

ВЛИЯНИЕ РЕКОМБИНАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУР $p\text{Si}-n(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$

Х.М. Мадаминов

khurmad@mail.ru

АндГУ, Андижан, Республика Узбекистан

Аннотация

В результате анализа вольт-амперных характеристик p - n -структур на основе твердых растворов кремния с сульфидом кадмия в интервале значений температуры 293...463 К определена важность влияния рекомбинационных процессов. Показано, что вольт-амперные характеристики этих структур состоят из нескольких специфичных участков. Первый участок удовлетворительно описывается линейной зависимостью, второй и третий участки — экспоненциальной зависимостью. Появление экспоненциального участка является результатом реализации режима длинного диода, который впервые определен В.И. Стафеевым. Рассчитанные в рамках этого режима параметры позволили определить значимую роль удельного сопротивления переходного слоя $n(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ при формировании электрофизических свойств исследованных структур. Результаты анализа третьего участка вольт-амперных характеристик позволяют сделать вывод, что диффузионный механизм играет значимую роль в формировании электрофизических свойств твердых растворов $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ ($0 \leq x \leq 0,01$). Однако с увеличением температуры этот механизм постепенно переходит в дрейфовый. Таким образом, полученные результаты подтверждают важность удельного сопротивления переходного слоя и диффузионного механизма при формировании электрических свойств таких структур. Рекомендовано использовать твердые растворы $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ в качестве активных элементов детекторов, особенно в инжекционном режиме и при создании температурнозависимых оптических систем для фиксации фоновых сигналов и спектров металлов и их сплавов

Ключевые слова

Жидкофазная эпитаксия, экспоненциальный участок, модель рекомбинации, омическая релаксация, диффузионный механизм, дрейфовый механизм, инжекционный детектор

Поступила 25.03.2024

Принята 03.10.2024

© Автор(ы), 2025

Введение. На практике (в полупроводниковом материаловедении и опто-электронном приборостроении) наряду с элементарными полупроводниками, как правило, используют полупроводниковые твердые растворы (ПТР) соединений типа $A^{II}B^{VI}$ [1, 2]. Среди них можно выделить ПТР с областью поглощения, соответствующей ближнему и среднему ИК-диапазону спектра излучения [3]. При синтезе таких ПТР перспективным является раствор кремния с сульфидом кадмия [4]. Во многих научных центрах и лабораториях проводят работы по выращиванию этих ПТР с управляемым составом и кристаллически совершенных [5, 6], эффективно изучаются их структурные [7, 8], электрофизические [9, 10] и фотоэлектрические свойства [11, 12]. Особое внимание уделяется разработке новейших технологий выращивания ПТР кремния с сульфидом кадмия из жидкой фазы [13] в целях получения активных материалов для солнечных элементов [14, 15].

Несмотря на множество имеющихся результатов исследований ПТР кремния с сульфидом кадмия, технология синтеза совершенных монокристаллов этих ПТР остается менее освоенной, а их поверхностные и электрические свойства менее изучены. Установлено, что в диодных структурах на основе ПТР кремния с сульфидом кадмия при комнатной температуре электронные процессы определяются различными механизмами [16–18]. Однако экспериментальные результаты по установлению механизмов токопрохождения с учетом совместного воздействия температуры и рекомбинации в p - n -структурах, разработанных на основе ПТР $(Si_2)_{1-x}(CdS)_x$, отсутствуют.

Цель работы — исследование поверхностных качеств выращенного ПТР $(Si_2)_{1-x}(CdS)_x$ на кремниевых подложках из жидкой фазы и изучение влияния температуры на механизм токопрохождения в структурах $pSi-n(Si_2)_{1-x}(CdS)_x$ ($0 \leq x \leq 0,01$) с учетом рекомбинационных процессов.

Подготовка образцов. Для проведения экспериментов выращены ПТР кремния с сульфидом кадмия методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ). Характеристические параметры подложки и выращенной пленки ПТР приведены в табл. 1 (T — температура начала кристаллизации, ν — скорость вынужденного охлаждения подложки).

Для установления поверхностных особенностей, в том числе топографии рельефа, и распределения потенциала по поверхности эпитаксиальных пленок ПТР $(Si_2)_{1-x}(CdS)_x$ рассмотрены дву- (рис. 1, а) и трехмерные (рис. 1, б) изображения поверхности, полученные на атомно-силовом мик-

роскопе (АСМ) Solver NexT¹ (Россия). При изучении топографии поверхности выбор шага обусловлен линейными размерами области сканирования (256 × 256).

Таблица 1

Значения характеристических параметров подложки и эпитаксиальной пленки ПТР

Параметр	Подложка	Эпитаксиальная пленка
Материал:	КДБ-0.01	
марка		
тип	ρ	n
D , мм	20	–
h , мм	360	10–25
ρ , мОм·см	10	16
T , °С	–	1100
ν , °С/мин	–	1

