

**СТРУКТУРА, МОРФОЛОГИЯ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x}\text{(Ge}_2\text{)}_x$** С.З. Зайнабидинов¹А.С. Саидов²А.Й. Бобоев¹Д.П. Абдурахимов¹

prof_sirojiddin@mail.ru

amin@scient.uz

aboboevscp@gmail.com

dilhayota@gmail.com

¹ Андижанский государственный университет им. З.М. Бабура,
Андижан, Республика Узбекистан² Физико-технический институт НПО «Физика–Солнце»

Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, Республика Узбекистан

Аннотация

Изучены структурные свойства тонкопленочных твердых растворов $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$, выращенных методом жидкофазной эпитаксии на подложках монокристаллов GaAs. Полученные эпитаксиальные слои имели толщину 10 мкм и удельное сопротивление 0,17 Ом · см p -типа проводимости. Рентгенографический анализ показал, что полученные пленки являются монокристаллическими с нановключениями примесных атомов и дефектов решетки размерами до 49 нм и кристаллографической ориентацией (100), имеют сфалеритную структуру типа ZnS. Морфологические исследования с использованием атомно-силовой микроскопии показали, что наблюдаемые на поверхности эпитаксиальных слоев $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ наноконусы обусловлены присутствием в них атомов Ge. В соответствии с результатами исследований, проведенных методом рентгеновской дифракции, диаметры оснований наноконусов находятся в пределах 70...90 нм, высота — 3...12 нм. Спектры фоточувствительности этих твердых растворов имеют своеобразные флуктуации, обусловленные образованием в них различных комплексов заряженных ионов. Результаты анализа спектров фоточувствительности гетероструктур $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x}\text{(Ge}_2\text{)}_x$ получены с использованием программы *Wolfram Mathematica 7*. Установлено, что спектр состоит из трех пиков, обусловленных соединениями As–Ge, Ge–Ge и Ga–Ge

Ключевые слова

Жидкофазная эпитаксия, рентгенограмма, подложка, пленка, сфалерит, наноконус, фоточувствительность

Поступила 09.06.2021

Принята 28.07.2021

© Автор(ы), 2022

Работа выполнена при поддержке Комитета по координации и развитию науки и технологий при Кабинете Министров Республики Узбекистан (грант № Ф2-68)

Введение. На поверхности тонких эпитаксиальных слоев, полученных методом жидкофазной эпитаксии, образуются различные наноразмерные объекты типа квантовых ям (КЯ), квантовых точек (КТ), нанобъединений примесных атомов и других объектов, обусловленных возникновением периодических упорядоченных структур в результате образования смачивающего слоя на поверхности и в объеме эпитаксиальных пленок полупроводниковых гетероструктур [1]. Основные факторы для формирования таких нанобъектов — различия размеров постоянных кристаллических решеток элементов нанобразований и матрицы. Спонтанное упорядочение наноструктур позволяет образовать включения узкозонных полупроводников в широкозонной матрице и тем самым создавать локализирующий потенциал для носителей тока. Периодические структуры таких включений могут создавать массивы КТ, КЯ и квантовых проволок или сверхрешеток. Исходя из энергии ковалентной связи атомов материалов нановключений и матрицы, авторы работы [2] предлагают разделить эти нанобъекты на КТ и КЯ следующим образом: если ширина запрещенной зоны нановключений больше ширины запрещенной зоны базового полупроводника $E_{g, A} > E_{g, B}$, то образуется КТ (рис. 1, а), если $E_{g, A} < E_{g, B}$, то — КЯ (рис. 1, б). Однако природа таких образований, их энергия взаимодействия, а также влияние их составляющих на структурные и фотоэлектрические свойства матрицы в зависимости от состава и типа примесных атомов остаются неисследованными.

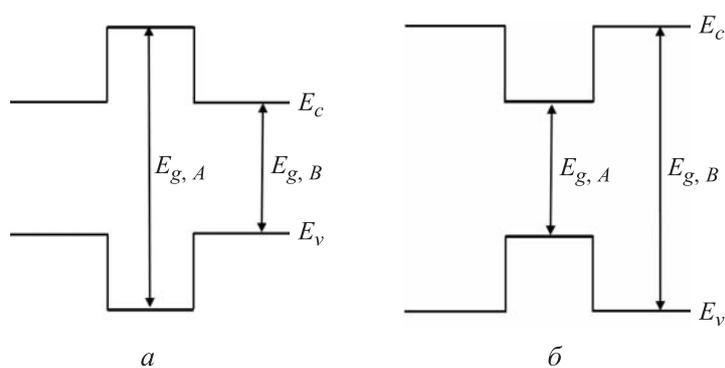


Рис. 1. Зонные диаграммы полупроводника с КТ (а) и КЯ (б)

Следовательно, создание новых многослойных гетероструктур с нанобъектами, исследование их морфологических структурных особенностей, механизмов примесного фотовольтаического эффекта и механизмов выброса-транспорта-разделения носителей заряда в структурах с КТ и КЯ весьма актуальны.

Образцы, методика эксперимента. Эпитаксиальные пленки получены на GaAs-подложке с удельным сопротивлением 250 Ом · см и толщиной 350 мкм *n*-типа проводимости методом жидкофазной эпитаксии из раствора–расплава (Sn–Ge–GaAs) в атмосфере очищенного палладием водорода. Начальная температура кристаллизации эпитаксиального слоя составляла 700 °С, скорость охлаждения раствора–расплава 1 °С/мин. Выращенные слои имели толщину 10 мкм, удельное сопротивление 0,17 Ом · см и *p*-тип проводимости.

