

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

Лухмырина Татьяна Сергеевна
**Свето- и фотодиоды на основе гетероструктур A3B5 среднего ИК
диапазона спектра для датчиков нарушенного полного внутреннего
отражения**

Специальность – 1.3.11 физика полупроводников
Научный доклад

Санкт-Петербург
2022

Научный руководитель:

Матвеев Борис Анатольевич, главный научный сотрудник лаборатории инфракрасной оптоэлектроники ФТИ им. Иоффе, доктор физико-математических наук

Рецензент:

Сотрудник ФТИ

Рецензент:

Черняков Антон Евгеньевич, старший научный сотрудник НТЦ микроэлектроники РАН, кандидат физико-математических наук

Содержание

Введение.....	4
Цель и задачи работы.....	7
Апробация работы.....	8
Объекты и методы исследования	9
Результаты и их обсуждение.....	12
Распространение излучения СД в микрооптопаре	12
Зависимость фотоответа ФД в составе микрооптопары ($\lambda = 3.4$ мкм) на основе двойной гетероструктуры InAsSbP/InAs от концентрации этанола	15
Анализ распределения тепла, выделенного активированным СД, в микрооптопарах на основе ДГС InAsSbP/InAsSb/InAs.....	21
Заключение	24
Список литературы	26

Введение

Определение концентрации и/или качественного состава вещества с помощью спектроскопии является одной из наиболее часто решаемых задач инфракрасной оптоэлектроники с использованием полупроводниковых лазеров [1,2], светодиодов (СД) [3–5] и фотодиодов (ФД) [1–5]. Раньше традиционно регистрировались спектры пропускания и их интенсивность определялась в первую очередь толщиной образца. При анализе газов это не вызывало проблем, так как газы, в основном, прозрачны, однако при анализе твердых тел или жидкостей проблема поглощения излучения средой становилась заметной, что требовало применения различных ухищрений при пробоподготовке. Спектроскопия нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) лишена этого недостатка.

В спектроскопии НПВО анализируется спектр излучения испытываемого полное внутреннее отражение на границе раздела между оптически более плотной средой – волноводом и менее плотной – анализируемым веществом (аналитом). При этом внутри последней образуется исчезающая волна («evanescent wave»), часть которой поглощается; непоглощенная часть возвращается в волновод, на выходе из которого регистрируется спектр, являющийся некоторым подобием спектра поглощения. Глубина проникновения исчезающей волны d_p в аналит постоянна и составляет

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi n_w * \sqrt{\sin^2(\theta) - (n_{analit}/n_w)^2}}$$

где λ – длина волны излучения, θ – угол его падения на границу раздела волновод-аналит, который должен быть больше критического, n_w и n_{analit} – коэффициенты преломления волновода и аналита соответственно. Обычно d_p не превышает 5 мкм, благодаря чему интенсивность ИК излучения ослабляется незначительно, что позволяет получать спектры даже очень сильно поглощающих веществ.

При изучении веществ имеющих относительно слабое поглощение, ослабления сигнала при единичном отражении может быть недостаточно для

проведения точного анализа, тогда для используют волновод, обеспечивающий многократное отражение лучей от границы раздела волновод/аналит. В литературе такие волноводы, чаще всего выполненные в виде трапецоида, нередко именуют «элементами (кристаллами) многократно нарушенного полного внутреннего отражения» (МНПВО) [6]. В качестве материала такого волновода, т.е. прозрачной среды с высоким показателем преломления n , могут быть использованы многие вещества, например, халькогенидное стекло ($n=2.3-3$) [7], сапфир ($n=1.8$), полупроводники ($n=3.4-4$) и т.д.. Среди полупроводников наиболее популярными у крупных производителей, являются Ge, ZnSe и Si, при этом габариты и некоторые другие характеристики промышленно изготавливаемых полупроводниковых элементов МНПВО не всегда в полной мере отвечают тенденции миниатюризации в приборостроении. Арсенид индия ($n = 3.42$) является путем к решению задач, для которых непригодны более распространённые материалы.

Одним из ключевых свойств InAs, важного при создании кристаллов МНПВО, помимо высокого коэффициента преломления n является наличие плоскостей наименьшей спайности $\{110\}$, характерных для всех полупроводников A_3B_5 и позволяющих получать требуемую форму кристалла, например, трапецоида, простым скалыванием пластины, вырезанной в направлении $[111]$, по этим плоскостям. Процедура скалывания по плоскостям $\{110\}$ для создания требуемой формы образца давно освоена в технологии создания инжекционных лазеров, в которых пары параллельных друг другу плоскостей образуют резонатор Фабри Перо.

При использовании в качестве зондирующего источника СД форма кристалла МНПВО в виде трапецоида не является строго необходимой. В отличие от лазеров диаграмма направленности у СД, не обременённых фокусирующими элементами, широкая, описываемая распределением Ламберта. Это означает, что значительная часть введенного в InAs излучения СД будет иметь углы падения, превышающие угол полного внутреннего

отражения на границе раздела InAs/воздух или InAs/анализируемое вещество, т.е. будет создавать полезный сигнал при измерениях методом МНПВО. Из этого следует, что кристалл МНПВО может иметь в том числе и форму параллелепипеда. Отметим, что отечественная промышленность по-прежнему предлагает широкую номенклатуру подложек InAs, прозрачных в средней ИК области спектра [8].

