Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук Центр физики наногетероструктур Лаборатория инфракрасной оптоэлектроники

Климов Александр Алексеевич Свето- и фотодиоды на основе гетероструктур из твердых растворов InAs для ИК оптических датчиков (λ = 3 - 4 мкм)

> Специальность – 1.04.10 физика полупроводников Научный доклад

> > Санкт-Петербург 2025

Научный руководитель:

Ременный Максим Анатольевич, ведущий научный сотрудник лаборатории инфракрасной оптоэлектроники ФТИ им. Иоффе, кандидат физикоматематических наук.

Рецензент:

Пихтин Никита Александрович, ведущий научный сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе, кандидат физико-математических наук

Рецензент:

Журихина Валентина Владимировна, доцент Вышей школы фундаментальных физических исследований ФГАОУ ВО «СПбПУ», доктор физикоматематических наук

Содержание				
Введение	4			
Цель и задачи работы	6			

## **C**

Цель и задачи работыб
Апробация работы7
Объекты и методы исследования8
Широкополосные флип-чип фотодиоды на основе ДГС P-InAsSbP/n-InAs(Sb)/N-
InAsSb, $\lambda$ =3.3, 4.0 мкм (с удаленной подложкой)9
Фотодиоды на основе ГС InAsSbP/InAsSb <sub>0.16</sub> P <sub>0.34</sub> /InAs ( $\lambda$ =2.2–2.6 мкм)14
Двухволновые фотодиоды на основе фоточувствительных слоев InAs ( $\lambda_{max}$ =3.3
мкм) и InAsSb ( $\lambda_{max}$ =4.0 мкм)
Двухспектральные фотоприемники «двухсторонней конструкции»17
Двухспектральные фотоприемники «флип-чип конструкции»
Высокотемпературные фотодиоды на основе гетероструктуры N-
InAsSbP/InAs/P-InAsSbP ( $\lambda_{\text{макс}}$ =3.3 мкм, 296 К)24
Фотодиоды на основе N-InAsSbP/InAsSb/N-InAsSbP ( $\lambda_{\text{макс}} \ge 4.0$ мкм)
Фотодиоды на основе N-InAsSbP/InAsSb $_{0.1}$ /N-InAsSbP ( $\lambda_{0.5}$ =5.2 мкм, 295 K)
для оптических датчиков угарного газа
Фотодиоды на основе N-InAsSbP/InAsSb <sub>x</sub> /N-InAsSbP (x $\geq$ 0.1, $\lambda$ =3 $\div$ 6 мкм)32
Средневолновые светодиоды на основе ГС N-InAsSbP/InAs(Sb,P)/P-InAsSbP,
работающие в интервале температур 200-500 К
Результаты и их обсуждение
Заключение
Список литературы

#### Введение

Фотонные фотоприемники и излучатели (фотодиоды и светодиоды), работающие в средневолновом ИК диапазоне, в частности, в области длин волн  $\lambda = 3 \div 4$  мкм, используются в ряде приборов химического, в т.ч. газового анализа, работающих на принципах инфракрасной спектроскопии, а также в приборах низкотемпературной пирометрии, работающих на основе детектирования теплового излучения разогретых тел. Примерами таких приборов и систем являются: трассовые анализаторы утечек природного газа; портативные газоанализаторы углеводородных смесей; датчики метана и природного газа; алкотестеры; алкозамки и алкорамки; быстродействующие измерители толщины полимерных пленок; датчики углекислого газа, в том числе капнографы для аппаратов искусственной вентиляции легких и прикроватных мониторов; датчики пожарной безопасности и быстродействующие пирометры.

Конкуренция на рынке вышеуказанных приборов приводит К необходимости постоянного улучшения их характеристик, что обеспечивается за счет улучшения характеристик как используемой электронной компонентной базы, так и улучшения характеристик ключевых элементов средневолновых инфракрасных датчиков: свето- и фотодиодов, работающих в области длин волн 3-4 мкм. К числу основных характеристик инфракрасных компонентов, уровень которых подвергается постоянной «ревизии», относятся: выходная мощность, КПД (коэффициент полезного действия), расходимость излучения, диапазон длин волн, диапазон рабочих температур, стоимость – у светодиодов; токовая чувствительность, обнаружительная способность, размерность, быстродействие, рабочих температур фотодиодов. диапазон И стоимость y Вышеперечисленные требования к улучшению характеристик, часто, кратко называют трендом на уменьшение размеров, веса и энергопотребления – минимизации характеристики SWaP – Scale, Weight and Power.

Основными материалами, используемыми для создания фотонных источников и приемников излучения для средневолновой ИК области спектра, являются:

- поликристаллические пленки солей свинца (PbS), на основе которых выпускаются фотодиоды, фотосопротивления и оптически возбуждаемые излучатели, работающие на длинах волн 2.7, 3.3, 3.8 мкм;

- гетроструктуры из твердых растворов КРТ (CdHgTe) на основе которых выпускаются фотодиоды, работающие на длинах волн 3.3, 4 (и далее в длинноволновую область спектра) микрометров;

- гетероструктуры из твердых растворов InAs (InAsSb, InAsSbP), на основе которых выпускаются светодиоды и фотодиоды, работающие на динах волн 3.0, 3.3, 3.8, 4.2 (и далее в длинноволновую область спектра) микрометров.

Каждый из этих подходов имеет свои сильные и слабые стороны, тем не менее они доказали свою работоспособность и востребованность на протяжении многих лет. Существуют и другие альтернативы, такие как сверхрешетки на основе гетеропереходов InAs/InAsSb и InAs/GaSb, однако их конкурентоспособность проявляется в более длинноволновой области спектра и, поэтому, далее – не рассматривается.

В лаборатории ИК оптоэлектроники ФТИ им А.Ф. Иоффе на протяжении многих лет разрабатываются и внедряются источники и приемники излучения для диапазона длин волн 3-4 мкм на основе гетероструктур InAs(Sb,P)/InAsSbP, выращиваемых на подложках InAs, преимуществами которых являются: долговременная стабильность (отсутствие деградации и надежность), высокая подвижность, широкие возможности по перестройке рабочей длины волны и созданию p-n перехода – по сравнению с приборами на основе PbS; значительно меньшая вредность производства и доступность подложек – по сравнению с

приборами на основе гетроструктур из твердых растворов CdHgTe. Что касается технических характеристик, то, по-видимому, можно предположить, что потенциал для улучшения параметров компонентов на основе PbS – исчерпан и они проигрывают приборам на основе гетроструктур из твердых растворов CdHgTe и InAs(Sb,P) между которыми идет соревнование по соотношению характеристики/цена.

