

**РЕНТГЕНОДИФРАКЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$,
ВЫРАЩЕННЫХ НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ**

С.З. Зайнабидинов

prof_sirojiddin@mail.ru

А.Й. Бобоев

aboboevscp@gmail.com

Н.Ю. Юнусалиев

nyunusaliyev1997@gmail.com

У.Р. Каримбердиев

karimberdiyevu417@gmail.com

Ш.И. Одилов

shodilovphd@gmail.com

АндГУ, Андижан, Республика Узбекистан

Аннотация

Представлены результаты рентгеноструктурного исследования эпитаксиальных пленок $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$, выращенных методом жидкостной эпитаксии на кремниевых подложках с кристаллографической ориентацией (111). Выращенные эпитаксиальные пленки представляют собой твердые растворы $(\text{Ge}_2)_{1-y}(\text{ZnSe})_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ с постепенно изменяющимся молярным составом ($0 \leq x \leq 0,72$ и $0 \leq y \leq 0,46$), в которых осуществляется взаимное замещение компонентов. Происходит формирование слоя, обогащенного широкозонными соединениями ZnSe и $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$, в переходной области между подложкой и поверхностными слоями пленки. Установлено, что полученная эпитаксиальная пленка представляет собой монокристалл с кристаллографической ориентацией (111), состоящий из элементарных ячеек алмазоподобной структуры с параметром решетки $a_{exp} = 0,5658$ нм. Результаты анализа показали, что нанокристаллиты соединений $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$, самопроизвольно сформировавшиеся в поверхностных областях эпитаксиальных слоев, имеют кубическую элементарную ячейку с параметром решетки 5,9978 нм и принадлежат фазовой группе $P4_3m$. Установлено следующее: размеры нанокристаллитов (33,9; 34,5; 34,9 нм) и их среднее значение (~ 34 нм) свидетельству-

Ключевые слова

Ge₂, ZnSe, GaAs_{1-δ}Bi_δ, эпитаксиальная пленка, монокристалл, кристаллическая решетка, алмазоподобная структура, нанокристаллит

ют о том, что нанокристаллиты имеют округ- Поступила 28.02.2025
лую геометрическую форму и формируются Принята 23.05.2025
преимущественно одинаковых размеров © Автор(ы), 2025

*Работа выполнена при поддержке Министерства инновационного
развития Республики Узбекистан (грант FZ-292154210)*

Введение. Решение некоторых научно-технических задач, связанных с расширением функциональности нано- и микроэлектронных систем полупроводниковой электронной продукции в широком температурном диапазоне, является одной из актуальных проблем современности [1, 2]. Несмотря на наличие множества публикаций, посвященных указанной проблеме, вопросы легирования монокристаллов Si, Ge, GaAs и других полупроводниковых материалов примесными атомами [3], которые создают различные энергетические уровни в пределах ширины запрещенной зоны, а также проблемы, связанные с введенными в процессе выращивания дефектами и частичной фазовой перестройкой под воздействием температуры и нейтронного излучения, остаются недостаточно изученными [4, 5]. Особенности поведения таких дефектов и их влияние на прохождение тока в полупроводниковых материалах и многослойных полупроводниковых структурах требуют дальнейших исследований. В то же время большой научный и практический интерес представляет определение оптимальных технологических условий для создания совершенных структур эпитаксиальных тонких пленок, а также выбор их необходимых компонентов и легирующих атомов, которые позволяют целенаправленно управлять их свойствами [6]. Исследования миграций молекулярных примесей и нанокристаллитов в твердых растворах, зависимость процессов прохождения тока от состава основного материала, а также механизмы взаимодействия нанокристаллитов в полупроводниковых материалах до сих пор остаются недостаточно изученными и требуют дальнейших исследований [7, 8].

Цель работы — получение методами рентгенодифракционных исследований экспериментальных данных о кристаллической структуре твердых растворов $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$, выращенных методом жидкофазной эпитаксии на подложках *n*-Si с кристаллографической ориентацией (100).

Методика эксперимента. Для экспериментальных исследований состояния поверхности твердых растворов $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ эпитаксиальные слои выращивали методом жидкофазной эпитаксии [9, 10] из висмутсодержащего раствора-расплава на кремниевые подложки с удельным сопротивлением 250 Ом·см, толщиной 350 мкм и проводимостью

n-типа. Выращивания выполняли в атмосфере очищенного водорода с использованием палладиевого фильтра. Начальная температура кристаллизации эпитаксиального слоя составляла 730 °С, скорость охлаждения раствора-расплава — около 1 °С/мин. Выращенные таким способом эпитаксиальные пленки имели толщину около 10 мкм, удельное сопротивление 0,1 Ом · см и проводимость *p*-типа.