Структурные исследования выращенных пленочных твердых растворов и подложек выполнены на рентгеновском дифрактометре *XRD-6100* (*Sahimdzu*, Япония, CuK α -излучения, $\lambda = 0,15418$ нм) по схеме θ – 2θ в режиме пошагового сканирования. Рентгеновское напряжение 40 кВ, ток 30 мА, диапазон сканирования 8,0...90°, скорость сканирования 2 град/мин, шаг выборки 0,02°. Экспериментальные результаты, полученные с использованием *XRD-6100*, анализировали методом Ритвельда в программе *FullProf Suite* (<https://www.ill.eu/sites/fullprof>).

Возбуждение фотолюминесценции (ФЛ) проводили лазерным излучением ($\lambda_{\text{л}} = 325$ нм) со стороны эпитаксиального слоя при температуре жидкого гелия (4 К), сигнал регистрировали на установке СДЛ-2. Спектральная зависимость фоточувствительности гетероструктур *n*-GaAs–*p*-(GaAs)_{1-x}(Ge₂)_x измерена оптическим спектрометром, оснащенным зеркальным монохроматором фирмы *Carl Zeiss Jena* с кварцевой оптикой, что давало возможность исследовать образцы в диапазоне значений энергии фотонов 1...3 эВ.

Исследования поверхности проводили с использованием промышленного атомно-силового микроскопа (АСМ) *Solver-NEXT*, позволяющего измерять рельеф поверхности и распределение потенциала по поверхности.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Рентгенограмма подложки GaAs приведена на рис. 2, *a*: на дифракционной картине присутствуют серия селективных структурных рефлексов типа {*H*00} (где *H* = 1, 2, 3, ...) с различной интенсивностью и структурные линии (200)_{GaAs} с $d/n = 0,2814$, (400)_{GaAs} с $d/n = 0,1412$, (600)_{GaAs} с $d/n = 0,09422$ нм. Это свидетельствует о том, что поверхность подложки соответствует кристаллографической плоскости (100). При углах рассеяния $2\theta_{(200)} = 28,2^\circ$, $2\theta_{(400)} = 58,8^\circ$ и $2\theta_{(600)} = 95,2^\circ$ заметны β -составляющие этих структурных линий. Кроме того, в дифракционном спектре в средних углах рассеяния наблюдается еще один структурный рефлекс (220)_{GaAs} с $d/n = 0,1998$ нм при $2\theta = 45,4^\circ$

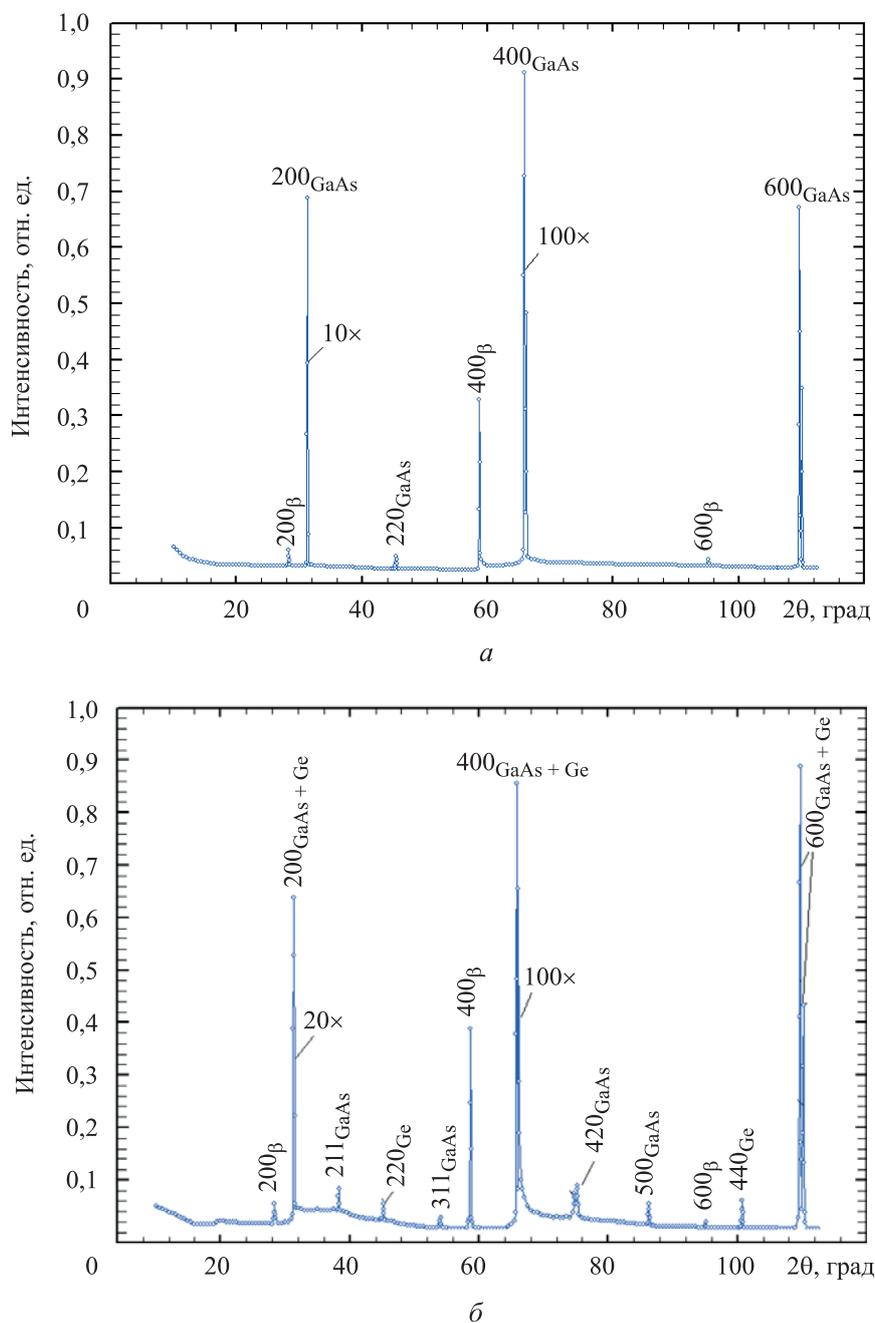


Рис. 2. Рентгенограммы подложки GaAs [4] (а) и эпитаксиальной пленки $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ (б)