Высокая эффективность оптической связи НПВО-кристаллом/волноводом из InAs может достигаться путем «прямого» монтажа флип-чип светодиода на плоскую поверхность НПВО-кристалла/волновода за счет использования халькогенидного «клея» с высоким показателем преломления ($n = 2.4$) [7,9]. Однако даже в этом случае френелевские потери на границе InAs /стекло могут достигать 48%. При использовании в качестве СД и ФД структур на основе твердых растворов InAs их возможно интегрировать с волноводом из InAs без каких-либо дополнительных фокусирующих элементов, например, с использованием эпитаксиальной технологии выращивания монокристаллических полупроводниковых структур с последующей многостадийной фотолитографией и выкалыванием [9]. Таким образом реализуется, например, монокристаллическая микрооптопара (анг. термин – “on-chip sensor”, русскоязычный аналог этого термина – «система на кристалле»). Если в ней излучение не покидает монокристалльный чип, т.е. распространяется от СД в ФД внутри прозрачной подложки [10–12], то микрооптопара может выступать в роли датчика МНПВО [10,11].

Еще одним преимуществом микрооптопары является возможность пропорционального уменьшения ее физических размеров, поскольку при этом количество отражений от границы раздела кристалл МНПВО/аналит остается постоянным, следовательно, при прочих равных условиях остается постоянным и полезный сигнал в ФД. Уменьшение размеров ФД и, соответственно, увеличение его динамического сопротивления, весьма актуально при поиске решения, обеспечивающего получение максимального

отношения сигнал/шум при работе с современными операционными усилителями электрических сигналов [13].

Имеются в монолитном исполнении и недостатки – тепло от работающих элементов или от вещества, с которым датчик находится в контакте передается по кристаллу и влияет на характеристики всех элементов датчика. В этом случае необходимо измерять температуру хотя бы одного из его компонентов, для проведения калибровки полученных результатов при их анализе. Нам доступно измерение температуры ФД с помощью анализа его вольт-амперной характеристики (ВАХ) [11]. Для повышения точности анализа полезно знать так же и температуру СД, так как она может существенно отличаться [14].

Взаимодействие описанных выше параметров делает датчики МНПВО из микрооптопары на основе InAs перспективными для применения при анализе жидкостей и твердых тел, но требующими тщательного изучения взаимодействия их компонент.

Цель и задачи работы

Цель работы - изучение особенностей фотоэлектрических и люминесцентных свойств, согласованных с помощью волновода оптопар светодиод-фотодиод.

Для успешного достижения этой цели в работе решались следующие основные задачи:

1. Изучение особенностей InAs при использовании в качестве кристалла МНПВО.
2. Анализ влияния токового разогрева и тепловых свойств исследуемых веществ, контактирующих с поверхностью микрооптопары, на результаты измерений.
3. Выбор алгоритма калибровки, устраняющего, влияние температуры на результат измерений.

Апробация работы

1. Карандашев С.А., Лухмырина Т.С., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Усикова А.А. «Об использовании арсенида индия в качестве материала волновода при измерениях методом нарушенного полного внутреннего отражения» Оптика и спектроскопия, 2021, том 129, вып. 9
2. Karandashev, S. A., Lukhmyrina, T. S., Matveev, B. A., Remenny, M. A., & Usikova, A. A. «p-InAsSbP/n-InAs Double Heterostructure as an On-Chip Midinfrared Evanescent Wave Sensor» of Liquids. *physica status solidi (a)*, 2022, 219(2), 2100456.
3. С. А. Карандашев, А. А. Климов, Т. С. Лухмырина, Б. А. Матвеев, М. А. Ременный, А. А. Усикова «Микрооптопара ($\lambda = 3.4$ мкм) на основе двойной гетероструктуры InAsSbP/InAs для измерения концентрации этанола в водном растворе методом МНПВО» Опт. и спектр. (Принято к печати)

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлись микрооптопары с рабочей длиной волны $\lambda = 3.4-4.7$ мкм, выращенные методом жидкофазной эпитаксии на подложках из InAs различной ориентации. Каждая микрооптопара содержала в себе четыре или три анода и один или три катода, полученных с использованием стандартной фотолитографии и жидкостного химического травления. С помощью химического травления также утонялась и полировалась ростовая подложка до толщины менее 160 мкм. Контакты анодов и катодов на основе золота были сформированы на одной стороне чипа путем напыления и термического испарения в вакууме с последующим нанесением толстого (3 мкм) золотого покрытия.

Измерялись как отдельные (несмонтированные) микрооптопары, в таком случае для подключения к диодам использовались прижимные контакты, а чип размещался на теплоотводящей платине; так и смонтированные с помощью технологии флип-чип на печатных платах из Si или AlN с металлизацией Cu-Ni-Au. При флип-чип монтаже чипы устанавливались вверх дном, так что подложка InAs выступала в качестве активной поверхности датчика, как схематически показано на рис. 1.

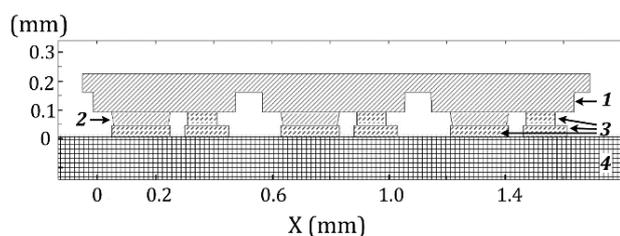


Рисунок 1. Пример схемы продольного сечения, смонтированной на печатную плату методом флип-чип, микрооптопары: 1) утоненная ростовая подложка InAs, 2) аноды чипа, 3) металлизация печатной платы с нанесенным припоем, 4) печатная плата.