## Цель и задачи работы

Цель работы – разработка и исследование фотоэлектрических и люминесцентных свойств эпитаксиальных гетероструктур N-InAsSbP/InAs(Sb,P)/P-InAsSbP для создания на их основе источников и приемников средневолнового ИК излучения ( $\lambda$ =3÷4 мкм), работающих, в зависимости от возможного применения, в интервале температур от100 до 500 К.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- разработка и исследование широкополосных фотодиодов, в том числе, многоэлементных, с удаленной подложкой;

- разработка фотодиодов с фоточувствительной областью на основе твердого раствора InAsSb<sub>0.16</sub>P<sub>0.34</sub> для диапазона длин волн 2.2÷2.6 мкм;

- разработка двухволновых фотодиодов с фоточувствительными слоями на основе InAs и InAsSb;

- разработка высокотемператуурных фотодиодов с фоточувствительной областью InAs и InAsSb;

- разработка высокотемпературных светодиодов на основе InAs(Sb,P) работающих на длинах волн около 3 мкм и определение механизмов потерь, ограничивающих выходную мощность.

## Апробация работы

Материалы работы проходили апробацию на следующих мероприятиях: 25-й юбилейной Международной научно-технической конференции ПО фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, АО «НПО «Орион», 2018 г.); Научной конференции с международным участием «Неделя науки СПБПУ» (Санкт-Петебург, 2018 г.); 20-й Всероссийской молодежной конференции "Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника" (СПБ, 2018); 6-th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures "Saint Petersburg OPEN 2019" (СПб, 2019); 21-й Всероссийской молодежной конференции ПОЛУПРОВОДНИКОВ И НАНОСТРУКТУР, "ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА" (СПБ, 2019); Международной конференция "ФизикА.СПб" (СПБ. 2019); Научной конференции с международным участием "Неделя науки СПБПУ" (СПБ, 2019); Всероссийской конференции «НЕДЕЛЯ НАУКИ ИФНИТ» (Санкт-Петербург, 2020); Международной конференции «ФизикА. СПБ» (2021 г., СПб); ХХVI конференции Международной научно-техническаой И школе ПО (2022)фотоэлектронике приборам ночного видения Москва); И Г., Международной конференции «ФизикА.СПб/2022»; 10-ой международной школе-конференции «Saint Petersburg OPEN 2023»., «XXV Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике» (СПб, 2023); Молодежной (СПб, 2023 конференции ФизикА.СПб г.); Молодежной конференции ФизикА.СПб (СПб, 2024 г.).

## Объекты и методы исследования

Объектами фотодиоды исследований являются светодиоды И на гетероструктур P-InAsSbP/InAs(Sb,P)/N-InAsSbP, выращенных на подложках n-InAs (100)жидкофазной (ЖФЭ). методом эпитаксии Активная/фоточувствительная область гетероструктуры, в зависимости от требуемой длины волны, была получена на основе InAsSbP (длина волны  $\lambda \leq 3.3$ мкм), InAs ( $\lambda$ =3.3÷3.4) мкм или InAsSb  $\lambda$ ≥3.4 мкм). Эпитаксиальные структуры проходили постростовую обработку методами стандартной фотолитографии и «мокрого» химического травления для формирования требуемой топологии с характерными размерами излучающей/фоточувствительной области 100÷350 мкм. Светодиоды имели «флип-чип» конструкцию с вводом излучения через сильнолегированную подложку n+-InAs и, как правило, соединялись с иммерсионными линзами с помощью халькогенидного стекла с высоким показателем преломления, что обеспечивало увеличение эффективности вывода излучения из чипа светодиода и коллимацию излучения в угле 10-15 градусов. Фотодиоды, в зависимости от требуемых характеристик, могли иметь «флипчип» геометрию, называемую также BSI (back-side illuminated) или FSI (frontside illuminated) геометрию с вводом излучения через широкозонный слой Р-InAsSbP собираться И могли также с иммерсионными линзами, обеспечивающими увеличение фоточувствительной площади и уменьшение угла зрения. Более подробное описание объектов приводится В соответствующих главах работы.

Основными методами исследования являлись измерения вольт-амперных, ватт-амперных характеристик, спектров фотолюминесценции, электролюминесценции и фоточувствительности. Измерения проводились в интервале длин волн 1.3÷25 мкм и интервале температур 100÷500 К.

## Широкополосные флип-чип фотодиоды на основе ДГС P-InAsSbP/n-InAs(Sb)/N-InAsSb, λ=3.3, 4.0 мкм (с удаленной подложкой)

При создании ИК фотоприемников, наиболее востребованной геометрией чипа является, так называемая «флип-чип» конструкция, обеспечивающая свободную от контактов фоточувствительную поверхность и возможность использования групповых методов сборки при изготовлении многоэлементных фотоприемников. Однако, квантовая эффективность фотоприемников, В которых реализована «флип-чип» конструкция, зависит от оптических свойств подложки, через которую осуществляется ввод излучения. В частности, межзонное поглощение в подложке n<sup>0</sup>-InAs ограничивает коротковолновую границу фоточувствительности значением 3.5 мкм (при комнатной температуре и толщине подложки 500 мкм), а поглощение на свободных носителях при использовании легированных подложек снижает квантовую эффективность как в длинноволновой области спектра, так и в максимуме фотоответа. Уменьшение влияния подложки можно достигнуть за счет ее утонения, частичного или полного удаления. В данной части работы, рассматривается возможность полного удаления подложки за счет использования селективного химического травителя для которого имеет место значительное отличие скоростей травления InAs и InAsSbP. Таким образом, слой N-InAsSbP можно рассматривать, как «стопорный» слой при химическом удалении подложки, что открывает возможность создания флип-чип ФД без последней, т.е. с возможностью получения широкой спектральной кривой фоточувствительности за счет неглубокого залегания p-n перехода от освещаемой поверхности N-InAsSbP. Кроме того, возможность удаления подложки позволяет получать многоэлементные фотоприемники, в которых отдельные элементы являются оптически и электрически разъединенными.

Данная часть работы направлена на создание фотодиодов «флип-чип» геометрии на основе двойных гетероструктур (ДГС) *N*-InAsSbP/*n*-InAs(Sb)/*P*-InAsSbP, выращенных на подложках *n*+-InAs (100), в которых исключено поглощение излучения подложкой и получен широкополосный спектр фотответа в ближней и средней ИК области спектра.

Для этой цели методами многостадийной стандартной фотолитографии и «мокрого» химического травления были изготовлены чипы фотоприемников размером 400×600 мкм, с фоточувствительной областью 220×220 мкм. Для формирования *n*- контакта на минимально возможной глубине, что необходимо для обеспечения механической прочности чипа, формирование (вытравливание) фоточувствительную область «мезы», ограничивающей фотоприемника, происходило ступенчато с глубинами травления приблизительно 4.5-5, 6 и 7-7.5 мкм, при этом после каждого травления осуществлялся контроль вольтамперной характеристики между соседними *p*-контактами. Операция травления была прекращена после достижения глубины травления 7-7.5 мкм, при которой значение темнового сопротивления соответствовало ожидаемому для данной гетероструктуры значению. Для удаления подложки была использована, разработанная нами [1], методика селективного химического травления арсенида индия, которая обеспечивала полное удаление подложки  $n+-\ln As$  и резкое уменьшение скорости травления твердого раствора N-InAsSbP, выполняющего функцию «стопорного слоя» для процесса химического травления.

