

## ВЛИЯНИЕ ИНЖЕКЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ $pSi-nSi_{1-x}Sn_x$

Х.М. Мадаминов

khurmad@mail.ru

Андижанский государственный университет, Андижан, Республика Узбекистан

### Аннотация

Исследована вольт-амперная характеристика структур  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x$  в интервале значений температуры 293...393 К в целях выяснения роли инжекционных эффектов при формировании электрических свойств гетероструктур  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x$ , полученных на основе твердого раствора  $Si_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ). Установлено, что вольт-амперная характеристика таких гетероструктур состоит из двух характерных участков. Определено, что первый участок вольт-амперной характеристики хорошо описывается экспоненциальной зависимостью. За экспоненциальной зависимостью на всех вольт-амперных характеристиках наблюдаются независимые от температуры сублинейные участки. Показано, что указанные участки хорошо описываются в рамках теории эффекта инжекционного обеднения. По сублинейному участку вольт-амперной характеристики определено значение параметра  $a$ , с использованием которого можно рассчитать концентрацию глубоких примесей, ответственных за появление сублинейного участка. Доказано, что исследованную структуру можно рассматривать как переход  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x-n^+Si_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ) с высокоомным  $nSi_{1-x}Sn_x$ -слоем. Полученные результаты позволили сделать следующие выводы: в твердом растворе  $Si_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ) существенную роль при формировании электрофизических свойств играет рассеяние носителей заряда не только на сложных комплексах, но и на нановключениях; установлена эффективность использования эпитаксиальных пленок твердых растворов  $Si_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ), полученных на кремниевых подложках, как перспективных материалов при разработке диодов, функционирующих в режиме двойной инжекции

### Ключевые слова

Твердый раствор, жидкофазная эпитаксия, диодная структура, вольт-амперная характеристика, сублинейный участок, эффект инжекционного обеднения

Поступила 16.09.2020

Принята 12.11.2020

© Автор(ы), 2021

*Работа выполнена в рамках проекта Государственной научно-технической программы Республики Узбекистан (проект № ОТ-Ф2-68)*

**Введение.** Синтез новых полупроводниковых материалов и изучение физических свойств существующих является актуальной проблемой в микро- и наноэлектронике. При решении указанной проблемы первичная задача — изучение новых кристаллически совершенных полупроводниковых твердых растворов с управляемыми составами и разработка на их основе новых полупроводниковых гетероструктур с улучшенными параметрами. В связи с этим определение оптимальных технологических условий синтеза гетероструктур может несколько упростить решение такой задачи.

При рассмотрении электрических свойств твердых растворов в качестве показателя последних используется вольт-амперная характеристика (ВАХ)  $p$ - $n$ -перехода, полученная на основе этих соединений. Это связано с тем, что форма кривых ВАХ дает возможность исследователям говорить о тех или иных свойствах диодного перехода. При обычных методах получения  $p$ - $n$ -переходов появляются различные поверхностные состояния, которые резко ухудшают электрические свойства изготовленных на их основе приборов. Как правило, для уменьшения концентрации поверхностных дефектов требуется получение  $p$ - $n$ -перехода в едином технологическом цикле. Учитывая факторы, влияющие на качество исследуемых структур, для получения  $p$ - $n$ -структур на основе твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ) использовался метод жидкофазной эпитаксии [1].

*Цель работы* — определить влияние эффекта инжекционного обеднения на формирование электрических свойств гетероструктур  $p\text{Si}-n\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$ , полученных на основе эпитаксиальной пленки твердого раствора замещения  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ), выращенной из оловянного раствора-расплава методом жидкофазной эпитаксии [2].

В настоящее время существует достаточно мало работ, посвященных исследованию влияния эффекта инжекционного обеднения на электрофизические свойства твердых растворов замещения  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ). Для  $p$ - $i$ - $n$ -структур, работающих в режиме двойной инжекции, впервые в [3] теоретически предсказан эффект инжекционного обеднения. В этом эффекте сочетаются два несовместимых между собой процесса: 1) инжекция (увеличение концентрации свободных носителей заряда на базе структуры); 2) обеднение (уменьшение концентрации свободных носителей заряда) [4].