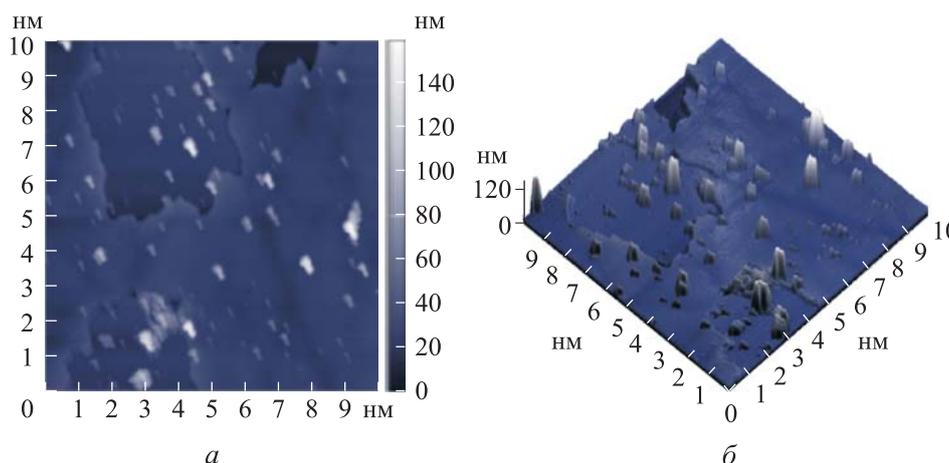


Рис. 1. Дву- (а) и трехмерные (б) изображения поверхности образца

Для нахождения линейных размеров нанобъектов исследована площадь образца размером 2×2 мкм (рис. 2). Результаты анализа изображений показали, что нанобъекты имеют высоту 4...30 нм и линейные размеры основания 40...170 нм. Шероховатость гладкой части подложки не превышает 1 нм.

¹ Атомно-силовой микроскоп Solver NexT (Россия).

URL: <https://n-tc.ru/equipment/атомно-силовой-микроскоп-solver-next-россия> (дата обращения: 25.03.2024).

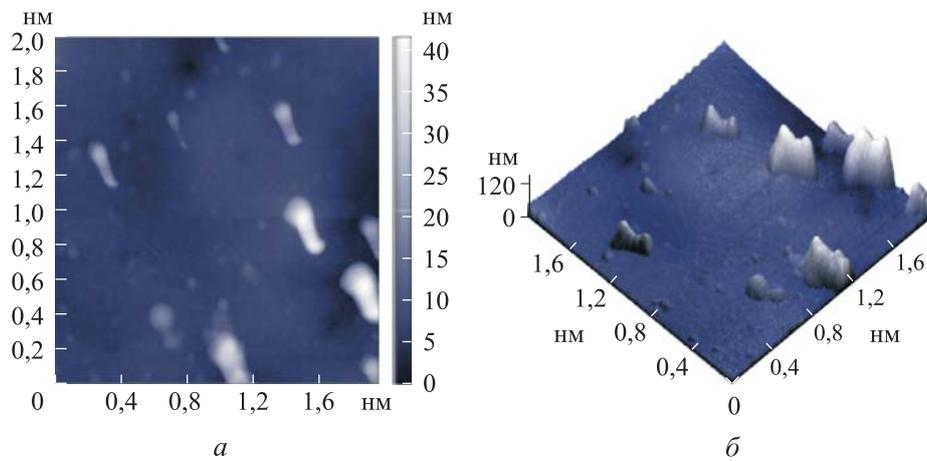


Рис. 2. Дву- (а) и трехмерные (б) изображения исследованного образца размером 2×2 мкм

Согласно изображениям на рис. 1, на поверхности формируются отдельные наноразмерные объекты, расположенные по определенным направлениям. Вероятно, «бугорки» обусловлены ПТР кремния с сульфидом кадмия, элементный состав которого отличается от кремниевой подложки.

Наличие нанобъектов, расположенных на поверхности пленки, обусловлено процессами самоорганизации двухфазной (твердый–жидкий) и двухкомпонентной (Si–CdS) системы во время роста, что энергетически выгодно для минимизации энергии упругого напряжения кристаллической решетки [19]. Возникающие в подобных системах напряжения содействуют трансформации зонной структуры и позволяют усилить подвижность носителей заряда, в результате чего модифицируются электрофизические параметры [20].

Экспериментальные результаты и теоретические предпосылки. Исследования проведены на *p-n*-структурах, изготовленных на основе выращенного ПТР кремния с сульфидом кадмия. Для изучения вольт-амперных характеристик (ВАХ) в диапазоне значений температуры 293...463 К в структурах напылением серебра Ag в вакууме при давлении около 10^{-5} Торр созданы омические контакты. Контакты со стороны подложки сплошные, со стороны эпитаксиального слоя имеют четырехугольную форму площадью около 10 мкм^2 .

Все измерения ВАХ выполнены на криостате, в котором структуры помещали и плотно фиксировали специальными зажимами. Во время измерений в криостате значения остаточного давления варьировались

в диапазоне примерно 3...10 Торр. Для регистрации силы тока, проходящего через исследуемый образец, использован прибор Щ-300К, а для регистрации напряжения, подаваемого к исследуемым диодным структурам, — вольтметр В7-9. За потенциал, приложенный к подложке, принято направление тока в структуре: прямое — положительный, а обратное — отрицательный.

Результаты анализа прямой ветви ВАХ при комнатной температуре *p-n*-структур позволили определить три ярко выраженных участка: первый и третий описываются степенной зависимостью вида $j \propto V^\beta$, а второй — логарифмической. Третий участок имеет детерминистический характер, что связано с повышением температуры (табл. 2).