На рис. 1 приведены: спектры фотответа полученных фотоприемников, измеренные в интервале температур 80-400 К (а также, спектр фотоответа, полученный на аналогичном фотоприемнике с толщиной подложки около 100 мкм - отмеченный надписью  $t = 100 \,\mu$ m); кривая фотоответа идеального фотоприемника с внутренней квантовой эффективностью  $\eta = 1$ . Как видно из

сравнения с данными фотответа, полученными для фотодиода с подложкой (t = 100 мкм), удаление подложки привело к получению широкополосного спектра, который характеризуется пологим спадом в коротковолновой области с квантовой эффективностью около 0.5 ( $\lambda = 2$  мкм, T = 80-250 K), а также увеличению токовой чувствительности в максимуме спектра фотоответа.

На рис. 2 приведены температурные зависимости токовой чувствительности *Si* ( $\lambda_{max}$ ) и квантовой эффективности *QE* в максимуме спектра фотоответа, полученные на основе данных, представленных на рис. 1. Как видно, максимальное значение токовой чувствительности достигается при температуре около 250 К, при которой внешняя квантовая эффективность приближается к своему максимально возможному значению (*QE* = 0.7) и практически не меняется при дальнейшем понижении температуры.



Рис. 1. Спектры фотоответа флип-чип фотодиодов на основе ДГС P-InAsSbP/n-InAs/N-InAsSb и P-InAsSbP/n-InAsSb/N-InAsSb с удаленной подложкой



Рис. 2. Температурные зависимости токовой чувствительности  $Si(\lambda_{max})$  и квантовой эффективности QE в максимуме спектра фотоответа.

На рис. 3 приведены температурные зависимости длинноволновых границ фоточувствительности  $\lambda_{0.1}$ полученные основе И  $\lambda_{0.5},$ на данных, представленных на рис. 1, а также аппрокимация зависимости  $hv_{0.5} = f(T)$ функцией, имеющий характерный ВИД. ДЛЯ эмпирической формулы, описывающей температурное изменение ширины запрещенной зоны InAs, с соответствующим коэффициентом 0.28 мэВ/К. Вероятнее всего, их близость связана с одной стороны с близостью параметров твердого раствора InAsSb с небольшим содержанием Sb к параметрам InAs, а с другой - с отсутствием эффектов, связанных с поглощением излучения в подложке. Ход зависимости длинноволновой границы фоточувствительности, практически совпадающий с температурной зависимостью ширины запрещенной зоны свидетельствует об отсутствии заметного поглощения в широкозонном слое.



Рис. 3. Температурные зависимости длинноволновых границ фоточувствительности  $\lambda_{0,1}$  и  $\lambda_{0,5}$ 



Рис.4 Фотография чипа фотоприемника размером 600×400 мкм, толщиной около 10 мкм с полностью удаленной подложкой

На рис. 4 приведены фотографии чипов с удаленной подложкой. Таким образом, показана возможность получения широкополосных фотоприемников на основе ДГС *N*-InAsSbP/*n*-InAsSb/*P*-InAsSbP, с полностью удаленной подложкой, флип-чип геометрии, фоточувствительных в области до  $\lambda_{0.1} \approx 4$  и 5 мкм с квантовой эффективностью близкой к предельно возможным значениям при температурах 80-250 К [2, 3].

## Фотодиоды на основе ГС InAsSbP/InAsSb<sub>0.16</sub>P<sub>0.34</sub>/InAs ( $\lambda$ =2.2–2.6 мкм)

Для детектирования излучения в области 3-3.4 мкм наилучшие значения чувствительности и обнаружительной способности имеют фотовольтаические приемники на основе InAs, которые могут использоваться также для работы и в более коротковолновой области спектра (2-3 мкм). Однако, можно предположить, что фотоприемники на основе InAs не являются оптимальными для  $\lambda = 2-3$ ллин волн МКМ падения фоточувствительности из-за В коротковолновой области спектра, a также перспективы получения фотоприемников на основе более широкозонных чем InAs твердых растворах InAsSbP, в которых можно ожидать меньшие темновые токи и, как следствие, большие значения обнаружительной способности [4]. Это обстоятельство необходимость разработки обуславливает фотоприемников, оптимизированных под требуемый диапазон длин волн для применений, в которых требуются предельные значения обнаружительной способности  $(D^*)$ .

Данная работа направлена на исследование фотоэлектрических свойств фотодиодов на основе гетероструктур (ГС) InAs/InAs<sub>1-x-y</sub>Sb<sub>x</sub>P<sub>y</sub>/InAsSbP, чувствительных к излучению с длиной волны 2.2-2.6 мкм.

Эпитаксиальные структуры выращивалась на подложках *n*-InAs (100) методом ЖФЭ и содержали фоточувствительный слой InAs<sub>1-x-y</sub>Sb<sub>x</sub>P<sub>y</sub> (x~0.16, y~0.34) толщиной 3-4 мкм и широкозонный слой *P*-InAsSbP толщиной 2 мкм. Методами многостадийной фотолитографии и «мокрого» химического травления были изготовлены образцы фотодиодов (ФД) FSI (front side eliminated) геометрии с размером фоточувствительной области 400×400 мкм, которые монтировались (припаивались) на корпус TO-18.

На рис.5 а приведены спектральные зависимости относительной фоточувствительности ФД при температурах 77 и 296 К (левая шкала) и спектр фотолюминесценции, полученный в геометрии «на отражение» при 77 К

(правая шкала). Спектр фотолюминесценции содержит полосу с максимумом около 500 мэВ, связанную с рекомбинацией в фоточувствительном слое, и длинноволновое плечо, обусловленное рекомбинацией в подложке n-InAs и выводом излучения через широкозонный слой InAsSbP. Ширина запрещенной фоточувствительной области ΦД, определенная зоны ИЗ спектра фотолюминесценции как  $Eg = hv_{max} + 10$  мэВ (энергия акцепторного уровня), соответствует значениям, полученным согласно интерполяционным расчетам (Eg=510 мэB, x=0.16, y=0.34) и близка к длинноволновой границе спектра фоточувствительности  $\lambda_{0.5}$ , что характерно для фотоприемников на основе объемных слоев из узкозонных материалов А<sub>3</sub>В<sub>5</sub>. Температурный сдвиг длинноволновой границы при изменении температуры от 77 до 296 К, около 55 мэВ, что соответствует значению коэффициента составляет температурного изменения ширины запрещенной зоны -0.28 мэВ/К, близкому к значению для InAs.