Химический состав выращенных эпитаксиальных слоев изучен на рентгеновском микроанализаторе *Jeol JSM 5910 LV*. Структурно-фазовые состояния гетероструктур $n\text{-Si-}p\text{-(Ge}_2\text{)}_{1-x-y}\text{(ZnSe)}_x\text{(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ исследованы с использованием рентгеновского дифрактометра третьего поколения *Empyrean Malvern*. Рентгенодифракционные измерения проведены в геометрии Брэгга — Брентано в диапазоне значений углов $2\theta = 15 \dots 100^\circ$ с постоянной скоростью сканирования 1 °/мин с использованием CuK_α -излучения ($\lambda = 0,15418$ нм) по схеме $\theta-2\theta$ в режиме пошагового сканирования.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. По результатам анализа с использованием рентгеновского микроанализатора определен профиль распределения молекул соединений ZnSe, Ge₂ и GaAs_{1-δ}Bi_δ по толщине эпитаксиального слоя $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}\text{(ZnSe)}_x\text{(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ (рис. 1). С увеличением толщины эпитаксиального слоя молярные количества ZnSe и GaAs_{1-δ}Bi_δ сначала постепенно увеличиваются, достигая максимальных значений при $x = 0,72$ и $y = 0,46$. Это свидетельствует о высокой степени насыщенности используемого раствора-расплава соединениями ZnSe и GaAs_{1-δ}Bi_δ в зоне кристаллизации. Молярные количества ZnSe и GaAs_{1-δ}Bi_δ постепенно уменьшаются, достигая значений $x = 0,31$ и $y = 0,12$ в областях, близких к поверхности эпитаксиального слоя.

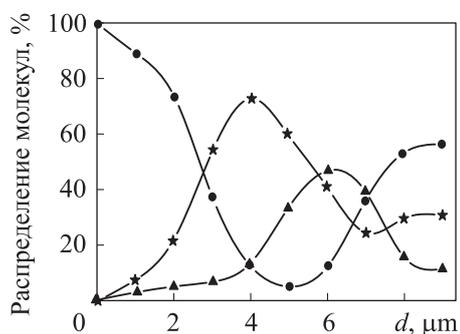


Рис. 1. Профиль распределения молекул соединений ZnSe (●), Ge₂ (★) и GaAs_{1-δ}Bi_δ (▲) по толщине эпитаксиального слоя $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}\text{(ZnSe)}_x\text{(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$

Рост эпитаксиального слоя осуществлялся в ограниченном объеме раствора-расплава, где растворимость ZnSe в жидком висмуте была в 3 раза, а растворимость GaAs_{1-δ}Bi_δ в 5 раз выше, чем растворимость Ge [11]. Это привело к постепенному

уменьшению молярных количеств ZnSe и GaAs_{1-δ}Bi_δ в направлении роста эпитаксиального слоя. Начиная с глубины 1 мкм от поверхности пленки молярное количество ZnSe и GaAs_{1-δ}Bi_δ не превышало 31 и 12 %. Таким образом, установлено, что выращенные эпитаксиальные пленки представляют собой твердые растворы (ZnSe)_{1-x-y}(Ge₂)_x(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_y с постепенно изменяющимся молярным составом (0 ≤ x ≤ 0,72 и 0 ≤ y ≤ 0,46). Происходит формирование слоя, обогащенного ZnSe и GaAs_{1-δ}Bi_δ, с широкой энергетической зоной в переходной области между подложкой и поверхностным слоем пленки. Рентгенограмма монокристаллической подложки Si приведена на рис. 2, а. Можно наблюдать дифракционные отражения высокой интенсивности с селективным характером, соответствующие кристаллографическим ориентациям (111)_{Si} и (333)_{Si} из серии (ННН), на углах рассеяния 2θ = 28,4° и 2θ = 94,9°. Кроме того, на углах рассеяния 2θ = 25,7° и 2θ = 83,3° обнаруживаются их β-компоненты. Это подтверждает, что поверхность монокристаллической подложки Si имеет кристаллографическую ориентацию (111).

На основе результатов анализа экспериментальных данных по основному дифракционному отражению (111) установлено, что размер субкристаллитов кремниевой подложки составляет 23 нм. Интенсивность дифракционной линии (4,46 · 10⁴ имп. · с⁻¹), ее полуширина (FWHM = 6,49 · 10⁻³ рад) и соответствие кристаллографической ориентации (111)_{Si} свидетельствуют о высокой степени упорядоченности атомной решетки подложки и низкой дефектности ее кристаллической структуры. Однако немонотонный характер неупругого фонового уровня в интервале углов рассеяния 10...60°, а также незначительное разделение структурного отражения (111)_{Si} на компоненты α₁ и α₂ излучений позволяют предположить наличие эластических микроискажений в кристаллической решетке подложки [12].

Однако наличие на рентгенограмме отражения при 2θ = 58,8°, соответствующего ориентации (222)_{Si}, может указывать на отклонения от идеальной монокристаллической структуры кремниевой подложки, поскольку подобные отражения, как правило, не проявляются при высокой кристаллической совершенности. Обычно такие структурные отражения не заметны на рентгенограммах кремния, свободного от различных микроискажений в кристаллической решетке. Наличие отражения указывает на существование микроискажений в кристаллической решетке подложки. Для количественного определения таких микроискажений используется отношение