Спектры электролюминесценции СД (ЭЛ) и чувствительности ФД измерялись на смонтированных на платах чипах в импульсном режиме (10 мкс, 2 кГц). Измерения спектра ЭЛ проводились с помощью

охлаждаемого CdHgTe-детектора, а чувствительности ФД с использованием Globar в качестве источника света.

ВАХ измерялись в непрерывном режиме с помощью SourceMeter Keithley 6430, и были получены как без засветки со стороны СД ($I_{LED} = 0$) – темновые ВАХ, так и при активации одного из диодов (СД) в составе микрооптопары ($I_{LED} = 10-120$ mA) - «световые» ВАХ. При этом под фототоком понималась разность тока при активации СД и темнового тока: $I_{ph} = |I_{light} - I_{dark}|$ в нуле смещения. Средняя температура активных слоев ФД определялась из анализа ВАХ путем измерения динамического сопротивления при нуле смещения (R_0), которое связано с производной ВАХ при $|U| < 5$ мВ как $1/R_0 = dI/dU$.

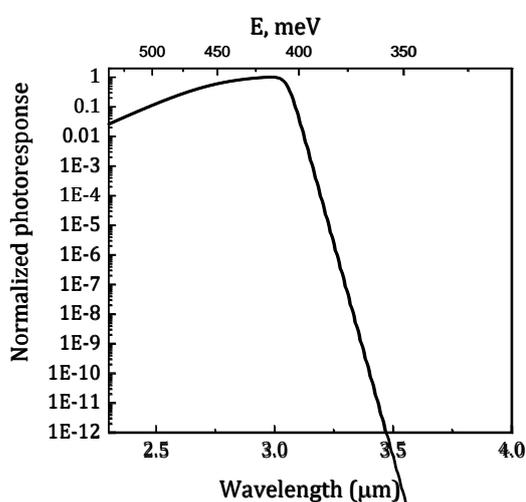


Рисунок 2. Спектр чувствительности ИК-микроскопа УТК1.

Распределения температуры на поверхности смонтированной на плате микрооптопары с рабочей длиной волны $\lambda = 4.7$ мкм при активации одного из диодов были получены с помощью ИК-микроскопа УТК1 [15], его спектр чувствительности представлен на рис. 2.

ИК микроскоп регистрирует не температуру, а интенсивность теплового излучения тела $\sim a \cdot T^4$, где коэффициент a – отражает излучательную способность материала, также регистрируемая интенсивность зависит от наклона и гладкости поверхности исследуемого образца. Поэтому перед основными измерениями была получена серия изображений исследуемой микрооптопары при известных температурах (293-363 К). На основе этих изображений для каждой точки микрооптопары была построена калибровочная кривая, связывающая интенсивность, зафиксированную ИК микроскопом, с температурой образца. С помощью данных кривых

проводился итоговый пересчет интенсивности в температуру в измерениях с активированным СД.

Термические сопротивления R_{th} слоев смонтированной на плате микрооптопары (рис.1) с рабочей длиной волны $\lambda = 4.7$ мкм определяли с помощью прибора «Thermaltester T3Ster» [16]. Из термического сопротивления вычислялись теплопроводности слоев K как:

$$K = \frac{h}{R_{th}S}$$

где h – толщина слоя, S – площадь, через которую переносится тепло, примерно равная площади анода СД. Полученные значения теплопроводностей использовались в численной модели, использовавшейся для оценки распределения температуры по объему микрооптопары при активации одного из диодов.

Моделирование пространственного распределения температуры внутри смонтированной на плате микрооптопары выполнялось методом конечных элементов в программе Comsol Multiphysics путем решения стационарного уравнения теплопроводности. 3D-модель повторяла реальный образец, ее продольное сечение показано на рис.1. Предполагалось, что вся электрическая мощность ($P = I*V$), приложенная к СД, переходит в тепло, так как его внутренняя квантовая эффективность меньше 10% [17].

Результаты и их обсуждение

Распространение излучения СД в микрооптопаре

Изучалась микрооптопара 1x4 анода с рабочей длиной волны излучения $\text{FWHM}_1 = 0.5$ мкм, на основе гетероструктур (ГС) p-InAsSbP/n-InGaAsSb, выращенных на подложке n⁺-InAs (111). Изучались как отдельные чипы (#S6269) с $\lambda_{1\text{max}} = 3.6$ мкм [18], так и смонтированные на монтажных платах из Si методом флип-чип (#S6279) с $\lambda_{2\text{max}} = 3.7$ мкм. На тыльной (плоской) стороне n⁺-InAs образцы #S6279 содержали фотонный кристалл (ФК) с периодом 3 мкм (фото на рис. 3).

Четыре квадратные мезы 70×70 мкм с индивидуальными анодами располагались в линию вдоль длинной стороны; общий для всех четырех элементов П-образный катод располагался сбоку от мез как показано на рис. 3.

