

**МЕХАНИЗМ ТОКОПРОХОЖДЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
 p -Si- n -(Si₂)_{1-x}(CdS)_x СТРУКТУРАХ****С.З. Зайнабидинов**

prof_sirojiddin@mail.ru

Х.М. Мадаминов

aduxurshid@gmail.com

khurmad@mail.ru

**Андижанский государственный университет,
Андижан, Республика Узбекистан****Аннотация**

Показана возможность получения монокристаллического твердого раствора замещения p -Si- n -(Si₂)_{1-x}(CdS)_x ($0 \leq x \leq 0,01$) на кремниевых подложках методом жидкофазной эпитаксии из Sn-Si-CdS раствора-расплава в атмосфере водорода, очищенного палладием. Получены наиболее совершенные эпитаксиальные слои с зеркальными поверхностями и с наилучшими параметрами при следующих условиях технологического режима: температура начала кристаллизации 1100 °С; скорость принудительного охлаждения 1 град/мин. Толщина выращенных эпитаксиальных пленок 20 мкм, n -тип проводимости с удельным сопротивлением 0,018 Ом-см. Результаты исследования механизмов переноса тока в p -Si- n -(Si₂)_{1-x}(CdS)_x структурах при комнатной температуре показывают, что вольт-амперная характеристика в прямом направлении состоит из нескольких характерных участков, а процессы токопрохождения определяются различными механизмами. При малых плотностях тока его рост объясняется увеличением концентрации инжектированных носителей за счет простых локальных центров, а при больших — рекомбинационными процессами, протекающими в сложных комплексах, внутри которых происходит электронный обмен. Именно этот факт показывает, что в рассматриваемой структуре с увеличением приложенного напряжения более ярко проявляются выпрямляющие свойства. Определено,

Ключевые слова

Твердый раствор, вольт-амперная характеристика, подвижность, инжекция, модель рекомбинации, дрейфовый механизм

что исследуемые в работе эпитаксиальные пленки твердых растворов (Si₂)_{1-x}(CdS)_x ($0 \leq x \leq 0,01$) являются перспективными материалами для диодов, выпрямляющих высокие токи

Поступила 25.10.2019
Принята 12.12.2019
© Автор(ы), 2020

Работа выполнена в рамках проекта (ОТ-Ф2-68) Государственной научно-технической программы РУз

Введение. Полупроводниковые соединения A^2B^6 являются дорогостоящими материалами, поэтому использование массивных элементов на их основе экономически ограничено. Учитывая, что активная область оптоэлектронных элементов составляет несколько микрометров, целесообразно выращивать такие соединения на доступных и недорогих подложках, например монокристаллическом кремнии. Однако вследствие различия параметров решетки и коэффициентов термического расширения кремния и выращиваемых на нем эпитаксиальных пленок соединений A^2B^6 получить качественные пленки непосредственно на кремниевых подложках трудно [1, 2]. Это различие можно исключить, создав промежуточный буферный слой между подложкой и эпитаксиальной пленкой. В качестве буферного слоя можно использовать варизонные твердые растворы (Si₂)_{1-x}(A^2B^6)_x с изменяющимся составом ($0 \leq x \leq 1$).

Сглаживая параметры решетки, буферный слой предотвращает механическое напряжение между подложкой и эпитаксиальной пленкой. Однако результаты проведенных исследований показали, что промежуточный слой может существенно влиять на электронные процессы всей структуры и, следовательно, на работу приборов на его основе [3, 4].

Полупроводниковые соединения CdS, принадлежащие классу соединений A^2B^6 , и их твердые растворы с элементарными полупроводниками являются активными элементами фотопреобразователей и фотодатчиков, работающих в видимой и инфракрасной областях спектра излучения. В связи с этим результаты исследования физики и технологии выращивания таких твердых растворов на доступных кремниевых (Si) подложках, используемых в качестве буферного слоя, представляют как фундаментальный, так и прикладной интерес.

Несмотря на достаточное число работ по результатам исследования физических свойств полупроводниковых соединений CdS, исследования этих материалов продолжают оставаться актуальной задачей полупроводниковой микроэлектроники [5–8]. В проведенных исследованиях особое внимание было уделено не только получению этого материала с использованием относительно недорогой технологии — жидкофазной эпитаксии, но и изу-

чению особенностей их фотоэлектрических и электрофизических свойств [9, 10]. Однако до настоящего времени авторы не обнаружили данных о механизмах токопрохождения в p -Si- n -(Si₂)_{1-x}(CdS)_x гетероструктурах.

Цель работы — изучить механизмы токопрохождения в p -Si- n -(Si₂)_{1-x}(CdS)_x структурах с использованием результатов анализа их вольт-амперных характеристик (ВАХ).