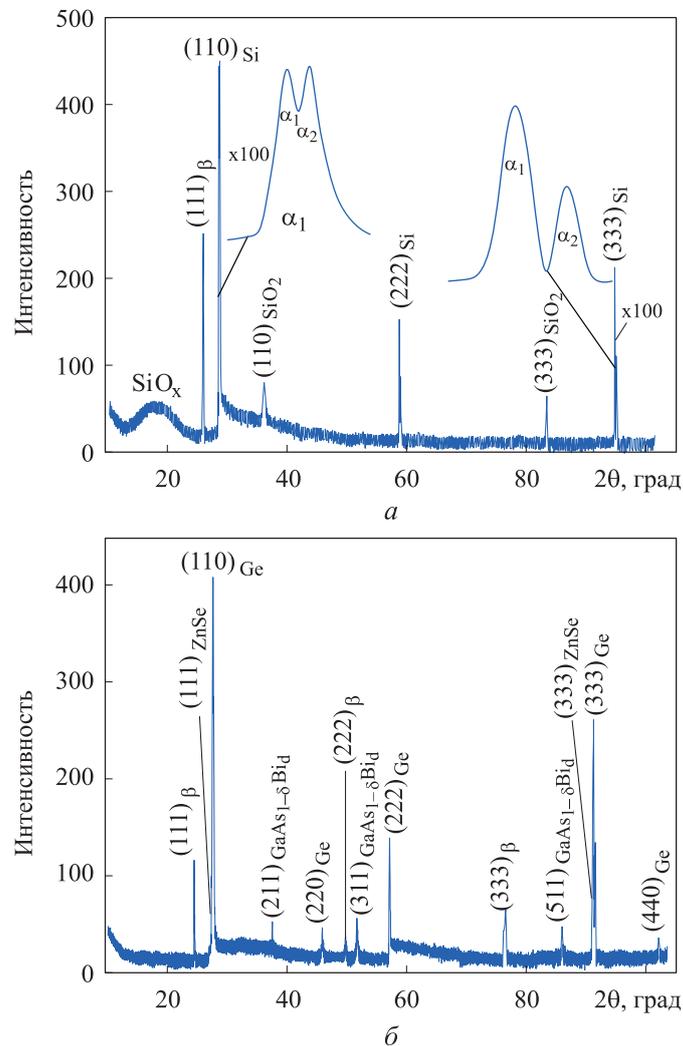


Рис. 2. Рентгенограммы кремниевой подложки (а) и эпитаксиальной пленки $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$, выращенной на кремниевых подложках (б)

интенсивности структурного отражения $(222)_{\text{Si}}$ к интенсивности основного структурного отражения $(111)_{\text{Si}}$. В рассматриваемом случае отношение этих интенсивностей составляет $3,4 \cdot 10^{-3}$, что превышает значение 10^{-4} , характерное для равномерного распределения атомов в кристаллической решетке алмазоподобных структур [13]. Это указывает на наличие механических напряжений в локальных областях кристаллической решетки кремния, вызванных неравномерным распределением кислорода, связанного с фоновыми примесями [14]. Однако заметное разделение структурного отражения $(333)_{\text{Si}}$ на компоненты α_1 и α_2 , в отличие от $(111)_{\text{Si}}$, свидетельствует

о том, что такие микроискажения формируются в поверхностных областях кремниевой подложки. Это может быть обусловлено различием ионных радиусов кремния и кислорода [15], а также незначительными напряжениями, возникающими вследствие температурного градиента во время роста кристалла [16]. Ввиду различий ионных радиусов атомы кислорода размещаются в приграничных областях кристаллической решетки и на смещенных узловых атомах, разделяющих субкристаллиты кремния, что приводит к насыщению незавершенных связей кремния в кристаллической решетке [17]. В свою очередь, это указывает на то, что в объеме кристаллитов располагаются только атомы кремния, а их кристаллическая структура обладает высокой симметрией, тогда как атомы кислорода формируют асимметричные кристаллиты на границах раздела субкристаллитов. В подтверждение этого предположения на рентгенограмме подложки при $2\theta = 35,9^\circ$ наблюдается структурное отражение, относящееся к фазе SiO_2 с кристаллографической ориентацией (110). Полуширина этого отражения ($\text{FWHM} = 1,1 \cdot 10^{-2}$ рад) свидетельствует о том, что в результате взаимодействия атомов кремния и кислорода формируются кристаллиты размерами 13,8 нм. Кроме того, результаты анализа экспериментальных данных этого структурного отражения позволили определить параметры кристаллической решетки SiO_2 . Вычисленные значения составляют $a_{\text{exp}} = b_{\text{exp}} = 0,5128$ нм, $c_{\text{exp}} = 0,8379$ нм, что достаточно хорошо согласуется с табличными значениями [18, 19].

На рентгенограмме подложки в области малых углов ($2\theta \approx 15^\circ$) наблюдается диффузное отражение, связанное с SiO_x . В результате анализа ширины этого отражения ($\text{FWHM} = 1,13 \cdot 10^{-1}$ рад) установлено, что оно не связано с кристаллитами, а представляет собой небольшие фрагменты размерами около 0,9 нм. Такие фрагменты формируются преимущественно в областях, близких к поверхности кремниевой подложки, и указывают на наличие ненасыщенных связей между атомами кремния [20]. Небольшие размеры фрагментов свидетельствуют об отсутствии дальнего порядка при размещении атомов кремния и кислорода. Поэтому такие фрагменты называются кластерами. В свою очередь, формирование подобных кластеров приводит к образованиям дополнительных микродефектов в кристаллической решетке кремния. В результате объемная доля нарушенных областей кристаллической решетки подложки увеличивает ее параметр. На основе анализа экспериментальных данных определено, что параметр решетки подложки составляет $a_s = 0,5436$ нм.