Результаты анализа научных исследований показали, что эффект инжекционного обеднения наблюдался в многослойных гетероструктурах, полученных из твердых растворов, выращенных методом жидкофазной эпитаксии, например,  $n$ -Ge- $p$ -( $\text{Ge}_2$ ) $_{1-x-y}$ (GaAs) $_x$ (ZnSe) $_y$  [5],  $p$ -Si- $n$ -( $\text{Si}_2$ ) $_{1-x}$ (CdS) $_x$  [6],

$p\text{-Si}-n\text{-(Si}_2\text{)}_{1-x}\text{(ZnSe)}_x$  [7] и  $n\text{-GaAs}-p\text{-(InSb)}_{1-x}\text{(Sn}_2\text{)}_x$  [8], а также на структурах с гетеропереходом  $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$  [9].

**Теоретическая часть.** Рассмотрим уравнение, описывающее так называемый амбиполярный перенос свободных носителей в базе  $p\text{-}n\text{-}n^+$ -структуры. Уравнение получено математическим преобразованием отдельных соотношений для диффузии основных и неосновных носителей заряда [10]:

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

Здесь  $D_a$  — амбиполярный коэффициент диффузии,

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

$b = \mu_n / \mu_p$  — безразмерная величина, определяемая как отношение подвижности электронов к подвижности дырок;  $D_p$  — коэффициент диффузии дырок;  $\gamma = N_t / p_{1t}$  — фактор прилипания,  $N_t$  — концентрация центров прилипания,  $p_{1t} = N_v \exp(-\Delta E_t / kT)$  — статистический фактор Шокли — Рида для уровня центров прилипания,  $\Delta E_t = E_v - E_t$  — активационная энергия уровней центров прилипания,  $E_t, E_v$  — энергия, соответствующая уровню валентной зоны;  $v_a$  — амбиполярная скорость дрейфа;  $U = p / \tau$  — скорость рекомбинации неравновесных носителей по статистике Шокли — Рида,  $p$  — концентрация свободных дырок,  $\tau$  — время жизни неосновных носителей заряда (в рассматриваемом случае — дырок) [9].

Амбиполярная скорость дрейфа:

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

где  $\mu_a = \frac{\mu_n \mu_p (n - p)}{\mu_n n - \mu_p p}$  — амбиполярная подвижность,  $n$  — концентрация свободных электронов;  $N_t^+$  — концентрация центров прилипания, захвативших дырку;  $E_J = \frac{J}{q\mu_p(b\gamma + b + 1)p}$  — напряжение электрического поля

в базе.

Нетрудно убедиться, что слагаемое (пропорциональное  $N_t$ ) в формуле (3) описывает омическую релаксацию остаточного объемного заряда

да, а второе слагаемое (пропорциональное  $dE/dx$ ) — диэлектрическую релаксацию объемного заряда. Последнее слагаемое связано с так называемой токовой модуляцией заряда глубоких центров прилипания (т. е. дырок). Рассмотрим случай, когда токовая модуляция заряда глубоких центров прилипания является определяющей. Она реализуется, когда значения первых двух слагаемых в (3) малы по сравнению с третьим. Если глубокая примесь играет роль центров прилипания дырок, то формулу (3) можно преобразовать к виду [10]:

$$v_a = \frac{I}{q} \frac{\mu_n \mu_p N_t}{(\mu_n + \mu_p)^2 (p_{1t}^*)^2}.$$

Здесь

$$p_{1t}^* = p_{1t} + \frac{\mu_n}{\mu_n + \mu_p} N_t.$$

В условиях превалирующего влияния модуляции глубоких центров прилипания, фактор прилипания которых  $\gamma = N_t / p_{1t} \gg 1$ , с учетом  $p < p_{1t}^*$  формулы (2) и (3) принимают вид:  $v_a \approx aJD_a$  и  $D_a \approx D_p$  ( $a$  — параметр;  $J$  — плотность тока). В этом случае уравнение (1) преобразуется к виду

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

где

$$a = \frac{1}{2qkT\mu_n N_t} \tag{4}$$

— параметр, зависящий только от подвижности основных носителей — электронов ( $\mu_n$ ) — и концентрации глубоких примесей  $N_t$  [7–9];  $q$  — заряд;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура;  $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$  — диффузионная длина неосновных носителей (дырок).