Таблица 2

Характеристические участки прямой ветви ВАХ структур $p\text{Si}-n(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$

Температура, К	Напряжение, В		
	0–0,2	0,2–1,7	1,8–3,0
293	$\beta = 1,0$	$\ln j \propto V$	$\beta = 3,5$
363			$\beta = 3,0$
403			$\beta = 2,8$
423			$\beta = 2,5$

Ключевое уравнение задачи может быть записано в виде [21]

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

Здесь D_p — коэффициент диффузии неосновных носителей заряда (дырок), в рассматриваемом случае он приблизительно равен коэффициенту амбиполярной диффузии ($D_p \approx D_a$); $p(x)$ — градиент концентрации неосновных носителей заряда (дырок); u — скорость рекомбинации неравновесных носителей заряда;

$$v_a = \frac{\mu_n}{(b+1)p} \left\{ N_D - \frac{\varepsilon}{q} \left[\frac{d^2 E}{dx^2} - \frac{1}{E} \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} \right)^2 \right] \right\} E_j, \quad (2)$$

b — соотношение значений подвижности электронов к подвижности дырок; N_D — концентрация доноров; q — заряд; E_j — напряженность электрического поля в эпитаксиальной пленке ПТР (базе),

$$E_j = \frac{j}{q\mu_p (b+1) p},$$

j — плотность электрического тока.

С повышением напряжения на ВАХ очень четко заметна степенная зависимость (см. табл. 2). Это свидетельствует о том, что диффузионный режим сменился дрейфовым, причем в (2) для скорости амбиполярного дрейфа довольно значительны члены [22], связанные с изменением поля, что и определяет кубический закон Ламперта [23]:

$$j = \frac{125}{18} \frac{\varepsilon\mu_p\mu_n\tau_p V^3}{W^5}.$$

С повышением температуры происходит снижение показателя от 3,0 до 2,5 ($j \propto V^{3,0}$, $j \propto V^{2,8}$, $j \propto V^{2,5}$) при температуре 363, 403 и 423 К. Хотя и не наблюдается истинная квадратичная зависимость, характерная для режима омической релаксации [13]:

$$j = \frac{9}{8} \frac{q\mu_p\mu_n\tau_p N_D V^2}{W^3}.$$

На первый взгляд, результаты экспериментов достаточно необычные. Однако этому есть краткое объяснение. Согласно классической теории двойной инжекции [2], режим омической релаксации должен смениться режимом диэлектрической релаксации, т. е. в формуле для скорости амбиполярного дрейфа (2) первоначально существенен первый член, пропорциональный N_D , а затем второй, связанный с изменением поля [22].

Видоизменение режимов двойной инжекции должно отражаться не только в механизмах токопрохождения, но и в изменениях электрофизических параметров промежуточного слоя, образующегося между подложкой и эпитаксиальной пленкой.

Обсуждение полученных результатов. Рассмотрим ключевые моменты изменения режимов инжекции, приводящие к трансформации электрических свойств, с учетом рекомбинационных каналов [16, 17]. Формулу скорости рекомбинации с учетом возможности межпримесного взаимодействия (потенциала электронного обмена внутри двухкомпонентных примесных комплексов) можно записать в виде [21]

$$u = N_R \frac{c_n c_p (pn - n_i^2)}{c_n (n + n_1) + c_p (p + p_1) + \alpha\tau_i pn}. \quad (3)$$

Здесь N_R — концентрация рекомбинационных центров (R-центр); c_n , c_p — коэффициенты захвата электронов и дырок на R-центрах; n , p — концентрации неравновесных носителей заряда электронов и дырок; n_1 , p_1 — факторы Шокли — Рида (ШР); α — коэффициент, учитывающий внутрикомплексный обмен несвязанными носителями заряда; τ_i — период электронного обмена внутри комплекса.

Формула (3) отличается от обыкновенной статистики ШР и учитывает непростую природу примесных центров и дефектов, существующих в исследуемом материале. В случае простых R-центров факторы ШР определяются как

$$n_1 = N_C \exp\left(-\frac{E_c - E_R}{kT}\right); \quad (4)$$

$$p_1 = N_v \exp\left(-\frac{E_R - E_v}{kT}\right), \quad (5)$$

где N_v, N_C — плотности состояний, соответствующие валентной зоне и зоне проводимости; E_R — энергетический уровень R-центров, расположенный в запрещенной зоне. В случае двукомпонентного R-центра, когда уровень E_1 меняется в основном с C-зоной, а уровень E_2 — с v -зоной, для определяющих факторов ШР выражения (4), (5) примут вид:

$$n_1 = N_C \exp\left(-\frac{E_c - E_1}{kT}\right); \quad p_1 = N_v \exp\left(-\frac{E_2 - E_v}{kT}\right).$$

Ряд двукомпонентных комплексов приведен в [23]. Они могут быть разными: комплексы акцептор + донор, вакансия + R^+ -центр, ион внедрения⁻ + R^- -центр, вакансия + донор (донор мелкий, как у ПТР $A^{IV}B^{VI}$). Если электронный обмен внутри двукомпонентных комплексов значителен, то независимо от конкретного вида скорость рекомбинации неравновесных носителей, в отличие от статистики ШР, имеет вид (3) [24]. Схема рекомбинационных каналов, формирующихся в подобных комплексах, приведена на рис. 3.

Исследованный ПТР обладает несколькими характерными особенностями. Вакансии могут стать независимым рекомбинационным каналом, однако для упрощения пренебрежем их взаимодействием с зоной проводимости (переходами 3, 4). Донор, являясь мелким, не может быть независимым рекомбинационным каналом и не должен взаимодействовать с валентной зоной (переходы 5, 6). В результате у комплекса остаются три

канала обмена свободными носителями: 1) обмен с уровнем вакансии в валентной зоне; 2) внутрикомплексный обмен с уровнем донора; 3) обмен с донорным уровнем и зоной проводимости [25].