со слабой интенсивностью. Высокая интенсивность ($2 \cdot 10^5$ имп \cdot с⁻¹) основного рефлекса $(400)_{\text{GaAs}}$, сравнительно узкая ширина ($FWHM = 0,0039$ рад) и ровный минимальный уровень неупругого фона свидетельствуют о доста-

точно высокой степени совершенства кристаллической решетки подложки. Экспериментально определенное значение параметра решетки подложки $a_{\text{GaAs}} = 0,56532$ нм, что очень близко к его табличному значению: $a_{\text{GaAs}} = 0,5646$ нм [3].

Рентгенограмма выращенной эпитаксиальной пленки $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ представлена на рис. 2, б, она существенно отличается от рентгенограммы подложки. Дифракционная картина пленки аналогична спектру пленки, полученной в [5]. Исключение составляет появление на рентгенограмме пленки рефлекса с ориентациями (400), который примерно на 10 % меньше рефлекса подложки. Интенсивность второго порядка (200) увеличилась на 85 %, интенсивность шестого порядка (600) — приблизительно в 2 раза. Эти данные свидетельствуют о неравномерном распределении парных атомов Ge и молекул из ионов ZnS по глубине в GaAs-решетке пленки. Исследования показали, что в приповерхностном слое их содержание существенно меньше, чем в более глубоких слоях эпитаксиальной пленки. Это подтверждает близость значений интенсивностей и заметное различие ширины основного рефлекса (400) подложки и пленки. В глубине поверхности парные ионы Ge и молекулы ZnS все больше замещают молекулы GaAs, что приводит к усилению искажения кристаллической решетки пленки, вследствие которого происходит нарушение условий дифракции Брэгга — Вульфа для высоких порядков отражений типа $\{H00\}$. В результате нормали этих атомных плоскостей приобретают произвольную ориентацию по отношению к направлению нормали соответствующих плоскостей совершенной кристаллической решетки. Вследствие этого увеличиваются потери интенсивностей дифракционного отражения (400) и происходит уменьшение толщины подложки, которое связано с увеличением толщины пленки. В этом случае появляется новое, энергетически более выгодное направление роста кристаллитов, обусловленное накоплением упругой энергии в локальных участках решетки, искаженных присутствием примесных атомов или молекул. Следовательно, увеличение толщины пленки способствует росту кристаллитов с другой ориентацией, что снижает степень монокристалличности выращиваемой пленки.

Наблюдаемое увеличение неупругого фона в малых и средних углах рассеяния (на 29 %) и снижение в дальних углах (на 32 %) связаны с локальным характером сосредоточения упругой энергии в решетке пленки и с наличием микроискажений в значительно меньших величинах (возможно, они являются следствием близости ионных радиусов элементов пленки: $r_{\text{As}} = 0,058$ нм, $r_{\text{Ga}} = 0,062$ нм и $r_{\text{Ge}} = 0,053$ нм) [3]. Наличие атомов Ge

в решетке твердого раствора подтверждается присутствием на рентгенограмме дифракционного отражения от плоскости (220) с $d/n = 0,2000$ нм ($2\theta = 45,3^\circ$) и (440) ($d/n = 0,1001$ нм, $2\theta = 100,8^\circ$) нанокристаллов Ge с другой ориентацией. Размеры нанокристаллов Ge составляли примерно 44 нм. Следовательно, примеси Ge в решетке GaAs распределены неравномерно, в дефектоспособных областях матричной решетки эти примеси преобразуются в нанокристаллы Ge. Предположительно, рост нанокристаллов Ge с другой ориентацией связан со скоростью релаксационного процесса упругого напряжения в эпитаксиальном слое при выращивании. Значение параметра решетки нанокристаллов Ge, определенное по рентгенограмме, составило $a_{Ge} = 0,5662$ нм, что близко к его табличному значению $a_{Ge} = 0,5657$ нм [3]. На рентгенограмме также присутствуют три более слабо выраженных отражения (211)_{GaAs} с $d/n = 0,2305$ нм ($2\theta = 38,5^\circ$), (311)_{GaAs} с $d/n = 0,1689$ нм ($2\theta = 54,3^\circ$) и (500)_{GaAs} с $d/n = 0,1128$ нм ($2\theta = 86,1^\circ$), которые свойственны сфалеритным структурам [6]. Отношение их интенсивностей к интенсивностям основного рефлекса (400) оценивается как $I(211)/I(400) = 8,73 \cdot 10^{-4}$, $I(311)/I(400) = 3,24 \cdot 10^{-4}$ и $I(500)/I(400) = 5,78 \cdot 10^{-4}$. Эти значения несколько выше, чем 10^{-4} , соответствующее равномерному распределению примесей в алмазоподобной решетке [7]. Ввиду близости параметров решетки монокристалла Ge ($a_{Ge} = 0,56576$ нм) и соединений GaAs ($a_{GaAs} = 0,5646$ нм) [4] на рентгенограмме пленки селективные рефлексы типа $\{H00\}$ (где $H = 2, 4$) при малых углах рассеяния совпадали по угловому положению с такими же линиями рентгенограммы подложки.