В обычной  $p$ - $n$ - $n^+$ -структуре значения концентрации свободных носителей заряда у  $p$ - $n$ -перехода больше, чем у  $n$ - $n^+$ -перехода. Это означает, что градиент концентрации  $dp/dx < 0$ , т. е. концентрация впрыснутых носителей уменьшается от  $p$ - $n$  к  $n$ - $n^+$ -переходу. В этом случае направления амбиполярной диффузии и амбиполярного дрейфа одинаковы [3]. При концентрации свободных носителей у  $n$ - $n^+$ -перехода большей, чем у  $p$ - $n$ -перехода имеет место обратный случай. Когда реализуется условие  $dp/dx > 0$ , т. е. градиент концентрации свободных носителей будет возрасти от  $p$ - $n$

к  $n-n^+$ -переходу, амбиполярные диффузии и дрейф будут направлены противоположно. Если приложить к структуре создающее инжекционный ток напряжение, то на границах базы концентрация носителей будет увеличиваться с ростом тока, а в средней части уменьшаться [5].

При выполнении условия  $Jad > 2$  и достаточно больших токах уравнение (4) имеет приближенное решение (рис. 1) [11]:

$$p \sim \exp(-aJd), \quad (5)$$

т. е. с увеличением тока концентрация убывает,  $d$  — толщина исследуемой структуры. В этом случае ВАХ диодных структур будут иметь вид

$$V \approx V_0 \exp(aJd). \quad (6)$$

Здесь

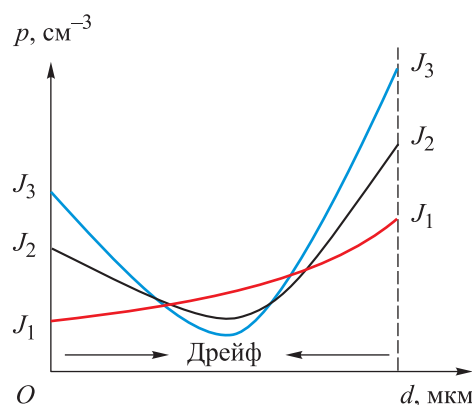
$$V_0 = \frac{2bkTN_t}{q} \sqrt{\frac{qV_p^*(1+\gamma)}{(b\gamma+b+1)n_nJ}},$$

$V_p^*$  — эффективная скорость утечки дырок через  $i-n$ -переход. Впервые решение (5) получено аналитически в [11], подтверждено численными расчетами в [12]. Согласно (6), структуры с эффектом инжекционного обеднения более восприимчивы к таким внешним воздействиям, как тепловое возбуждение, механическое напряжение, магнитные и радиационные поля.

По результатам исследований [5] найдена зависимость протяженности сублинейного участка ВАХ от интенсивности процессов инжекции и аккумуляции в  $p-n-n^+$ -структурах. Если аккумуляция в  $p-n-n^+$ -структурах, определяющая  $p(d)$ , интенсивнее инжекции, определяющей  $p(0)$ , и выполняется условие  $p(d) > p(0)\exp(2d/L)$ , то протяженность градиента по плотности тока  $\Delta J$  сублинейного участка ВАХ находится как

$$\Delta J = \ln\left(\frac{p(d)}{p(0)}\right) \left\{ \frac{2}{ad} \sqrt{1 - \frac{4d^2}{L^2 \ln^2(p(d)/p(0))}} \right\}, \quad (7)$$

а логарифм протяженности градиента напряжения сублинейного участка ВАХ — как



**Рис. 1.** Качественная оценка по (5) изменения концентрации неравновесных носителей заряда по толщине базовой области  $p-n-n^+$ -структуры при  $J_1 < J_2 < J_3$

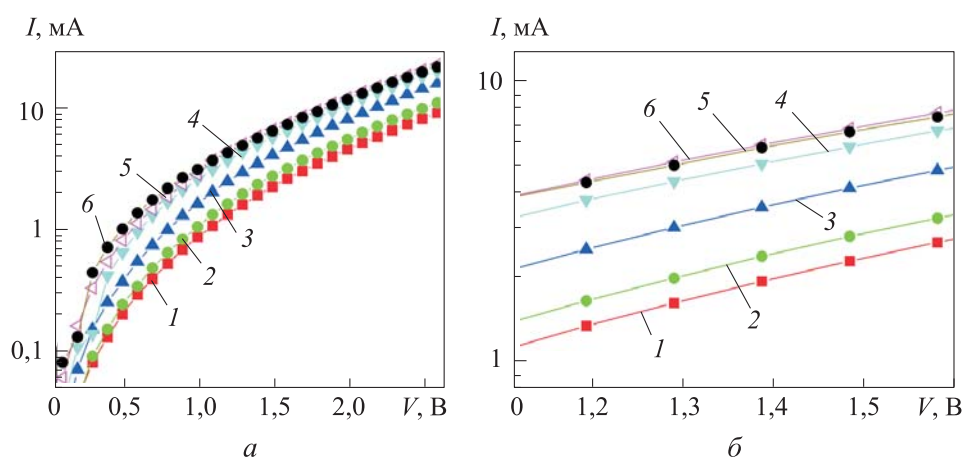
$$\ln(\Delta V) = \left\{ 1 + \sqrt{1 - \frac{4d^2}{L^2 \ln^2(p(d)/p(0))}} \right\} \ln \left( \frac{p(d)}{p(0)} \right).$$