Образование твердых растворов (Si₂)_{1-x}(CdS)_x. Рассмотрим механизм образования твердого раствора (Si₂)_{1-x}(CdS)_x с учетом зарядового состояния и геометрических факторов составляющих компонентов.

Образование непрерывных твердых растворов замещения двух и более элементов, как и в случае Si и CdS, основано на молекулярно-статистических и кристаллохимических условиях [11]:

$$\Delta z = \sum_{i=1} z_i^m - \sum_{i=1} z_i^n = 0; \quad (1)$$

$$\Delta r = \left| \sum_{i=1} r_i^m - \sum_{i=1} r_i^n \right| \leq 0,1 \sum_{i=1} r_i^m = 0, \quad (2)$$

где z_i^m , z_i^n — валентности; r_i^m , r_i^n — ковалентные радиусы атомов растворяющего (m) и растворяемого (n) химического элемента или элементов, образующих молекулы растворяющего и растворяемого соединений соответственно, $i = 1, 2, 3, 4, \dots$

Условие (1) предусматривает электронейтральность растворяемых химических элементов или соединений в растворяющем полупроводниковом материале. Условие выполняется, когда растворяющие элементы изовалентны относительно растворяемых.

Условие (2) предусматривает близость геометрических параметров растворяющего и растворяемого соединений, исключающую возникновение значительных искажений кристаллической решетки в твердых растворах. Чем меньше Δr , тем меньше энергия упругих искажений кристаллической решетки и, следовательно, тем больше кристаллическое совершенство твердого раствора и растворимость n в m . Если разность суммы ковалентных радиусов образующих раствор атомов молекул составляет более 10 %, то вероятность формирования твердого раствора замещения этих компонентов незначительна.

В рассматриваемом случае суммы валентностей атомов молекул Si₂ и CdS равны и выполняется условие электронейтральности (1):

$$\Delta z = (z_{\text{Si}} + z_{\text{Si}}) - (z_{\text{Cd}} + z_{\text{S}}) = 0,$$

где z_{Si} , z_{Cd} , z_{S} — валентности атомов кремния, кадмия и серы.

Суммы ковалентных радиусов атомов молекул Si_2 и CdS имеют близкие значения, тогда из условия (2) можно получить

$$\begin{aligned} \Delta r &= |(r_{\text{Si}} + r_{\text{Si}}) - (r_{\text{Cd}} + r_{\text{S}})| = |2,34 \text{ \AA} - 2,52 \text{ \AA}| = \\ &= 0,18 \text{ \AA} \approx 0,077(r_{\text{Si}} + r_{\text{Si}}) < 0,1(r_{\text{Si}} + r_{\text{Si}}), \end{aligned}$$

где r_{Si} , r_{Cd} , r_{S} — ковалентные радиусы атомов кремния, кадмия и серы по Полингу. В соответствии с приведенным выражением отличие суммы ковалентных радиусов атомов молекул Si_2 и CdS составляет около 7,7 %. Следовательно, эти компоненты удовлетворяют условиям (1) и (2) образования непрерывного твердого раствора замещения, приведенным в [11].

Замещение Si_2 молекулой CdS не сильно деформирует кристаллическую решетку, при этом энергия упругих искажений кристаллической решетки будет незначительной и твердый раствор замещения в виде $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ является стабильной твердой фазой. На основе изложенного выше построена пространственная конфигурация двух стабильных тетраэдрических связей твердого раствора $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ (рис. 1).

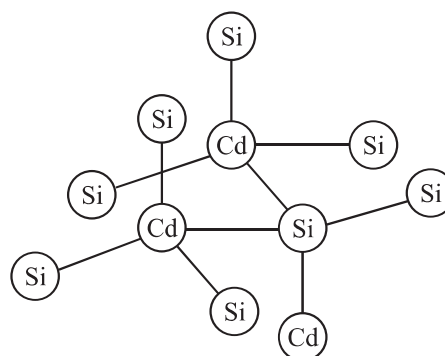


Рис. 1. Пространственная конфигурация двух тетраэдрических связей $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$

Подготовка образцов. Слои твердых растворов выращены с использованием метода жидкофазной эпитаксии [12] из ограниченного объема Sn раствора–расплава в атмосфере очищенного палладием водорода. В качестве подложек использованы монокристаллические кремниевые (КДБ-0.01) шайбы диаметром 20 мм, толщиной 400 мкм с кристаллографической ориентацией (111). При выращивании эпитаксиальных пленок состав раствора–расплава Sn–Si–CdS определен на основе результатов предварительных опытов по растворимости Si и CdS в растворителе Sn и данных, приведенных в [12, 13]. При оптимальных режимах температура начала кристаллизации раствора–расплава составляла 1100 °С, скорость охлаждения — 1 град/мин, расстояние между горизонтально расположенными подложками — 1 мм. При выбранных значениях параметров технологического про-

процесса вся поверхность подложки была покрыта сплошной однородной эпитаксиальной пленкой. Поверхность пленки — гладко-зеркальная, толщина эпитаксиального слоя одинакова и в зависимости от продолжительности процесса равнялась 7...35 мкм. Выращенные эпитаксиальные пленки имели толщину примерно 20 мкм и *n*-типа проводимость с удельным сопротивлением около 0,018 Ом·см. Химический состав и структурное совершенство пленок твердых растворов $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ проанализированы различными методами.

