Мостиковые InAs/InAsSbP-фотодиоды: особенности технологии создания

© А.А. Пивоварова, Е.В. Куницына, С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, И.А. Андреев, Н.А. Пихтин, Н.Д. Ильинская, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Pivovarova.antonina@iropto.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 23 октября 2025 г.
В окончательной редакции 17 ноября 2025 г.
Принята к публикации 24 ноября 2025 г.

Разработана технология создания фотодиодов мостиковой конструкции с малым диаметром фоточувствительной площадки (< 100 мкм) на основе гетероструктур InAs/InAsSbP, позволяющая получать высокую воспроизводимость параметров приборов. Показано, что полная изоляция металлического мостика при травлении дает возможность в 2 раза уменьшить высоту мезы и, соответственно, обеспечить бóльшую механическую прочность мостикового фотодиода. Применение предлагаемой технологии привело к уменьшению разброса параметров приборов по пластине, а также снижению величины темновых токов фотодиодов. Так, при $U = -0.2$ В минимальный темновой ток составляет $I_d = 200$ мкА при открытом мостике и $I_d = 1$ мкА для приборов с полной изоляцией. Подавление металл-стимулированного травления позволяет изготавливать приборы мостиковой конструкции на любых соединениях $A^{III}B^{V}$ независимо от используемого материала, травителя и кристаллографической ориентации структуры.

Ключевые слова: гетероструктуры InAs/InAsSbP, химическое травление, мостиковый фотодиод, быстродействие.

DOI: 10.61011/FTP.2025.08.62193.8691

1. Введение

Полупроводниковые лазеры и современные лазерные системы, способные эффективно работать в ближней и средней ИК областях спектра, находят все новые применения. Так, диодная лазерная спектроскопия используется для скрининговой диагностики различных заболеваний на ранней стадии при отсутствии выраженных симптомов [1,2]. Ранняя диагностика позволяет не только избежать необратимых изменений в организме человека и снижения качества жизни, но и в ряде случаев спасти жизнь пациента. Квантово-каскадные лазеры ИК диапазона открывают новые перспективы для систем связи в свободном пространстве [3,4].

С развитием лазерной техники возникает необходимость создания быстродействующих ИК фотоприемников и фотоприемных устройств, способных регистрировать короткие импульсы. При разработке фотоприемников стоит задача получения оптимального соотношения таких параметров, как чувствительность, величина темнового тока, а также быстродействие.

Известно, что уменьшение емкости $p-i-n$-фотодиода и, соответственно, повышение его быстродействия возможно за счет снижения концентрации носителей заряда в активной области гетероструктуры либо за счет уменьшения площади $p-n$-перехода (диаметра чувствительной площадки). Ранее нами было проведено исследование характеристик InAs/InAsSbP-фотоприемников с диаметром чувствительной площадки от 2 мм до 100 мкм [5], в которых использовалась конструкция с мезой в форме круга и кольцевым фронтальным контактом, а также грушевидные мезы с точечным контактом. Однако в случае, когда размеры светочувствительной и контактной площадок сопоставимы, возникает необходимость выноса контактной площадки за пределы светочувствительной поверхности, чтобы избежать слишком большого процента затенения. Формирование двух отдельных (фоточувствительной и контактной) площадок предусмотрено в мостиковой конструкции прибора, которая была предложена нами для GaInAsSb/GaAlAsSb-фотодиодов спектрального диапазона 1.2–2.4 мкм [6]. В данной работе диэлектрический изолирующий слой формировался только под контактной площадкой. Было обнаружено, что формирование мостиковой конструкции на данных материалах зависит от ориентации оси прибора относительно кристаллографического направления структуры.

При переходе в более длинноволновую область спектра, где используются материалы на основе InAs и его твердых растворов, был выявлен ряд трудностей, которые приводят к низкой механической прочности конструкции и большому разбросу параметров фотодиодов.

Данная работа является продолжением исследований, представленных в работе [7]. Нами решалась задача разработки универсальной технологии создания механически прочных мостиковых InAs/InAsSbP-фотодиодов с высокой воспроизводимостью параметров, которая даст возможность создавать различные приборы мостиковой конструкции на любых материалах $A^{III}B^{V}$ [8].