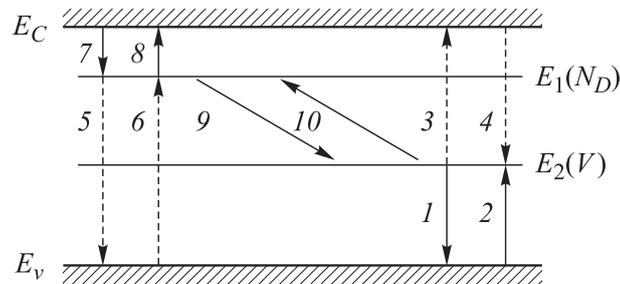


Рис. 3. Схема рекомбинационных каналов, проходящих через рекомбинационные комплексы [25] (1-10 — переходы)

В слабых межпримесных взаимодействиях, т. е. $c_n(n + n_1) + c_p(p + p_1) > \alpha \tau_i p n$, формула (3) перейдет к соотношению ШР. В общем виде уравнение (1) не может быть решено аналитически, но численно-приближенные решения подтверждены результатами многих экспериментов [26].

В рассматриваемом случае также может произойти замена диффузионного режима дрейфовым. Если приложенное напряжение мало, то в уравнении (1) можно пренебречь дрейфовым членом v_a , а в (3) — последним слагаемым в знаменателе. Тогда имеем обыкновенный диффузионный режим и экспоненциальную зависимость для плотности тока, полученную В.И. Стафеевым для p - n -структур со сплошным омическим контактом [25] и рассмотренную для p - i - n -структур в [13]:

$$j = j_0 \exp\left(\frac{BV}{c}\right), \tag{6}$$

где j_0 — предэкспоненциальный множитель; $B = q/(kT)$. Значение c в показателе экспоненты можно вычислить непосредственно из двух соседних экспериментальных точек экспоненциального участка (табл. 3) ВАХ [16]:

$$c = \frac{B\Delta V}{\ln\left(\frac{j_2}{j_1}\right)},$$

где j_1, j_2 — плотность тока, соответствующая напряжениям V_1, V_2 .

Электрофизические параметры, вычисленные из экспериментальных данных по экспоненциальному участку ВАХ

T, K	c	j_0, mA	W/L_p	$L_p, \mu m$	$\mu_p \tau_p, cm^2/VB$
293	5,71	0,05	5,49	4,55	8,20
323	6,91	0,23	5,75	4,35	6,80
343	8,48	0,22	6,01	4,16	5,85
363	9,92	0,32	6,2	4,03	5,19
383	8,46	0,29	6,01	4,16	5,24
403	7,95	0,41	5,93	4,22	5,13
423	7,50	0,47	5,86	4,27	5,00
443	6,61	0,42	5,69	4,39	5,05
463	6,12	0,39	5,58	4,48	5,03

Физические процессы при прохождении электрического тока через структуру определяются в основном ПТР, поэтому в качестве толщины базы структуры принята толщина эпитаксиальной пленки $W = 25$ мкм. Параметр c находим по формуле [21]:

$$c = \frac{2b + \operatorname{ch}\left(W / \sqrt{D_p \tau_p}\right) + 1}{b + 1}. \quad (7)$$

Для оценки диффузионной длины неосновных носителей тока в ПТР $b = 2$. Тогда из (7) получим $L_p = (D_p \tau_p)^{1/2} = 4,55$ мкм. Подвижность основных носителей тока (электронов), установленная по методу Холла, $\mu_n = 340$ см²/(В·с), отсюда $\mu_p = \mu_n / b = 170$ см²/(В·с).

Предэкспоненциальный множитель в (6) имеет вид [21–22]:

$$j_0 = \frac{\operatorname{ch}(W / L_p)}{2ATL_p \rho} \frac{b}{b + 1} \operatorname{ctg}\left(\frac{W}{L_p}\right), \quad (8)$$

где A — площадь образца; ρ — удельное сопротивление промежуточного слоя, расположенного под эпитаксиальным слоем ПТР кремния с сульфидом кадмия и между кремниевой подложкой. Используя значение $j_0 = 50$ мА, вычисленное по экспоненциальному участку кривых ВАХ, по (8) определено удельное сопротивление промежуточного слоя ($\sim 7,2 \cdot 10^7$ Ом·м) при комнатной температуре. С учетом этого промежуточный слой показывает себя как высокоомный подслой, который сформирован из ПТР. Значения показателя экспоненты c и множителя j_0 в (6)

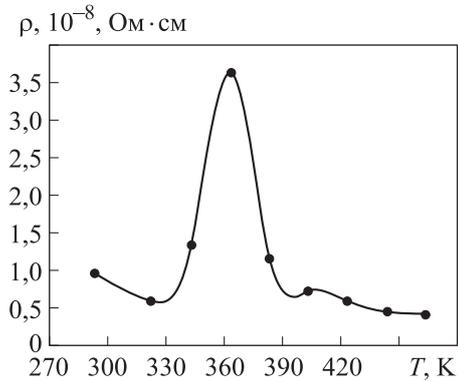


Рис. 4. Зависимость $\rho(T)$

при различных значениях температуры приведены в табл. 3. На основе табличных данных по формуле (6) построена зависимость $\rho(T)$ при различных значениях температуры (рис. 4). Наблюдается уменьшение ρ в двух разных диапазонах значений: 1) 293...323 К; 2) 363...463 К. Это связано с увеличением концентрации свободных носителей заряда с ростом температуры, которая способствует дополнительной тепловой генерации электронно-дырочных пар.