Эпитаксиальные пленки твердых растворов $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$, выращенные на кремниевых подложках при оптимальных технологических условиях, исследованы на спектрометре *In Via Raman* (*Renishaw*, Великобритания). Полученные микрофотографии поверхностей подложки и пленки $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ монокристаллического кремния приведены на рис. 2. Пленки $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ имеют зеркально гладкую, блестящую поверхность, микрорельефы подложек (рис. 2, *а*) и эпитаксиальных пленок (рис. 2, *б*) идентичны. Предварительно это свидетельствует об отсутствии макроскопических дефектов и однородности эпитаксиальных пленок.

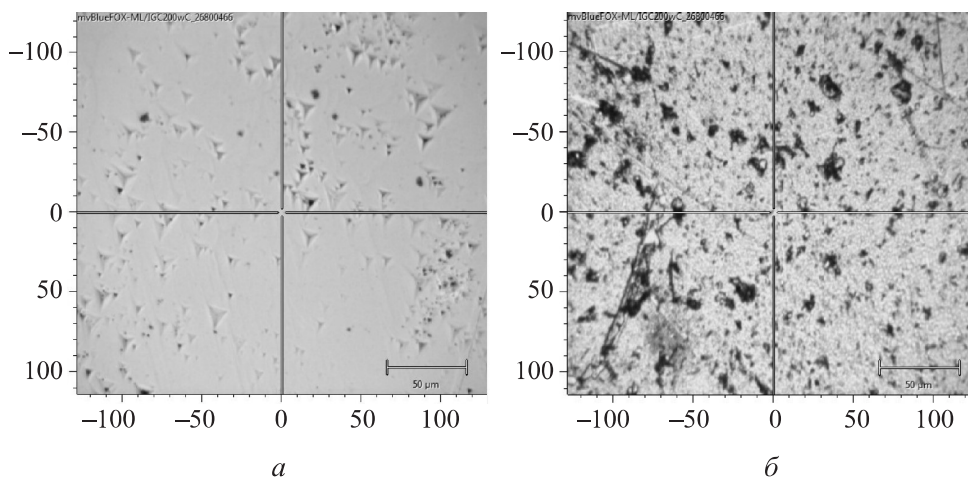


Рис. 2. Микрофотографии поверхностей подложки (*а*) и эпитаксиальной пленки (*б*) монокристаллического кремния

Результаты рентгеноструктурного анализа химического состава поверхности и скола выращенных эпитаксиальных слоев (рис. 3), проведенного на микроанализаторе *Jeol JSM 5910 LV-Japan*, показали следующее: распределение компонентов по поверхности пленки однородное, а состав твердого раствора $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ по толщине слоя изменяется в пределах $0 \leq x \leq 0,01$.

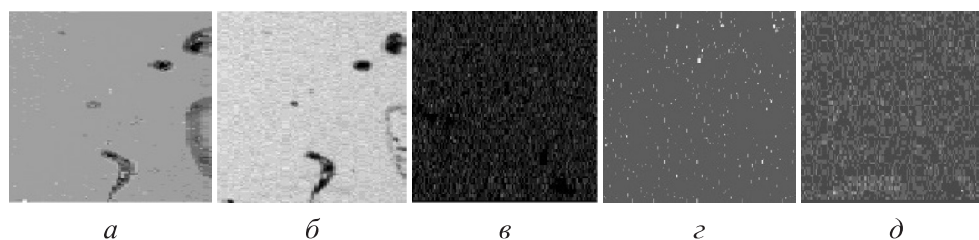


Рис. 3. Растровые картины поверхности эпитаксиальной пленки твердого раствора $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$, полученные методами вторичной электронной эмиссии (а), $\text{Si}_{K\alpha}$ (б), $\text{Sn}_{K\alpha}$ (в), $\text{Cd}_{K\alpha}$ (г) и $\text{S}_{K\alpha}$ (д)

Экспериментальная часть. В соответствии с поставленной целью изучены некоторые электрические свойства твердого раствора замещения $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$.