Узкая ширина ($FWHM = 5,36 \cdot 10^{-3}$ рад) и большая интенсивность ($2 \cdot 10^5$ имп \cdot с⁻¹) основного рефлекса (400)_{GaAs + Ge} свидетельствуют о высокой степени совершенства кристаллической решетки твердого раствора [8], т. е. выращенная пленка является монокристаллической с ориентацией (100). Размеры субкристаллитов (блоков) пленки, оцененные по ширине пика методом Саляково — Шеррера [9], составили около 49 нм.

Рельеф поверхности эпитаксиальных пленок (GaAs)_{1-x}(Ge₂)_x изучали с использованием АСМ. Трехмерное изображение эпитаксиальной пленки приведено на рис. 3. На поверхности пленок образуются отдельные нанобъекты различного размера. Физические свойства эпитаксиальных слоев сильно зависят от формы и плотности (телесного угла) наноконуса [10]: если угол составляет около 1,047 рад, то наноконус представляет собой систему КТ (0D-систему), если угол стремится к 3,14 рад, то наноконус вырождается в КЯ (2D-систему); если угол стремится к 0,

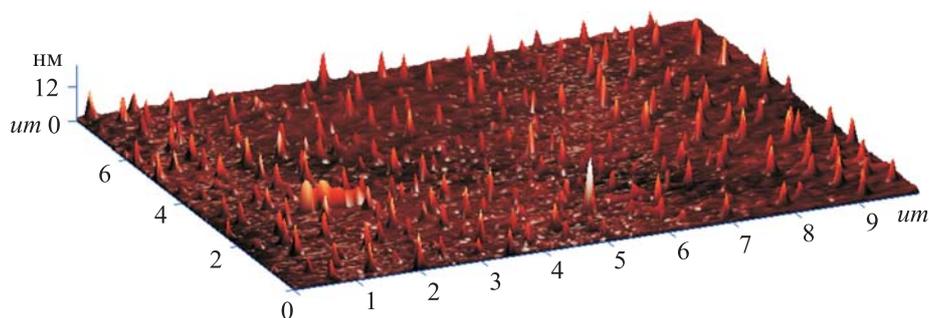


Рис. 3. Трехмерное изображение эпитаксиального слоя твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$

то — в систему проволок (1D-систему). В рассматриваемом случае телесный угол наноконуса стремится к $3,14$ рад, т. е. он является КЯ. Результаты анализа показали, что диаметр основания наноконусов варьируется в интервале $70\dots 90$ нм, высота — $3\dots 12$ нм. При эпитаксиальном выращивании различных полупроводниковых материалов энергия деформации, вызванная несоответствием параметров кристаллической решетки контактирующих материалов, является основным фактором для формирования самоорганизующихся трехмерных наноконусов [11]. Поскольку значения параметров постоянных решеток для систем GaAs/Ge ($0,323\%$) почти одинаковы, возможно формирование наноконусов Ge на поверхности пленок GaAs. Выращенные на подложке GaAs эпитаксиальные пленки $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ имели совершенную монокристаллическую структуру с ориентацией (100) [4]. В пленке присутствовали когерентно расположенные нанокристаллы Ge с параметрами решетки $a_{\text{Ge}} = 5,67 \text{ \AA}$ и размерами 44 нм по направлениям (100). Следует отметить, что параметр решетки нанокристаллов Ge в эпитаксиальной пленке примерно на $0,22\%$ больше его табличного значения. Возможно, это обусловлено деформацией кристаллической решетки эпитаксиальной пленки. Размеры наноконусов на поверхности пленки, полученные с использованием АСМ, и наноконусов в эпитаксиальной пленке, установленные рентгеновской дифракцией, имели близкие значения. На основе этого и результатов структурного анализа исследованных пленок можно сделать следующий вывод: наблюдаемые наноконусы на поверхности эпитаксиальных слоев обусловлены нанокристаллами Ge.

Для определения роли компонентов твердых растворов в наблюдаемых процессах исследованы спектры ФЛ при температуре 4 К и спектральная зависимость фоточувствительности изготовленных гетероструктур. Спектр

ФЛ поверхности эпитаксиального слоя $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ приведен на рис. 4. Спектр ФЛ твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ имеет широкую полосу, охватывающую весь инфракрасный диапазон спектра излучения с максимальным пиком при $\lambda_{\text{max}} = 852$ нм. Этот пик соответствует ширине запрещенной зоны GaAs, равной 1,45 эВ. На спектре наблюдается еще один пик с максимумом при 946 нм, который, возможно, связан с излучательным центром атомов Ge в запрещенной зоне GaAs.

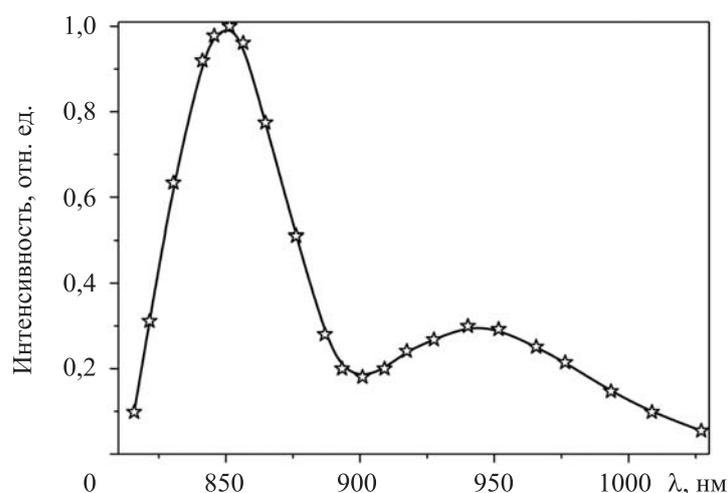


Рис. 4. Спектр ФЛ гетероструктур $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ при температуре гелия

Спектральная зависимость фоточувствительности гетероструктур $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ представлена на рис. 5. Фоточувствительность исследованных гетероструктур охватывает диапазон значений энергии фотонов 1,13...1,73 эВ. Фоточувствительность исследованной структуры начинается при энергии фотонов 1,13 эВ, максимум спектральной фоточувствительности твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ наблюдается при 1,34 эВ (~ 924 нм), что меньше 1,42 эВ (872 нм) запрещенной зоны GaAs. Здесь плавный спад спектральной чувствительности, возможно, обусловлен толщиной слоя твердых растворов $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$, эффективно поглощающих низкоэнергетические кванты.