В случае выполнения условия  $p(d) < p(0) \exp(2d/L)$  наблюдаются другие виды ВАХ, в частности, зависимости типа  $J \sim V^m$ ,  $0 < m \leq 1$ , и экспоненциальная зависимость на ВАХ [5].

Рассмотрим основное условие для реализации эффекта инжекционного обеднения — изменение знака градиента концентрации свободных носителей. Для этого необходимо реализовать случай, при котором образуется «идеальный»  $i$ - $n$ -переход (поступает много электронов), и «неидеальный»  $p$ - $i$ -переход (поступает мало дырок). Это можно реализовать не только технологически, но и в процессе эксплуатации прибора. Согласно [11], при идеальных контактах наблюдаются линейные зависимости  $p(0) \sim J$  и  $p(d) \sim J$ , а при неидеальных эти зависимости ослабевают и принимают вид  $p(0) \sim \sqrt{J}$ ,  $p(d) \sim J$ . Если считать  $p$ - $i$ -переход «неидеальным» ( $p(0) \sim \sqrt{J}$ ), а в то же время  $i$ - $n$ -переход останется «идеальным» ( $p(d) \sim J$ ), то значения концентрации носителей у  $i$ - $n$ -перехода могут стать больше, чем у  $p$ - $i$ -перехода. Знак градиента  $dp/dx$  станет положительным, и таким образом реализуется условие для эффекта инжекционного обеднения [3].

**Подготовка образцов, экспериментальные результаты.** Для проведения исследований изготовлены структуры  $p\text{Si}-n\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ) методом жидкофазной эпитаксии твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$   $n$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho \approx 0,8$  Ом·см на кремниевых подложках,  $p$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho \approx 1,0$  Ом·см. Вакуумным напылением серебра при рабочем давлении около  $10^{-5}$  торр получены омические контакты, сплошные с тыльной стороны и четырехугольные площадью  $12 \text{ мм}^2$  со стороны эпитаксиального слоя.

Для установления механизмов переноса тока в структурах  $p\text{Si}-n\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  проведены эксперименты по определению ВАХ при различных значениях температуры (рис. 2, а). Для этого образцы помещали и механически плотно закрепляли на металлическом криостате, в котором значение остаточного давления снижено примерно до  $3 \dots 10$  торр. К исследуемым структурам  $p\text{Si}-n\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  с помощью блока питания Б5-45А приложили напряжение, значения которого фиксировались вольтметром В7-9. Для наблюдения



**Рис. 2.** Прямые (а) и сублинейные (б) участки ВАХ гетероструктур  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x$  в полулогарифмическом масштабе при значениях температуры 293 (1), 313 (2), 333 (3), 353 (4), 373 (5) и 393 К (6)

силы тока, проходящего через исследуемый образец, использовали многофункциональный прибор Щ-300.

Результаты экспериментов показали, что прямая ветвь ВАХ структур  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x$  при значениях температуры 293...393 К состоит из двух специфических участков (см. рис. 2, а). Первый из этих участков ВАХ в диапазоне напряжений 0...0,5 В описывается зависимостью вида [13]:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eV}{ckT}\right), \quad (8)$$

где  $I_0$  — предэкспоненциальный множитель;  $e$  — заряд электрона;  $V$  — подаваемое напряжение к структуре;  $c$  — показатель, вычисленный по экспоненциальному участку ВАХ при различных значениях температуры (табл. 1). Значение показателя  $c$  уменьшается при повышении температуры от 293 до 353 К.