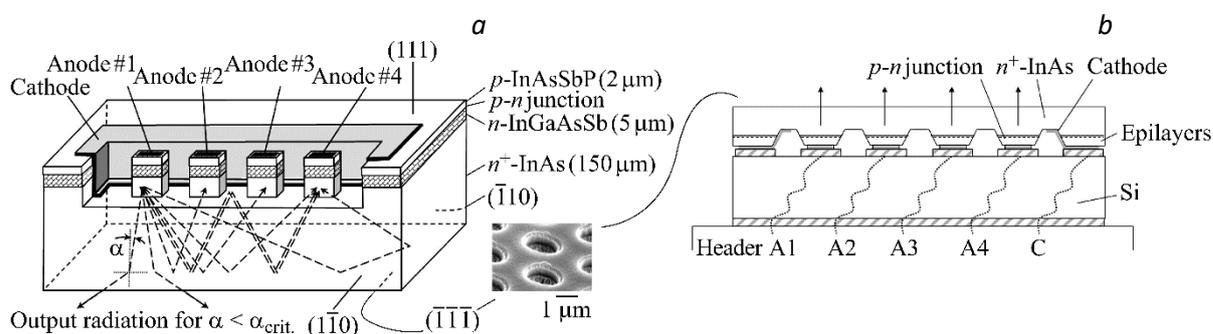


Рисунок 3. (а) Схема чипа линейки 1×4 с двумя сколотыми боковыми плоскостями $\{110\}$ и двумя гладкими поверхностями $\{111\}$ и (b) схема сечения того же чипа, смонтированного на кремниевой контактной плате (Si) [19]. Стрелками показаны лучи, покидающие кристалл при $\alpha < \alpha_{\text{crit}}$. В нижнем правом углу рис. (а) приведена фотография поверхности подложки n⁺-InAs с периодическим рельефом (поле $\sim 3.5 \times 5$ мкм²).

На рис. 4 (а) и (b) приведены темновая ($I_{\text{LED}}=0$) и «световые» ($I_{\text{LED}}=10-50$ мА) ВАХ одного из элементов несмонтированной диодной линейки 1x4, выбранного в качестве ФД. Из рис. 4 (b) отчетливо видно смещение ВАХ ФД в область отрицательных значений токов при $U=0$, связанное с появлением фототока при поглощении излучения активированного СД. С увеличением

тока СД (0-50 мА) динамическое сопротивление в нуле смещения R_0 в ФД уменьшалось с 3.9 кОм до 3.6 кОм, отражая некоторый разогрев всего чипа при выделении тепла (см. обсуждение вопросов разогрева в гетероструктурах, в которых р–n-переход удален от теплоотвода из-за относительно толстой подложки InAs [20] или приближен к нему в образцах типа флип-чип [14,20]).

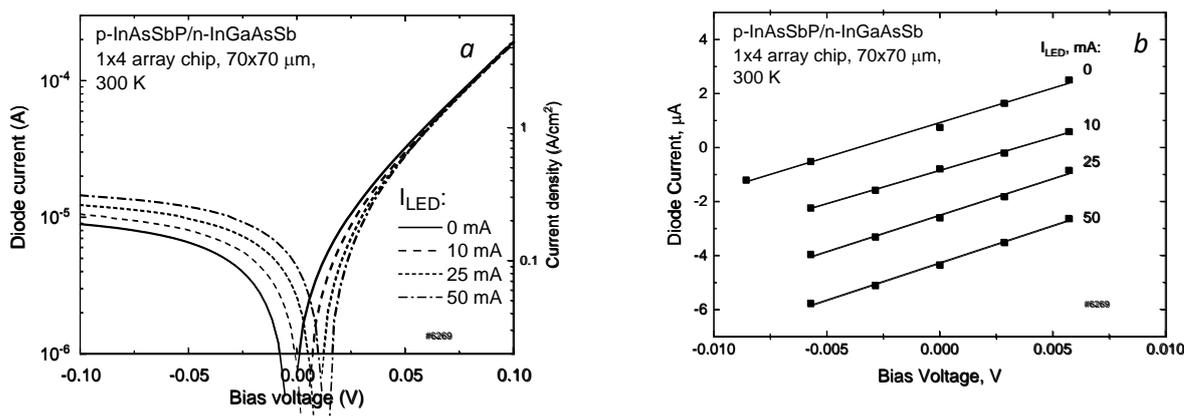


Рисунок 4. Темновая ($I_{LED}=0$) и «световые» ($I_{LED}=10-50$ мА) вольт-амперные характеристики одного из элементов чипа несмонтированной диодной линейки 1x4, выбранного в качестве ФД.

Полученная из данных на рис. 4 зависимость фототока ФД I_{ph} при нулевом смещении ($U=0$) представлена на рис. 5. Там же приведены значения I_{ph} в

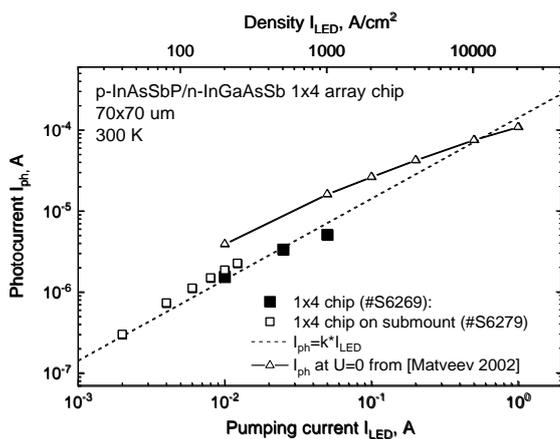


Рисунок 5. Зависимость фототока ФД от тока накачки СД в чипе 3.6 мкм (■) и в смонтированной линейке 3.7 мкм (□) от тока через светодиод. ▲ - данные из работы [Matveev 2002] для иммерсионных СД и ФД 3.4 мкм.