В целях более глубокого изучения механизмов поглощения энергии фоточувствительность гетероструктуры оценивалась в программе *Wolfram Mathematica 7* в гауссовом приближении, результаты разложены на гауссовы линии. Исходные значения энергий E_i отдельных фотопиков задавали с учетом максимумов поглощения на экспериментальной кри-

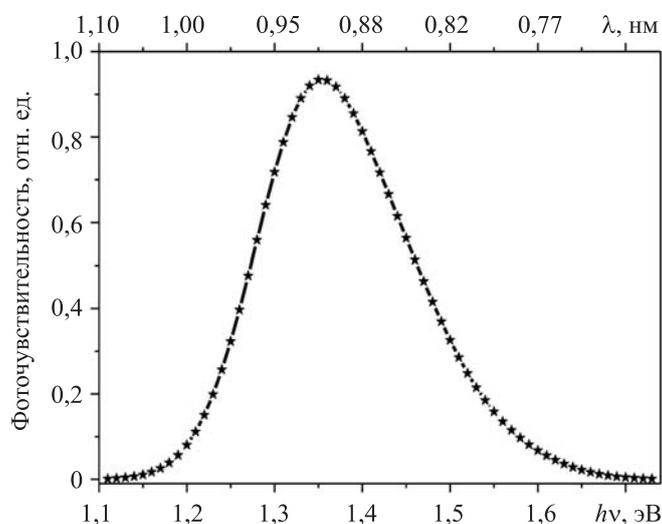


Рис. 5. Спектральная фоточувствительность гетероструктур $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ [12]

вой. В результате проанализированный спектр можно описать совокупностью трех гауссовых линий со значениями E_i , отвечающими оптимальному совпадению экспериментальной и суммарной аппроксимирующей гауссовых кривых. При этом разность значений E_i фотопиков и табличных значений не превышает 0,03 эВ. Три фотопика, соответствующие гауссовым кривым, наблюдались в интервале значений энергии фотонов, эВ: $E_{ph,1} = 1,1 \dots 1,61$; $E_{ph,2} = 1,16 \dots 1,65$; $E_{ph,3} = 1,35 \dots 1,7$ (рис. 6).

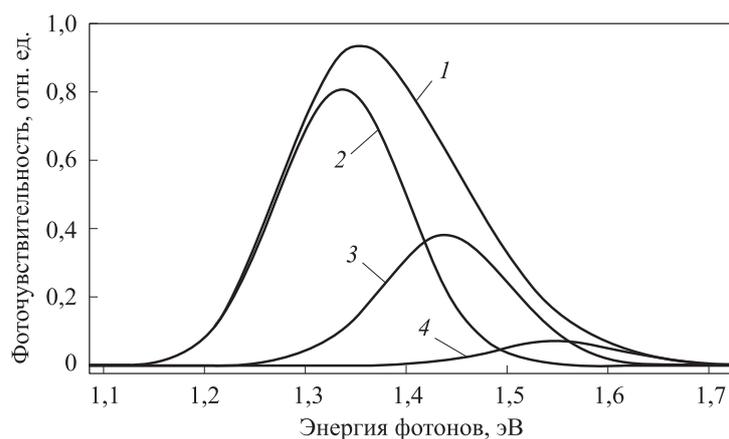


Рис. 6. Гауссово приближение спектральной фоточувствительности гетероструктур $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$:

1 — суммы расчетного гауссова спектра; 2–4 — гауссовы компоненты расчетного спектра [12]

Спектр первого гауссова компонента (кривая 1, см. рис. 6), который начинается с энергии 1,1 эВ, обусловлен узкозонным компонентом атомов Ge, размещенным в узлах Ga, образуя ковалентную связь с атомами As и мелкий энергетический уровень донорного характера [13]. Поскольку компоненты Ge₂ замещают атомы Ga и As в тетраэдрической решетке GaAs [14], связи Ga–As ослабляются под влиянием окружающих их атомов Ge. Энергия связи атомов Ge–Ge при их нахождении в тетраэдрической решетке Ge определяется шириной запрещенной зоны Ge ($E_{Ge} = 0,67$ эВ), и она меньше ширины запрещенной зоны GaAs ($E_{GaAs} = 1,42$ эВ), поэтому энергия ионизации связи Ge–Ge увеличивается при нахождении в окружении GaAs. Кроме того, спектр этого компонента резко возрастает, начиная с энергии фотонов 1,2 эВ, что свидетельствует об образовании комплексов между рекомбинационными центрами. Как отмечено выше, эти центры — атомы с мелкими донорными уровнями и собственный атом нанокристаллов Ge в слое GaAs, имеют акцепторную природу [15]. Это означает, что парные атомы Ge₂ частично замещают некоторые молекулы GaAs в дефектоспособных областях решетки GaAs и в этих местах образуются нанокристаллиты [16]. В связи с этим максимум первой гауссовой компоненты наблюдается при энергии фотонов 1,34 эВ, который обусловлен шириной запрещенной зоны твердого раствора (GaAs)_{1-x}(Ge₂)_x [17].

