УДК 621.793 *Обзор*

Проблемы и стратегии эпитаксиального роста полупроводниковых тонких пленок III-V-Bi: обзор

О.В. Девицкий[1,2]

[1]*ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН»*
344006, Россия, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41
[2]*ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»*
355017, Россия, Ставрополь, ул. Пушкина, 1
v2517@rambler.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.244

Аннотация: В настоящей обзорной статье систематизированы фундаментальные и прикладные исследования, посвященные эпитаксии метастабильных твердых растворов III-V-*Bi*. Основной проблемой получения тонких пленок III-V-*Bi* является их термодинамическая нестабильность, обусловленная широкой щелью смешиваемости и экстремально низкой равновесной растворимостью висмута в III-V. Показано, что преодоление этих ограничений возможно исключительно посредством методов кинетического удержания. Выявлены ключевые стратегии увеличения внедрения *Bi*: снижение температуры подложки до 200–350 °C; манипуляция поверхностной стехиометрией: переход к *Ga*-обогащенным режимам и металлическим реконструкциям (2×1); инженерия растягивающих деформаций, увеличивающая растворимость *Bi* в 100 раз, а также использование высокоиндексных подложек (115)*A*, (311)*B* и методов конгруэнтного переноса вещества. В работе детально рассмотрена проблема улучшения структурных свойств, включая подавление образования капель висмута, двухтемпературные подходы, in-situ и пост-ростовой отжиг. В рамках единого обзора проведен сравнительный анализ методов молекулярно-лучевой эпитаксии, металлоорганической газофазной эпитаксии и импульсного лазерного напыления в контексте получения тонких пленок III-V-*Bi*. Установлено, что дальнейший прогресс в создании приборов на основе III-V-*Bi* требует перехода от эмпирического подбора условий к прецизионному управлению поверхностной кинетикой и дефектами на атомарном уровне.

Ключевые слова: GaAsBi, тонкие пленки, III-V-Bi, молекулярно-лучевая эпитаксия, металлоорганическая газофазная эпитаксия, импульсное лазерное напыление.

Девицкий Олег Васильевич – к.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур для СВЧ-электроники и фотоники ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН»; ведущий научный сотрудник научно-образовательного центра фотовольтаики и нанотехнологии, доцент кафедры физической химии ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Review

Problems and strategies of epitaxial growth of III-V-Bi semiconductor thin films: a review

O.V. Devitsky[1,2]

[1]*Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of the RAS, Rostov-on-Don, Russia*
[2]*North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.244

Abstract: This review article systematically summarizes fundamental and applied research concerning the epitaxy of metastable III-V–*Bi* solid solutions. The main challenge in obtaining thin films of III-V–*Bi* is their thermodynamic instability, which results from a wide miscibility gap and extremely low equilibrium solubility of bismuth in III-V compounds. It is demonstrated that overcoming these limitations is only possible through kinetic stabilization methods. Key strategies to enhance bismuth incorporation are identified, including lowering the substrate temperature to 200-350°C, manipulating

© О.В. Девицкий, 2026

surface stoichiometry by shifting to gallium-rich regimes, and employing surface reconstructions such as the 2×1 pattern. Additional approaches involve engineering tensile strain to increase bismuth solubility by up to 100 times and using high-index substrates like (115)*A* and (311)*B*, along with congruent transfer techniques. The paper also thoroughly discusses strategies for improving structural quality, such as suppressing bismuth droplet formation, implementing two-temperature growth procedures, and performing in-situ and post-growth annealing. A comparative analysis of molecular beam epitaxy, metal-organic vapor phase epitaxy, and pulsed laser deposition methods is presented within the context of producing high-quality III-V–*Bi* thin films. The review concludes that further progress in developing devices based on III-V–*Bi* requires shifting from empirical process optimization to precise control of surface kinetics and atomic-level defect management.
Keywords: GaAsBi, thin films, III-V-Bi, molecular beam epitaxy, metal-organic vapor phase epitaxy, pulsed laser deposition.

Oleg V. Devitsky – Ph. D., Leading Researcher, Laboratory of Physics and Technology of Semiconductor Nanoheterostructures for Microwave Electronics and Photonics, Federal Research Center Southern Scientific Center of the RAS; Leading Researcher at the Research and Educational Center for Photovoltaics and Nanotechnology, Associate Professor at the Department of Physical Chemistry, North-Caucasus Federal University, ORCID: 0000-0003-3153-696X

Поступила в редакцию/received: 25.07.2026; после рецензирования/revised: 25.08.2026; принята/accepted: 27.08.2026.

1. Введение

Разбавленные висмутиды ($III-V-Bi$) вызывают значительный научный интерес благодаря физическим свойствам, недостижимым в классических полупроводниках $III-V$. Введение висмута (Bi) в решетку приводит к гигантскому прогибу запрещенной зоны (до 88 мэВ/мол.% Bi в $GaAsBi$), что успешно описывается моделью валентного зонного антипересечения (VBAC) [1, 2]. Существенным следствием такой модификации зонной структуры является линейный рост энергии спин-орбитального расщепления (Δ_{SO}) [3]. При концентрациях Bi свыше 9-10% выполняется условие $\Delta_{SO} > E_g$, что существенно подавляет Оже-рекомбинацию по механизму CHSH и открывает путь к созданию температурно-нечувствительных лазеров среднего ИК-диапазона и высокоэффективных многопереходных солнечных элементов [4, 5].