Рис.5. а) Спектральные зависимости относительной фоточувствительности ФД при температурах 77 и 296 К (левая шкала) и спектр фотолюминесценции при 77 К (правая шкала); b) Зависимость произведения сопротивления в нуле смещения на площадь ФД при комнатной температуре в настоящей работе и из литературных данных от энергии длинноволнового края фоточувствительности.

На рис.5 b приведена зависимость произведения сопротивления в нуле площадь ΦД  $R_0 \times A$ ОТ энергии длинноволнового смешения на края фоточувствительности комнатной при температуре, полученная ИЗ литературных данных по фотодиодам на основе InAs, твердого раствора InAsSbP и данным настоящей работы. Как видно из графика, зависимость  $R_0 \times A$ хорошо описывается экспоненциальной функцией  $\propto exp(E/kT)$ , где параметр E понимается, как ширина запрещенной зоны полупроводника и/или энергия длинноволнового края фоточувствительности ФД, и может свидетельствовать о кристаллическом совершенстве полученных эпитаксиальных слоев. Значение  $R_0 \times A$  (10 Ом×см<sup>2</sup>), превышает полученное ранее в ФД с длинноволновой границей  $\lambda_{0,1}=3$  мкм значение в 2 раза, что эквивалентно увеличению обнаружительной способности в 1.4 раза в диапазоне длин волн вблизи 2.5 мкм.

Таким образом, показано [5, 6], что использование гетероструктуры ГС InAs/InAs<sub>*I-x-y*</sub>Sb<sub>*x*</sub>P<sub>*y*</sub>/InAsSbP с составом около x=0.16, y=0.34, перспективно для получения фотодиодов с целью детектирования излучения в спектральной области 2-2.6 мкм, в которой чувствительность фотоприемников на основе InAs может оказаться недостаточной.

# Двухволновые фотодиоды на основе фоточувствительных слоев InAs (λ<sub>max</sub>=3.3 мкм) и InAsSb (λ<sub>max</sub>=4.0 мкм)

Развитие методов обнаружения и классификации объекта измерения, а равно и методов маскировки цели делает, в ряде случаев, необходимым переход фотоприемников многоволновым/многоцветным, OT одноволновых К позволяющим использовать метод отношения для точного определения температуры объекта Т и уменьшения влияния помех. Слоистая архитектура для мультиспектральных ИК фотоприемников может создаваться путем «склейки» нескольких фоточувствительных пластин единое целое, монтажом В определенной последовательности линеек в сканирующих устройствах или выращиванием слоев с различной границей фоточувствительности на единой подложке. В рамках данной работы и доступных технологий эпитаксиального роста и постростовой обработки были опробованы два подхода к получению двухспектральных фотоприемников, в которых фоточувствительные области, работающие в различающихся спектральных областях, расположены на одной оси.

## Двухспектральные фотоприемники «двухсторонней конструкции»

Для реализации двухспектрального фотоприемника была предложена следующая конструкция «двухстороннего чипа», в котором две гетроструктуры выращиваются на противоположных сторонах от подложки и в котором излучение первоначально поглощается в фоточувствительном слое InAs ДГС N-InAsSbP/InAs/P-InAsSbP (геометрия FSI), затем проходит через подложку n-InAs и далее, поглощается в фоточувствительном слое InAsSb ДГС P-InAsSbP/InAsSb/N-InAsSbP (геометрия BSI). Формирование контактов осуществляется к:

- слою P-InAsSbP (анод для широкозонной ДГС);

- подложке n-InAs (общий катод);

- слою P-InAsSbP (анод для узкозонной ДГС).

Характерными чертами этой конструкции, являются: широкополосный фотоответ для широзонной фоточувствительной области; необходимость двухсторонней фотолитографии; двухсторонняя разводка электрических контактов. Преимуществом данной конструкции является отработанность технологических режимов для каждой из выращиваемых эпитаксиальных структур. Главными «вызовами» данной конструкции, являются:

- точное пространственное совмещение процессов постростовой обработки на противоположных сторонах подложки;

- сложности эпитаксиального роста и постростовой обработки, связанные с необходимостью защиты противоположной стороны пластины по отношению к той, на которой в данной момент совершаются технологические операции.

Для выполнения данной конструкции были разработаны фотошаблоны, выращены эпитаксиальные структуры на которых выполнена постростовая обработка. Фотографии чипа до разделения и после корпусирования приведены на рис. 6.



Рис. 6. Фотография скола эпитаксиальной пластины с выполненной постростовой обработкой двухспектрального фотоприемников двухсторонней

конструкции и фотографии чипа двухспектрального приемника «двухсторонней» конструкции.

На рис. 7 приведены спектры фотоответа экспериментальных образцов двухспектральных фотоприемников на основе двухсторонней эпитаксиальной структуры (рис.3). Спектры фотоответа двухстороннего фотоприемника имеют вид, характерный для фотоприемников FSI геометрии для коротковолновой фоточувствительной области и BSI геометрии для длинноволновой области. Полученные значения токовой чувствительности эквивалентны квантовой эффективности QE=0.8-0.9 при комнатной температуре, что говорит о наличии эффекта сбора излучения с оптической площади, превышающей площадь p-n перехода.





Таким образом, показана возможность создания двухспетральных фотоприемников, с максимумами фоточувствительности около 3.3 и 4.0 мкм, с характеристиками, близкими к характеристикам одиночных фотоприемников.

#### Двухспектральные фотоприемники «флип-чип конструкции».

Реализованная выше конструкция двухспектрального фотоприемника имеет недостатком наличие контакта на входной поверхности фотоприемника, что исключает возможность стыковки чипа с иммерсионными линзами и непригодность данной конструкции для многоэлементных фотоприемников. В связи с этим, было предложено реализовать флип-чип конструкцию с эпитаксиальной структурой, состоящей из двух гетроструктур, расположенных одна за другой, в которой излучение вводится через подложку n-InAs (reometpuя BSI), затем частично поглощается в фоточувствительном слое InAs ДГС N-InAsSbP/InAs/P-InAsSbP (который является широкозонным окном для более длинноволнового излучения) и затем поглощается в фоточувствительном слое InAsSb ДГС P-InAsSbP/InAsSb/N-InAsSbP. Формирование контактов осуществляется к:

- подложке n-InAs (катод для широкозонной ДГС);

- слою P-InAsSbP (общий анод);

- слою N-InAsSbP (катод для узкозонной ДГС).

Характерными чертами этой конструкции, являются преимущества, типичные «флип-чип» конструкции: свободная для OT контактов фоточувствительная поверхность с возможностью стыковки с иммерсионной линзой; зеркальный стороны ограничивающей контакт co мезы. фоточувствительную область; фильтрация коротковолнового излучения подложкой InAs. Главными «вызовами» данной конструкции, являются:

возможность значительной диффузии примесей при росте многослойной
 структуры и, как следствие, ухудшение параметров фоточувствительности
 каждого из фоточувствительных слоев;

- сложность формирования анодного контакта на заданной глубине, что связано с большими скоростями травления при «мокром травлении»;

- возможность недостаточной эффективности сбора носителей в анодном контакте, что может быть вызвано малой проводимостью Р- слоя (по сравнению с п- материалом)

Для реализации предложенной конструкции были разработаны фотошаблоны и подкристальная плата для монтажа чипа. На рис. 8 приведены схема сечения ФД на основе двух двойных гетероструктур, фотография участка эпитаксиальной структуры после постростовой обработки и корпусированного фотоприемника.