Таблица 1

**Значения параметров структур  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x$**

$T$ , К	293	313	333	353	373	393
$c$	2,78	2,77	2,66	2,62	2,85	2,93
$I_0$ , мкА	7,32	11,25	19,64	31,43	51,07	84,11
$\mu_p \tau_p, 10^{-5}, \text{см}^2/\text{В}$	3,62	3,41	3,62	3,57	2,66	2,37
$\rho, 10^5, \text{Ом} \cdot \text{см}$	5,74	3,95	2,32	1,50	1,06	0,69

Используя экспериментальные значения подвижности основных носителей (электронов)\*  $\mu_n \approx 538 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  и толщины базы  $n\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$   $d \approx 45 \text{ мкм}$ , а также значение показателя экспоненты  $c$ , рассчитанное из (8), по формуле

$$c(b+1) = 2b + \text{ch}\left(\frac{d}{L_p}\right) + 1 \quad (9)$$

можно вычислить отношение  $d/L_p = 2,1$  ( $d/L_p > 1$ ). Далее можно найти значение  $L_p$  при температуре 293 К ( $b = 3$ , как и в [14]):  $L_p \approx 9,57 \text{ мкм}$ .

Полученные результаты позволили определить произведение подвижности и времени жизни неосновных носителей:  $\mu_p\tau_p = qL_p^2/(kT)$  (см. табл. 1). Согласно данным, приведенным в табл. 1, значения  $\mu_p\tau_p$  в интервале 293...353 К слабо зависят от температуры, а в интервале 353...393 К наблюдается уменьшение значения произведения  $\mu_p\tau_p$ .

Предэкспоненциальный множитель  $I_0$  в формуле (8) имеет вид [9]:

$$I_0 = \frac{kT}{q} \frac{Sb \text{ch}(d/L_p)}{2(b+1)L_p\rho \text{tg}(d/(2L_p))}, \quad (10)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление переходного слоя, расположенного между кремниевой (Si) подложкой и эпитаксиальным слоем твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  (т. е.  $p$ - $n$ -перехода). Значение предэкспоненциального множителя, определенное по ВАХ, при комнатной температуре равнялось 7,32 мкА. С использованием (10) и экспериментальных точек на кривых ВАХ при комнатной температуре вычислено значение удельного сопротивления переходного слоя между подложкой и эпитаксиальной пленкой:  $5,74 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . С увеличением температуры удельное сопротивление переходного слоя между подложкой и эпитаксиальной пленкой уменьшается.

За экспоненциальной зависимостью ВАХ в исследованном диапазоне значений температуры наблюдается участок ВАХ, где ток слабо меняется с ростом приложенного напряжения (рис. 2, б). Этот участок ВАХ может быть хорошо описан в рамках изложенной выше теории эффекта инжекционного обеднения (6). Используя (6), можно определить значение параметра  $a$  непосредственно по сублинейному участку ВАХ [3]:

\* Определено методом Холла при комнатной температуре.



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

где  $I_1, I_2$  — значения тока при напряжениях  $V_1, V_2$  в последовательных точках сублинейного участка ВАХ. Поскольку коэффициент диффузии носителей заряда зависит только от температуры и подвижности основных носителей, определив параметр  $a$  по соотношению (4), можно найти произведение подвижности основных носителей и концентрации глубоких примесей  $\mu_n N_t$  (табл. 2) [10]. Полученное значение  $a$  позволило из формулы (4) найти значение концентрации глубоких примесей, ответственное за появление сублинейного участка:  $N_t = 5,3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  (при комнатной температуре).

Таблица 2

**Значение параметра  $a$  и произведения подвижности основных носителей и концентрации глубоких примесей  $\mu_n N_t$  в зависимости от температуры**

Параметр	T, К					
	293	313	333	353	373	393
$a, 10^3, \text{ см/А}$	6,58	5,49	3,79	3,22	2,82	3,45
$\mu_n N_t, 10^{16}, (\text{В} \cdot \text{см} \cdot \text{с})^{-1}$	1,84	2,11	2,87	3,20	3,02	3,10

Произведение  $\mu_n N_t$  основных носителей в твердом растворе  $n\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  увеличивается с возрастанием температуры. По-видимому, это позволяет заключить, что в таком твердом растворе большую роль в зависимости подвижности от температуры играет рассеяние носителей на глубоких примесях. Результаты рентгенодифракционного анализа эпитаксиальных слоев твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  и его кремниевой подложки, выращенной методом жидкофазной эпитаксии, приведены в [15]. Установлено, что молекулы олова могут не только частично замещать молекулы кремния, но и сегрегироваться в дефектоспособных местах — между блоками, на межфазовых границах, образуя в этих местах нановключения олова. Учитывая результаты рентгеноструктурных исследований, можно предположить, что в твердом растворе  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  примесные атомы олова, замещающие в узлах кристаллической решетки атомы кремния, будут вести себя как нейтральный атом замещения. Возможно, находясь на межфазовых границах, они будут вести себя как обычная глубокая примесь и будут ответственны за наблюдаемую сублинейную ВАХ.