Ключевым ограничением при получении соединений $III-V-Bi$ является их термодинамическая нестабильность. Согласно модели дельта-параметра решетки (DLP), система $III-V-Bi$ характеризуется огромной энтальпией смешения и широкой щелью смешиваемости [6, 7]. Равновесная растворимость Bi в $GaAs$ при типичных температурах эпитаксии составляет доли процента. Слабая связь $III-Bi$ и сильное рассогласование ковалентных радиусов приводят к тому, что Bi термодинамически стремится к сегрегации на поверхности или образованию металлических преципитатов [8]. В связи с этим, синтез $III-V-Bi$ сместился в область глубоко неравновесных процессов, требующих жесткого кинетического контроля. Методы молекулярно-лучевой (МЛЭ) и металлоорганической газофазной (МОГФЭ) эпитаксии, а

также импульсного лазерного осаждения (ИЛН) предлагают различные пути «замораживания» метастабильной фазы [9-12]. Цель настоящего обзора – систематизация современных стратегий преодоления термодинамических ограничений и управления структурным совершенством тонких пленок $III-V-Bi$ с учетом их физических механизмов, ограничивающих внедрение Bi и возникновение дефектов.

2. Термодинамика и кинетика эпитаксии III-V-Bi

Получение твердых растворов $III-V-Bi$ осуществляется в условиях, далеких от термодинамического равновесия. Энтальпия смешения, которая в рамках DLP-модели пропорциональна квадрату разности параметров решёток бинарных соединений, например, для системы $GaAsBi$ значительное рассогласование ковалентных радиусов Bi (1,46 Å) и As (1,20 Å) приводит к тому, что свободная энергия Гиббса твёрдого раствора становится положительной при температурах выше 200-300°C, что инициирует спинодальный распад [13]. В этих условиях классический подход к эпитаксии, предполагающий стремление системы к минимуму свободной энергии Гиббса, неприменим. Формирование однофазного метастабильного сплава возможно исключительно посредством кинетического удержания [14]. Данный подход предполагает создание поверхностных условий, при которых скорость захвата атомов Bi решеткой многократно превышает скорость их термической десорбции, поверхностной сегрегации или обмена с атомами группы V. Расчеты методом функционала плотности (DFT) показывают, что равновесная растворимость Bi в $GaAs$ при типичных температурах молекулярно-лучевой эпитаксии 400-500°C составляет доли процента [7, 15]. Экспериментально достигаемые концентрации Bi для твердого раствора $GaAsBi$ составляют 22%, что на три порядка превышают равновесные значения, что прямо указывает на кинетическую природу их удержания в решетке [14]. Для систематизации стратегий максимизации концентрации Bi необходимо выделить четыре фундаментальных вектора управления: контроль температуры подложки для подавления десорбции; контроль потоков компонентов для формирования специфических сурфактантных реконструкций; термодинамическая модификация щели смешиваемости; использование высокоиндексных ориентаций подложки.

2.1 Контроль температуры подложки при эпитаксии III-V-Bi

Температура подложки является определяющим фактором эффективности внедрения Bi вследствие существенно более низкой энергии связи $Ga-Bi$ по сравнению с $Ga-As$. Энергия активации десорбции атомов Bi из узлов решетки составляет около 0,25 эВ [16], что

обуславливает выделение четырех характерных температурных доменов роста $GaAsBi$. В области кинетического удержания при температурах ниже 330°C диффузионная длина адатомов Bi минимальна, что обеспечивает их немедленное встраивание в решетку [13]. В этом режиме концентрация Bi линейно зависит от его потока, достигает значений 22% и не зависит от типа деформации или давления мышьяка, что подтверждает доминирование кинетических факторов над термодинамическими. При повышении температуры до 330-410°C тепловая энергия преодолевает барьер десорбции, и концентрация Bi снижается из-за преобладания скорости обменной реакции As/Bi на поверхности над скоростью захвата. В интервале 330-410°C при высоком потоке Bi увеличенная поверхностная миграция приводит к агрегации Bi и образованию металлических капель по механизму «пар-жидкость-кристалл», которые могут катализировать рост планарных нанопроволок [17] или формировать агломераты капель Bi. При температурах выше 400°C реализуется сурфактантный режим, при котором Bi формирует поверхностный металлический слой, улучшающий морфологию, но не встраивающийся в кристаллическую решетку $III-V$. В случае МОГФЭ технологическое окно смещается в диапазон 365-440°C, что диктуется температурами разложения прекурсоров: триметилвисмут ($TMBi$) разлагается при 290°C, а третичный бутиларсин ($TMAs$) при 330°C, создавая узкий интервал между началом роста и термической деструкцией метастабильного твердого раствора [18].

2.2 Контроль потоков компонентов при эпитаксии III-V-Bi

Для анализа механизмов внедрения Bi необходимо перейти от макроскопических параметров потоков V/III к атомистическим моделям поверхностных реакций. Лимитирующей стадией данного процесса является реакция обмена As_2 или As_4, поступающими из потока, и атомами Bi, находящимися в сурфактантном слое на поверхности. Расчёты DFT доказывают, что встраивание Bi происходит не напрямую из вакуума, а из металлического сурфактантного слоя, который формирует реконструкцию типа (2×1) с димерами $Bi-Bi$. Атомы Ga, осаждаясь на эту поверхность, легко захватывают атомы Bi без энергетического барьера. Однако если на поверхность поступает As_2, происходит обменная реакция. Энергетический барьер этой обменной реакции составляет примерно 0,58 эВ [16]. Отношение потока Bi к потоку Ga в МЛЭ или отношение парциальных давлений прекурсоров в МОГФЭ также является важным технологическим параметром, определяющим концентрацию внедренного Bi. Это связано с тем, что скорость захвата атомов Bi пропорциональна потоку Ga и вероятности его осаждения на сайты, покрытые Bi. Высокое отношение Bi/Ga необходимо для поддержания сплошного

сурфактантного слоя, который экранирует растущую пленку от прямого контакта с потоком As_2 или As_4, тем самым подавляя обменную реакцию и «запирая» Bi в решётке. Переход к Ga-обогащённым режимам (низкое As/Ga или высокое Bi/Ga) создаёт Ga-терминированную поверхность, которая термодинамически благоприятствует замещению атомов As атомами Bi.