Наилучшим показателем качества электрических свойств полупроводниковых структур является ВАХ $p\text{-n}$ -перехода, полученная на основе этих соединений. Вид кривых ВАХ позволяет получить сведения о тех или иных свойствах $p\text{-n}$ -перехода. При создании $p\text{-n}$ -переходов обычным методом образуются различного рода поверхностные состояния, что приводит к резкому снижению электрических параметров приборов на их основе. Полученный $p\text{-n}$ -переход в едином технологическом цикле обуславливает уменьшение плотности поверхностных дефектов. В связи с этим исследуемые $p\text{-n}$ -структуры выполнены в едином технологическом цикле методом жидкофазной эпитаксии.

Для определения основных электрофизических характеристик $p\text{-Si-n-(Si}_2\text{)}_{1-x}\text{(CdS)}_x$ структур проведены эксперименты по измерению ВАХ. Для этого изготовлены $p\text{-Si-n-(Si}_2\text{)}_{1-x}\text{(CdS)}_x$ ($0 \leq x \leq 0,01$) структуры толщиной базового n -слоя $W \approx 20$ мкм. При исследовании в структуре созданы омические контакты методом вакуумного напыления серебра — сплошные с тыльной стороны и четырехугольные площадью $5,6 \text{ мм}^2$ со стороны эпитаксиального слоя.

В эксперименте при комнатной температуре ($T = 300 \text{ К}$) измерены темновые ВАХ в режимах прямого и обратного токов. В прямой ветви ВАХ (рис. 4) в диапазоне напряжений до 3 В насыщение по току не наблюдается, что свидетельствует о низкой плотности поверхностных состояний. Можно сделать вывод, что в такой структуре с увеличением напряжения более ярко проявляются ее выпрямляющие свойства. Для утверждения достоверности этого вывода определены коэффициенты выпрямления. Структура обладает выпрямляющими свойствами, коэффициенты выпрямления

изменяются в интервале 1,1–3,5 при изменении напряжения в диапазоне 0...1 В. При малых значениях напряжения токи, проходящие в обоих направлениях, почти одинаковые, что обусловлено образованием утечки в p - n -переходах. При значениях напряжения 1,1...3,0 В коэффициенты выпрямления изменяются в интервале 3,6–5,4, т. е. при больших значениях напряжения улучшаются выпрямляющие свойства структуры.

Прямая ветвь ВАХ исследованной структуры в двойном логарифмическом масштабе при комнатной температуре показана на рис. 5. Характерные участки ВАХ в прямом направлении тока имеют следующую последовательность:

- участок 1 при значениях напряжения 0,1...0,2 В с показателем $m = 1,8$ — зависимость, близкая к квадратичной;
- участок 2 при значениях напряжения 0,20...0,84 В с показателем $m = 3,5$;
- участок 3 при значениях напряжения 0,84...3,0 В с показателем $m = 2,0$ — квадратичная зависимость.

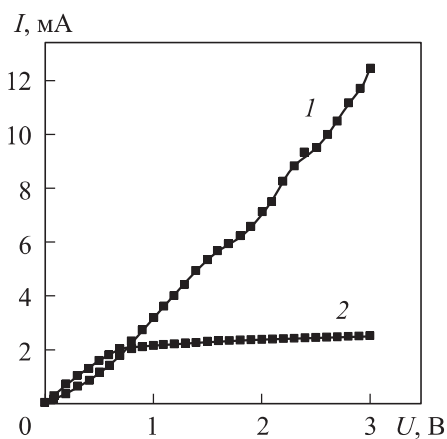


Рис. 4. Прямая (1) и обратная (2) ветви темновой ВАХ p - Si - n - $(Si_2)_{1-x}(CdS)_x$ ($0 \leq x \leq 0,01$) структуры при комнатной температуре

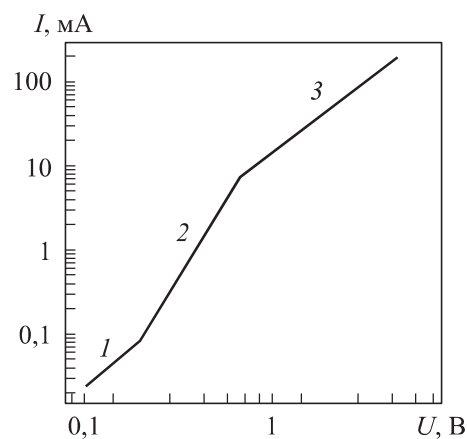


Рис. 5. Последовательность характерных участков прямой ветви ВАХ p - Si - n - $(Si_2)_{1-x}(CdS)_x$ ($0 \leq x \leq 0,01$) структуры в двойном логарифмическом масштабе при $m = 1,8$ (1), 3,5 (2) и 2,0 (3)

Обсуждение полученных результатов. Особенности последовательных участков прямой ветви ВАХ (см. рис. 4) исследованной структуры можно объяснить исходя из модели рекомбинации, учитывающей инерционность электронного обмена между рекомбинационными комплексами типа «дефект + примесь» [14, 15]. В этом случае скорость рекомбинации

существенно отличается от скорости рекомбинации по Шокли — Риду и имеет вид [14]

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

Здесь N_R — концентрация рекомбинационных центров; c_n , c_p — коэффициенты захвата электронов и дырок; n , p — концентрации свободных электронов и дырок; n_i — собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике; n_1 , p_1 — статистические факторы Шокли — Рида; τ_i — время процесса электронного обмена внутри рекомбинационного комплекса.