Следует отметить, что удельное сопротивление эпитаксиального слоя, определенное методом Холла, составляет  $0,8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , однако все полученные характеристики свидетельствуют о том, что между эпитаксиальной пленкой

и подложкой образуется слой с другими характеристиками, иначе в таких ВАХ не наблюдается и, следовательно, не может наблюдаться экспоненциальная зависимость (7). Таким образом, исследованную структуру можно рассматривать как переход  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x-n^+Si_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ) с высокоомным  $nSi_{1-x}Sn_x$ -слоем (рис. 3).

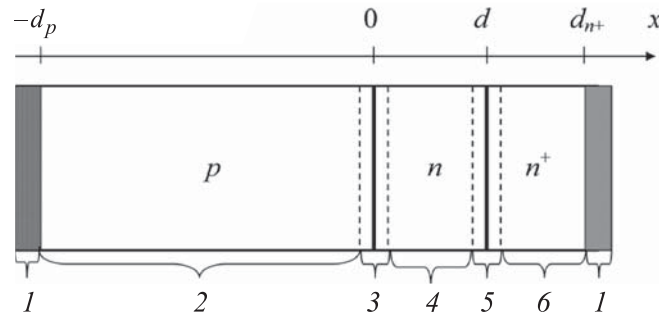


Рис. 3. Схема структуры  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x-n^+Si_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ):

1 — омические токосъемные контакты; 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  $n^+Si_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ )

**Заключение.** Полученные экспериментальные и расчетные результаты позволяют сделать вывод, что в твердом растворе  $Si_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ) существенную роль в механизме подвижности играет рассеяние носителей заряда не только на сложных комплексах, но и на нановключениях.

Эпитаксиальные пленки твердых растворов  $Si_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ) на кремниевых подложках полагаются активными полупроводниковыми материалами. Полученные на их основе структуры и описание механизмов различных электрофизических процессов, наблюдаемых в них, как в теоретическом, так и в практическом аспекте являются актуальными для полупроводникового материаловедения [1]. Можно предположить, что исследуемые в работе эпитаксиальные пленки твердых растворов  $Si_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ) могут быть перспективными материалами для диодов, работающих в режиме двойной инжекции.

### Благодарности

Автор выражает благодарность научному консультанту, академику Академии наук Республики Узбекистан С.З. Зайнабидинову, профессору А.Ю. Лейдерман и д-ру физ.-мат. наук Ш.Н. Усмонову за помощь в работе, профессору А.С. Саидову — за предоставление исследуемых образцов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зайнабидинов С.З., Мадаминов Х.М. Механизм токопрохождения в полупроводниковых  $p\text{-Si-n}-(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$  структурах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2020, № 4 (91), с. 58–72.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2020-4-58-72>
- [2] Андреев В.М., Долгинов Л.М., Третьяков Д.Н. Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов. М., Сов. радио, 1975.
- [3] Leiderman A.Yu., Karageorgy-Alkalaev P.M. On the theory of sublinear current-voltage characteristics of semiconductor structures. *Solid State Commun.*, 1978, vol. 25, iss. 10, pp. 781–783. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(78\)90239-9](https://doi.org/10.1016/0038-1098(78)90239-9)
- [4] Usmonov Sh.N., Saidov A.S., Leiderman A.Yu. Effect of injection depletion in  $p\text{-n}$  heterostructures based on solid solutions  $(\text{Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs})_y$ ,  $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ ,  $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ , and  $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ . *Phys. Solid State*, 2014, vol. 56, no. 12, pp. 2401–2407. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063783414120348>
- [5] Зайнабидинов С.З., Лейдерман А.Ю., Каланов М.У. и др. Особенности электрофизических свойств  $p\text{-n}$ -структур на основе непрерывного твердого раствора  $n\text{-Ge-p}-(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ . *Узбекский физический журнал*, 2015, № 17, с. 301–305.
- [6] Saidov A.S., Leyderman A.Yu., Usmonov Sh.N., et al.  $I\text{-}V$  characteristic of  $p\text{-n}$  structures based on a continuous solid solutions  $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ . *Semiconductors*, 2009, vol. 43, no. 4, pp. 416–418. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782609040022>
- [7] Saidov A.S., Leyderman A.Yu., Usmonov Sh.N., et al. Effect of injection depletion in  $p\text{-Si-n}-(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$  ( $0 \leq x \leq 0.01$ ) heterostructure. *Semiconductors*, 2018, vol. 52, no. 9, pp. 1188–1192. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782618090142>
- [8] Saidov A.S., Saidov M.S., Usmonov Sh.N., et al. Growth of  $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$  films on GaAs substrates by liquid-phase epitaxy. *Semiconductors*, 2010, vol. 44, no. 7, pp. 938–945. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782610070183>
- [9] Usmonov Sh.N., Mirsagatov S.A., Leyderman A.Yu. Study of the current-voltage characteristic of the  $n\text{-CdS/p-CdTe}$  heterostructure depending on temperature. *Semiconductors*, 2010, vol. 44, no. 3, pp. 313–317. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782610030073>
- [10] Саидов А.С., Амонов К.А., Лейдерман А.Ю. Исследование зависимости вольт-амперной характеристики  $p\text{-Si-n}-(\text{Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ -структур от температуры. *Comp. Nanotechnol.*, 2019, № 3, с. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2019-6-3-16-21>
- [11] Адирович Э.И., Карагеоргий-Алкалаев П.М., Лейдерман А.Ю. Токи двойной инжекции в полупроводниках. М., Сов. радио, 1978.
- [12] Li S.S. *Semiconductor physical electronics*. New York, NY, Springer, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/0-387-37766-2>