Содержание Bi резко возрастает при снижении соотношения потоков As/Ga до 0,5, а затем насыщается [19]. При этом в МЛЭ использование тетрамеров мышьяка вместо димеров существенно меняет кинетику. As_4, распадаясь на поверхности, требует больше времени и энергии для высвобождения активного As_2, участвующего в обмене, что позволяет включать Bi даже в условиях, близких к стехиометрическим, избегая при этом образования Ga-капель [13]. В МОГФЭ формирование реконструкции $c(4\times4)-\beta$, стабилизированной слоем Bi, является критическим условием для гомогенного включения Bi [20]. $TMBi$ изменяет реконструкцию $c(4\times4)-\beta$ до Bi-терминированной поверхности, которая может быть стабилизирована до 600°C при непрерывной подаче $TMBi/TMBi$ [18].

2.3. Термодинамическая модификация щели смешиваемости

Термодинамическая модель DLP предсказывает, что эпитаксиальные напряжения оказывают колоссальное влияние на щель смешиваемости. В то время как сжимающие напряжения, характерные для роста $GaAsBi$ на $GaAs$, дестабилизируют твердый раствор из-за большого ковалентного радиуса Bi, растягивающие напряжения термодинамически стимулируют его внедрение [7]. Согласно расчётам [15] растягивающие напряжения в пленке в плоскости увеличивают параметр решётки, снижая энергию упругой деформации для крупных атомов Bi. Это приводит к увеличению равновесной растворимости Bi примерно в 100 раз по сравнению с ненапряжённым объёмом.

Использование частично релаксированных буферных слоёв $InGaAs$ позволяет снизить глобальную сжимающую деформацию в пленке $GaAsBi$. Это не только увеличивает максимальную концентрацию Bi (до 8,8% при толщине 100 нм), но и полностью подавляет образование поверхностных капель $Ga-Bi$, которые являются следствием локальной релаксации напряжений [21]. Рост пленок $InPBi$ на подложках $GaSb$ создаёт растягивающую деформацию, что увеличивает концентрацию Bi с 1,16% на InP до 2,68% на $GaSb$ при идентичных условиях роста [22]. В четырёхкомпонентных твердых растворах $GaAsBiN$ введение азота, создающего растягивающие напряжения, компенсирует сжатие от Bi,

позволяя выращивать толстые слои без дислокаций несоответствия, хотя это и требует прецизионного баланса потоков [23]. Важно отметить, что в некоторых системах, например, *GaInAsBi* включение *Bi* может не зависеть от деформации при очень низких температурах роста, менее 330°C, когда кинетическое удержание полностью доминирует над термодинамическими факторами [24].

2.4. Рост на высокоиндексных ориентациях подложки

Поверхностная энергия и плотность атомных ступеней критически зависят от ориентации подложки. Рост на высокоиндексных плоскостях, таких как $(115)A$ или $(311)B$, сильно меняет кинетику включения *Bi*. На подложках *GaAs* $(115)A$ достигается максимальное содержание *Bi* до 3,5% в МОГФЭ при минимальной скорости роста. Это связано с тем, что высокая плотность ступеней и специфическая реконструкция поверхности увеличивают вероятность захвата адатомов *Bi* до того, как они успеют десорбироваться или агрегировать в капли. Скорость роста *GaAsBi* уменьшается в порядке $(111)A > (114)A > (115)A > (001)$ для низких концентраций *Bi*. В МОГФЭ использование подложек $(311)B$ позволяет достичь 6,4% *Bi*, что сопоставимо с результатами МЛЭ, и сдвигает технологическое окно в область более высоких температур, снижая плотность точечных дефектов. При этом снижение запрещённой зоны на подложках (115) составляет 70 мэВ/% *Bi*, что приближается к значениям для МЛЭ 62-88 мэВ/% *Bi* [25].

Непрерывный рост в режиме насыщения по *Bi* неизбежно приводит к сегрегации и образованию капель *Bi* [26]. Переход к импульсным режимам в МОГФЭ или последовательному осаждению в МЛЭ позволяет разорвать цикл обмена As/Bi. В импульсном режиме подача *TMBi* чередуется с паузами или ростом барьерных слоёв, что позволяет поверхностному *Bi* включиться в решётку, избегая накопления избыточного сурфактантного слоя, который является предшественником капель.