При начале влияния рекомбинационных процессов с учетом обмена внутри комплекса, т. е. $c_n(n + n_1) + c_p(p + p_1) > \alpha \tau_i np$, решение уравнения

$$D_a \frac{d^2 p}{dx^2} - v_a \frac{dp}{dx} - u = 0, \quad (4)$$

описывающего процесс прохождения тока через $p\text{-}n$ -переход с достаточно длинной базой, имеет вид

$$U \propto M(I) \sqrt{I}, \quad (5)$$

где D_a — коэффициент амбиполярной диффузии; v_a — амбиполярная скорость дрейфа; $M(I) \approx 1 + 3m(2 + C(\alpha \tau_i / c_n) \sqrt{I})^2$, m , C — параметры, зависящие от свойств материала; I — плотность тока. С учетом условия $c_n(n + n_1) + c_p(p + p_1) > \alpha \tau_i np$ участок 1 ВАХ (см. рис. 5), где наблюдается зависимость $I \propto U^{1,8}$, можно аппроксимировать по (5). Другими словами, на этом участке ВАХ наблюдается режим, близкий к квадратичному (лампертовскому), но отличающийся наличием множителя M , который является функцией тока.

Далее процесс обмена внутри комплекса начинает оказывать влияние на токопрохождение через структуру: с ростом уровня возбуждения член $\alpha \tau_i np > c_n(n + n_1) + c_p(p + p_1)$ в знаменателе (3) становится существенным и решение уравнения (4) имеет вид

$$U = A + B \sqrt{I} - \frac{D}{\sqrt{I}}. \quad (6)$$

Здесь

$$A = \frac{(b+1)W^2 N_R}{N_D \mu_p \tau_i}, \quad B = \frac{W}{q \mu_p (b+1) C}, \quad D = \frac{2(b+1)W^2 N_R c_n}{N_D \mu_p \alpha \tau_i^2 C}$$

— параметры, зависящие от свойств материала базы p - n -перехода, в рассматриваемом случае от свойств твердого раствора p -Si- n -(Si₂)_{1-x}(CdS)_x ($0 \leq x \leq 0,01$), N_D — концентрация донорных центров (доноров), μ_p, τ_p — подвижность и время жизни дырок; μ_n — подвижность электронов. Таким образом, ВАХ описывает участок 2 как $I \propto U^{3,5}$ (см. рис. 5).

Предлагаемая модель предсказывает последовательную смену лампертовского закона $U \propto \sqrt{I}$ на более сильную зависимость (6). По мнению авторов работы, эта модель может объяснить наблюдавшиеся ВАХ, обычно описываемые эмпирической зависимостью, а также новый, квадратичный по напряжению участок ВАХ $I \propto U^m$. Такие ВАХ наблюдаются на диодных структурах, изготовленных из различных материалов [15–17].

При выполнении условия $c_n(n+n_1) + c_p(p+p_1) \gg \alpha\tau_i n p$ решение уравнения (4) имеет вид

$$U = B_0 \sqrt{I},$$

где $B_0 = \sqrt{\frac{8W^3}{9q\mu_p\mu_n\tau_p N_D}}$. Другими словами, на участке 3 ВАХ (см. рис. 5)

наблюдается квадратичный режим, обычно он обусловлен преобладанием дрейфового режима токопереноса над диффузионным режимом.

Появление участков быстрого роста прямого тока свидетельствует о дрейфовом механизме токопереноса в условиях омической релаксации объемного заряда с учетом инерционности электронного обмена внутри рекомбинационного комплекса [15].

Заключение. На монокристаллических кремниевых подложках с ориентацией (111) методом жидкофазной эпитаксии из оловянного раствора–расплава выращены монокристаллические твердые растворы (Si₂)_{1-x}(CdS)_x n -типа проводимости. Образование таких твердых растворов замещения объясняется изовалентностью и близостью сумм ковалентных радиусов атомов молекул компонентов твердых растворов.

Экспериментально показано, что жидкофазная эпитаксия твердого раствора (Si₂)_{1-x}(CdS)_x из раствора–расплава Sn–Si–CdS сопровождается наращиванием на кремниевой подложке последовательных тонких слоев (Si₂)_{1-x}(CdS)_x с плавно изменяющимся составом, т. е. $0 \leq x \leq 0,01$. Переход от кремниевой подложки к эпитаксиальной пленке через буферный слой (Si₂)_{1-x}(CdS)_x, обогащенный кремнием, обусловлен минимизацией энергий искажений кристаллической решетки.