Результаты анализа на основе представления из [16] показывают, что в монокристаллах GaAs нанокристаллы Ge имеют собственный энергетический уровень с акцепторным характером.

Максимум второй гауссовой компоненты (кривая 2, см. рис. 6) наблюдается при 1,44 эВ, этот пик также соответствует рекомбинации зарядов из зоны проводимости на акцепторные состояния в *p*-GaAs, что подтверждают результаты ФЛ кристаллов *p*-GaAs при энергии фотонов 1,35... 1,65 эВ [17].

Максимум третьей гауссовой компоненты (кривая 3, см. рис. 6) наблюдается при 1,55 эВ, что, возможно, обусловлено изовалентными нанокристаллитами Ge в слое GaAs. Спектр внешней квантовой чувствительности фотоэлемента на основе гетероструктуры *p*-GaAs/*p*-Ge/*n*-Ge охватывает диапазон излучения 600...1800 мкм [17]. В проведенных экспериментах также наблюдался такой фотоотклик, который накладывается на область спектра энергии 1,25...1,72 эВ.

В целях объяснения экспериментальных данных и гауссовых приближений о спектральной зависимости фоточувствительности гетеро-

структуры $p\text{-(GaAs)}-n\text{-(GaAs)}_{1-x}\text{(Ge}_2)_x$ изучены роли отдельных компонентов исследуемого твердого раствора в этих процессах.

Пространственная конфигурация тетраэдрических связей в пределах нанокластеров, образуемых примесями Ge и GaAs в кристаллах GaAs, показана на рис. 7. Нанокластеры в твердом растворе $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ охватывают три связи As–Ge, одну Ge–Ge и три Ga–Ge, восемь атомов Ga, Ge и As. Поскольку элементарная ячейка материалов с алмазоподобной структурой состоит из восьми атомов, линейный размер нанокластера $5,6 \times 5,6 \times 5,6 \text{ \AA}$ почти равен параметру решетки GaAs. Это позволяет предположить, что базовая решетка исследуемого твердого раствора состоит из двойного GaAs и Ge, т. е. $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge})_x$. Кроме того, поскольку атомы Ge в решетке GaAs распределены равномерно, а другие — неравномерно, в дефектоспособных областях решетки матрицы эти атомы примеси преобразуются в нанокристаллы Ge.

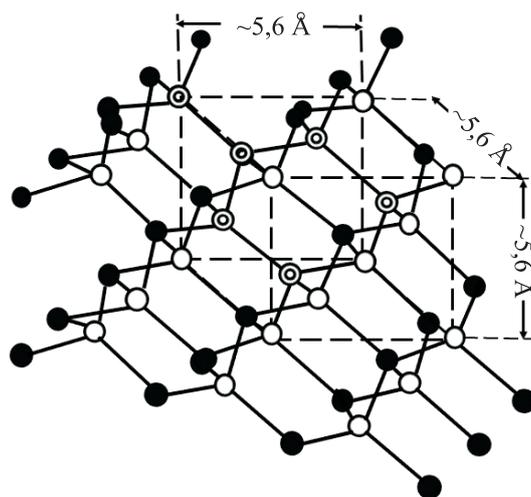


Рис. 7. Пространственная конфигурация тетраэдрических связей молекул непрерывных твердых растворов $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ [11]

Заключение. Выращенные методом жидкофазной эпитаксии пленки $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ являются монокристаллическими с кристаллографической ориентацией (100). Размеры образующихся субкристаллов (блоков) Ge в кристаллической решетке пленки, оцененные по ширине основного пика методом Сяляково — Шеррера, составляют около 49 нм; наличие атомов Ge в тетраэдрической решетке GaAs приводит к тому, что в его спектре фоточувствительности наблюдается пик, который принадлежит нанокристаллам Ge, объединенным с молекулами GaAs. Морфологические исследования

позволили установить, что наблюдаемые наноконусы на поверхности эпитаксиальных слоев $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ обусловлены примесными атомами Ge; результаты анализа спектров фоточувствительности $n\text{-GaAs-p}$ гетероструктур $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ с использованием *Wolfram Mathematica 7* показали, что в спектре общей гауссовой линии имеется крайняя длинноволновая область с энергией фотонов 1,1 эВ и три компонента, которые соответствуют соединениям As–Ge, Ge–Ge и Ga–Ge и подтверждают образование соответствующих энергетических уровней, связанных с такими соединениями в запрещенной и валентной зонах GaAs.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Моисеев К.Д., Пархоменко Я.А., Гущина Е.В. и др. Особенности эпитаксиального роста указанных квантовых точек InSb на подложке InAs. *Физика и техника полупроводников*, 2009, т. 43, № 8, с. 1142–1150.
- [2] 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>
- [3] Равдель А.А., Пономарева А.М. Краткий справочник физико-химических величин. СПб., Иван Федоров, 2003.
- [4] Zaynabidinov S.Z., Saidov A.S., Leiderman A.Yu., et al. Growth, structure, and properties of GaAs-based $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ epitaxial films. *Semiconductors*, 2016, vol. 50, no. 1, pp. 59–65. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782616010231>
- [5] Бобоев А.Й., Хамраева Р.Н., Рустамова В.М. Формирование нанокристаллов Ge и ZnSe в эпитаксиальной пленке $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$. *Матер. 52-й Международ. науч. студ. конф. «Физические методы в естественных науках»*. Новосибирск, НГУ, 2014, с. 10–11.
- [6] Шульпина И.Л., Кютт Р.Н., Ратников В.В. и др. Методы рентгеновской дифракционной диагностики сильнолегированных монокристаллов полупроводников. *ЖТФ*, 2010, т. 80, № 4, с. 105–114.
- [7] Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М., Металлургия, 1970.
- [8] Фетисов Г.В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. М., ФИЗМАТЛИТ, 2007.
- [9] Шаренкова Н.В., Каминский В.В., Петров С.Н. Размеры областей когерентного рассеяния рентгеновского излучения в тонких пленках SmS и их визуализация. *ЖТФ*, 2011, т. 81, № 9, с. 144–146.
- [10] Medvid A., Onufrijevs P., Jarimaviciute-Gudaitiene R., et al. Formation mechanisms of nano and microcones by laser radiation on surfaces of Si, Ge, and SiGe crystals. *Nanoscale Res. Lett.*, 2013, vol. 8, no. 1, art. 264. DOI: <https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-264>