Для объяснения аномального увеличения удельного сопротивления переходного слоя $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ в диапазоне значений температуры 323...363 К используем выводы, приведенные в [24]. В ПТР одним из компонентов является сульфид кадмия — материал, относящийся к группе $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$. Обычно в объеме подобных материалов постоянно присутствуют комплексы типа вакансии + донор [16]. В происходящих процессах под влиянием внешних факторов (температуры) эти комплексы распадаются, в результате чего в объеме исследуемых ПТР формируются свободные мелкие доноры. При увеличении концентрации свободных доноров и допустимого превалирования члена, пропорционального N_D , в (2) для амбиполярной скорости v_a , режим диэлектрической релаксации устанавливается прежде режима омической релаксации.

Если рассмотреть более подробно, то из (2) нетрудно заметить следующее: когда значения слагаемых, пропорциональных концентрации доноров (N_D), которые ответственны за омическую релаксацию (закон $j \propto V^2$), значительны, тогда слагаемые, связанные с градиентом электрического напряжения и ответственные за появление зависимости $j \propto V^3$, могут стать незначительнее. Несмотря на то, что квадратичная зависимость неочевидна, наблюдается тенденция к уменьшению значения степени в зависимости $j \propto V^\beta$, которая свидетельствует об углублении воздействия омической релаксации. В то же время следует помнить и об обострении процессов рекомбинации с повышением концентрации свободных носителей. Это обстоятельство может приводить к значительному влиянию последнего члена в знаменателе (3) и аналитически описано в виде $c_n(n + n_1) + c_p(p + p_1) < \alpha \tau_i p n$. Здесь уже нет закономерности

сти, соответствующей омической релаксации [23], и имеет место более сложная зависимость вида $V \propto M(j)j^2$, где

$$M = 1 + 3m \left(2 + C \left(\frac{a\tau_i}{c_n} \right) \sqrt{j} \right)^2, \quad m = \frac{2\tau_i N_D V_n^*}{8b(b+1)p_n W}, \quad C = \left[\frac{b}{b+1} \frac{p_n}{qV_n^*} \right]^{0,5},$$

V_n^* — величина, связанная с инжектирующими способностями контакта [13]. В результате подобная зависимость позволяет разъяснить отклонения от закона $j \propto V^2$.

Многочисленными экспериментами [22] подтверждено, что более сложная закономерность вида

$$V = \frac{(b+1)W^2 N_R}{N_D \mu_p \tau_i} + \frac{W}{q \mu_p (b+1) C} \sqrt{j} + \frac{2(b+1)W^2 N_R c_n}{N_D \mu_p \alpha \tau_i^2 C} \sqrt{j}$$

позволяет получить разные значения показателя степени β в зависимости $j \propto V^\beta$, причем показатель β меняется в зависимости от тока, вследствие чего можно объяснить аномальную картину в $\rho(T)$ (см. рис. 4) в диапазоне значений температуры 323...363 К.

Заключение. Описан синтез монокристаллических эпитаксиальных слоев ПТР $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ с наноразмерными объектами на кремниевых подложках методом ЖФЭ. Методом ЖФЭ сформированы нанобъекты CdS на поверхности и в приповерхностной области эпитаксиального слоя $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$. Установлено, что неоднократное повторение этапов синтеза нанобъектов CdS, выращенных на эпитаксиальных слоях $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ с электронным типом проводимости, позволяет создать многослойную гетероструктуру. В процессе кристаллизации получается сформировать довольно плотные и гомогенные нанокристаллиты по свойствам комплекса наноразмерных объектов.

Проведенные эксперименты позволили предположить, что в исследованных ПТР при небольших значениях возбуждения интенсивность процессов рекомбинации неравновесных носителей заряда устанавливается простыми локальными центрами. С усилением возбуждения в рекомбинационном процессе с простыми локальными центрами одновременно играют роль комплексы дефект + примесь. С синхронным ростом температуры и уровня возбуждения вклад комплексов дефект + примесь, сформированных в объеме ПТР кремния с сульфидом кадмия, в рекомбинационные процессы усиливается и может стать определяющим [24].

В результате дрейфовый режим токопереноса превалирует над диффузионным. Результаты анализа температурных зависимостей ВАХ доказывают, что область прямых токов ВАХ структур $p\text{Si}-n(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ состоит из омических, экспоненциальных и степенных зависимостей от напряжения.

Следовательно, на основе модели двойной инжекции для структуры $p-n-n^+$ можно объяснить весь набор ВАХ от температуры, экспериментально полученный для структур $p\text{Si}-n(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ с высокоомным переходным слоем из ПТР $n(\text{Si}_2)_{0,99}(\text{CdS})_{0,01}$.

