из двух характерных участков. Первый участок ВАХ до 0,5 В хорошо описывается экспоненциальной зависимостью [9]:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{ckT}\right), \quad (11)$$

где  $q$  – элементарный заряд;  $V$  – электрическое напряжение, приложенное к структуре;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

За экспоненциальной зависимостью ВАХ в исследованном диапазоне температур появляется протяженный сублинейный участок, где ток слабо меняется с ростом приложенного напряжения (рис. 3). Этот участок ВАХ может быть хорошо описан в рамках изложенной выше теории эффекта инжекционного обеднения. Используя выражение (8), можно определить значение параметра « $a$ » непосредственно из сублинейного участка ВАХ:

$$a = \frac{S \ln(V_1/V_2)}{(I_1 - I_2)d}, \quad (14)$$

где  $I_1, I_2$  – значения тока при напряжениях  $V_1, V_2$  в соседних точках сублинейного участка ВАХ. Поскольку коэффициент диффузии носителей заряда зависит только от температуры и подвижности основных носителей, определив параметр «а» по соотношению с (6), можно найти произведение подвижности основных носителей и концентрации глубоких примесей –  $\mu_n N_t$  (см. таблицу). А также значение величины «а» позволяет из формулы (6) определить концентрацию глубоких примесей ответственных за появление сублинейного участка (8), при комнатной температуре, значение которого составляло  $N_t = 5,3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

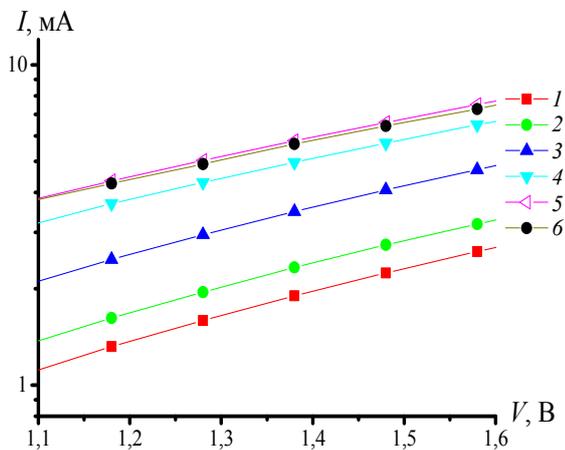


Рис. 3. Сублинейные участки вольтамперных характеристик  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x$  гетероструктур при различных температурах (1 – 293 К; 2 – 313 К; 3 – 333 К; 4 – 353 К; 5 – 373 К; 6 – 393 К).

Таблица

Значение параметра «а» и произведение подвижности основных носителей и концентрации глубоких примесей –  $\mu_n \times N_t$ , в зависимости от температуры

T, К	a, $\times 10^3 \text{ см/А}$	$\mu_n \times N_t, \times 10^{16} \times (\text{В см с})^{-1}$
293	6,58	1,84
313	5,49	2,11
333	3,79	2,87
353	3,22	3,2
373	2,82	3,02
393	3,45	3,1

Из таблицы видно, что произведение  $\mu_n \times N_t$  основных носителей в твердом растворе  $nSi_{1-x}Sn_x$  увеличивается с ростом температуры. Это, по-видимому, позволяет заключить, что в

данном твердом растворе большую роль в зависимости подвижности от температуры играет рассеяние носителей на глубоких примесях.

Поскольку в работе [10] были исследованы дифрактограммы эпитаксиального слоя твердого раствора  $Si_{1-x}Sn_x$ , выращенного из оловянного раствора-расплава, и его кремниевой подложки. Было установлено, что парные атомы Sn могут не только частично замещать молекулы Si, но также сегрегируются в дефектоспособных местах – между блоками, на межфазовых границах, а также в этих местах они образуют нановключений олова. Эти факты позволяют предположить, что в твердом растворе  $Si_{1-x}Sn_x$  примеси олова не всегда будут вести себя как нейтральный атом замещения. Возможно, находясь на межфазовых границах, оно будет вести себя как обычная глубокая примесь и будет ответственно за наблюдаемую сублинейную ВАХ.

Здесь уместно добавить, что удельное сопротивление эпитаксиального слоя, определенное по методу Холла составляет 0,8 (Ом см), однако все полученные характеристики свидетельствуют о том, что между эпитаксиальной пленкой и подложкой образуется слой с другими характеристиками, иначе такие ВАХ не наблюдается, и, следовательно, не может наблюдаться экспоненциальная зависимость (8). Это позволяет нам что, исследованную структуру можно рассматривать как  $p-Si-n-Si_{1-x}Sn_x-n^+-Si_{1-x}Sn_x(0 \leq x \leq 0,04)$ -переход с высокоомным  $n-Si_{1-x}Sn_x$  слоем (рис. 4).

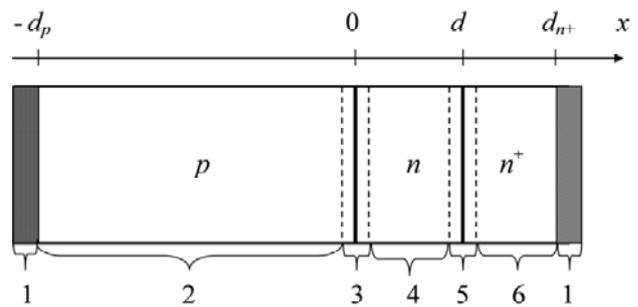


Рис. 4. Схема  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x-n^+Si_{1-x}Sn_x(0 \leq x \leq 0,04)$ -структуры. 1 – омические токосъемные контакты ( $R_{0, \omega}$ ); 2 – слой  $pSi$  (подложка); 3 – область объемного заряда инжектирующего перехода  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x(0 \leq x \leq 0,04)$ ; 4 – высокоомный эпитаксиальный слой твердого раствора  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x(0 \leq x \leq 0,04)$ ; 5 – область объемного заряда инжектирующего перехода  $nSi_{1-x}Sn_x-n^+Si_{1-x}Sn_x(0 \leq x \leq 0,04)$ ; 6 – низкоомный эпитаксиальный слой твердого раствора  $n^+Si_{1-x}Sn_x(0 \leq x \leq 0,04)$ .