- [11] Дубровский В.Г. Теория формирования эпитаксиальных наноструктур. М., ФИЗМАТЛИТ, 2009.
- [12] Бобоев А.Й., Усмонов Ж.Н., Махмудов Х.А. и др. Фотоэлектрические свойства $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x}\text{(Ge}_2\text{)}_x$ гетероструктур с нанокристаллами германия. *Научный вестник НамГУ*, 2020, № 1, с. 58–63.
- [13] Хлудков С.С. Диффузия примесей в арсениде галлия, диффузионные структуры и приборы. *Вестник Томского государственного университета*, 2005, № 285, с. 84–94.
- [14] Saidov M.S. Low-temperature crystallization of semiconductor solid solutions that are promising for the realization of the extrinsic thermo photovoltaic effect. *Appl. Sol. Energy.*, 2007, vol. 43, no. 1, pp. 45–48.
DOI: <https://doi.org/10.3103/S0003701X0701015X>
- [15] Журавлев К.С., Чикичев С.И., Штаске Р. и др. Исследование комплексообразования в эпитаксиальном сильно легированном $p\text{-GaAs:Ge}$ методом фотолюминесценции. *Физика и техника полупроводников*, 1990, т. 24, № 9, с. 1645–1649.
- [16] Aleshkin V.Ya., Dubinov A.A., Kudryavtsev K.E., et al. 1.3 μm Photoluminescence of Ge/GaAs multi-quantum-well structure. *J. Appl. Phys.*, 2014, vol. 115, iss. 4, art. 043512. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4863121>
- [17] Хвостиков В.П., Лунин Л.С., Ратушный В.И. и др. Фотообразователи на основе GaAs/Ge гетероструктур, полученных методом низкотемпературной ЖФЭ. *Письма в ЖТФ*, 2003, т. 29, № 14, с. 46–49.

Зайнабидинов Сиражиддин Зайнабидинович — академик Академии наук Республики Узбекистан, д-р физ.-мат. наук, профессор, Андижанский государственный университет им. З.М. Бабура (Республика Узбекистан, Андижан, 170100, ул. Университетская, д. 129).

Саидов Амин Сафарбоевич — д-р физ.-мат. наук, профессор, Физико-технический институт НПО «Физика–Солнце» Академии наук Республики Узбекистан (Республика Узбекистан, 100084, Ташкент, ул. Чингиза Айтматова, д. 2Б).

Бобоев Акрамжон Йулдашбоевич — канд. физ.-мат. наук, доцент, Андижанский государственный университет им. З.М. Бабура (Республика Узбекистан, Андижан, 170100, ул. Университетская, д. 129).

Абдурахимов Дилхаётжон Пулатжон угли — докторант, Андижанский государственный университет им. З.М. Бабура (Республика Узбекистан, Андижан, 170100, ул. Университетская, д. 129).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Зайнабидинов С.З., Саидов А.С., Бобоев А.Й. и др. Структура, морфология и фотоэлектрические свойства гетероструктуры $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x}\text{(Ge}_2\text{)}_x$. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2022, № 1 (100), с. 72–87.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-1-72-87>

STRUCTURE, MORPHOLOGY AND PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF n -GaAs- p -(GaAs) $_{1-x}$ (Ge $_2$) $_x$ HETEROSTRUCTURE

S.Z. Zaynabidinov¹

A.S. Saidov²

A.Y. Boboev¹

D.P. Abdurahimov¹

prof_sirojiddin@mail.ru

amin@scient.uz

aboboevscp@gmail.com

dilhayota@gmail.com

¹ Andijan State University named after Z.M. Babur, Andijan, Republic of Uzbekistan

² Physical-Technical Institute NGO “Physics-Sun”, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan

Abstract

The paper studies the structural properties of the thin-film (GaAs) $_{1-x}$ (Ge $_2$) $_x$ solid solutions grown by liquid-phase epitaxy on single crystal GaAs substrates. The obtained epitaxial layers were 10 μ m thick, had a 0.17 $\Omega \cdot$ cm resistivity of p -type conductivity. X-ray diffraction analysis showed that the obtained films are monocrystalline with nanoinclusions with block sizes up to 49 nm, with a crystallographic orientation (100), and have a sphalerite structure of the ZnS type. Morphological studies using AFM showed that the nanocones on the surface of the epitaxial (GaAs) $_{1-x}$ (Ge $_2$) $_x$ layers are due to Ge atoms in them. The analysis revealed that the diameter of the nanocones' bases is in the range from 70 to 90 nm, and the height is from 3 to 12 nm. The sizes of such nanocones, determined by the X-ray diffraction method, were close to these values. The photosensitivity spectra of these solid solutions exhibit peculiar fluctuations due to various complexes of charged atoms in them. Analysis of the photosensitivity spectrum of n -GaAs- p -(GaAs) $_{1-x}$ (Ge $_2$) $_x$ heterostructures using the *Wolfram Mathematics 7* program showed that the spectrum consists of three peaks due to As-Ge, Ge-Ge and Ga-Ge