3. Методы улучшения структурных свойств и подавления дефектности

Необходимость низкотемпературного роста и высоких потоков *Bi* неизбежно ведет к генерации специфических дефектов, фазовому расслоению и образованию капель. При эпитаксии методами МЛЭ и МОГФЭ превышение порога кинетического захвата *Bi* приводит к его сегрегации и образованию жидких капель, если температура превышает эвтектическую точку системы $Ga-Bi$ (222°C). Поскольку механическое удаление капель не устраняет объемные дефекты, применяются методы предотвращения их образования. Эффективным подходом является метод

двухтемпературного роста: формирование активного слоя при низкой температуре обеспечивает захват Bi, а последующее осаждение барьеров при 600-650°C вызывает контролируемое испарение сегрегированного Bi без разрушения квантовой ямы [27]. Высокотемпературный рост барьеров $AlGaAs$ при этом выполняет роль отжига в процессе эпитаксии, снижая концентрацию точечных дефектов [28]. Низкие температуры эпитаксии способствуют генерации вакансий галлия (V_{Ga}) и антисайтов (As_{Ga}, Bi_{Ga}) [29]. Вакансии V_{Ga} выступают центрами кластеризации Bi при любых последующих термических воздействиях. С использованием химически чувствительной просвечивающей электронной микроскопии в темном поле было показано, что на границах раздела квантовых ям $Ga(As,Bi)/(Al,Ga)As$ образуются гетероантисайты Bi_{Ga}, локально искажающие решетку и формирующие некогерентные включения [29]. Перспективным методом послеростовой обработки является гамма-облучение: воздействие гамма-квантами способствует аннигиляции ловушек, связанных с Bi, что увеличивает концентрацию свободных носителей заряда, снижает время жизни фотовозбужденных носителей и, как следствие, повышает интенсивность фотолюминесценции, улучшая электрические характеристики диодов [30].

Метод ИЛН перспективен для гетероинтеграции $III-V-Bi$ на Si и получения многокомпонентных тонких пленок за счет конгруэнтного переноса вещества и дискретной подачи энергии [31]. Высокая кинетическая энергия частиц плазменного факела 200-250 м/с позволяет выращивать пленки сильно рассогласованных твердых растворов при 300-400°C с низкой термической десорбцией Bi [32]. В отличие от МЛЭ и МОГФЭ, где образование капель имеет термическую природу, в ИЛН оно связано с гидродинамическим распылением мишени. Рост $GaInAsBi$ на $Si(100)$ методом ИЛН продемонстрировал полную пластическую релаксацию напряжений через систему дислокаций и образование двойников при рассогласовании 7,8% [33]. Основным ограничением остается необходимость компромисса между температурой роста и структурным совершенством пленок: низкие температуры, требуемые для кинетического удержания Bi, подавляют поверхностную диффузию, что приводит к генерации точечных дефектов. Дополнительной проблемой является сложность контролируемого легирования: переход к режимам, обогащенным галлием, в МЛЭ превращает кремний из донора в акцептор, что затрудняет формирование $p-i-n$ структур [34].

Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на развитии диагностики в процессе роста, в частности спектроскопии отражения и продвинутой просвечивающей электронной микроскопии, для

мониторинга реконструкций и дефектов в реальном времени [35]. Перспективным направлением является атомистическое моделирование с применением методов машинного обучения для предсказания кинетических барьеров обмена As/Bi на высокоиндексных поверхностях. Кроме того, актуальным остается поиск гибридных подходов, сочетающих низкотемпературный рост с селективной плазменной или фотонной стимуляцией диффузии, а также расширение методов послеростового управления дефектной структурой.

4. Заключение

Получение тонких пленок твердых растворов $III-V-Bi$ представляет собой принципиально неравновесный процесс, жестко ограниченный термодинамической нестабильностью данных систем. Широкая щель смешиваемости и экстремально низкая равновесная растворимость Bi в матрицах $III-V$ при стандартных температурах эпитаксии полностью исключают возможность получения метастабильных пленок в условиях термодинамического равновесия. Анализ показывает, что получение соединений $III-V-Bi$ с высокой концентрацией висмута возможно исключительно в режимах глубокого кинетического удержания. В этом случае скорость захвата атомов Bi растущей кристаллической решеткой многократно превышает скорости их термической десорбции и поверхностной сегрегации. Сравнительный анализ методов эпитаксии выявляет их четкую технологическую специализацию. МЛЭ остается эталонным методом для фундаментальных исследований, обеспечивая рекордные концентрации Bi благодаря сверхвысокому вакууму и высокоточному контролю потоков, хотя и характеризуется крайне узким технологическим окном. МОГФЭ оптимальна для промышленного масштабирования, но максимальная концентрация Bi в квантовых ямах ограничена уровнем 8-9% из-за риска углеродного загрязнения. ИЛН демонстрирует технологическое преимущество для гетероинтеграции на Si и получения многокомпонентных тонких пленок за счет конгруэнтного переноса вещества и высокой кинетической энергии частиц плазменного факела.

Дальнейший прогресс в создании оптоэлектронных приборов на основе $III-V-Bi$ и в частности, температурно-нечувствительных лазеров среднего инфракрасного диапазона и высокоэффективных многопереходных солнечных элементов будет определяться переходом от эмпирического подбора параметров к прецизионному атомарному контролю границ раздела. Перспективными направлениями научных исследований являются развитие диагностики в процессе роста для мониторинга поверхностных реконструкций и дефектообразования в

реальном времени, атомистическое моделирование кинетических барьеров обмена с применением методов машинного обучения, а также разработка гибридных технологий, которые должны стимулировать поверхностную диффузию адатомов для снижения плотности точечных дефектов, не вызывая при этом термической десорбции Bi.

Публикация выполнена в рамках государственного задания федерального исследовательского центра Южного научного центра РАН № 125011200148-9.