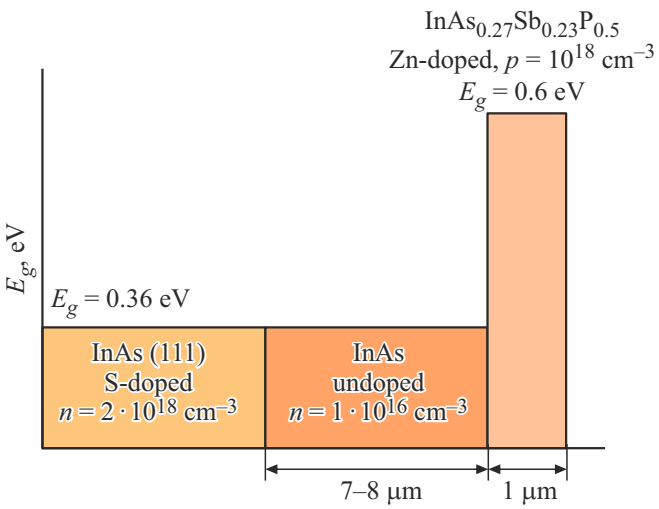

Рис. 1. Схематическая энергетическая диаграмма гетероструктуры InAs/InAsSbP.

2. Образцы и методы исследования

Гетероструктуры n-InAs/p-$InAs_{0.27}Sb_{0.23}P_{0.50}$ выращивались методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (MOCVD). Схематическая энергетическая диаграмма представлена на рис. 1. Для создания мостиковых фотодиодов на основе данных гетероструктур использовались методы оптической литографии, высоковакуумного термического и магнетронного напыления, локального электрохимического осаждения, жидкостного химического травления. Омические контакты к полупроводниковому материалу n- и p-типа создавались на основе многослойной системы Cr-Au-Ni-Au, которая утолщалась гальваническим золотом со стороны фронтального контакта и напылением двухслойной системы Cr-Au со стороны сплошного тыльного контакта. Этапы изготовления мостиковых фотодиодов на основе гетероструктур InAs/InAsSbP подробно описаны в нашей работе [7].

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) изготовленных фотодиодов исследовались с помощью автоматизированного измерителя ВАХ. Дифференциальное сопротивление R_0 определялось по наклону линейного участка ВАХ в диапазоне ± 10 мВ. Емкость измерялась с помощью LCR-измерителя Agilent E4980A.

Исследование динамических характеристик мостиковых InAs/InAsSbP-фотодиодов проводилось на стенде с помощью источника лазерных импульсов на основе одномодового лазерного диода ($\lambda = 1.55$ мкм, длительность импульсов 70 пс на полувысоте, фронт нарастания 40 пс по уровню 10–90 %, пиковая мощность 75 мВт). Измерительный стенд также включал стробоскопический осциллограф Agilent 86117A с полосой 50 ГГц, оптическую схему, обеспечивающую фокусировку лазерного луча на фотоприемной площадке (диаметр пятна 5 мкм), и линейный транслятор для сканирования лазерного луча по площадке. Точность позиционирования составляла ≤ 1 мкм. Образцы в корпусе TO-18 монтировались на высокочастотную линию (ВЧ) с SMA (subminiature version A) выходом.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Мостиковая конструкция формируется методом жидкостного травления гетероструктуры на всю толщину эпитаксиальных слоев. Основной особенностью этого метода является латеральное травление, за счет чего происходит удаление полупроводникового материала под мостиковым контактом одновременно с формированием рабочей мезаструктуры. Для обеспечения электрической изоляции слоев гетероструктуры между фоточувствительной и контактной мезами необходимо сформировать воздушный протрав под металлической балкой. При этом от выбора травителя и подбора глубины травления будет зависеть возможность реализации данной задачи.

Жидкостное химическое травление основано на взаимодействии травящего раствора с поверхностью полупроводника. Большинство травителей состоят из окислителя (для окисления поверхности полупроводника) и комплексообразователя (для образования растворимых соединений с продуктами окисления). Для InAs и его твердых растворов широко применяется состав $HBr{:}H_2O_2{:}H_2O$, в котором скорости травления разных слоев гетероструктуры близки по величине, что позволяет получать ровную зеркально-гладкую боковую поверхность мезаструктуры.

Формирование воздушного тоннеля под выводом контактной площадки (мостиком) обеспечивается за счет латерального травления. При этом ключевое значение имеют физико-химические процессы, протекающие в травящем растворе. Нами обнаружено, что в случае, когда в травителе присутствуют открытые участки золота, как в качестве материала мостика, так и на технических метках, необходимых для проведения последовательных процессов фотолитографии, скорость латерального травления в травителе $HBr{:}H_2O_2{:}H_2O$ значительно уменьшается. Это приводит к тому, что для гетероструктур InAs/InAsSbP получение воздушного тоннеля под металлическим мостиком при суммарной толщине слоев гетероструктуры $\sim 5-7$ мкм возможно только при травлении на бóльшую глубину ~ 50 мкм, что существенно снижает механическую прочность всей конструкции.