[13] Зайнабидинов С.З., Мадаминов Х.М. Влияние рекомбинационных процессов на механизм токопрохождения в  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ) структурах. *Петербургский журнал электроники*, 2017, № 4, с. 8–13.

[14] Мейлихов Е.З., Лазарев С.Д. Электрофизические свойства полупроводников. М., Атоминформ, 1987.

[15] Saidov A.S., Usmonov Sh.N., Kalanov M., et al. Structure and photoelectric properties of  $Si_{1-x}Sn_x$  epilayers. *Tech. Phys. Lett.*, 2010, vol. 36, no. 9, pp. 827–829.

DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063785010090154>

**Мадаминов Хуршиджон Мухамедович** — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика» Андижанского государственного университета (Республика Узбекистан, 170100, Андижан, ул. Университетская, д. 129).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Мадаминов Х.М. Влияние инжекционных эффектов на электрические свойства гетеропереходов  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x$ . *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2021, № 2 (95), с. 71–84.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-2-71-84>

**EFFECT OF INJECTION PHENOMENA ON ELECTRICAL PROPERTIES OF  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x$  HETEROJUNCTIONS**

**Kh.M. Madaminov**

khurmad@mail.ru

**Andijan State University, Andijan, Republic of Uzbekistan**

**Abstract**

We studied the current-voltage characteristic of  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x$  structures in the temperature range of 293–393 K so as to find out the role of injection phenomena during electrical property formation in  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x$  heterojunctions derived from the  $Si_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0.04$ ) solid solution. We established that the current-voltage characteristic of such heterojunctions consists of two typical segments. We determined that an exponential function describes the first current-voltage characteristic segment well. In all current-voltage characteristics the exponential curve is followed by sub-linear segments that do not depend on temperature. We show that the theory of injection depletion effect describes these segments well. We used the sublinear segment of the current-voltage characteristic to deter-

**Keywords**

*Solid solution, liquid-phase epitaxy, diode configuration, current-voltage characteristic, sublinear segment, injection depletion effect*

mine the value of the parameter  $a$ , which can be employed to calculate deep level impurity concentration leading to the appearance of the sublinear segment. We prove that the structure under investigation may be considered to be a  $p\text{Si}-n\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x-n^+\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0.04$ ) junction with a high-resistance  $n\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  layer. The analysis results make it possible to conclude that charge carrier dissipation on both complex aggregates and nanoinclusions plays a significant role in forming electrophysical properties in the  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0.04$ ) solid solution and that epitaxial films of  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0.04$ ) solid solutions derived on silicon substrates are efficient promising materials for developing diodes operating under double injection

Received 16.09.2020

Accepted 12.11.2020

© Author(s), 2021

*The study was conducted as part of the project of the State Science and Engineering Program of the Republic of Uzbekistan (project no. OT-F2-68)*