Рентгенограмма эпитаксиальной пленки, выращенной на кремниевых подложках, которая заметно отличается от рентгенограммы подложки, приведена на рис. 2, б. На рентгенограмме пленки интенсивность структурного отражения, соответствующего кристаллографической ориентации (111), уменьшилась на 8,5 %, тогда как интенсивность структурного отражения (333) увеличилась на 6 %. Эти отражения смещены в сторону меньших углов рассеяния по сравнению с аналогичными отражениями на рентгенограмме кремниевой подложки. На рентгенограмме пленки они наблюдаются при углах $2\theta \approx 27,31^\circ$ и $2\theta \approx 90,01^\circ$ (рис. 3, а). Это свидетельствует о формировании эпитаксиальных пленок на поверхности кремниевых подложек. Параметр решетки выращенной пленки определен на основе экспериментальных данных двух структурных отражений и составил $a_{т.р} = 0,566$ нм. Это значение больше параметра кристаллической решетки подложки ($a_{п} = 0,5436$ нм $<$ $a_{т.р} = 0,566$ нм) и близко к табличному значению для атомов германия ($a_{Ge} = 0,5657$ нм). В свою очередь, это указывает на то, что большинство атомов в эпитаксиальном слое состоит из атомов германия.

На рентгенограмме пленки при угле рассеяния $2\theta \approx 15^\circ$ диффузное отражение отсутствует. В результате уровень неупругого фона на рентгенограмме в области малых углов рассеяния ($10...50^\circ$) уменьшился на 37 %. Однако уровень неупругого фона в области средних углов рассеяния ($50...70^\circ$) увеличился на 45 %. Эти экспериментальные результаты указывают на то, что парные атомы германия частично занимают вакантные узлы в поверхностных областях кремниевой подложки. В то же время некоторые узловыые позиции остаются незанятыми. В результате на начальных стадиях роста формируются переходные нанослои (так называемый буферный слой), которые самопроизвольно образуются между подложкой и пленкой, состоящей из атомов германия. Этот процесс приводит к дальнейшему формированию эпитаксиальной пленки.

Интенсивность основного первого порядка структурного отражения (111) на рентгенограмме пленки ($4,1 \cdot 10^4$ имп. \cdot с $^{-1}$) и его полуширина ($\text{FWHM} = 5 \cdot 10^{-3}$ рад) свидетельствуют о высокой степени совершенства кристаллической решетки эпитаксиальной пленки. Полученные эпитаксиальные пленки являются монокристаллами с кристаллографической ориентацией (111). Характерный размер субкристаллитов (D_c) в эпитаксиальной пленке, определенный на основе анализа экспериментальных данных по отражению (111), составляет 29,8 нм. Таким образом, выращенная эпитаксиальная пленка представляет собой монокристалл с ори-

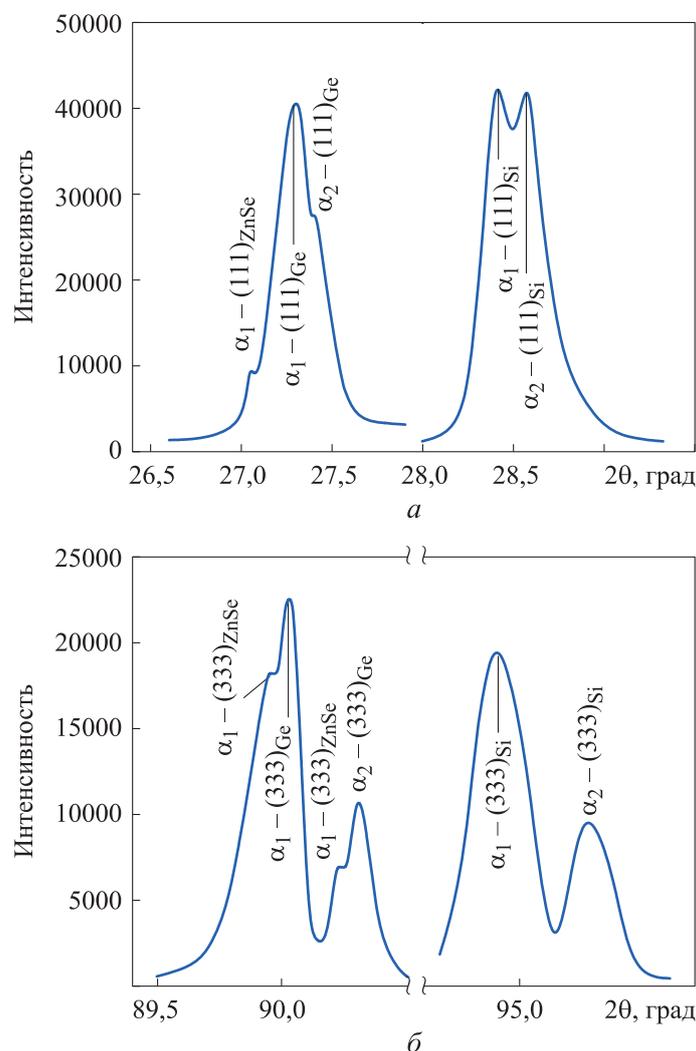


Рис. 3. Формы структурных отражений (111) (а) и (333) (б)

ентацией (111), а ее кристаллическая решетка состоит из элементарных ячеек алмазоподобной структуры.