дальнем от СД (#1 на рис. 3) элементе линейки (#4 на рис. 3), смонтированной на Si плате при разных значениях тока СД. Как видно из рис. 5 величина фототока I_{ph} в несмонтированном чипе лишь немногим уступает I_{ph} в линейке на монтажной плате. При этом в области малых токов зависимость I_{ph} от I_{LED} , близка к линейной; в области больших токов имеет место отклонение от

линейной зависимости, вероятнее всего, связанное с возрастанием Оже-рекомбинации при увеличении концентрации инжектированных носителей заряда. Там же на рис. 5 приведены значения импульсных ($10 \mu\text{s}$, 500 Hz) фототоков "немоно-литного" датчика метана на основе дискретных ФД и СД с оптической связью через сферическое зеркало, содержащих иммерсионные линзы диаметром 3.5 mm и полупроводниковые структуры p-InAsSbP/n-InAs ($\lambda = 3.4 \mu\text{m}$), описанные в [21]. Как видно из рис. 5 значения фототока для пары СД/ФД ($\lambda=3.4 \text{ мкм}$) [21] в 2-3 раза превышает I_{ph} для пары СД/ФД ($\lambda = 3.7 \text{ мкм}$), что мы связываем, прежде всего, с уменьшением квантового выхода электролюминесценции с увеличением длины волны, сопоставимым с общей тенденцией снижения мощности средневолновых ИК СД [22].

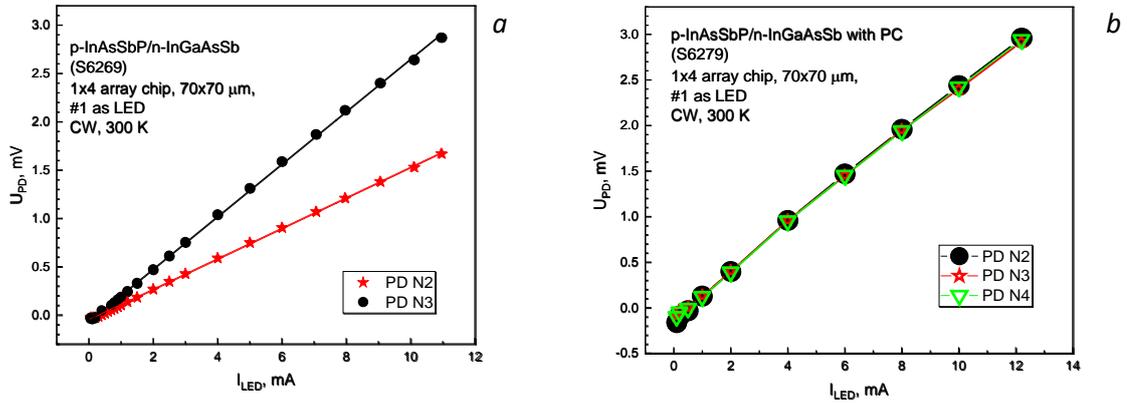


Рисунок 6. Зависимость фотоэдс ФД от тока накачки СД в чипе 3.6 мкм (а) и в смонтированной линейке 3.7 мкм (б) в зависимости от тока СД при различном удалении ФД от СД.

Обычно фототок в микрооптопарах уменьшается с увеличением расстояния СД-ФД как на рис. 6 (а), в случае с несколькими ФД, расположенными линейно, это связано как с вкладом поглощения подложки, так и с поглощением излучения ФД, расположенными ближе к источнику излучения. При нанесении на поверхность микрооптопары фотонного кристалла картина меняется, так рис. 6 (b) показано, что при использовании анода #1 как СД, а #2, 3, 4 как ФД фотоэдс не зависит от расстояния ФД-СД, что вероятно связано с изменением распределения излучения внутри волновода вследствие дифракции.

Зависимость фотоответа ФД в составе микрооптопары ($\lambda = 3.4$ мкм) на основе двойной гетероструктуры InAsSbP/InAs от концентрации этанола

Микрооптопары были изготовлены на основе ДГС InAsSbP/InAs; их зонная диаграмма, а также способность работы как в качестве ФД, так и в качестве СД, были описаны в [23]. Схема расположения слоев в ДГС приведена на вставке в левом верхнем углу рис. 7 (b): на сильнолегированной проводящей подложке n^+ -InAs (001) $n \approx 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, утоненной до 160 мкм, методом жидкофазной эпитаксии были выращены широкозонный слой N-InAsSbP толщиной 3 мкм, активный слой n-InAs толщиной 7 мкм и контактный слой P-InAsSbP толщиной 3 мкм.

Изучались микрооптопары, состоящие из диодов двух типов: каждый диод был размером 0.4×0.55 мм, первый тип (S1) состоял из круглой мезы $\varnothing_m = 185$ мкм с круглым металлическим анодом $\varnothing_A = 150$ мкм, у второго типа (S2) $\varnothing_m = 95$ мкм и $\varnothing_A = 72$ мкм, каждый диод так же имел металлический катод, размещенный сбоку от анода, как показано на рис. 7 (a). Микрочип датчика размером 0.4×1.8 мм (см. фотографию на рис. 7 (a)) состоял из трех описанных выше диодов, имеющих общую подложку n^+ -InAs, разделенных канавками травления и расположенных с периодом 580 мкм (в направлении

X на рис. 7). Боковые поверхности чипа были получены скалыванием подложки по плоскостям $\{110\}$.