Библиографический список:

1. **Francoeur, S.** Band gap of $GaAs_{1-x}Bi_x$, 0<x<3.6% / S. Francoeur, M.J. Seong, A. Mascarenhas et al. // Applied Physics Letters. – 2003. – V. 82. – I. 22. – P. 3874-3876. DOI: 10.1063/1.1581983.
2. **Kudrawiec, R.** Unusual broadening of E_0 and E_0 Δ_{SO} transitions in GaAsBi studied by electromodulation spectroscopy / R. Kudrawiec, J. Kopaczek, P. Sitarek et al. // Journal of Applied Physics. – 2012. – V. 111. – I. 6. – P. 066103-1-066103-3. DOI: 10.1063/1.3692763.
3. **Samajdar, D.P.** Influence of Bi-related impurity states on the bandgap and spin-orbit splitting energy of dilute III-V-Bi alloys: $InP_{1-x}Bi_x$, $InAs_{1-x}Bix$, InSb1-xBix and $GaSb_{1-x}Bi_x$ / D.P. Samajdar, S. Dhar // Superlattices and Microstructures. – 2016. – V. 89. – P. 112-119. DOI: 10.1016/j.spmi.2015.10.048.
4. **Hild, K.** Auger recombination suppression and band alignment in GaAsBi/GaAs heterostructures / K. Hild, Z. Batool, S.R. Jin et al. // AIP Conference Proceedings – 2013. – V. 1566. – I. 1. – P. 488-489. DOI: 10.1063/1.4848498.
5. **Ammar, I.** Optical gain and threshold current density for mid-infrared GaSbBi/GaSb quantum-well laser structure / I. Ammar, N. Sfina, M. Fnaiech // Materials Science and Engineering: B. – 2021. – V. 266. – Art. № 115056. – 10 p. DOI: 10.1016/j.mseb.2021.115056.
6. **Stringfellow, G.B.** Epitaxial growth of metastable semiconductor alloys / G.B. Stringfellow // Journal of Crystal Growth. – 2021. – V. 564. – Art. № 126065. – 13 p. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2021.126065.
7. **Guan, Y.** Thermodynamic stability analysis of Bi-containing III-V quaternary alloys and the effect of epitaxial strain / Y. Guan, G. Luo, D. Morgan et al. // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2020. – V. 138. – Art. № 109245. – 12 p. DOI: 10.1016/j.jpcs.2019.109245
8. **Baladés, N.** Analysis of Bi distribution in epitaxial GaAsBi by aberration-corrected HAADF-STEM / N. Baladés, D.L. Sales, M. Herrera et al. // Nanoscale Research Letters. – 2018. – V. 13. – I. 1. – Art. № 125. – 8 p. DOI: 10.1186/s11671-018-2530-5.
9. **Yoshida, J.** Temperature dependence of $GaAs_{1-x}Bi_x$ band gap studied by photoreflectance spectroscopy / J. Yoshida, T. Kita, O. Wada, et al. // Japanese Journal of Applied Physics. – 2003. – V. 42. – № 2R. – P. 371-374. DOI: 10.1143/JJAP.42.371.
10. **Gelczuk, Ł.** Effects of rapid thermal annealing on deep-level defects and optical properties of n-type GaAsBi alloys grown by molecular beam epitaxy at low temperature / Ł. Gelczuk, J. Kopaczek, D. Pucicki et al. // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2024. – V. 169. – Art. № 107888. – 10 p. DOI: 10.1016/j.mssp.2023.107888.
11 **Pashchenko, A.S.** Growth of nanotextured thin films of GaInAsP and GaInAsSbBi solid solutions on GaP substrates by pulsed laser deposition / A.S. Pashchenko, O.V. Devitsky, L.S. Lunin et al. // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. – 2023. – V. 14. – I. 5. – P. 601-605. DOI: 10.17586/2220-8054-2023-14-5-601-605.
12. **Девицкий, О.В.** Исследование состава пленок $GaAs_{1-y}Bi_y$, полученных методом импульсного лазерного напыления / О.В. Девицкий, А.А. Кравцов, И.А. Сысоев // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2021. – Вып. 13. – С. 96-105. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.096.
13. **Bennarndt, W.** Domains of molecular beam epitaxial growth of Ga(In)AsBi on GaAs and InP substrates / W. Bennarndt, G. Boehm, M.C. Amann // Journal of Crystal Growth. – 2016. – V. 436. – P. 56-61. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2015.11.021.
14. **Lewis, R.B.** Growth of high Bi concentration $GaAs_{1-x}Bi_x$ by molecular beam epitaxy / R.B. Lewis, M. Masnadi-Shirazi, T. Tiedje // Applied Physics Letters. – 2012. – V. 101. – I. 8. – Art. № 82112. – 5 p. DOI: 10.1063/1.4748172
15. **Jacobsen, H.** Ab initio study of the strain dependent thermodynamics of Bi doping in GaAs / H. Jacobsen, B. Puchala, T.F. Kuech et al.// Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics. – 2012. – V. 86.