Рис. 8. Схема сечения ФД на основе двух двойных гетероструктур, фотография участка эпитаксиальной структуры после постростовой обработки и корпусированного фотоприемника

На рис. 9 приведены распределения основных элементов (P, Sb) и примесей (Zn, Sn) по толщине эпитаксиальной структуры, где значение глубины (Depth) =0, соответствует поверхности выращенной структуры, а также вольтамперные и спектральные характеристики для каждого из фотоприёмных каналов. При этом, при определении значений токовой чувствительности, для исключения влияния эффектов, связанных разницей оптически- и электрически активной площади фоточувствительной области, осуществлялась стыковка чипа с иммерсионной линзой из Si, диаметром 3.5 мм.

Фоточувствительность в максимуме спектра для ФД, снабженных иммерсионными линзами с диаметром открытой части 3.2 мм, составляла 1.3 (QE=0.52) и 1 (QE=0.3) А/Вт для длин волн 3.3 и 4 мкм, соответственно. При этом расчетное значение обнаружительной способности, соответственно 4 и 2  $\frac{10^{10} \text{ см}\sqrt{\Gamma \mu}}{\text{BT}}$ , что близко к значениям для одноволновых ФД и открывает перспективу использования разработанного подхода [7, 8] для изготовления двухволновых матриц, работающих при комнатной температуре в диапазоне длин волн 3-4 мкм.



Рис. 9. Распределение основных элементов (P, Sb) и примесей (Zn, Sn) по толщине структур n+-InAs/InAsSb/P-InAsSbP (данные BИMC); вольт-амперные

характеристики и спектры фоточувствительности для каждого из фотоприемных каналов.

## Высокотемпературные фотодиоды на основе гетероструктуры N-InAsSbP/InAs/P-InAsSbP (λ<sub>макс</sub>=3.3 мкм, 296 K).

Улучшение потребительских качеств многих приборов, сопровождается трендом на уменьшение размеров, веса и энергопотребления используемых фотоприёмных устройств (минимизация SWaP – Scale, Weight and Power). Это формирует запрос на фотоприемники достаточно с высокими характеристиками, которые бы позволили отказаться от систем для их охлаждения или термостабилизации. Ответ на данный запрос нашёл отражение в термине «высокотемпературные фотоприемники» (англ.- High-Operating-Temperature Infrared Photodetectors (HOT Photodetectors)) [9], используемом для обозначения фотоприемников, работающих при температурах близких или выше комнатной [10], а также для фотоприемников, в которых достигается режим ограничения фоном (BLIP режим) при T $\geq$  150 K.

работы Данная часть посвящена разработке, исследованию И модернизации фотодиодов на основе ДГС N-InAsSbP/InAs/P-InAsSbP с вводом излучения со стороны верхнего слоя P-InAsSbP (геометрия «FSI» – front side выращенных на подложках n<sup>+</sup>-InAs (100) методом ЖФЭ, illuminated), фоточувствительных в спектральной области λ=2÷4 мкм и работающих в интервале температур 200 – 500 К [10, 11]. В вышеуказанных работах было значения обнаружительной показано достижение способности  $D^* = 1.5 \cdot 10^{10}$  см·Гц<sup>1/2</sup>·Вт<sup>-1</sup> (300 К), что является одним из наилучших результатов среди опубликованных данных. Однако, полученные фотодиоды демонстрировали резкое падение токовой чувствительности при температурах выше 300 К (до  $S_i = 0.01$  A/Bt, T = 500 K), что ограничивало перспективы их использования в инфракрасных датчиках, работающих без принудительного охлаждения при повышенных температурах. В связи с этим, необходимо выяснить причины и найти решения по конструкции чипа фотоприемника

которые обеспечили бы более слабую, чем ранее, температурную зависимость параметров ФД.

На рисунке 10 приведены спектры фотолюминесценции (ФЛ) эпитаксиальных структур из данной работы и [12], а также нелегированной подложки n-InAs ( $n = 1 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>) при 77 К;. Спектры ФЛ гетероструктур состоят из двух полос, ответственных за рекомбинацию в фоточувствительной области InAs (с максимумом около 410 мэВ) и широкозонном слое P-InAsSbP (с максимумом 470 – 490 мэВ).



Рис. 10. Спектры фотолюминесценции гетероструктуры N-InAsSbP/InAs/P-InAsSbP из данной работы; работы [12], подложки чистого n-InAs $(n^0 = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3})$  при 77 K.

Спектры ФЛ в данной работе и в [12] имеют ряд отличий, которые позволяют сделать следующие предположения о свойствах полученных гетероструктур: фоточувствительная область характеризуется меньшим, чем в [12], уровнем легирования донорной примесью, о чем свидетельствует близость максимума ее

ФЛ и максимума ФЛ нелегированного n-InAs; слой P-InAsSbP характеризуется большим значением ширины запрещенной зоны. Указанные свойства гетероструктуры, позволяют ожидать уменьшение значений темновых токов, что будет подтверждено данными, представленными на рисунке 4.

На рисунке 11 представлены спектры токовой чувствительности в интервале температур 125 – 300 К (а), 300 – 500 К и данные из работы [13] при T = 500 К (b). Спектры фоточувствительности в области низких температур (рисунок 2a) имеют форму с ярко выраженным максимумом, который мы связываем с многопроходным поглощением излучения в фоточувствительной области при его отражении от зеркального контакта к подложке (катода). Данный эффект приводит к увеличению токовой чувствительности в области оптической прозрачности подложки, причём его влияние уменьшается с ростом температуры из-за уменьшения оптического пропускания подложки.



Рис. 11. Спектры токовой чувствительности ФД в интервале температур 125 – 300 К (а), 300 – 500 К и образца [13] при *T* = 500 К (b).

При повышении температуры (рисунок 2b) происходит уменьшение токовой чувствительности, которое отчасти связано с уменьшением

эффективности сбора фотогенерированных носителей в условиях, когда темновое сопротивление p-n перехода приближается к значениям последовательного сопротивления между областью разделения электроннодырочных пар и анодным контактом [14]. Этим же объясняется и относительно низкая токовая чувствительность ФД на основе идентичной структуры с точечным анодным контактом, приведенная на рисунках 2b и 3a [11, 13].