Микрооптопара размещалась на полированной теплоотводящей пластине, как показано на рис. 7 (b) (A1-A3, C1-C3). В серии экспериментов между теплоотводом и подложкой n^+ -InAs был введен слой этанола технической (96% C_2H_5OH), дистиллированной воды или водно-спиртовой смеси (40% этанола, 60% дистиллированной воды: “водка”) (аналита (*analyte*)) толщиной 1-2 мкм.

Спектр электролюминесценции (ЭЛ) и токовая фоточувствительность (S_I) диодов представлены на рис. 8. Внутренняя квантовая эффективность СД составляет 0.05, а ФД 0.7 [23,24]. Там же приведен спектр пропускания подложки n^+ -InAs; положение максимума её пропускания на $\lambda = 3.4$ мкм соответствует длине волны максимума произведения спектров ЭЛ и S_I .

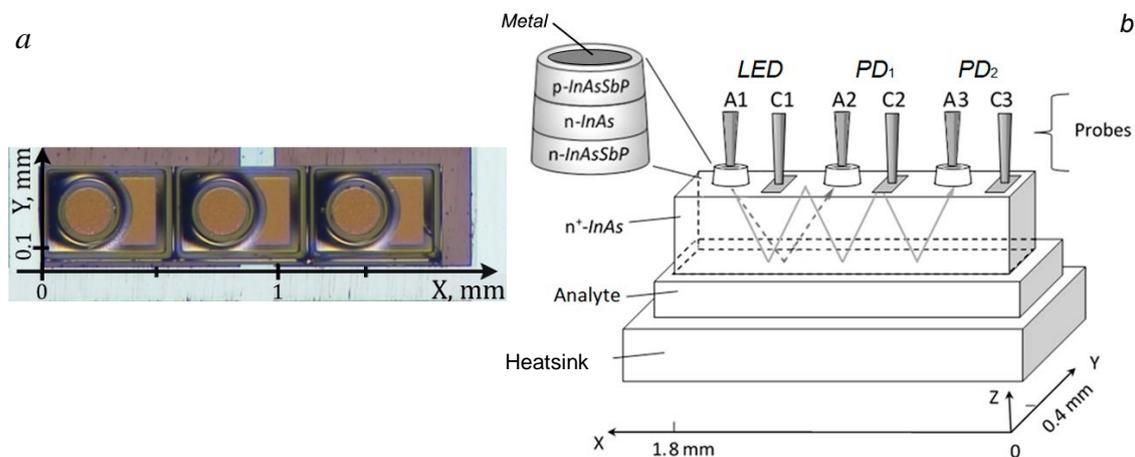


Рисунок. 7. (a) Фотография поверхности датчика со стороны контактов.

(b) Схема датчика. Линиями со стрелками показаны примеры хода лучей от СД (LED) к ФД₁ (PD_1) и ФД₂ (PD_2). A1, A2, A3 – аноды, C1, C2, C3 – катоды. На вставке изображена схема ДГС. *Metal* – металлический анод, *probes* – щупы, *analyte* – анализируемое вещество (аналит), *heatsink* – теплоотводящая пластина.

ВАХ СД при прямом смещении ($U_{fb} < 0.35$ V) следовала модифицированной формуле Шокли:

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{eU}{\beta kT}\right) - 1 \right) \quad (2)$$

с коэффициентом идеальности для S1 $\beta_1 = 1.02$ и для S2 $\beta_2 = 1.25$ и током насыщения $I_{01} = 1.1 \cdot 10^{-5}$ А и $I_{02} = 4 \cdot 10^{-6}$ А. При больших прямых смещениях и токах накачки $I_{fb} = 120\text{--}1000$ мА экспоненциальная зависимость ($I = I_0 \cdot \exp(eU/\beta kT)$) сменялась линейной ($I_{fb} \sim U_{fb}/R_s$), определяемой последовательным сопротивлением СД $R_{s1} = 0.11$ Ом и $R_{s2} = 0.27$ Ом.

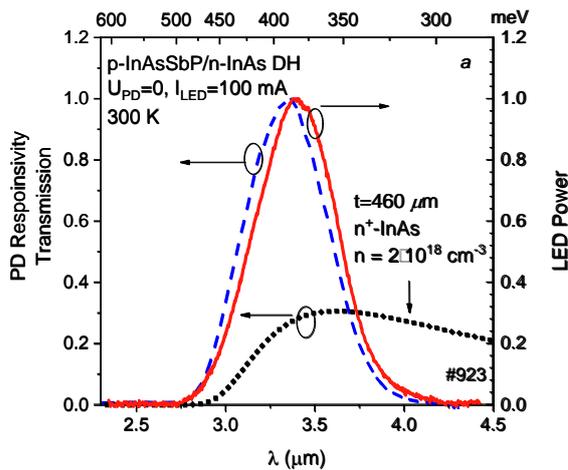


Рисунок 8. Чувствительность ФД (синяя штриховая кривая) и спектр электролюминесценции СД (красная кривая) в составе датчика. Оптическое пропускание подложки n^+ -InAs толщиной 460 мкм (черная пунктирная кривая).

Фототоков связано, вероятно, как с разницей в оптическом пути от СД до ФД (см. рис. 7) (т.е. вкладом поглощения подложки), так и с тем, что значительная часть излучения, исходящего из СД, после отражения от границы раздела n^+ -InAs/воздух поглощалась в ближайшем к нему ФД₁.