Увеличение уровня неупругого фона рентгенограммы эпитаксиальной пленки в области средних углов рассеяния ($50...70^\circ$) и появление линии второго порядка (запрещенной) указывают на наличие микродефектов в кристаллической решетке твердого тела [21]. Как правило, такие микродефекты возникают вследствие несоответствия периодов решеток кристаллической подложки и эпитаксиальных слоев, которое составляет примерно 4 %. Рентгенограмма также показывает, что отражения первого и третьего порядков связаны с соединениями ZnSe. Это свидетельствует о частичном замещении молекул ZnSe спаренными атомами Ge. Кроме

того, интенсивность структурного отражения (111), соответствующего соединению ZnSe, ниже интенсивности структурного отражения (333) (см. рис. 3, а и б). Это указывает на то, что в объеме пленки значительное число молекул ZnSe замещается парными атомами Ge по сравнению с поверхностью пленки. Таким образом, размещение молекул ZnSe в узлах, занятых спаренными атомами Ge в объеме пленки, а также несоответствие параметров решеток подложки и эпитаксиального слоя (составляющее 4 %) приводят к возникновению микродефектов в кристаллической решетке. Такие микродефекты, формирующиеся в кристаллической решетке эпитаксиального слоя, постепенно распространяются в сторону поверхности выращенной пленки. В результате это приводит к формированию объемных дефектов на границах субкристаллитов и в областях, близких к поверхности.

В подтверждение сделанного вывода на рентгенограмме эпитаксиальной пленки при углах рассеяния $2\theta = 45,2^\circ$ и $2\theta = 100,52^\circ$ наблюдаются структурные отражения в других направлениях, соответствующих нанокристаллитам германия (220 и 440). Это указывает на наличие поликристаллических областей размерами 14 и 17 нм, расположенных на границах раздела субкристаллитов в пленке.

На рентгенограмме пленки при углах рассеяния $2\theta \approx 37,12^\circ$, $2\theta \approx 50,54^\circ$ и $2\theta \approx 84,48^\circ$ наблюдаются структурные линии, которые соответствуют кристаллографическим ориентациям (211), (311) и (511), они относятся к соединению $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ и интерпретируются как проявление нарушений в ориентационной упорядоченности кристаллитов (рис. 4). Их наличие указывает на определенные искажения кристаллической структуры, возникшие, вероятно, в процессе роста пленки. Возможной причиной этих нарушений может быть перераспределение компонентов твердого раствора вблизи поверхности под воздействием локальных механических напряжений, возникающих вследствие различий параметров решетки между матрицей и включенными атомами. В частности, не исключается взаимодействие атомов GaAs с атомами Bi из висмутсодержащего раствора-расплава, что может приводить к формированию нанокристаллитов с нарушенной ориентацией. На основе экспериментальных данных по этим дифракционным отражениям рассчитаны структурные параметры соединения $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$. Результаты анализа показали, что нанокристаллиты соединений $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$, самопроизвольно сформировавшиеся в поверхностных областях эпитаксиальных слоев, имеют кубическую элементарную ячейку с параметром решетки 0,5998 нм и принадлежат фазовой группе $R\bar{4}3m$.

Кроме того, на основании значений полуширины (FWHM) для этих отражений определены размеры нанокристаллитов, которые составляют 33,9, 34,5 и 34,9 нм. Примечательно, что средний размер этих нанокристаллитов примерно равен 34 нм. Это свидетельствует о том, что такие нанокристаллиты имеют геометрическую форму, основанную на окружности, и формируются в основном с одинаковыми размерами.

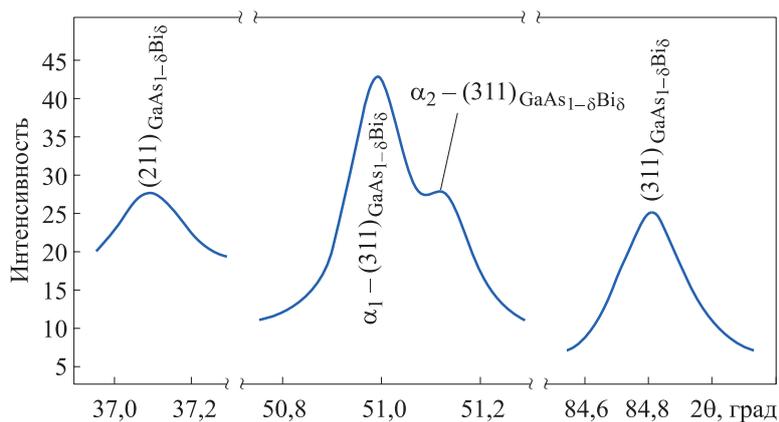


Рис. 4. Формы структурных отражений (211), (311) и (511)

Заключение. На основе рентгенодифракционных исследований твердых растворов эпитаксиальной пленки $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$, выращенной на кремниевых подложках, сделаны следующие выводы.

Выращенные эпитаксиальные пленки представляют собой твердые растворы состава $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ с постепенно изменяющимся молярным содержанием компонентов в пределах $0 \leq x \leq 0,72$ и $0 \leq y \leq 0,46$, что указывает на наличие взаимного замещения между элементами в кристаллической решетке.

Установлено формирование переходного слоя, обогащенного как широкозонными, так и узкозонными соединениями ZnSe и $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$, расположенного между кремниевой подложкой и верхними слоями эпитаксиальной пленки.

Полученная эпитаксиальная структура представляет собой монокристалл с преимущественной кристаллографической ориентацией (111). Кристаллическая решетка пленки образована элементарными ячейками алмазоподобного типа с экспериментально определенным параметром решетки 0,5658 нм.