Ha рисунке 12а, приведены температурные зависимости токовой чувствительности ФД с фоточувствительной областью InAs как в геометрии «FSI», так и с вводом излучения через подложку (BSI – back side illuminated) [11, 12]. Наиболее «слабая» температурная зависимость наблюдается в образцах BSI геометрии, которые имеют наименьшую толщину чипа и, как следствие, наименьшее поглощение в подложке, а также сплошной анодный контакт, что эффективности сбора фотогенерированных минимизирует уменьшение носителей из-за «шнурования» обратного тока. Сравнение с данными работы [11], позволяет предположить, что уменьшение токовой чувствительности из-за «шнурования» фототока в данной работе имеет место при температурах выше 400 K.

На рисунке 12b приведены температурные зависимости произведения  $R_0$ ·A вышеуказанных ФД. Все они характеризуются экспоненциальной зависимостью произведения  $R_0$ ·A с энергией активации, близкой к значению ширины запрещенной зоны фоточувствительной области (n-InAs), что свидетельствует о диффузионном механизме токопротекания в диапазоне 175 – 500 К. Отличия, которые возникают в области повышенных температур, могут быть объяснены эффектами «шнурования» тока в ФД с точечным и разветвленным (но не сплошным) контактом. Это подтверждает ранее сделанное предположение о причине уменьшения токовой чувствительности FSI фотодиодов с ростом температуры.



Рис. 12. Температурные зависимости токовой чувствительности  $S_i$  (a) и произведения  $R_0$ ·A (b) фотодиодов с фоточувствительной областью InAs с вводом излучения через подложку (BSI) и через эпитаксиальный слой (FSI).

На рисунке 13а приведены температурные зависимости обнаружительной способности  $D^*$  вместе с результатами наших предыдущих работ.

Полученное в работе увеличение обнаружительной способности связано с увеличением темнового сопротивления из-за отмеченных выше свойств эпитаксиальной структуры (по сравнению с результатами работы [12]) и увеличением токовой чувствительности в чипе с разветвленным анодным контактом (по сравнению с результатами работы [11]).

На рисунке 13b и таблице 1 представлено сравнение полученных в работе значений токовой чувствительности и произведения  $R_0$ ·A с ближайшими аналогами: фотодиодами с фоточувствительной областью из InAs (разработчики «1 – 6») и фоточувствительной областью на основе HgCdTe для той же области спектра (разработчик «0»). Проведенное сравнение показывает перспективность

использования гетероструктуры N-InAsSb/InAs/P-InAsSbP для создания ФД с разветвленным анодом для спектральной области 2 – 4 мкм.



Рис. 13. Температурные зависимости обнаружительной способности в сравнении с результатами предыдущих работ (а); сравнение полученных значений токовой чувствительности и произведения  $R_0$ ·A с аналогами (b), номера на оси X соответствуют номерам разработчиков из таблицы 1.

Таким образом, в результате выполнения ряда работ, были получены и свойства исследованы фотоэлектрические экспериментальных образцов фотодиодов FSI конструкции на основе двойной гетероструктуры n-InAs/N-InAsSbP/n-InAs/P-InAsSbP с разветвленным анодным контактом в интервале температур 125 – 500 К. Предложены решения по свойствам эпитаксиальной структуры и конструкции чипа, которые обеспечили значения токовой обнаружительной способности чувствительности  $S_{\rm i} = 1.6 \, {\rm A/BT}$ И И  $D^* = 1.5 \cdot 10^{10}$  см· $\Gamma$ ц<sup>1/2</sup>·Bт<sup>-1</sup> при комнатной температуре и  $S_i > 0.1$  A/Bт при *T* = 500 K.

Разработчик	S <sub>i</sub> , токовая чувствительность, А/Вт	Произведение <i>R</i> <sub>0</sub> · <i>A</i> , Ω·см <sup>2</sup>	Обнаружительная способность <i>D</i> <sup>*</sup> , см·Гц <sup>1/2</sup> ·Вт <sup>-1</sup>	
0. Vigo System SA (Польша)	0.8	0.5	$7.10^{9}$	
1. Hamamatsu (Япония)	1	0.314 - 0.55	$(3-4.5) \ 10^9$	
2. Laser Components (Германия)	0.9	0.88 – 1.37	$1 \cdot 10^{10}$	
3. Vigo System SA (Польша)	0.7 - 0.9	0.55 - 0.75	$(5-7) \cdot 10^9$	
4. Образец из [15] (Китай)	1.45	0.8	$1.6 \cdot 10^{10}$ $1 \cdot 10^{10}$ (из указанных $S_{ m i}$ и $R_0 \cdot A$ )	
5. Образец из [16] (ФТИ Иоффе)	1	1	8·10 <sup>9</sup>	
6. Данная работа (ФТИ Иоффе)	1.5 – 1.75	1.5	$1.5 \cdot 10^{10}$	

# Таблица 1. Сравнение с аналогами.

## Фотодиоды на основе N-InAsSbP/InAsSb/N-InAsSbP ( $\lambda_{\text{макс}} \ge 4.0$ мкм)

Вышеприведенные фотоприемники имели размер толщины фоточувствительной области, составляющий 3-4 мкм, что было возможным благодаря небольшому количеству Sb в твердом растворе InAsSb. В случае необходимости получения более узкозонного материала InAsSb (с большим содержанием Sb), рассогласование периодов решетки подложки InAs и фоточувствительной области InAsSb, приводило необходимости к использования дополнительных буферных, в том числе градиентных слоев, что приводило К увеличению поглощения излучения ДО попадания В фоточувствительную область и деформации эпитаксиальных структур. Что в свою очередь приводило к проигрышу в характеристиках по сравнению с фотодиодами на основе гетероструктур из материалов КРТ.

# Фотодиоды на основе N-InAsSbP/InAsSb<sub>0.1</sub>/N-InAsSbP (λ<sub>0.5</sub>=5.2 мкм, 295 К) для оптических датчиков угарного газа.

В данной части работы сообщается о разработке и результатах исследования фотоэлектрических характеристик иммерсионных фотоприемников на основе фотодиодных структур N-InAsSbP/InAsSb<sub>0.1</sub>/N-InAsSbP 295 К). Ha  $(\lambda_{0.5}=5.2)$ МКМ, рис. 14 приведены спектры фоточувствительности температурная обнаружительной И зависимость способности фотоприемников на основе ДГС N-InAsSbP/InAsSb<sub>0.1</sub>/N-InAsSbP. В результате использование новых геометрии чипов фотоприемников и дизайна фоточувствительной структуры, позволило получить параметры фоточувствительности [17] превышающие на порядок параметры фотоприемников, разработанных ранее [18], что в свою очередь привело к возможности разработки оптических датчиков для детектирования угарного газа на длине волны около 4.55 мкм с пороговой чувствительностью 1 мг/м<sup>3</sup> (0.85 ppm) [19].



Рис.14 Спектры фоточувствительности и температурная зависимость обнаружительной способности фотоприемников на основе ДГС N-InAsSbP/InAsSbP/InAsSbP.