– I. 8. – Art. № 085207. – 10 p. DOI: 10.1103/PhysRevB.86.085207.
16. **Luo, G.** First-principles studies on molecular beam epitaxy growth of $GaAs_{1-x}Bi_x$ / G. Luo, S. Yang, J. Li et al. // Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics. – 2015. – V. 92. – I. 3. – Art. № 035415. – 10 p. DOI: 10.1103/PhysRevB.92.035415.
17. **Himwas, C.** High verticality vapor-liquid-solid growth of $GaAs_{0.99}Bi_{0.01}$ nanowires using Ga-Bi assisted catalytic droplets / C. Himwas, V. Yordsri, C. Thanachayanont et al. // Nanoscale Advances. – 2024. – V. 6. – I. 3. – P. 846-854. DOI: 10.1039/d3na00428g.
18. **Forghani, K.** Low temperature growth of $GaAs_{1-y}Bi_y$ epitaxial layers / K. Forghani, A. Anand, L.J. Mawst et al. // Journal of Crystal Growth. – 2013. – V. 380. – P. 23-27. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2013.05.033.
19. **Puustinen, J.** Analysis of GaAsBi growth regimes in high resolution with respect to As/Ga ratio using stationary MBE growth / J. Puustinen, J. Hilska, M. Guina // Journal of Crystal Growth. – 2019. – V. 511. – P. 33-41. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2019.01.010.
20. **Knaub, N.** Quantification of Bi distribution in MOVPE-grown Ga(AsBi) via HAADF STEM / N. Knaub, A. Beyer, T. Wegele et al.// Journal of Crystal Growth. – 2016. – V. 433. – P. 89-96. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2015.10.007.
21. **Stevens, M.A.** Strain stabilization of far from equilibrium GaAsBi films / M.A. Stevens, K.A. Grossklaus, T.E. Vandervelde // Journal of Crystal Growth. – 2019. – V. 527. – Art. № 125216. – 5 p. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2019.125216.
22. **Chomdech, S.** Impact of growth temperature and Bi flux on InPBi layers grown on GaSb (001) / S. Chomdech, V. Sigmarsson, W. Pumee et al. // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2026. – V. 205 – Art. № 110382. – 7 p. DOI: 10.1016/j.mssp.2025.110382.
23. **Sweeney, S.J.** The potential of GaAsBiN for multi-junction solar cells / S.J. Sweeney, K. Hild, S. Jin // IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 16-21 June 2013. – Tampa, IEEE Publ., 2013. – P. 2474-2478. DOI: 10.1109/PVSC.2013.6744977.
24. **Ludewig, P.** Growth of Ga(AsBi) on GaAs by continuous flow MOVPE / P. Ludewig, Z.L. Bushell, L. Nattermann et al. // Journal of Crystal Growth. – 2014. – V. 396. – P. 95-99. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2014.03.041.
25. **Zaied, I.** Structural and optical properties of diluted GaAsBi alloys grown on GaAs(115) substrate by MOVPE / I. Zaied, A.M. Alghurabi, H. Fitouri et al. // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2025. – V. 195. – Art. № 109649. – 7 p. DOI: 10.1016/j.mssp.2025.109649.
26. **Steele, J.A.** Surface effects of vapour-liquid-solid driven Bi surface droplets formed during molecular-beam-epitaxy of GaAsBi / J.A. Steele, R.A. Lewis, J. Horvat et al. // Scientific Reports. – 2016. – V. 6. – Art. № 28860. – 17 p. DOI: 10.1038/srep28860.
27. **Patil, P.K.** Bismuth flux dependence of GaAsBi/GaAs MQWs grown by molecular beam epitaxy using two-substrate-temperature technique / P.K. Patil, F. Ishikawa, S. Shimomura // Superlattices and Microstructures. – 2017. – V. 106. – P. 50-57. DOI: 10.1016/j.spmi.2017.03.021.
28. **Štaupienė, A.** Improving optical properties through growth temperatures and post-growth annealing in parabolic GaAsBi/AlGaAs quantum wells / A. Štaupienė, M. Jokubauskaitė, A. Zelioli et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2026. – V. 1060. – Art. № 187230. – 6 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2026.187230.
29. **Luna, E.** Detection of BiGa hetero-antisites at Ga(As,Bi)/(Al,Ga)As interfaces / E. Luna, J. Puustinen, J. Hilska, M. Guina et al. // Journal of Applied Physics. – 2024. – V. 135. – I. 12. – Art. № 125303. – 10 p. DOI: 10.1063/5.0195965.
30. **Alhassni, A.A.** Dilute $GaAs_{1-x}Bi_x$ epilayers with different bismuth concentrations grown by Molecular Beam Epitaxy: A promising candidate for gamma radiation sensor applications / A.A. Alhassni, J.F. Felix, J.F.R. Marroquin et al. // Applied Surface Science. – 2023. – V. 636. – Art. № 157787. – 10 p. DOI: 10.1016/j.apsusc.2023.157787.
31. **Девицкий, О.В.** Структура и состав тонких пленок $GaAs_{1-x-y}N_xBi_y$, полученных методом импульсного лазерного напыления / О.В. Девицкий // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2022. – Вып. 14. - С. 593-601. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.593.
32. **Девицкий, О.В.** Импульсное лазерное напыление полупроводниковых тонких пленок III-V: обзор / О.В. Девицкий // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2024. – Вып. 16. - С. 621-630. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.621.
33. **Pashchenko, A.S.** Epitaxial growth of GaInAsBi thin films on Si (001) substrate using pulsed laser deposition / A.S. Pashchenko, O.V. Devitsky, M.L. Lunina et al. // Vacuum. – 2024. – V. 227. – Art. № 113372. – 9 p. DOI: 10.1016/j.vacuum.2024.113372.
34. **Ben Abdelwahed, A.** MOVPE growth and characterization of GaAs/GaAsBi/GaAs p-i-n structure / A. Ben Abdelwahed, S. Zouaghi, H. Fitouri, A. Rebey // Optical Materials. – 2024. – V. 155. – Art. № 115822. – 7 p. DOI: 10.1016/j.optmat.2024.115822.