Получены $p\text{-Si-n-(Si}_2\text{)}_{1-x}\text{(CdS)}_x$ ($0 \leq x \leq 0,01$) структуры толщиной базового n -слоя $W \approx 20$ мкм в едином технологическом цикле методом жидкофазной эпитаксии.

Установлено, что в исследованных $p\text{-Si-n-(Si}_2\text{)}_{1-x}\text{(CdS)}_x$ структурах процессы токопрохождения определяются различными механизмами: при малых значениях плотности тока его рост можно связать с увеличением концентрации инжектированных носителей за счет простых локальных центров, а при больших значениях плотности тока — с протекающими в сложных комплексах рекомбинационными процессами. Таким образом, в $p\text{-Si-n-(Si}_2\text{)}_{1-x}\text{(CdS)}_x$ структуре с ростом приложенного напряжения более ярко проявляются ее выпрямляющие свойства.

Показано, что прямая ветвь ВАХ $p\text{-Si-n-(Si}_2\text{)}_{1-x}\text{(CdS)}_x$ ($0 \leq x \leq 0,01$) структур в прямом направлении тока $I \propto U^m$ состоит из нескольких участков, в которых m имеет различные значения. Эти участки появляются за счет образования сложных рекомбинационных комплексов типа «отрицательно заряженный акцептор + положительно заряженный ион внедрения» или «положительно заряженный донор + отрицательно заряженная вакансия», что в конечном счете приводит к «задержке» рекомбинационных процессов.

Установлено, что в таких твердых растворах скорость рекомбинации определяется не только природой комплексов и простых заряженных центров, но и одновременным участием комплексов и локальных центров.

Эпитаксиальные пленки твердых растворов $p\text{-Si-n-(Si}_2\text{)}_{1-x}\text{(CdS)}_x$ ($0 \leq x \leq 0,01$), полученные на кремниевых подложках, являются новыми полупроводниковыми материалами и могут быть использованы как фотоактивный элемент для разработки солнечных элементов. Изготовленные на их основе структуры и описание механизмов протекающих в них физических процессов представляют как теоретический, так и практический интерес для полупроводникового материаловедения.

Исследованные в работе эпитаксиальные пленки твердых растворов $p\text{-Si-n-(Si}_2\text{)}_{1-x}\text{(CdS)}_x$ ($0 \leq x \leq 0,01$) могут быть перспективными материалами для изготовления высокоточных диодов.

Благодарности

Авторы выражают признательность профессору А.С. Саидову за предоставление исследуемых образцов, профессору А.Ю. Лейдерману и д-ру физ.-мат. наук Ш.Н. Усмонову за плодотворные дискуссии и оказанную помощь при подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Алферов Ж.И. Наука и общество. СПб., Наука, 2005.
- [2] Саидов А.С. Жидкостная эпитаксия твердых растворов $(IV_2)_{1-x}(A^3B^5)_x$. *Узбекский физический журнал*, 1993, № 4, с. 48–51.
- [3] Саидов А.С., Усмонов Ш.Н., Каланов М.У. и др. Влияние гамма-облучения на релаксацию фотопроводимости и фоточувствительности твердого раствора $Si_{1-x}Sn_x$. *Гелиотехника*, 2011, т. 47, № 1, с. 58–61.
- [4] Саидов А.С., Усмонов Ш.Н., Каланов М.У. и др. Структурное и фотоэлектрическое исследование эпитаксиального слоя $Si_{1-x}Sn_x$. *Письма в ЖТФ*, 2010, т. 36, № 9, с. 104–110.
- [5] Tomakin M., Altunbas M., Bacaksiz E., et al. Preparation and characterization of new window material CdS thin films at low substrate temperature (< 300 K) with vacuum deposition. *Mater. Sci. Semicond. Process*, 2011, vol. 14, iss. 2, pp. 120–127.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2011.01.015>
- [6] Castro-Rodríguez R., Mendez-Gamboa J., Perez-Quintana I., et al. CdS thin films growth by fast evaporation with substrate rotation. *Appl. Surf. Sci.*, 2011, vol. 257, iss. 22, pp. 9480–9484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.06.040>
- [7] Castro-Rodríguez R., Oliva A.I., Sosa V., et al. Effect of indium tin oxide substrate roughness on the morphology, structural and optical properties of CdS thin films. *Appl. Surf. Sci.*, 2000, vol. 161, iss. 3-4, pp. 340–346.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(99\)00574-7](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(99)00574-7)
- [8] Kim M., Min B.-K., Kim C.-D., et al. Study of the physical property of the cadmium sulfide thin film depending on the process condition. *Curr. Appl. Phys.*, 2010, vol. 10, iss. 3, pp. S455–S458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cap.2010.02.027>
- [9] Саидов А.С., Лейдерман А.Ю., Усмонов Ш.Н. и др. Вольт-амперная характеристика p - n -структур на основе непрерывного твердого раствора $(Si_2)_{1-x}(CdS)_x$. *Физика и техника полупроводников*, 2009, т. 43, № 4, с. 436–438.
- [10] Саидов А.С., Усмонов Ш.Н., Холиков К.Т. и др. Спектральная чувствительность твердого раствора $(Si_2)_{1-x}(CdS)_x$. *Письма в ЖТФ*, 2007, т. 33, № 20, с. 5–10.
- [11] Саидов М.С. Твердые растворы многокомпонентных полупроводниковых соединений с нанодфектами и примесные вольтаические эффекты в фотоэлементах. *Гелиотехника*, 2006, № 4, с. 48–54.
- [12] Saidov A.S., Razzakov A.Sh., Risaeva V.A., et al. Liquid-phase epitaxy of solid solution $(Ge_2)_{1-x}(ZnSe)_x$. *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)
- [13] Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. М., Металлургиздат, 1962.
- [14] 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.