## Фотодиоды на основе N-InAsSbP/InAsSb<sub>x</sub>/N-InAsSbP (x≥0.1, λ=3÷6 мкм)

В ходе данной части работы была проверена возможность получения эпитаксиальных структур N-InAsSbP/InAsSb<sub>x</sub>/N-InAsSbP с фоточувствительной областью InAsSb<sub>x</sub> в области составов  $0.1 \le x \le 0.22$ , с толщиной фоточувствительной области не более 4 мкм и создания на их основе фотоприемников с длинноволновой границей вплоть до 6.3 мкм, работающих в интервале температур до 400 К [20, 21].

На рис.15, приведены спектры фоточувствительности фотодиода на основе гетероструктуры N-InAsSbP/InAsSb<sub>x</sub>/P-InAsSbP (x=0.22) в интервале температур 275-400 К. Анализ вольт-амперных характеристик показывает преобладание диффузионного механизма токопротекания во всем исследованном интервале температур.



Рис.15. Спектры фоточувствительности фотодиода на основе гетероструктуры N-InAsSbP/InAsSb<sub>x</sub>/P-InAsSbP (x=0.22)

## Средневолновые светодиоды на основе ГС N-InAsSbP/InAs(Sb,P)/Р-InAsSbP, работающие в интервале температур 200-500 К.

Светодиоды на основе гетероструктур из InAs и твердых растворов InAsSb, InAsSbP, работающие в средней инфракрасной области, находят применения в приборах газового анализа, например для детектирования углекислого газа (λ=4.2 мкм) в портативных капнографах или детектирования паров алкоголя (λ=3.3 мкм) в алкорамках и алкозамках. Другим применением, является их использование в устройствах для тестирования тепловизионных систем, поскольку светодиоды могут обеспечить широкий динамический диапазон изменения сигнала, создавая тепловой контраст до 1148 К [22], возможность его быстрого изменения (высокое быстродействие), а также отрицательный контраст при обратном смещении. Однако, характеристики светодиодов, такие как спектр излучения и выходная мощность зависят от температуры светодиода, контроль которой является важной задачей. В связи с этим, важным является оптимизация гетероструктур и конструкции чипа с точки минимизации потерь на самопоглощение, уменьшения последовательного сопротивления и увеличения эффективности вывода излучения из кристалла. При этом, для правильной интерпретации полученных результатов, необходимо выяснение влияния на характеристики светодиода не только Джоулева разогрева, но и разогрева, вызванного Оже-рекомбинацией неравновесных носителей заряда.

В данной части работы [23, 24] были исследованы температурные зависимости спектров излучения, ватт-амперных, вольт-амперных (в т.ч. динамических) характеристик СД на основе InAsSbP. Проведена оценка степени разогрева гетероструктур в непрерывном и импульсном режимах и показано, что показано, разогрев светодиодов связан как с Джоулевым механизмом, так и Оже-рекомбинацией неравновесных носителей заряда. Уменьшение квантовой

эффективности светодиодов при больших плотностях тока накачки не может быть объяснено только тепловым гашением электролюминесценции.

На рис. 16 приведены спектры электролюминесценции, вольт-амперные и ватт-амперные характеристики полученных светодиодов в интервале температур 200-500 К, а также фотографии матричного излучателя на их основе.



Рис. 16. Спектры электролюминесценции, вольт-амперные и ватт-амперные характеристики иммерсионных светодиодов на основе твердого раствора InAsSbP в интервале температур 200-500 К, а также фотографии матричного излучателя на их основе в видимой и ИК области спектра.

Проведенные исследования позволили разработать конструкцию светодиода, обеспечивающую получение электролюминесценции в области длин волн 3-4 мкм в интервале температур 200-500 К и разработать на их основе матричные излучатели большой площади для тестирования тепловизионных систем.

#### Результаты и их обсуждение

В выполнения работы, осуществлена разработка результате И исследование широкополосных фотодиодов с фоточувствительными областями InAs и InAsSb, с максимумами фоточувствительности около 3.3 и 4.0 мкм, в том числе, многоэлементных, с удаленной подложкой; разработаны фотодиоды с фоточувствительной областью на основе твердого раствора InAsSb<sub>0.16</sub>P<sub>0.34</sub> для диапазона длин волн 2.2÷2.6 мкм; разработаны и исследованы двухволновые фотодиоды с фоточувствительными слоями на основе InAs и InAsSb; разработаны исследованы высокотемператуурные фотодиоды И с фоточувствительной областью InAs и InAsSb, работающие при повышенных температурах вплоть до 500 К со значением токовой чувствительности более 0.1 А/Вт; разработаны и исследованы высокотемпературные светодиоды на основе InAs(SbP), работающие на длинах волн около 3 мкм и разработаны матричные излучатели на их основе.

Показано, что основные характеристики фотодиодов на основе двойных гетероструктур с фоточувствительными областями на основе InAs и твердых растворов InAsSbP и InAsSb в области составов/значений ширины запрещенной зоны близких к InAs, в диапазоне температур 200-500 К, определяются диффузионным механизмом токопротекания, не завися от рассогласования периодов решетки фоточувствительной области и подложки. Величина эффективности фотодиодов приближается квантовой К максимально возможному значению 0.7 в области температур вблизи комнатной при условии зеркального отражения излучения тыльной наличия OT поверхности фотоприемника (многократного прохождения детектируемого излучения через фоточувствительную область) и минимизации эффектов, связанных С «шнурованием» фототока.

### Заключение

В работы осуществлены разработка результате выполнения И исследование фотоэлектрических и люминесцентных свойств эпитаксиальных гетероструктур N-InAsSbP/InAs(Sb,P)/P-InAsSbP и созданы на их основе светодиоды фотодиоды для средневолнового ИК излучения (λ=3÷4 мкм), работающие, в зависимости от возможного применения, в интервале температур от 100 до 500 К. При этом, осуществлена разработка конструктивных решений, обеспечивших внедрение полученных свето- и фотодиодов в изделия отечественной промышленности И показано, что предложенные конструктивные решения, касающиеся конструкции эпитаксиальных структур, чипов и изготовленных на их основе изделий, характеризуются техническими характеристиками соответствующими или превосходящими характеристики лучших образцов функциональных аналогов.