35. **Maßmeyer, O.** In situ analysis of Bi terminated GaAs (001) and Ga(As,Bi) surfaces during growth by MOVPE / O. Maßmeyer, T. Hepp, R. Günkel et al. // Applied Surface Science. – 2020. – V. 533. – Art. № 147401. – 12 p. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.147401.

References:

1. Francoeur S., Seong M.J., Mascarenhas A. et al. Band gap of $GaAs_{1-x}Bi_x$, 0<x<3.6%, *Applied Physics Letters*, 2003, vol. 82, issue 22, pp. 3874–3876. DOI: 10.1063/1.1581983.
2. Kudrawiec R., Kopaczek J., Sitarek P. et al. Unusual broadening of E_0 and E_0 Δ_{SO} transitions in GaAsBi studied by electromodulation spectroscopy, *Journal of Applied Physics*, 2012, vol. 111, issue 6, pp. 066103-1-066103-3. DOI: 10.1063/1.3692763.
3. Samajdar D.P., Dhar S. Influence of Bi-related impurity states on the bandgap and spin-orbit splitting energy of dilute III-V-Bi alloys: $InP_{1-x}Bi_x$, $InAs_{1-x}Bi_x$, $InSb_{1-x}Bi_x$ and $GaSb_{1-x}Bi_x$, *Superlattices and Microstructures*, 2016, vol. 89, pp. 112-119. DOI: 10.1016/j.spmi.2015.10.048
4. Hild K., Batool Z., Jin S.R. et al. Auger recombination suppression and band alignment in GaAsBi/GaAs heterostructures, *AIP Conference Proceedings*, 2013, vol. 1566, issue 1, pp. 488-489. DOI: 10.1063/1.4848498.
5. Ammar I.,Sfina N.,Fnaiech M. Optical gain and threshold current density for mid-infrared GaSbBi/GaSb quantum-well laser structure, *Materials Science and Engineering: B*, 2021, vol. 266, art. no. 115056, 10 p. DOI: 10.1016/j.mseb.2021.115056.
6. Stringfellow G.B. Epitaxial growth of metastable semiconductor alloys, *Journal of Crystal Growth*, 2021, vol. 564, art. no. 126065, 13 p. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2021.126065.
7. Guan Y., Luo G., Morgan D. et al. Thermodynamic stability analysis of Bi-containing III-V quaternary alloys and the effect of epitaxial strain, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2020, vol. 138, art. no. 109245, 12 p. DOI: 10.1016/j.jpcs.2019.109245.
8. Baladés N., Sales D.L., Herrera M. et al. Analysis of Bi distribution in epitaxial GaAsBi by aberration-corrected HAADF-STEM, *Nanoscale Research Letters*, 2018, vol. 13, issue 1, art. no. 125, 8 p. DOI: 10.1186/s11671-018-2530-5.
9. Yoshida J., Kita T., Wada O. et al. Temperature dependence of $GaAs_{1-x}Bi_x$ band gap studied by photoreflectance spectroscopy, *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 42, no. 2R, pp. 371-374. DOI: 10.1143/JJAP.42.371.
10. Gelczuk Ł., Kopaczek J., Pucicki D. et al. Effects of rapid thermal annealing on deep-level defects and optical properties of n-type GaAsBi alloys grown by molecular beam epitaxy at low temperature, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2024, vol. 169, art. no. 107888, 10 p. DOI: 10.1016/j.mssp.2023.107888.
11 Pashchenko A.S., Devitsky O.V., Lunin L.S. et al. Growth of nanotextured thin films of GaInAsP and GaInAsSbBi solid solutions on GaP substrates by pulsed laser deposition, *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2023, vol. 14, issue 5, pp. 601-605. DOI: 10.17586/2220-8054-2023-14-5-601-605.
12. Devitsky O.V., Kravtsov A.A., Sysoev I.A. Issledovanie sostava plenok GaAs1-yBiy, poluchennykh metodom impul'snogo lazernogo napyleniya [Study of the composition of $GaAs_{1-y}Bi_y$ films obtained by pulsed laser deposition], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2021, issue 13, pp. 96-105. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.096. (In Russian).
13. Bennarndt W., Boehm G., Amann M.C. Domains of molecular beam epitaxial growth of Ga(In)AsBi on GaAs and InP substrates, *Journal of Crystal Growth*, 2016, vol. 436, pp. 56-61. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2015.11.021.
14. Lewis R.B., Masnadi-Shirazi M., Tiedje T. Growth of high Bi concentration $GaAs_{1-x}Bi_x$ by molecular beam epitaxy, *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 101, issue 8, art. no. 82112, 5 p. DOI: 10.1063/1.4748172.
15. Jacobsen H., Puchala B., Kuech T.F. et al. Ab initio study of the strain dependent thermodynamics of Bi doping in GaAs, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 2012, vol. 86, issue 8, art. no. 085207, 10 p. DOI: 10.1103/PhysRevB.86.085207.
16. Luo G., Yang S., Li J. et al. First-principles studies on molecular beam epitaxy growth of $GaAs_{1-x}Bi_x$, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 2015, vol. 92, issue 3, art. no. 035415, 10 p. DOI: 10.1103/PhysRevB.92.035415.
17. Himwas C., Yordsri V., Thanachayanont C. et al. High verticality vapor-liquid-solid growth of $GaAs_{0.99}Bi_{0.01}$ nanowires using Ga-Bi assisted catalytic droplets, *Nanoscale Advances*, 2024, vol. 6, issue 3, pp. 846-854. DOI: 10.1039/d3na00428g.
18. Forghani K., Anand A., Mawst L.J. et al. Low temperature growth of $GaAs_{1-y}Bi_y$ epitaxial layers, *Journal of Crystal Growth*, 2013, vol. 380, pp. 23-27. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2013.05.033.
19. Puustinen J., Hilska J., Guina M. Analysis of GaAsBi growth regimes in high resolution with respect to