Если для структур на основе GaSb соотношение глубины мезаструктуры и величины протрава под мостиком составляло 2 : 1, то при аналогичной конструкции прибора для структур на основе InAs минимальное соотношение составляет 4 : 1, что делает конструкцию менее механически прочной. Мы полагаем, что эффект влияния золота на латеральное травление под мостиком

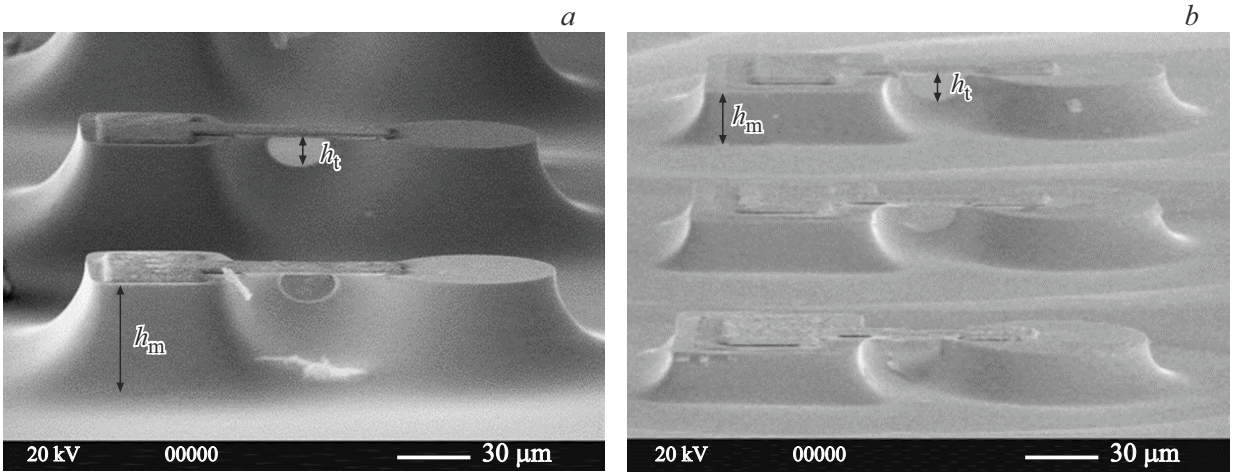

Рис. 2. SEM-изображения InAs/InAsSbP-фотоприемников мостиковой конструкции, полученных: *a* — без полной изоляции металлического мостика; *b* — с полной изоляцией металлического мостика.

обусловлен наличием открытых участков металлического мостика, оказывающих влияние на процессы как в травителе, так и в полупроводниковом материале, участвуя в перераспределении носителей между ними.

Использование металлической маски при жидкостном химическом травлении полупроводниковых материалов с целью получения наноразмерных структур активно исследуется с начала 2000-х годов. Известно, что при металл-стимулированном травлении (Metal Assisted Chemical Etching — MACE, i-MACE) благородный металл (не подвергающийся травлению), нанесенный на поверхность полупроводника, катализирует восстановление окислителя и увеличивает скорость растворения полупроводника вблизи от металлической пленки [9]. Ключевой особенностью такого метода является очень небольшая величина латерального травления, что позволяет получать мезаструктуры с бóльшим аспектным отношением (отношение горизонтального размера получаемого рельефа к его глубине). Механизмы протекания металл-стимулированного травления для разных материалов и травящих составов активно обсуждаются [10], однако ряд аспектов этого метода до настоящего времени остается неясным. Эффективность вертикального травления определяют два ключевых механизма — генерация дырок и массоперенос [11]. Так, по мере увеличения площади катализатора скорость генерации дырок растет; но если при этом ограничен массоперенос, то удаление продуктов электрохимических реакций, протекающих на поверхности полупроводника в присутствии металлического катализатора, затруднено, что потенциально снижает скорость травления.

Ранее нами использовалась изоляция с помощью диэлектрического слоя только контактной площадки от опорной мезы. Результаты ряда проведенных экспериментов показали, что возможность получения воздушного тоннеля под мостиковым контактом для гетероструктуры InAs/InAsSbP в травителе $HBr:H_2O_2:H_2O$ определяется не только изоляцией золотого мостика от полупроводника, но и его изоляцией от травящего раствора.