Показано, что в поверхностных областях эпитаксиальных слоев соединение $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ формирует самоорганизованные нанокристаллиты

размером около 34 нм, обладающие кубической элементарной ячейкой с параметром решетки 0,5998 нм и относящиеся к пространственной группе $R\bar{4}3m$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Белоус А.И., Ефименко С.А., Турцевич А.С. Полупроводниковая силовая электроника. М., Техносфера, 2013.
- [2] Hossain N., Mobarak M.H., Mimona M.A., et al. Advances and significances of nanoparticles in semiconductor applications — a review. *Results Eng.*, 2023, vol. 19, art. 101347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101347>
- [3] Basu R. A review on single crystal and thin film Si–Ge alloy: growth and applications. *Adv. Mater.*, 2022, vol. 3, iss. 11, pp. 4489–4513. DOI: <https://doi.org/10.1039/D2MA00104G>
- [4] Демидов А.А., Рыбалка С.Б. Современные и перспективные полупроводниковые материалы для микроэлектроники следующего десятилетия (2020–2030 гг.) *Прикладная математика и физика*, 2021, т. 53, № 1, с. 53–72. DOI: <https://doi.org/10.52575/2687-0959-2021-53-1-53-72>
- [5] Зайнабидинов С.З., Саидов А., Каланов М. и др. Синтез, структура и электрофизические свойства гетероструктур $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(ZnSe)}_y$ (обзор). *Гелиотехника*, 2019, т. 55, с. 291–308.
- [6] Фомин Д.В., Новгородцев Н.С., Струков Д.О. и др. Формирование тонких пленок Mg_2Si на Si (111) и исследование их методом ЭОС и СХПЭЭ. *Вестник АмГУ*, 2021, т. 93, с. 30–34. DOI: <https://doi.org/10.22250/jasu.93.6>
- [7] Гапоненко С. Полупроводниковые нанокристаллы. *Наука и инновации*, 2020, № 8, с. 9–13. EDN: ОКРGRW
- [8] Гулякович Г.Н., Северцев В.Н., Шурчков И.О. Перспективы и проблемы полупроводниковой нанoeлектроники. *Инженерный вестник Дона*, 2012, т. 20, № 2, с. 315–319. EDN: PCRQIB
- [9] Саидов А.С., Раззаков А.Ш., Исмаилов Ш.К. и др. Жидкофазная эпитаксия твердых растворов $(\text{Ge}_2)_{1-x}\text{(InP)}_x$ и $(\text{GaAs})_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(ZnSe)}_y$. *Техника. Технологии. Инженерия*, 2017, № 2-1, с. 28–30. EDN: YNEWVF
- [10] Зайнабидинов С.З., Утамурадова Ш.Б., Бобоев А.Ю. Структурные особенности твердого раствора $(\text{ZnSe})_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ с различными нановключениями. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2022, № 12, с. 48–52. DOI: <https://doi.org/10.31857/S1028096022120342>
- [11] Зайнабидинов С.З., Саидов А.С., Лейдерман А.Ю. и др. Получение, структура и свойства эпитаксиальных пленок $(\text{GaAs})_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(ZnSe)}_y$ на основе GaAs. *Физика и техника полупроводников*, 2016, т. 50, № 1, с. 60–66. EDN: VPSAMN
- [12] Зайнабидинов С.З., Юлдашев Ш.У., Бобоев А.И. и др. Рентгеноструктурные и электронно-микроскопические исследования металлооксидных пленок

ZnO(S), полученных методом ультразвукового спрей-пиролиза. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, т. 112, № 1 (112), с. 78–92.

EDN: GFUKHQ

[13] Плотников В.А., Макаров С.В., Еремеев О.О. и др. Распределение кластеров, сформированных sp^2 - и sp^3 -связями, в углеродной алмазоподобной тонкой пленке. *ЖТФ*, 2021, т. 91, № 4, с. 615–619.

DOI: <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.04.50624.157-20>

[14] Червоный И.Ф., Бубинец А.В. Влияние кислорода и углерода на образование окислительных дефектов упаковки в монокристаллическом кремнии. *ScienceRise*, 2015, т. 11, № 2, с. 6–10. EDN: VFEXHT

[15] Zainabidinov S.Z., Boboev A.Y., Yunusaliyev N.Y. Effect of γ -irradiation on structure and electrophysical properties of S-doped ZnO films. *East Eur. J. Phys.*, 2024, no. 2, pp. 321–326. DOI: <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-2-37>

[16] 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. EDN: RCTRSV

[17] Сетюков О.А., Самойлов А.И. Влияние юстировки рентгеновского дифрактометра на зависимость периода решетки от экстраполяционной функции Нельсона — Райли. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2011, т. 77, № 8, с. 34–36. EDN: ODVXWV

[18] Ташметов М.Ю., Каланов М., Махкамов Ш. и др. Медь-кислородные нанокристаллиты в монокристаллах кремния, легированных медью. *Узбекский физический журнал*, 2018, т. 20, № 2, с. 90–97. DOI: <https://doi.org/10.52304/v20i2.33>

[19] Терехов В.А., Тетельбаум Д.И., Занин И.Е. и др. Дифракционные исследования формирования нанокристаллов кремния в структурах SiO_x/Si с ионной имплантацией углерода. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*, 2012, № 4, с. 54–59. EDN: REJPHH

[20] Скворцов А.М., Трифонова Т.А., Хуинь Конг Ту. Микроструктурирование монокристаллов кремния волоконным лазером в режиме высокоскоростного сканирования. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2015, т. 15, № 6, с. 1062–1071.