## Заклучение

Таким образом, анализ полученных результатов позволяют заключить, что в данном  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ) твердом растворе существенную роль в механизме подвижности играет рассеяние носителей заряда не только на сложных комплексах, но и на нанообразованиях.

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 как активный элемент для разработки инжекционных диодов. Структуры, полученные на их основе и описание механизмов протекающих в них физических процессов, представляют, как теоретический, так и практический интерес для полупроводникового материаловедения.

В итоге можно предположить, что исследуемые в работе эпитаксиальные пленки твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ) могут быть перспективными материалами для изготовления диодов, работающих в режиме двойной инжекции.

*Автор признателен профессору А. С. Саидову – за предоставление исследуемых образцов, академику АН РУз С. З. Зайнабидинову, профессору А. Ю. Лейдерману и д.ф.-м.н. Ш. Н. Усмонову – за плодотворные дискуссии и оказанную помощь при подготовке статьи.*

*Работа выполнена в рамках проекта Государственной научно-технической программы (Грант ОТ-Ф2-68) Республики Узбекистан.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Leiderman A. Yu., Karageorgy-Alkalaev P. M. // Solid State Communications. 1978. Vol. 25. № 10. P. 781.
2. Usmonov Sh. N., Saidov A. S., Leiderman A. Yu. // Physics of the Solid State. 2014. Vol. 56. № 12. P. 2401.
3. Зайнабидинов С. З., Лейдерман А. Ю., Каланов М. У., Усмонов Ш. Н., Бобоев А. Й. // Узбекский физический журнал. 2015. Т. 17. № 5. С. 301.
4. Саидов А. С., Лейдерман А. Ю., Усмонов Ш. Н., Холиков К. Т. // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43. № 4. С. 436.
5. Саидов А. С., Лейдерман А. Ю., Усмонов Ш. Н., Амонов К. А. // Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52. № 9. С. 1066.
6. Saidov A. S., Saidov M. S., Usmonov Sh. N., Asatova U. P. // Semiconductors. 2010. Vol. 44. № 7. P. 938.
7. Usmonov Sh. N., Mirsagatov Sh. A., and Leyderman A. Yu. // Semiconductors. 2010. Vol. 44. № 3. P. 313.
8. Адирович Э. И., Карагеоргий-Алкалаев П. М., Лейдерман А. Ю. Токи двойной инжекции в полупроводниках. – М.: Сов. Радио, 1978.
9. Зайнабидинов С. З., Мадаминов Х. М. // Петербургский журнал электроники. 2017. № 4. С. 8.
10. Saidov A. S., Usmonov Sh. N., Kalanov M., Madaminov X. M. // Technical Physics Letters. 2010. Vol. 36. № 9. P. 827.

PACS: 81.15.Lm, 73.40.-c, 84.37.+q

## Investigation of the features of double injection currents in $p\text{Si}-n\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$ structures

*Kh. M. Madaminov*

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

*Received August 13, 2020*

***Studies of the mechanisms of current transfer in  $p\text{Si}-n(\text{Si})_{1-x}(\text{Sn})_x$  ( $0 \leq x \leq 0.04$ ) structures in the temperature range 293–393 K showed that the scattering of charge carriers plays an important role in the formation of electrical properties not only on complex complexes, but also on nano formations. And this proves that the epitaxial films of  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0.04$ ) obtained***

*on silicon substrates can be promising in the manufacture of diodes operating in the double injection mode.*

*Keywords:* the solid solution, the method of liquid phase epitaxial, current-voltage characteristics, sub linear plots, the effect of injection depletion.

## REFERENCES

1. A.Yu. Leiderman and P. M. Karageorgy-Alkalaev, *Solid State Communications* **25**, 781 (1978).
2. Sh. N. Usmonov, A. S. Saidov, and A. Yu. Leiderman, *Physics of the Solid State* **56**, 2401 (2014).
3. S. Z. Zainabidinov, A. Yu. Leiderman, M. U. Kalanov, Sh. N. Usmonov, and A. Y. Boboev, *Uzbekskii fizicheskii zhurnal* **17**, 301 (2015).
4. A. S. Saidov, A. Yu. Leyderman, Sh. N. Usmonov, and K. T. Kholikov, *Semiconductors* **43**, 436 (2009).
5. A. S. Saidov, A. Yu. Leyderman, Sh. N. Usmonov, K. A. Amonov, *Semiconductors* **52**, 1066 (2018).
6. A. S. Saidov, M. S. Saidov, Sh. N. Usmonov, and U. P. Asatova, *Semiconductors* **44**, 938 (2010).
7. Sh. N. Usmonov, Sh. A. Mirsagatov, and A. Yu. Leyderman, *Semiconductors* **44**, 313 (2010).
8. E. I. Adirovich, P. M. Karageorgi-Alkalayev, and A. Yu. Leiderman, *Dual injection currents in semiconductors* (Moscow, Sovetskoe radio, 1978) [in Russian].
9. S. Z. Zainabidinov and Kh. M. Madaminov, *Peterburgskii zhurnal elektroniki*, No. 4, 8 (2017).
10. A. S. Saidov, Sh. N. Usmonov, M. U. Kalanov, and Kh. M. Madaminov, *Technical Physics Letters* **36**, 827 (2010).