[15] Зайнабидинов С.З., Мадаминов Х.М. Влияние рекомбинационных процессов на механизм токопрохождения в $p\text{-Si-nSi}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.04$) структурах. *Петербургский журнал электроники*, 2017, № 4, с. 8–13.

[16] Усмонов Ш.Н., Мирсагатов Ш.А., Лейдерман А.Ю. Исследование вольт-амперной характеристики гетероструктуры $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ в зависимости от температуры. *Физика и техника полупроводников*, 2010, т. 44, № 3, с. 330–334.

[17] Мирсагатов Ш.А., Лейдерман А.Ю., Атабоев О.К. Механизм переноса тока в инжекционном фотодиоде на основе структуры $\text{In-n}^+\text{-CdS-n-CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-p-Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te-Mo}$. *Физика твердого тела*, 2013, т. 55, № 8, с. 1524–1536.

Зайнабидинов Сирожиддин Зайнабидинович — д-р физ.-мат. наук, академик АН РУз, профессор кафедры «Физика» Андижанского государственного университета (Республика Узбекистан, 170100, Андижан, Университетская ул., д. 129).

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

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Зайнабидинов С.З., Мадаминов Х.М. Механизм токопрохождения в полупроводниковых $p\text{-Si-n-(Si}_2\text{)}_{1-x}\text{(CdS)}_x$ структурах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2020, № 4 (91), с. 58–72.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-4-58-72>

CHARGE TRANSPORT MECHANISM IN $p\text{-Si-n-(Si}_2\text{)}_{1-x}\text{(CdS)}_x$ SEMICONDUCTOR STRUCTURES

S.Z. Zainabidinov
Kh.M. Madaminov

prof_sirojiddin@mail.ru
aduxurshid@gmail.com
khurmad@mail.ru

Andijan State University, Andijan, Republic of Uzbekistan

Abstract

The paper shows that it is possible to use liquid phase epitaxy to obtain single-crystal substitutional solid solution $p\text{-Si-n-(Si}_2\text{)}_{1-x}\text{(CdS)}_x$ ($0 \leq x \leq 0.01$) on silicon substrates from Sn-Si-CdS solution melt in a palladium-purified hydrogen atmosphere. The manufacturing conditions resulting in perfect epitaxial layers with mirror surfaces exhibiting the best parameters are as follows: crystallization start temperature of 1100 °C;

Keywords

Solid solution, current-voltage characteristic, mobility, injection, recombination model, drift current mechanism

forced cooling rate of 1 degree/min. The epitaxial films obtained feature a thickness of 20 μm and the n conductivity type, specific resistances being 0.018 $\Omega\text{-cm}$. Investigation results concerning charge transfer mechanisms in $p\text{-Si-n-(Si}_2\text{)}_{1-x}\text{(CdS)}_x$ structures at room temperatures show that the forward current–voltage characteristic consists of several characteristic segments, and there are various mechanisms that drive charge transfer processes. At low current densities, the increase in current is due to growing concentration of injected carriers on account of simple local centres; at high densities, it is due to recombination processes in compound complexes inside which electron exchange takes place. This fact is what proves that the structure under consideration displays better rectifying properties with increasing voltage. We determined that these epitaxial films of $(\text{Si}_2)_{1-x}\text{(CdS)}_x$ ($0 \leq x \leq 0.01$) solid solutions are promising materials for high-current rectifier diodes

Received 25.10.2019

Accepted 12.12.2019

© Author(s), 2020

The study was conducted as part of the project (OT-F2-68) of the State Science and Engineering Program of the Republic of Uzbekistan