Полученные экспериментальные и расчетные результаты показывают возможность использования ПТР кремния с сульфидом кадмия в производстве детекторов, работающих в широком диапазоне значений температуры, и при разработке температурнозависимых оптических систем для фиксации слабых световых сигналов и спектральных особенностей тугоплавких металлов и их сплавов [17].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Slyotov M.M., Makhniy V.P., Slytov A.M., et al. Peculiarities of the optical properties of wide-gap II-VI compounds with Mg isovalent impurity. *Telecommun. Radio Eng.*, 2014, vol. 73, iss. 10, pp. 909–914. DOI: <https://doi.org/10.1615/telecomradeng.v73.i10.50>
- [2] Usmonov Sh.N. Influence of GaAs molecules on the photosensitivity of $p\text{-Si}-n(\text{GaSb})_{1-x}(\text{Si}_2)_x$ and $n\text{-GaAs}-p(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ heterostructures. *Appl. Sol. Energy*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 211–214. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0003701X16030178>
- [3] Saidov A.S., Usmonov Sh.N., Amonov K.A., et al. Photosensitivity of $p\text{Si}-n(\text{Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ heterostructures with quantum dots. *Appl. Sol. Energy*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 287–290. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0003701X17040132>
- [4] Li Q., Li X., Yu J. Surface and interface modification strategies of CdS-based photocatalysts. In: *Interface Science and Technology*, vol. 31. Elsevier, 2020, pp. 313–348. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102890-2.00010-5>
- [5] Cheng L., Xiang Q.J., Liao Y.L., et al. CdS-based photocatalysts. *Energy Environ. Sci.*, 2018, vol. 11, no. 6, pp. 1362–1391. DOI: <https://doi.org/10.1039/C7EE03640J>
- [6] Yuan Y.J., Chen D.Q., Yu Z.T., et al. Cadmium sulfide-based nanomaterials for photocatalytic hydrogen production. *J. Mater. Chem. A*, 2018, vol. 6, no. 25, pp. 11606–11630. DOI: <https://doi.org/10.1039/C8TA00671G>
- [7] Lang D., Xiang Q., Qiu G., et al. Effects of crystalline phase and morphology on the visible light photocatalytic H_2 -production activity of CdS nanocrystals. *Dalton Trans.*, 2014, vol. 43, no. 19, pp. 7245–7253. DOI: <https://doi.org/10.1039/C3DT53601G>

- [8] Muruganandam S., Anbalagan G., Murugadoss G. Synthesis and structural, optical and thermal properties of CdS:Zn²⁺ nanoparticles. *Appl. Nanosci.*, 2014, vol. 4, no. 8, pp. 1013–1019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13204-013-0284-z>
- [9] Low J.X., Yu J.G., Jaroniec M., et al. Heterojunction photocatalysts. *Adv. Mater.*, 2017, vol. 29, no. 20, art. 1601694. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201601694>
- [10] Li Q., Li X., Wageh S., et al. CdS/graphene nanocomposite photocatalysts. *Adv. Energy Mater.*, 2015, vol. 5, no. 4, art. 1500010. DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.201500010>
- [11] Yuan Y.P., Ruan L.W., Barber J., et al. Hetero-nanostructured suspended photocatalysts for solar-to-fuel conversion. *Energy Environ. Sci.*, 2014, vol. 7, no. 12, pp. 3934–3951. DOI: <https://doi.org/10.1039/C4EE02914C>
- [12] Zhang J., Qiao S.Z., Qi L., et al. Fabrication of NiS modified CdS nanorod *p-n* junction photocatalysts with enhanced visible-light photocatalytic H₂-production activity. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2013, vol. 15, no. 29, pp. 12088–12094. DOI: <https://doi.org/10.1039/C3CP50734C>
- [13] Saidov A.S., Leyderman A.Y., Usmonov S.N., et al. Effect of injection depletion in *p-Si-n-(Si₂)_{1-x}(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>
- [14] Mekky A.H. Simulation and modeling of the influence of temperature on CdS/CdTe thin film solar cell. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 2019, vol. 87, no. 3, art. 30101. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjap/2019190037>
- [15] Sabory-Garcia R.A., Leal-Cruz A.L., Vera-Marquina A., et al. Modeling and analytical study for efficiency improvement for thin film solar cells based on CdS/PbS, CdS/CdTe, and CdS/CdSe. *Chalcogenide Lett.*, 2018, vol. 15, no. 12, pp. 625–638.
- [16] Зайнабидинов С.З., Мадаминов Х.М. Механизм токопрохождения в полупроводниковых *p-Si-n-(Si₂)_{1-x}(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>
- [17] Sapaev I.B., Sapaev B., Babajanov D.B. Current-voltage characteristic of the injection photodetector based on M(In)-*n*CdS-*p*Si-M(In) structure. *SPQEO*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 188–192. DOI: <http://doi.org/10.15407/spqeo22.02.188>
- [18] Saidov A.S., Razzakov A.Sh., Risaeva V.A., et al. Liquid-phase epitaxy of solid solution (Ge₂)_{1-x}(ZnSe)_x. *Mater. Chem. Phys.*, 2001, vol. 68, iss. 1-3, pp. 1–6. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(00\)00230-3](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(00)00230-3)
- [19] Dirko V.V., Lozovoy K.A., Kokhanenko A.P., et al. Thickness-dependent elastic strain in Stranski — Krastanow growth. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2020, vol. 22, no. 34, pp. 19318–19325. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0CP03538F>
- [20] Wu J., Chen S., Seeds A., et al. Quantum dot optoelectronic devices: lasers, photodetectors and solar cells. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2015, vol. 48, no. 36, art. 363001. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/36/363001>