На стадии фотолитографии пластины гетероструктуры *n*-InAs/*p*-InAsSbP были разделены на две части каждая. На одной из частей пластины фотодиоды изготавливались с открытым золотым мостиком, на другой — мостиковый контакт в процессе травления был полностью изолирован, чтобы исключить влияние золота на формирование мезаструктур.

Под мостиком была дополнительно сформирована диэлектрическая подкладка TiO_2/SiO_2, а поверх него накладывалась маска фоторезиста, изолирующая металл с верхней и боковых сторон [12].

На рис. 2 представлены SEM-изображения (scanning electron microscope) (растровая электронная микроскопия) InAs/InAsSbP-фотодиодов, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии.

Как видно из рис. 2, при травлении мезаструктур InAs/InAsSbP без полной изоляции металлического мостика от полупроводника и травителя при небольшой протраве под мостиком получаются глубокие мезы (рис. 2, *a*). Соотношение глубины мезаструктуры h_m к глубине протрава h_t составляет 4 : 1. В случае полной изоляции под мостиком получен воздушный тоннель при существенно меньшей глубине мезы (рис. 2, *b*). В этом случае соотношение глубины мезаструктуры к глубине протрава под мостиком составляет 2 : 1. Таким образом, подавление металл-стимулированного травления приводит к уменьшению глубины мез и повышению механической прочности конструкции.

Кроме того, экспериментально показано, что в отличие от первоначального подхода, когда диэлектрический слой формируется только под контактной площадкой, при полной изоляции металлического мостика в процессе травления не требуется ориентирование относительно кристаллографических направлений.

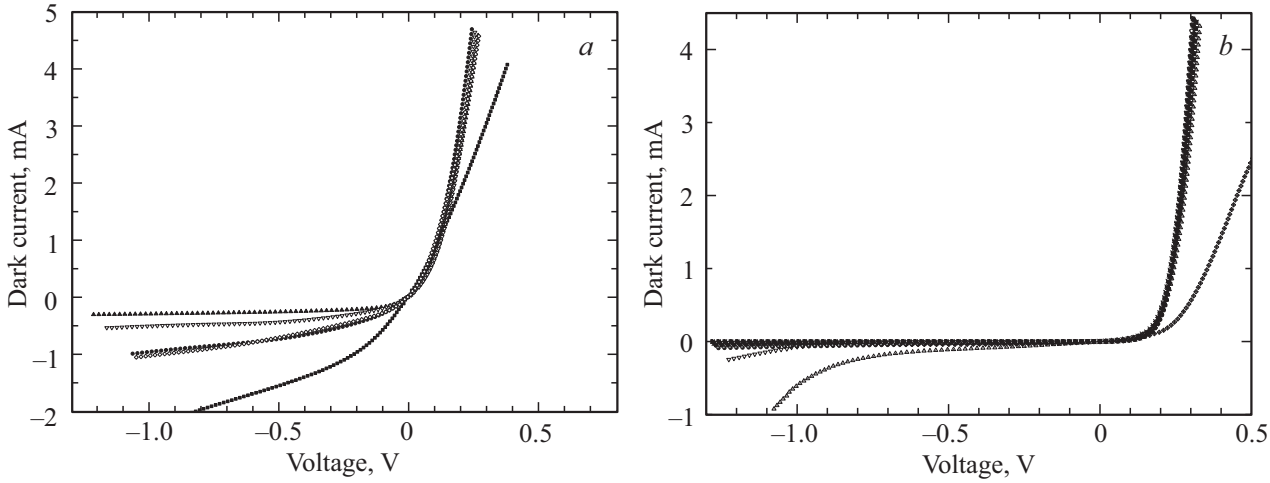

Рис. 3. Вольт-амперные характеристики InAs/InAsSbP-фотодиодов: *a* — без изоляции металлического мостика; *b* — с полной изоляцией металлического мостика.

Важно отметить, что разработанная технология создания мостиковых InAs/InAsSbP-фотодиодов позволяет изготавливать различные приборы мостиковой конструкции с высокой воспроизводимостью параметров на любых материалах $A^{III}B^{V}$.

На рис. 3 представлены вольт-амперные характеристики InAs/InAsSbP-фотодиодов, изготовленных без изоляции металлической балки (рис. 3, *a*) и с изоляцией (рис. 3, *b*).