REFERENCES

- [1] Alferov Zh.I. Nauka i obshchestvo [Science and society]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2005.
- [2] Saidov A.S. Liquid epitaxy of $(\text{IV}_2)_{1-x}(\text{A}^3\text{B}^5)_x$ solid solutions. *Uzbekskiy fizicheskiy zhurnal*, 1993, no. 4, pp. 48–51 (in Russ.).
- [3] Saidov A.S., Usmonov Sh.N., Kalanov M.U., et al. Effect of gamma irradiation on photoconductivity and photosensitivity of $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$ solid solutions. *Appl. Sol. Energy*, 2011, vol. 47, no. 1, pp. 48–51. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0003701X11010142>
- [4] Saidov A.S., Usmonov Sh.N., Kalanov M.U., 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>
- [5] Tomakin M., Altunbas M., Bacaksiz E., et al. Preparation and characterization of new window material CdS thin films at low substrate temperature (< 300 K) with vacuum deposition. *Mater. Sci. Semicond. Process*, 2011, vol. 14, iss. 2, pp. 120–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2011.01.015>
- [6] Castro-Rodríguez R., Mendez-Gamboa J., Perez-Quintana I., et al. CdS thin films growth by fast evaporation with substrate rotation. *Appl. Surf. Sci.*, 2011, vol. 257, iss. 22, pp. 9480–9484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.06.040>

- [7] Castro-Rodríguez R., Oliva A.I., Sosa V., et al. Effect of indium tin oxide substrate roughness on the morphology, structural and optical properties of CdS thin films. *Appl. Surf. Sci.*, 2000, vol. 161, iss. 3-4, pp. 340–346.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(99\)00574-7](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(99)00574-7)
- [8] Kim M., Min B.-K., Kim C.-D., et al. Study of the physical property of the cadmium sulfide thin film depending on the process condition. *Curr. Appl. Phys.*, 2010, vol. 10, iss. 3, pp. S455–S458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cap.2010.02.027>
- [9] 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>
- [10] Saidov A.S., Usmonov Sh.N., Kholikov K.T., et al. Spectral sensitivity of $(\text{Si}_2)_{1-x}\text{(CdS)}_x$ solid solutions. *Tech. Phys. Lett.*, 2007, vol. 33, no. 10, pp. 853–855.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063785007100148>
- [11] Saidov M.S. Solid solutions of multicomponent semiconductor compounds with nanodefects and extrinsic voltaic effects in photocells. *Appl. Sol. Energy*, 2006, vol. 42, no. 4, pp. 32–36.
- [12] 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)
- [13] Hansen M., Anderko K. Constitution of binary alloys. McGraw Hill, 1958.
- [14] Leyderman A.Yu., Minbaeva M.K. Rapid growth mechanism of direct current in semiconductor diode structures. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 1996, vol. 30, no. 10, pp. 1729–1738 (in Russ.).
- [15] Zaynabidinov S.Z., Madaminov Kh.M. The impact of recombination processes on the current-carrying process in $p\text{Si-nSi}_{1-x}\text{Sn}_x$ ($0 \leq x \leq 0.04$) structures. *Peterburgskiy zhurnal elektroniki* [Petersburg Electronics Journal], 2017, no. 4, pp. 8–13 (in Russ.).
- [16] Usmonov Sh.N., Mirsagatov Sh.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>
- [17] Mirsagatov Sh.A., Leyderman A.Yu., Ataboev O.K. Mechanism of charge transfer in injection photodiodes based on the $\text{In-n}^+\text{-CdS-n-CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-p-Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te-Mo}$ structure. *Phys. Solid State*, 2013, vol. 55, no. 8, pp. 1635–1646.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063783413080192>

Zainabidinov S.Z. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Academician of Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Professor, Department of Physics, Andijan State University (Universitetskaya ul. 129, Andijan, 170100 Republic of Uzbekistan).

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:

Zainabidinov S.Z., Madaminov Kh.M. Charge transport mechanism in $p\text{-Si-n-(Si}_2\text{)}_{1-x}\text{(CdS)}_x$ semiconductor structures. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2020, no. 4 (91), pp. 58–72 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-4-58-72>

В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла в свет монография авторов

М.П. Галанина, Е.Б. Савенкова

**«Методы численного анализа
математических моделей»**

Изложены методы решения задач линейной алгебры, систем нелинейных алгебраических уравнений, интерполяция функций, методы численного интегрирования и дифференцирования, численные методы решения задачи Коши и краевых задач для систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Приведены основы общей теории разностных схем и ее применение к построению и анализу методов численного решения эллиптических, параболических и гиперболических уравнений, а также численные методы решения интегральных уравнений. Представлены методы генерации сеток для многомерных задач математической физики, многосеточные методы решения, численные методы для решения уравнения переноса и уравнений газовой динамики, алгоритмические основы метода конечных элементов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

+7 (499) 263-60-45

press@bmstu.ru

<https://bmstu.press>