- [21] Мадаминов Х.М. Температурные зависимости электрофизических свойств твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0,04$). *Прикладная физика*, 2021, № 1, с. 63–68. DOI: <https://doi.org/10.51368/1996-0948/2021-1-63-68>
- [22] Мирсагатов Ш.А., Лейдерман А.Ю., Атабоев О.К. Механизм переноса тока в инжекционном фотодиоде на основе структуры $\text{In-}n^+ \text{-CdS-}n \text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x} \text{-}p \text{-Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te-Mo}$. *Физика твердого тела*, 2013, т. 55, № 8, с. 1524–1535. EDN: RCSXEZ
- [23] Лейдерман А.Ю., Минбаева М.К. Механизм быстрого роста прямого тока в полупроводниковых диодных структурах. *Физика и техника полупроводников*, 1996, т. 30, № 10, с. 1729–1738.
- [24] Мадаминов Х.М. Влияние инжекционных эффектов на электрические свойства гетеропереходов $p\text{Si-}n\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$. *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>
- [25] Саидов А.С., Амонов К.А., Лейдерман А.Ю. Исследование зависимости вольт-амперной характеристики $p\text{-Si-}n \text{-(Si}_2\text{)}_{1-x-y} \text{(Ge}_2\text{)}_x \text{(ZnSe)}_y \text{-структур}$ от температуры. *Computational Nanotechnology*, 2019, т. 6, № 3, с. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2019-6-3-16-21>
- [26] Leiderman A.Yu., Ayukhanov R.A., Turmanova R.M., et al. Non-recombination injection mode. *SPQEO*, 2021, vol. 24, no. 3, pp. 248–254. DOI: <http://doi.org/10.15407/spqeo24.03.248>

Мадаминов Хуршиджон Мухамедович — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика конденсированных сред» АндГУ (Республика Узбекистан, 170100, Андижан, Университетская ул., д. 129).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Мадаминов Х.М. Влияние рекомбинационных процессов на температурную зависимость вольт-амперных характеристик структур $p\text{Si-}n \text{(Si}_2\text{)}_{1-x} \text{(CdS)}_x$. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2025, № 2 (119), с. 35–51. EDN: JBOXKK

**INFLUENCE OF RECOMBINATION PROCESSES
ON THE TEMPERATURE DEPENDENCE
OF THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS
OF $p\text{Si-}n \text{(Si}_2\text{)}_{1-x} \text{(CdS)}_x \text{-STRUCTURES}$**

Kh.M. Madaminov

khurmad@mail.ru

AndSU, Andijan, Republic of Uzbekistan

Abstract

As a result of the analysis of the volt-ampere characteristics of p - n structures based on solid solutions of silicon with cadmium sulfide in the temperature range of 293–463 K, the importance of the influence of recombination processes is determined in the article. It is shown that the volt-ampere characteristics of these structures consist of several specific sites. The first section is satisfactorily described by linear dependence, the second and third sections by exponential dependence. The appearance of the exponential section is the result of the implementation of the long diode mode, which was first determined by V.I. Stafeev. The parameters calculated in this mode made it possible to determine the significant role of the resistivity of the $n(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ transition layer in the formation of the electrophysical properties of the studied structures. The results of the analysis of the third section of the volt-ampere characteristics led to the conclusion that the diffusion mechanism plays a significant role in the formation of the electrophysical properties of solid solutions $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ ($0 \leq x \leq 0.01$). However, as the temperature increases, this mechanism gradually turns into a drift one. Thus, the results obtained confirm the importance of the resistivity of the transition layer and the diffusion mechanism in the formation of the electrical properties of such structures. It is recommended to use $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ solid solutions as active detector elements, especially in injection mode and in the creation of temperature-dependent optical systems for recording background signals and spectra of metals and their alloys

Keywords

Liquid-phase epitaxy, exponential region, recombination model, ohmic relaxation, diffusion mechanism, drift mechanism, injection detector

Received 25.03.2024

Accepted 03.10.2024

© Author(s), 2025

REFERENCES

- [1] Slyotov M.M., Makhniy V.P., Slytov A.M., et al. Peculiarities of the optical properties of wide-gap II-VI compounds with Mg isovalent impurity. *Telecommun. Radio Eng.*, 2014, vol. 73, iss. 10, pp. 909–914. DOI: <https://doi.org/10.1615/telecomradeng.v73.i10.50>
- [2] Usmonov Sh.N. Influence of GaAs molecules on the photosensitivity of p -Si- n - $(\text{GaSb})_{1-x}(\text{Si}_2)_x$ and n -GaAs- p - $(\text{InSb})_{1-x}(\text{Sn}_2)_x$ heterostructures. *Appl. Sol. Energy*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 211–214. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0003701X16030178>
- [3] Saidov A.S., Usmonov Sh.N., Amonov K.A., et al. Photosensitivity of p -Si- n - $(\text{Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ heterostructures with quantum dots. *Appl. Sol. Energy*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 287–290. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0003701X17040132>