Как видно из рис. 3, разработанная технология позволила добиться меньшего разброса параметров приборов по пластине, а также уменьшить темновые токи фотодиодов. При $U = -0.2$ В минимальный темновой ток составляет $I_d = 200$ мкА при открытом мостике и $I_d = 1$ мкА для приборов с полной изоляцией. Мы полагаем, что уменьшение разброса параметров по пластине связано с тем, что при полной изоляции глубина травления, необходимая для получения воздушного тоннеля под мостиком, существенно меньше. В таком случае снижается разброс диаметра фоточувствительной площадки от мезы к мезе и, соответственно, разброс параметров приборов, в частности величины темнового тока. Дифференциальное сопротивление фотоприемников составляет $R_0 = 1.0-5.6$ кОм.

Спектральная чувствительность созданных InAs/InAsSbP-фотодиодов лежит в диапазоне длин волн 1.1–3.8 мкм с максимумом в области 2.8–3.1 мкм. Токовая монохроматическая чувствительность достигает $S_I = 1.0-1.2$ А/Вт.

На рис. 4 показаны типичные импульсы фотоответа, которые демонстрировали разработанные мостиковые InAs/InAsSbP-фотоприемники (диаметр фоточувствительной площадки ~ 80 мкм) при различных обратных напряжениях, а также форма лазерного импульса. Положение лазерного импульса относительно импульса фотоответа выбрано искусственно, так как в рамках проводимых исследований не проводилась оценка задержек сигналов.

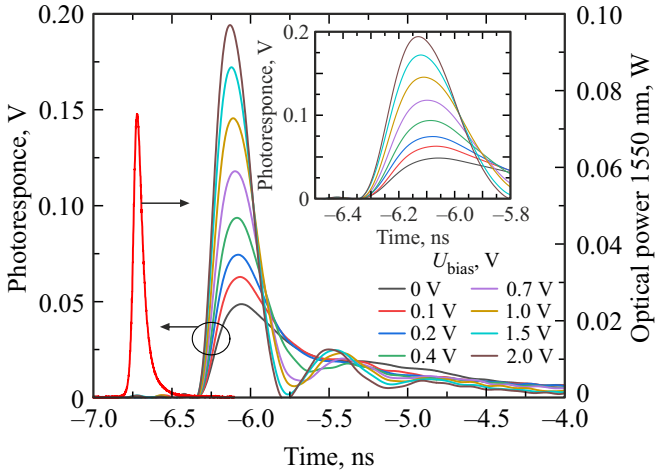

Рис. 4. Импульсы фотоответа при различных напряжениях обратного смещения U_{rev}, а также форма лазерного импульса, используемого в эксперименте. На вставке показаны импульсы фотоответа в большем масштабе.

Как видно из рис. 4, максимальная амплитуда импульса фотоответа составляет 0.19 В при обратном напряжении 2 В. При этом максимальное быстродействие фотодиодов, определяемое как время нарастания импульса фотоответа $\tau_{0.1-0.9}$, достигает 100 пс (см. вставку к рис. 4).

Таким образом, была разработана технология создания приборов мостиковой конструкции, позволяющая подавить эффект металл-стимулированного травления и благодаря этому увеличить механическую прочность конструкции за счет уменьшения высоты мезы. При этом уменьшены разброс и величина обратных темновых токов.

4. Заключение

Разработана технология создания мостиковых InAs/InAsSbP-фотодиодов с высокой воспроизводимостью параметров приборов для спектрального диапазона 1.1–3.8 мкм.

Обнаружено, что наличие открытых участков золота при травлении гетероструктур InAs/InAsSbP в системе $HBr:H_2O_2:H_2O$ препятствует латеральному травлению. Показано, что для получения конструкции фотодиода с мостиковым металлическим контактом необходимо полностью подавить металл-стимулированное травление, а именно исключить влияние золота на процесс травления полупроводника. Так, соотношение глубины мезаструктуры к глубине протрава составляет 4 : 1 без полной изоляции металлического мостика и 2 : 1 при полной его изоляции.

Показано, что при полной изоляции мостика на этапе травления мезаструктур уменьшается величина и разброс обратных темновых токов. Так, при открытом мостике минимальный темновой ток составил $I_d = 200$ мкА при $U = -0.2$ В, тогда как для конструкции с полной изоляцией $I_d = 1$ мкА при $U = -0.2$ В.

Подавление металл-стимулированного травления дает возможность изготавливать приборы мостиковой конструкции на любых соединениях $A^{III}B^{V}$ независимо от используемого материала, травителя и кристаллографической ориентации гетероструктуры.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Я.Я. Понуровский, А.И. Надеждинский, Д.Б. Ставровский, Ю.П. Шаповалов, М.В. Спиридонов, А.С. Кузмичев, А.А. Карабиненко, Ю.М. Петренко. СТМ, **12** (5), 71 (2020).