ФД разогревались вследствие тепла, выделяемого работающим СД и передающимся через подложку, так в микрооптопаре на диодах S1 температура ФД₁ при СД от 0 до 100 мА увеличивалась на $\Delta T = 9$ К, а на S2 на $\Delta T = 7$ К. Данные значения ΔT сопоставимы с экспериментальными данными в аналогичных структурах в [23].

При измерениях фототока диод №1 (крайний левый диод на рис. 7) работал как СД, оставшиеся два диода работали в качестве фотоприемников.

На рис. 9 показаны типичные ВАХ диода ФД1 в микрооптопарах из S1 (a) и S2 (b) на стеклянной пластине. В обоих ФД в данных микрооптопарах (ФД₁ и ФД₂) было зафиксировано появление фототоков (I_{ph}) при активации СД, при этом фототок в ближнем к СД фотодиоде был почти на порядок больше, чем в дальнем от СД фотодиоде. Различие в значениях

Заметный рост температуры связан с недостаточно эффективным теплоотведением в несмонтированных чипах. Температура ΦD_1 в микрооптопаре S1 была весьма чувствительна к теплопроводности теплоотводящей пластины, как видно из рис. 10. Так при замене стекла на алюминий или медь значение ΔT при $I_{LED} = 0 \dots 120$ мА упало до $\Delta_{Al} T = 6$ К и до $\Delta_{Cu} T = 4$ К, соответственно.

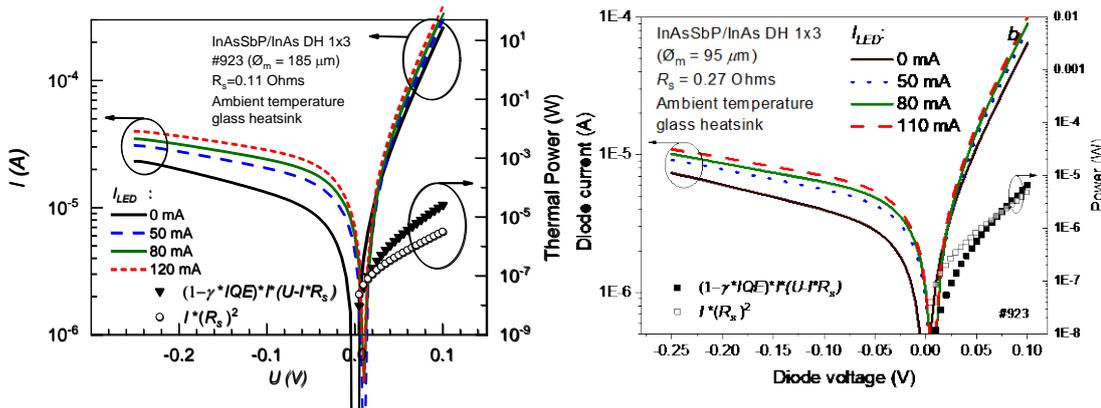


Рисунок 9. ВАХ центрального диода №2 (используемые контакты: A2, C2) в микрооптопаре на диодах S1(a) и S2(b) на стеклянной пластине (без анализа), при нескольких токах накачки СД (используемые контакты: A1, C1).

Строго говоря, в нашем случае тепло выделяемое СД при протекании через него тока возникает не только из-за джоулева разогрева. Во-первых, последовательное сопротивление светодиода R_s слишком мало для создания основного вклада в тепловую мощность тепловой мощности. С другой стороны, внутренняя квантовая эффективность (ВКЭ) в светодиодах на основе InAs среднего ИК-диапазона значительно ниже единицы и находится в диапазоне от 2 до 20% по литературным данным. Низкий IQE значение дает веские основания для преобразования почти всей электрической мощности, определяемой как $I \cdot U$, в тепло посредством процесса безызлучательной оже-рекомбинации. Кроме того, оптическая эффективность извлечения фотонов с плоской поверхности в светодиодах среднего ИК-диапазона (g) ограничена $\sim 2\%$, что вносит дополнительный вклад в тепло. Оценки вкладов оже- $(1 - \gamma \cdot IQE) \cdot I \cdot (U - I \cdot R_s)$ и джоулева $(I \cdot R_s)^2$ процессов нагрева при $\gamma = 0.02$,

$\text{IQE} = 0.02$ представлены на рис. 9. Видно, что основной механизм выделения тепла коренным образом зависит от геометрии структуры, при этом вклад оже процесса нагрева по крайней мере сравним с джоулевым.

При использовании микрооптопары в качестве контактного датчика жидкостей или твердых тел изменение её температуры будет обусловлено не только токовым разогревом СД, но и температурой и типом анализита, что может явиться источником больших погрешностей измерений.