- [4] Li Q., Li X., Yu J. Surface and interface modification strategies of CdS-based photocatalysts. In: *Interface Science and Technology*, vol. 31. Elsevier, 2020, pp. 313–348. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102890-2.00010-5>
- [5] Cheng L., Xiang Q.J., Liao Y.L., et al. CdS-based photocatalysts. *Energy Environ. Sci.*, 2018, vol. 11, no. 6, pp. 1362–1391. DOI: <https://doi.org/10.1039/C7EE03640J>
- [6] Yuan Y.J., Chen D.Q., Yu Z.T., et al. Cadmium sulfide-based nanomaterials for photocatalytic hydrogen production. *J. Mater. Chem. A*, 2018, vol. 6, no. 25, pp. 11606–11630. DOI: <https://doi.org/10.1039/C8TA00671G>
- [7] Lang D., Xiang Q., Qiu G., et al. Effects of crystalline phase and morphology on the visible light photocatalytic H₂-production activity of CdS nanocrystals. *Dalton Trans.*, 2014, vol. 43, no. 19, pp. 7245–7253. DOI: <https://doi.org/10.1039/C3DT53601G>
- [8] Muruganandam S., Anbalagan G., Murugadoss G. Synthesis and structural, optical and thermal properties of CdS:Zn²⁺ nanoparticles. *Appl. Nanosci.*, 2014, vol. 4, no. 8, pp. 1013–1019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13204-013-0284-z>
- [9] Low J.X., Yu J.G., Jaroniec M., et al. Heterojunction photocatalysts. *Adv. Mater.*, 2017, vol. 29, no. 20, art. 1601694. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201601694>
- [10] Li Q., Li X., Wageh S., et al. CdS/graphene nanocomposite photocatalysts. *Adv. Energy Mater.*, 2015, vol. 5, no. 4, art. 1500010. DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.201500010>
- [11] Yuan Y.P., Ruan L.W., Barber J., et al. Hetero-nanostructured suspended photocatalysts for solar-to-fuel conversion. *Energy Environ. Sci.*, 2014, vol. 7, no. 12, pp. 3934–3951. DOI: <https://doi.org/10.1039/C4EE02914C>
- [12] Zhang J., Qiao S.Z., Qi L., et al. Fabrication of NiS modified CdS nanorod *p-n* junction photocatalysts with enhanced visible-light photocatalytic H₂-production activity. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2013, vol. 15, no. 29, pp. 12088–12094. DOI: <https://doi.org/10.1039/C3CP50734C>
- [13] Saidov A.S., Leyderman A.Y., Usmonov S.N., et al. Effect of injection depletion in *p-Si-n-(Si₂)_{1-x}(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>
- [14] Mekky A.H. Simulation and modeling of the influence of temperature on CdS/CdTe thin film solar cell. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 2019, vol. 87, no. 3, art. 30101. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjap/2019190037>
- [15] Sabory-Garcia R.A., Leal-Cruz A.L., Vera-Marquina A., et al. Modeling and analytical study for efficiency improvement for thin film solar cells based on CdS/PbS, CdS/CdTe, and CdS/CdSe. *Chalcogenide Lett.*, 2018, vol. 15, no. 12, pp. 625–638.
- [16] Zaynabidinov C.Z., Madaminov Kh.M. Charge transport mechanism in *p-Si-n-(Si₂)_{1-x}(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>
- [17] Sapaev I.B., Sapaev B., Babajanov D.B. Current-voltage characteristic of the injection photodetector based on M(In)-*n*CdS-*p*Si-M(In) structure. *SPQEO*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 188–192. DOI: <http://doi.org/10.15407/spqeo22.02.188>

- [18] Saidov A.S., Razzakov A.Sh., Risaeva V.A., et al. Liquid-phase epitaxy of solid solution $(\text{Ge}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$. *Mater. Chem. Phys.*, 2001, vol. 68, iss. 1-3, pp. 1–6.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(00\)00230-3](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(00)00230-3)
- [19] Dirko V.V., Lozovoy K.A., Kokhanenko A.P., et al. Thickness-dependent elastic strain in Stranski — Krastanow growth. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2020, vol. 22, no. 34, pp. 19318–19325. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0CP03538F>
- [20] Wu J., Chen S., Seeds A., et al. Quantum dot optoelectronic devices: lasers, photo-detectors and solar cells. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2015, vol. 48, no. 36, art. 363001.
DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/36/363001>
- [21] Madaminov Kh.M. Temperature dependences of the electrophysical properties of the solid solution $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.04$). *Prikladnaya fizika*, 2021, no. 1, pp. 63–68 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51368/1996-0948/2021-1-63-68>
- [22] Mirsagatov Sh.A., Leyderman A.Yu., Ataboev O.K. Mechanism of charge transfer in injection photodiodes based on the $\text{In-}n^+\text{-CdS-}n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-}p\text{-Zn}_x\text{Cd}_{1-x}$ Te–Mo structure. *Phys. Solid State*, 2013, vol. 55, no. 8, pp. 1635–1646.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063783413080192>
- [23] Leyderman A.Yu., Minbaeva M.K. Mechanism of rapid growth of direct current in semiconductor diode structures. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 1996, vol. 30, no. 10, pp. 1729–1738 (in Russ.).
- [24] 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>
- [25] Saidov A.S., Amonov K.A., Leyderman A.Yu. Research of the dependence of current-voltage characteristics of $p\text{-Si-}n\text{-(Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ -structures on temperature. *Computational Nanotechnology*, 2019, vol. 6, no. 3, pp. 16–21 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2019-6-3-16-21>
- [26] Leyderman A.Yu., Ayukhanov R.A., Turmanova R.M., et al. Non-recombination injection mode. *SPQEO*, 2021, vol. 24, no. 3, pp. 248–254.
DOI: <http://doi.org/10.15407/spqeo24.03.248>

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

Please cite this article in English as:

Madaminov Kh.M. Influence of recombination processes on the temperature dependence of the current-voltage characteristics of $p\text{Si-}n(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ -structures. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2025, no. 2 (119), pp. 35–51 (in Russ.). EDN: JBOXKK