Keywords

Liquid-phase epitaxy, X-ray diffraction pattern, substrate, film, sphalerite, nanocone, photosensitivity

Received 09.06.2021

Accepted 28.07.2021

© Author(s), 2022

This work was supported by the Committee for Coordination Science and Technology Development under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan (grant no. F2-68)

REFERENCES

- [1] Moiseev K.D., Parkhomenko Ya.A., Gushchina E.V., et al. Specific features of the epitaxial growth of narrow-gap InSb quantum dots on an InAs substrate. *Semiconductors*, 2009, vol. 43, no. 8, pp. 1102–1109. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782609080259>
-

- [2] 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>
- [3] Ravdelya A.A., Ponomareva A.M. *Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin* [Brief handbook on physical-chemical figures]. St. Petersburg, Ivan Fedorov Publ., 2003.
- [4] Zaynabidinov S.Z., Saidov A.S., Leiderman A.Yu., et al. Growth, structure, and properties of GaAs-based $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ epitaxial films. *Semiconductors*, 2016, vol. 50, no. 1, pp. 59–65. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782616010231>
- [5] Boboev A.Y., Khamraeva P.N., Rustamova V.M. [Formation of Gc and ZnSe nanocrystals in $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ epitaxial film]. *Mater. 52-y Mezhdunar. nauch. stud. konf. "Fizicheskie metody v estestvennykh naukakh"* [Proc. 52 Int. Sci. Student Conf. Physical Methods in Natural Sciences]. Novosibirsk, NGU, 2014, pp. 10–11 (in Russ.).
- [6] Shul'pina I.L., Kyutt R.N., Ratnikov V.V., et al. X-ray diffraction diagnostics methods as applied to highly doped semiconductor single crystals. *Tech. Phys.*, 2010, vol. 55, no. 4, pp. 537–545. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784210040183>
- [7] Gorelik S.S., Rastorguev L.N., Skakov Yu.A. *Rentgenograficheskiy i elektronno-opticheskiy analiz* [X-ray and electro-optical analysis]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970.
- [8] Fetisov G.V. *Sinkhrotronnoe izluchenie. Metody issledovaniya struktury veshchestv* [Synchrotron emission. Research methods for materials structure]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2007.
- [9] Sharenkova N.V., Kaminskii V.V., Petrov S.N. Sizes of X-ray radiation coherent domains in thin SmS films and their visualization. *Tech. Phys.*, 2011, vol. 56, no. 9, art. 1363. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784211090209>
- [10] Medvid A., Onufrijevs P., Jarimaviciute-Gudaitiene R., et al. Formation mechanisms of nano and microcones by laser radiation on surfaces of Si, Ge, and SiGe crystals. *Nanoscale Res. Lett.*, 2013, vol. 8, no. 1, art. 264. DOI: <https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-264>
- [11] Dubrovskiy V.G. *Teoriya formirovaniya epitaksial'nykh nanostruktur* [Theory of epitaxial nanostructures formation]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2009.
- [12] Boboev A.Y., Usmonov J.N., Makhmudov Kh.A., et al. Photoelectric properties $n\text{-GaAs-p}-(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ heterostructures with germanium nanocrystals. *Nauchnyy vestnik NamGU*, 2020, iss. 1, pp. 58–63 (in Russ.).
- [13] Khludkov S.S. Diffusion of impurities in GaAs, diffusion structures and devices. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tomsk State University Journal], 2005, no. 285, pp. 84–94 (in Russ.).
- [14] Saidov M.S. Low-temperature crystallization of semiconductor solid solutions that are promising for the realization of the extrinsic thermo photovoltaic effect. *Appl. Sol. Energy*, 2007, vol. 43, no. 1, pp. 45–48. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0003701X0701015X>

[15] Zhuravlev K.S., Chikichev S.I., Shtaske R., et al. Study on complexing in epitaxial heavily-doped p -GaAs:Ge by a photoluminescence method. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 1990, vol. 24, no. 9, pp. 1645–1649 (in Russ.).

[16] Aleshkin V.Ya., Dubinov A.A., Kudryavtsev K.E., et al. 1.3 μm Photoluminescence of Ge/GaAs multi-quantum-well structure. *J. Appl. Phys.*, 2014, vol. 115, iss. 4, art. 043512. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4863121>

[17] Khvostikov V.P., Lunin L.S., Ratushnyy V.I., et al. Photomaker based on GaAs/Ge heterostructure obtained by low-temperature liquid phase epitaxy method. *Pis'ma v ZhTF*, 2003, vol. 29, no. 14, pp. 46–49 (in Russ.).

Zaynabidinov S.Z. — Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Andijan State University named after Z.M. Babur (Universitetskaya ul. 129, Andijan, 170100 Republic of Uzbekistan).

Saidov A.S. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Physical-Technical Institute NGO “Physics-Sun”, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (Chingiz Aytmatov ul. 2B, Tashkent, 100084 Republic of Uzbekistan).

Boboev A.Y. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor, Andijan State University named after Z.M. Babur (Universitetskaya ul. 129, Andijan, 170100 Republic of Uzbekistan).

Abdurahimov D.P. — Doctoral Student, Andijan State University named after Z.M. Babur (Universitetskaya ul. 129, Andijan, 170100 Republic of Uzbekistan).

Please cite this article in English as:

Zaynabidinov S.Z., Saidov A.S., Boboev A.Y., et al. Structure, morphology and photoelectric properties of n -GaAs- p -(GaAs) $_{1-x}$ (Ge $_2$) $_x$ heterostructure. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2022, no. 1 (100), pp. 72–87 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-1-72-87>