## Список литературы

- 1 М.А. Ременный и др., "Широкополосные флип-чип фотодиоды на основе ДГС P-InAsSbP/n-InAs/N-InAsSbP"; Труды 25-й юбилейной Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, АО «НПО «Орион», 24-26 мая 2018 г. Стр.77-79;
- 2 Климов А.А., Ременный М.А. "Широкополосные флип-чип фотодиоды на основе ДГС InAsSbP/InAsSb/InAsSbP (lmax=4.0 мкм, 300 K)". Неделя науки СПБПУ: материалы научной конфиренции с международным участием, 19-24 ноября 2018 г. Институт физики, нанотехнологий и телекомуникаций.-СПБ.:ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018.-426 с. 237 с.
- 3 A. Klimov, M. Remennyi, T. Lukhmyrina "Substrate-removed InAs/InAsSbP photodide arrays" BOOK of ABSTRACTS 6 th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, Academic University Publishing St. Petersburg, 2019. p. 65
- 4 A. Rogalski; CRC Press, 2011, p. 369 // "Infrared Detectors, second edition".
- 5 А.А. Климов, Р.Э. Кунков, Т.С. Лухмырина, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный " ФОТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ InAsSbP/InAsSb0.16P0.34/InAs ДЛЯ ДЛИН ВОЛН 2.2–2.6 мкм" материалы научной конференции с международным участием "Неделя науки СПБПУ". 2019
- 6 З. Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, А.А. Лавров, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, А.А. Усикова; ЖТФ, 2018, т. 88, в. 2, стр.234-237 // "Фотодиоды на основе InAsSbP для длин волн 2.6–2.8 μm".
- 7 А.А. Климов, Р. Э. Кунков, Т.С. Лухмырина, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный "ДВУХСПЕКТРАЛЬНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ НА ОСНОВЕ ДГС N-InAsSbP/n-InAs(Sb)/N-InAsSbP (λmax=3.3, 4.0 мкм 300 К)". Тезисы докладов

21-й Всероссийской молодежной конференции "ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И НАНОСТРУКТУР, ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА", СПБ, 2019, с. 110

- 8 Р. Э. Кунков, А.А. Климов, Т.С. Лухмырина, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный "Двухспектральные "флип-чип" фотоприемники на основе ГС P-InAsSbP/n-InAsSb/P-InAsSbP/n-InAs (λmax=3.3, 4.0 мкм 300 К)". Тезисы докладов 21-й Всероссийской молодежной конференции "ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И НАНОСТРУКТУР, ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ОПТО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА", СПБ, 2019, с. 110.
- 9 Piotrowski, J.; Rogalski, A. High-Operating-Temperature Infrared Photodetectors; SPIE Press: Bellingham, WA, USA, 2007.
- 10 Сотникова Г.Ю., Александров С.А., Гаврилов Г.А., Успехи прикладной физики, **10** (4), 389 (2022). DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-4-389-403.
- 11 Ременный М.А., Климов А.А., Кунков Р.Э., Лухмырина Т.С., Матвеев Б.А., Усикова А.А., сборник тезисов XXVII международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва 2024), стр. 76.
- 12 P.N. Brunkov, N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashev, A.A. Lavrov, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', A.A. Usikova, Infrared Phys. & Tech. 78, 249-253 (2016). DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.08.013</u>
- 13 Климов А.А., Кунков Р.Э., Лухмырина Т.С., Матвеев Б.А., Ременный М.А., тезисы конференции ФизикА.СПб (Санкт-Петербург, 2024), стр. 188.
- 14 Н.Д. Ильинская, А.Л. Закгейм, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, В.И. Ратушный, М.А. Ременный, А.Ю. Рыбальченко, Н.М. Стусь, А.Е. Черняков, ФТП 46 (5), 708 – 713 (2012).

- 15 Hongyu Lin, Hao Xie, Yan Sun, Shuhong Hu, Ning Dai, Journal of Crystal Growth **617**, 127293 (2023). DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2023.127293</u>
- 16 P. N. Brunkov, N. D. Il'inskaya, S. A. Karandashev, N. M. Latnikova, A. A. Lavrov, B. A. Matveev, A. S. Petrov, M. A. Remennyi, E. N. Sevostyanov, and N. M. Stus, Semiconductors 48 (10), 1359 1362 (2014). DOI: 10.1134/S1063782614100066.
- 17 Климов А.А., Кунков Р.Э., Лухмырина Т.С., Лавров А.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А. Фотодиоды на основе ДГС n-InAsSbP/InAs<sub>0.9</sub>Sb<sub>0.1</sub>/n-InAsSbP (\u03c6<sub>0.5</sub>=5.2 мкм, 295 K) для оптических датчиков угарного газа. «XXV Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике» 27.11 – 1.12 2023 года. Сборник тезисов, стр. 89.
- 18 P.N. Brunkov, N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashev, A.A. Lavrov, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', A.A. Usikova; «InAsSbP/InAs<sub>0.9</sub>Sb<sub>0.1</sub>/InAs DH photodiodes ( $\lambda_{0.1} = 5.2 \mu m$ , 300 K) operating in the 77–353 K temperature range»; Infrared Physics & Technology 73 (2015) 232–237.
- 19 Е.А. Кочелаев, В.В. Петров; «Разработка малогабаритного оптического датчика монооксида углерода с пороговой чувствительностью 1 mg/m3 (0.85 ppm). Оценка избирательности измерений», Оптика и спектроскопия, 2023, в печати.
- 20 А.А. Климов, Р.Э. Кунков, Т.С. Лухмырина, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный Фотоприемники на основе InAsSb0.22 для спектральной области 3-5 мкм. Тезисы докладов международной конференции ФизикА.СПБ, 2021 года, Санкт-Петербург.

- 21 Ременный М. А., Климов А. А., Кунков Р.Э., Лавров А.А., Лебедева Н.М., Лухмырина Т.С., Матвеев Б.А., Усикова А.А., «Фотодиоды на основе ДГС Р-InAsSbP/n-InAsSb/n-InAsSbP для спектральной области 3-6 мкм, работающие вплоть до Т = 400 К», Тезисы XXVI Международной научно-технической конференции и школы по фотоэлектронике и приборам ночного видения, стр. 184-185, 25-27 мая 2022 г., Москва, Россия.
- 22 P. Santhanam, D. Huang, R. J. Ram, M.A. Remennyi, B.A. Matveev, "Room Temperature Thermo-Electric Pumping in mid-Infrared Light-Emitting Diodes", Appl. Phys. Lett. 103 (19), 183513 (1 November 2013); doi: 10.1063/1.4828566
- 23 Климов А. А., Карандашев С. А. Кунков Р. Э., Лухмырина Т. С., Матвеев Б. А., Ременный М. А., «Разогрев в светодиодах на основе InAsSbP (λ=2.9 мкм), вызванный джоулевым механизмом и оже-рекомбинацией неравновесных носителей заряда», Тезисы Международной конференции «ФизикА.СПб/2022», стр. 275 276, 17 21 октября 2022 г.
- 24 A. A. Klimov, R. E. Kunkov, S. A. Karandashev, A. A. Lavrov, T. S. Lukhmyrina, B. A. Matveev, M.A. Remennyi, A. A. Usikova, HOT mid infrared LEDs based on P-InAsSbP/n-InAs(Sb)/N-InAsSbP heterostructure, 10-я международная школаконференция «Saint Petersburg OPEN 2023»., Санкт Петербург. 23 26 мая 2023г. Сборник тезисов стр. 81.