[2] B. Sumpf, M. Braune, M. Maiwald, M.E. Darvin, J. Lademann, G. Tränkle. Proc. SPIE, **11257**, Plasmonics in Biology and Medicine XVII; 1125707 (2020). DOI: 10.1117/12.2554015 (Event: SPIE BiOS, 2020, San Francisco, California, United States).

[3] O. Spitz, P. Didier, L. Durupt, D. Andrés Díaz-Thomas, A.N. Baranov, L. Cerutti, F. Grillot. IEEE J. Select.Topics Quant. Electron., **28** (1), 1200109 (2022). DOI: 10.1109/JSTQE.2021.3096316

[4] M. Turville-Heitz, R. Marsland, J.H. Ryu, S.A. Jacobs, J.D. Kirch, T. Earles, S. Ruder, K. Oresick, B. Knipfer, D. Botez, L.J. Mawst. Photonics, **12** (1), 51 (2025). DOI: 10.3390/photonics12010051

[5] И.А. Андреев, О.Ю. Серебренникова, Н.Д. Ильинская, А.А. Пивоварова, Г.Г. Коновалов, Е.В. Куницына, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **49** (12), 1720 (2015).

[6] И.А. Андреев, О.Ю. Серебренникова, Г.С. Соколовский, В.В. Дюделев, Н.Д. Ильинская, Г.Г. Коновалов, Е.В. Куницына, Ю.П. Яковлев. ФТП, **47** (8), 1109 (2013).

[7] А.А. Пивоварова, Е.В. Куницына, Г.Г. Коновалов, С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, И.А. Андреев, Н.А. Пихтин, Н.Д. Ильинская, А.Е. Черняков, Ю.П. Яковлев. ЖПС, **90** (1), 102 (2023).

[8] А.А. Образцова, А.А. Пивоварова, С.Д. Комаров, И.С. Федосов, К.А. Иванов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, Н.Д. Ильинская, Ю.П. Яковлев, И.С. Махов, Н.В. Крыжановская, А.Е. Жуков. ФТП, **59** (1), 37 (2025). DOI: 10.61011/FTP.2025.01.60498.7587

[9] L. Kong, B. Dasgupta, Y. Ren, P.K. Mohseni, M. Hong, X. Li, W.K. Chim, S.Y. Chiam. Sci. Rep., **6**, 36582 (2016). DOI: 10.1038/srep36582

[10] S. Znati, J. Wharwood, K.G. Tezanos, X. Lie, P.K. Mohseni. Nanoscale, **16**, 10901 (2024). DOI: 10.1039/D4NR00857J

[11] J.D. Kim, P.K. Mohseni, K. Balasundaram, S. Ranganathan, J. Pachamuthu, J.J. Coleman, X. Li. Adv. Funct. Mater., **27** (12), 1605614 (2017). DOI: 10.1002/adfm.201605614

[12] Н.Д. Ильинская, А.А. Пивоварова, Е.В. Куницына, И.А. Андреев, Ю.П. Яковлев. *Полупроводниковый фотодиод для инфракрасного излучения*. Пат. № 221645 РФ, приоритет изобретения: 01 сентября 2023 г.

Редактор Г.А. Оганесян

InAs/InAsSbP bridge photodiodes: features of the fabrication technology

A.A. Pivovarova, E.V. Kunitsyna, S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, I.A. Andreev, N.A. Pikhtin, N.D. Il'inskaya, Yu.P. Yakovlev

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The technology has been developed for producing bridge-type photodiodes with a small photosensitive area diameter ($< 100\,\mu$m) based on InAs/InAsSbP heterostructures, enabling high reproducibility of device parameters. It has been shown that complete isolation of the metal bridge during etching allows for a halving of the mesa height, thereby ensuring greater mechanical strength of the bridge photodiode. The use of the proposed technology has resulted in a reduction in the device parameter spread across the wafer, as well as a reduction in the photodiode dark current. Thus, at $U = -0.2$ V, the minimum dark current is $I_d = 200\,\mu$A for an open bridge and $I_d = 1\,\mu$A for devices with full insulation. Suppression of metal-assisted etching enables the fabrication of bridge-type devices on any $A^{III}B^{V}$, regardless of the material, etchant, or crystallographic orientation of the structure.