As/Ga ratio using stationary MBE growth, *Journal of Crystal Growth*, 2019, vol. 511, pp. 33-41. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2019.01.010.
20. Knaub N., Beyer A., Wegele T. et al. Quantification of Bi distribution in MOVPE-grown Ga(AsBi) via HAADF STEM, *Journal of Crystal Growth*, 2016, vol. 433, pp. 89-96. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2015.10.007.
21. Stevens M.A., Grossklaus K.A., Vandervelde T.E. Strain stabilization of far from equilibrium GaAsBi films, *Journal of Crystal Growth*, 2019, vol. 527, art. no. 125216, 5 p. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2019.125216.
22. Chomdech S., Sigmarsson V., Pumee W. et al. Impact of growth temperature and Bi flux on InPBi layers grown on GaSb (001), *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2026, vol. 205, art. no. 110382, 7 p. DOI: 10.1016/j.mssp.2025.110382.
23. Sweeney S.J., Hild K., Jin S. The potential of GaAsBiN for multi-junction solar cells, *IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 16-21 June 2013. Tampa, IEEE Publ., 2013, pp. 2474-2478. DOI: 10.1109/PVSC.2013.6744977.
24. Ludewig P., Bushell Z.L., Nattermann L. et al. Growth of Ga(AsBi) on GaAs by continuous flow MOVPE, *Journal of Crystal Growth*, 2014, vol. 396. pp. 95-99. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2014.03.041
25. Zaied I., Alghurabi A.M., Fitouri H. et al. Structural and optical properties of diluted GaAsBi alloys grown on GaAs(115) substrate by MOVPE, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2025, vol. 195, art. no. 109649, 7 p. DOI: 10.1016/j.mssp.2025.109649.
26. Steele J.A., Lewis R.A., Horvat J. et al. Surface effects of vapour-liquid-solid driven Bi surface droplets formed during molecular-beam-epitaxy of GaAsBi, *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, art. no. 28860, 17 p. DOI: 10.1038/srep28860.
27. Patil P.K., Ishikawa F., Shimomura S. Bismuth flux dependence of GaAsBi/GaAs MQWs grown by molecular beam epitaxy using two-substrate-temperature technique, *Superlattices and Microstructures*, 2017. vol. 106. pp. 50-57. DOI: 10.1016/j.spmi.2017.03.021.
28. Štaupienė A., Jokubauskaitė M., Zelioli A. et al. Improving optical properties through growth temperatures and post-growth annealing in parabolic GaAsBi/AlGaAs quantum wells, *Journal of Alloys and Compounds*, 2026, vol. 1060, art. no. 187230, 6 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2026.187230.
29. Luna E., Puustinen J., Hilska J., Guina M. et al. Detection of BiGa hetero-antisites at Ga(As,Bi)/(Al,Ga)As interfaces, *Journal of Applied Physics*, 2024, vol. 135, issue 12, art. no. 125303, 10 p. DOI: 10.1063/5.0195965.
30. Alhassni A.A., Felix J.F., Marroquin J.F.R. et al. Dilute $GaAs_{1-x}Bi_x$ epilayers with different bismuth concentrations grown by Molecular Beam Epitaxy: A promising candidate for gamma radiation sensor applications, *Applied Surface Science*, 2023, vol. 636, art. no. 157787, 10 p. DOI: 10.1016/j.apsusc.2023.157787.
31. Devitsky O.V. Struktura i sostav tonkikh plenok $GaAs_{1-x-y}N_xBi_y$, poluchennykh metodom impul'snogo lazernogo napyleniya [Structure and composition of thin $GaAs_{1-x-y}N_xBi_y$ films produced by pulsed laser deposition], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2022, issue 14, pp. 593-601. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.593. (In Russian).
32. Devitsky O.V. Impul'snoe lazernoe napylenie poluprovodnikovykh tonkikh plenok III-V: obzor [Pulsed laser deposition of III-V semiconductor thin films: review], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2024, issue 16, pp. 621-630. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.621. (In Russian).
33. Pashchenko A.S., Devitsky O. V., Lunina M.L. et al. Epitaxial growth of GaInAsBi thin films on Si (001) substrate using pulsed laser deposition, *Vacuum*, 2024, vol. 227, art. no. 113372, 9 p. DOI: 10.1016/j.vacuum.2024.113372.
34. Abdelwahed A.Ben, Zouaghi S., Fitouri H. et al. MOVPE growth and characterization of GaAs/GaAsBi/GaAs p-i-n structure, *Optical Materials*, 2024, vol. 155, art. no. 115822, 7 p. DOI: 10.1016/j.optmat.2024.115822.
35. Maßmeyer O., Hepp T., Günkel R. et al. In situ analysis of Bi terminated GaAs (001) and Ga(As,Bi) surfaces during growth by MOVPE, *Applied Surface Science*, 2020, vol. 533, art. no. 147401, 12 p. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.147401.