DOI: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-6-1062-1071>

[21] Utamuradova Sh.B., Daliev Sh.Kh., Khamdamov J.J., et al. Research of the impact of silicon doping with holmium on its structure and properties using Raman scattering spectroscopy methods. *East Eur. J. Phys.*, 2024, vol. 2, art. 274.

DOI: <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-2-28>

Зайнабидинов Сиражиддин Зайнабидинович — д-р физ.-мат. наук, профессор, АндГУ (Республика Узбекистан, 170100, Андижан, ул. Университетская, д. 129).

Бобоев Акрамжон Йулдашбоевич — д-р физ.-мат. наук, декан физико-технического факультета АндГУ (Республика Узбекистан, 170100, Андижан, ул. Университетская, д. 129).

Юнусалиев Нуритдин Юнусали угли — докторант, АндГУ (Республика Узбекистан, 170100, Андижан, ул. Университетская, д. 129).

Каримбердиев Улутбек Расулжон угли — заместитель декана физико-технического факультета АндГУ (Республика Узбекистан, 170100, Андижан, ул. Университетская, д. 129).

Одилов Шерзодбек Иброхимжон угли — инженер лаборатории «Выращивание полупроводниковых кристаллов» научного центра физики полупроводников АндГУ (Республика Узбекистан, 170100, Андижан, ул. Университетская, д. 129).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Юнусалиев Н.Ю. и др. Рентгенодифракционное исследование эпитаксиальных пленок $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$, выращенных на кремниевых подложках. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2025, № 6 (123), с. 60–75. EDN: XUGAZS

X-RAY DIFFRACTION STUDY OF STRUCTURAL PROPERTIES OF THE $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ EPITAXIAL FILMS GROWN ON THE SILICON SUBSTRATES

S.Z. Zaynabidinov

A.Y. Boboev

N.Yu. Yunusaliyev

U.R. Karimberdiyev

Sh.I. Odilov

prof_sirojiddin@mail.ru

aboboevscp@gmail.com

nyunusaliyev1997@gmail.com

karimberdiyevu417@gmail.com

shodilovphd@gmail.com

Andijan State University, Andijan, Republic of Uzbekistan

Abstract

The article presents results of an X-ray diffraction study of the $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$, epitaxial films grown by the liquid phase epitaxy on silicon substrates with the crystallographic orientation (111). The grown epitaxial films appear to be the $(\text{Ge}_2)_{1-y}(\text{ZnSe})_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ solid solutions with the gradually altering molar composition ($0 \leq x \leq 0.72$ and $0 \leq y \leq 0.46$), where mutual substitution of the components proceeds. A layer enriched by the ZnSe and $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$,

Keywords

Ge₂, ZnSe, GaAs_{1-δ}Bi_δ, epitaxial film, monocrystal, crystal lattice, diamond-like structure, nanocrystallite

wide-bandgap compounds forms in the transition region between the film substrate and surface layers. The paper establishes that the $(\text{Ge}_2)_{1-y}(\text{ZnSe})_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ obtained epitaxial film is a monocrystal with crystallographic orientation (111), and consists of the diamond-like structure unit cells with the lattice parameter $a_{\text{exp}} = 0.5658$ nm. The analysis results show that nanocrystallites of the $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ compounds formed spontaneously in the epitaxial layer surface regions, have a cubic unit cell with the lattice parameter of 5.9978 nm, and belong to the $P4_3m$ phase group. It is found that the nanocrystallites sizes (33.9; 34.5; 34.9 nm) and their average value (~ 34 nm) indicate that the nanocrystallites have a rounded geometric shape and are formed predominantly with the equal sizes

Received 28.02.2025

Accepted 23.05.2025

© Author(s), 2025

The work was supported by the Ministry of Innovative Development of the Republic of Uzbekistan (grant no. FZ-292154210)

REFERENCES

- [1] Belous A.I., Efimenko S.A., Turtsevich A.S. Poluprovodnikovaya silovaya elektronika [Semiconductor power electronics]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2013.
- [2] Hossain N., Mobarak M.H., Mimona M.A., et al. Advances and significances of nanoparticles in semiconductor applications — a review. *Results Eng.*, 2023, vol. 19, art. 101347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101347>
- [3] Basu R. A review on single crystal and thin film Si–Ge alloy: growth and applications. *Adv. Mater.*, 2022, vol. 3, no. 11, pp. 4489–4513. DOI: <https://doi.org/10.1039/D2MA00104G>
- [4] Demidov A.A., Rybalka S.B. Modern and promising semiconductor materials for microelectronics of the next decade (2020–2030). *Prikladnaya matematika i fizika* [Applied Mathematics & Physics], 2021, vol. 53, no. 1, pp. 53–72 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.52575/2687-0959-2021-53-1-53-72>
- [5] Zaynabidinov S.Z., Saidov A., Kalanov M., et al. Synthesis, structure and electro-physical properties of n -GaAs– p – $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ heterostructures (review). *Geliotekhnika* [Applied Solar Energy], 2019, vol. 55, pp. 291–308 (in Russ.).
- [6] Fomin D.V., Novgorodtsev N.S., Strukov D.O., et al. Formation of Mg_2Si thin films on Si (111) and their research by EOS and EELS. *Vestnik AmGU*, 2021, vol. 93, pp. 30–34 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22250/jasu.93.6>
- [7] Gaponenko S. Semiconductor nanocrystals. *Nauka i innovatsii* [The Science and Innovations], 2020, no. 8, pp. 9–13 (in Russ.). EDN: OKPGRW