## REFERENCES

- [1] Zaynabidinov S.Z., Madaminov Kh.M. Charge transport mechanism in  $p\text{-Si}-n\text{-(Si}_2\text{)}_{1-x}\text{(CdS)}_x$  semiconductor structures. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2020, no. 4 (91), pp. 58–72 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2020-4-58-72>
- [2] Andreev V.M., Dolginov L.M., Tretyakov D.N. *Zhidkostnaya epitaksiya v tehnologii poluprovodnikovyykh priborov* [Liquid epitaxy in technology of semiconductor devices]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1975.
- [3] Leiderman A.Yu., Karageorgy-Alkalaev P.M. On the theory of sublinear current-voltage characteristics of semiconductor structures. *Solid State Commun.*, 1978, vol. 25, iss. 10, pp. 781–783. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(78\)90239-9](https://doi.org/10.1016/0038-1098(78)90239-9)
- [4] Usmonov Sh.N., Saidov A.S., Leiderman A.Yu. Effect of injection depletion in  $p\text{-}n$  heterostructures based on solid solutions  $(\text{Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs})_y$ ,  $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ ,  $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ , and  $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ . *Phys. Solid State*, 2014, vol. 56, no. 12, pp. 2401–2407. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063783414120348>
- [5] Zaynabidinov S.Z., Leyderman A.Yu., Kalanov M.U., et al. Electrophysical properties features of  $p\text{-}n$  structures based on  $n\text{-Ge-p-(Ge}_2\text{)}_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$  continuous solid solution. *Uzbekskiy fizicheskiy zhurnal*, 2015, no. 17, pp. 301–305 (in Russ.).
- [6] Saidov A.S., Leyderman A.Yu., Usmonov Sh.N., et al.  $I\text{-}V$  characteristic of  $p\text{-}n$  structures based on a continuous solid solutions  $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ . *Semiconductors*, 2009, vol. 43, no. 4, pp. 416–418. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782609040022>
- [7] Saidov A.S., Leyderman A.Yu., Usmonov Sh.N., et al. Effect of injection depletion in  $p\text{-Si}-n\text{-(Si}_2\text{)}_{1-x}(\text{ZnSe})_x$  ( $0 \leq x \leq 0.01$ ) heterostructure. *Semiconductors*, 2018, vol. 52, no. 9, pp. 1188–1192. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782618090142>

- [8] Saidov A.S., Saidov M.S., Usmonov Sh.N., et al. Growth of  $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$  films on GaAs substrates by liquid-phase epitaxy. *Semiconductors*, 2010, vol. 44, no. 7, pp. 938–945. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782610070183>
- [9] Usmonov Sh.N., Mirsagatov S.A., Leyderman A.Yu. Study of the current-voltage characteristic of the  $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$  heterostructure depending on temperature. *Semiconductors*, 2010, vol. 44, no. 3, pp. 313–317. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782610030073>
- [10] Saidov A.S., Amonov K.A., Leyderman A.Yu. Research of the dependence of current-voltage characteristics  $p\text{-Si-}n\text{-(Si}_2\text{)}_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(ZnSe)}_y\text{-structures}$  on temperature. *Comp. Nanotechnol.*, 2019, no. 3, pp. 16–21 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2019-6-3-16-21>
- [11] Adirovich E.I., Karageorgiy-Alkalaev P.M., Leyderman A.Yu. Toki dvoynoy inzhektionsii v poluprovodnikakh [Dual injection currents in semiconductors]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1978.
- [12] Li S.S. Semiconductor physical electronics. New York, NY, Springer, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/0-387-37766-2>
- [13] Zaynabidinov S.Z., Madaminov Kh.M. The impact of recombination processes on the current-carryng process in  $p\text{Si-}n\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  ( $0 \leq x \leq 0.04$ ) structures. *Peterburgskiy zhurnal elektroniki* [Petersburg Electronics Journal], 2017, no. 4, pp. 8–13 (in Russ.).
- [14] Meylikhov E.Z., Lazarev S.D. Elektrofizicheskie svoystva poluprovodnikov [Electrophysical properties of semiconductors]. Moscow, Atominform Publ., 1987.
- [15] Saidov A.S., Usmonov Sh.N., Kalanov M., et al. Structure and photoelectric properties of  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  epilayers. *Tech. Phys. Lett.*, 2010, vol. 36, no. 9, pp. 827–829. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063785010090154>

**Madaminov Kh.M.** — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor, Department of Physics, Andijan State University (Universitetskaya ul. 129, Andijan, 170100 Republic of Uzbekistan).

**Please cite this article in English as:**

Madaminov Kh.M. Effect of injection phenomena on electrical properties of  $p\text{Si-}n\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  heterojunctions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2021, no. 2 (95), pp. 71–84 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-2-71-84>