- [8] Gulyakovich G.N., Severtsev V.N., Shurchkov I.O. Problems and perspectives of semiconductor nanoelectronics industry. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2012, vol. 20, no. 2, pp. 315–319 (in Russ.). EDN: PCRQIB
- [9] Saidov A.S., Razzakov A.Sh., Ismailov Sh.K., et al. Liquid-phase epitaxy of $(\text{Ge}_2)_{1-x}(\text{InP})_x$ и $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)(\text{ZnSe})_y$ solid solutions. *Tekhnika. Tekhnologii. Inzheneriya*, 2017, no. 2-1, pp. 28–30 (in Russ.). EDN: YNEWVF
- [10] Zaynabidinov S.Z., Utamuradova Sh.B., Boboev A.Yu. Structural peculiarities of the $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ solid solution with various nano-inclusions. *J. Surf. Investig.*, 2022, vol. 16, no. 6, pp. 1130–1134. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1027451022060593>
- [11] Zaynabidinov S.Z., Saidov A.S., Leyderman 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>
- [12] Zaynabidinov S.Z., Yuldashev Sh.U., Boboev A.Yu., et al. X-ray diffraction and electron microscopic studies of the ZnO(S) metal oxide films obtained by the ultrasonic spray pyrolysis method. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, vol. 112, no. 1 (112), pp. 78–92 (in Russ.). EDN: GFUKHQ
- [13] Plotnikov V.A., Makarov S.V., Ereemchenkova O.O., et al. Distribution of clusters formed by sp^2 - and sp^3 -bonds in a carbon diamond-like thin film. *Tech. Phys.*, 2021, vol. 66, no. 5, pp. 643–647. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784221040149>
- [14] Chervonyy I.F., Bubinet A.V. The influence of oxygen and carbon on the formation of oxidative stacking faults in single-crystal silicon. *ScienceRise*, 2015, vol. 11, no. 2, pp. 6–10 (in Russ.). EDN: VFEXHT
- [15] Zaynabidinov S.Z., Boboev A.Y., Yunusaliyev N.Y. Effect of γ -irradiation on structure and electrophysical properties of S-doped ZnO films. *East Eur. J. Phys.*, 2024, no. 2, pp. 321–326. DOI: <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-2-37>
- [16] Shulpina 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>
- [17] Setyukov O.A., Samoylov A.I. The effect of the X-ray diffractometer alignment on the lattice constant dependence on the Nelson — Riley extrapolation function. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials], 2011, vol. 77, no. 8, pp. 34–36 (in Russ.). EDN: ODVXWV
- [18] Tashmetov M.Yu., Kalanov M., Makhkamov Sh., et al. Copper-oxygen nanocrystallites in silicon single crystals doped with copper. *Uzbekskiy fizicheskiy zhurnal* [Uzbek Journal of Physics], 2018, vol. 20, no. 2, pp. 90–97 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.52304/v20i2.33>
- [19] Terekhov V.A., Tetelbaum D.I., Zanin I.E., et al. Diffraction studies of the formation of silicon nanocrystals in the SiO_x/Si compounds after carbon ion implantation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Materialy elektronnoy tekhniki* [Materials of Electronics Engineering], 2012, no. 4, pp. 54–59 (in Russ.). EDN: REJPHH

[20] Skvortsov A.M., Trifonova T.A., Khuin Kong Tu. Microstructuring of silicon single crystals by fiber laser in high-speed scanning mode. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 6, pp. 1062–1071 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-6-1062-1071>

[21] Utamuradova Sh.B., Daliyev Sh.Kh., Khamdamov J.J., et al. Research of the impact of silicon doping with holmium on its structure and properties using Raman scattering spectroscopy methods. *East Eur. J. Phys.*, 2024, vol. 2, art. 274. DOI: <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-2-28>

Zaynabidinov S.Z. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Andijan State University (Universitetskaya ul. 129, Andijan, 170100 Republic of Uzbekistan).

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

Yunusaliyev N.Yu. — Doctoral, Andijan State University (Universitetskaya ul. 129, Andijan, 170100 Republic of Uzbekistan).

Karimberdiyev U.R. — Deputy Dean of Faculty of Physics and Technology, Andijan State University (Universitetskaya ul. 129, Andijan, 170100 Republic of Uzbekistan).

Odilov Sh.I. — Engineer, Laboratory Growing Semiconductor Crystals, Scientific Center of Semiconductor Physics, Andijan State University (Universitetskaya ul. 129, Andijan, 170100 Republic of Uzbekistan).

Please cite this article in English as:

Zaynabidinov S.Z., Boboev A.Y., Yunusaliyev N.Yu., et al. X-ray diffraction study of structural properties of the $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ epitaxial films grown on the silicon substrates. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2025, no. 6 (123), pp. 60–75 (in Russ.). EDN: XUGAZS