Действительно, при проведении измерений с изменяющейся во времени температурой микрооптопары изменяется и коэффициент передачи тока (КПТ = $I_{\text{ph}}/I_{\text{LED}}$) [3,23,25]. Для устранения влияния этого эффекта на результат измерения обычно используют калибровочные алгоритмы, позволяющие

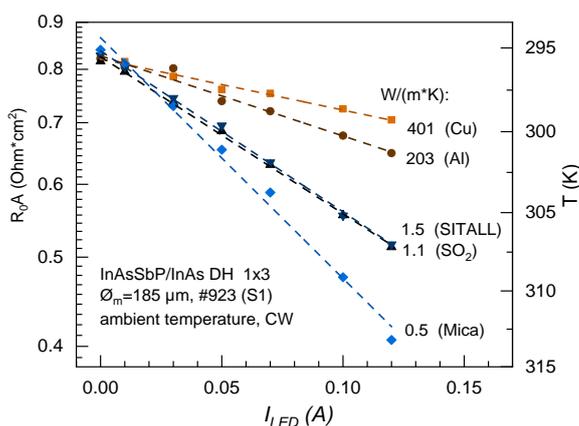


Рисунок 10. Произведение площади сопротивления при нулевом смещении в диоде №2 в микрооптопаре S2 в зависимости от тока накачки CW в диоде №1 при различных материалах радиатора.

анализировать КПТ оптопары, полученные при различной температуре. В наших работах использовались два алгоритма описанные в [11] и [26], различие которых состояло в основном в использованной для калибровки кривой и плотности тока СД. В работе [11], описывающей микрооптопару на S1. использовалась зависимость фототовета ФД в составе микрооптопары от тока СД при стабилизированной температуре, в то время как в работе [26], посвященной микрооптопаре на S2, использовалась зависимость фототовета ФД немонолитной («дискретной») оптопары от тока накачки СД, работавшего в импульсном режиме (10 μs , 2 kHz). Дискретная оптопара была термостабилизирована и состояла из пространственно-

разнесенных ФД на основе твердого раствора CdHgTe и СД, аналогичного использовавшемуся в микрооптопаре S2.

На рис.11 приведена зависимость R_0 ФД₁ от КПТ микрооптопары СД-ФД₁. Введение слоя жидкости толщиной 1-2 мкм между подложкой InAs и стеклом приводило к росту R_0 (снижению температуры $p-n$ перехода), из-за охлаждения датчика при испарении анализируемой жидкости. Стоит отметить, что значения R_0 и при нулевом токе СД зависели от скорости испарения аналита. Данные, представленные на рис. 11 (a) и (b), обрабатывались с помощью калибровочных алгоритмов [11] и [26] соответственно, в результате чего была получена величина, отражающая прозрачность оптического пути СД-ФД₁ (нормированную прозрачность оптической системы).

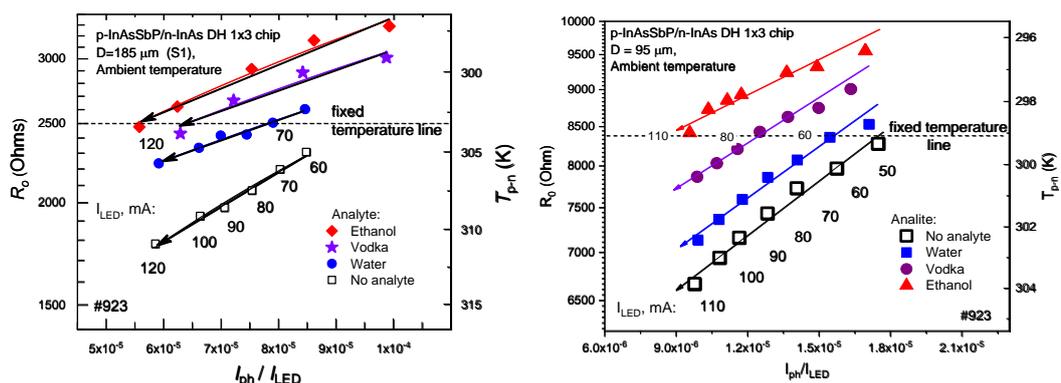


Рисунок 11. Сопротивление ФД₁ в нуле смещения от КПТ датчика при использовании различных аналитов. а) Микрооптопары S1 с $\varnothing_m = 185$ мкм и б) S2 с $\varnothing_m = 95$ мкм. Стрелками обозначены трековые линии наборов данных.

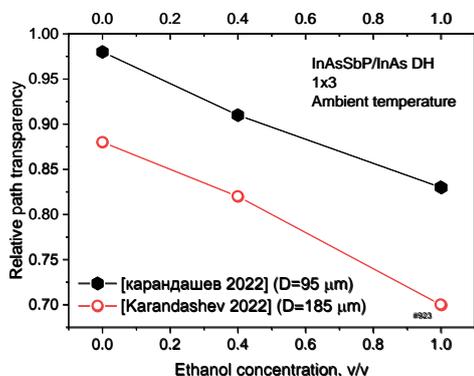


Рисунок 12. Нормированная

прозрачность для 2-х оптических систем (1×3) $\lambda = 3.4$ мкм, полученная для микрооптопары S1 [11] (185 мкм) и S2 [26] (95 мкм), в зависимости от объемного содержания этилового спирта в водном растворе (*Ethanol concentration*).

Величины нормированной прозрачности оптической системы для обоих случаев показаны на рис. 12. Видно, что для обеих микрооптопар она постепенно увеличивается с уменьшением концентрации этанола. Это связано как с изменением угла полного внутреннего отражения, так и с поглощением исчезающей волны на границе раздела InAs/аналит. При этом значение прозрачности для случая с “водкой” близко к сумме значений для чистого этанола и воды с коэффициентами, равными содержанию спирта в растворе.

Анализ распределения тепла, выделенного активированным СД, в микрооптопарах на основе ДГС InAsSbP/InAsSb/InAs.

Исследовалась двойная гетероструктура InAsSbP/InAsSb/InAs с рабочей длиной волны $\lambda = 4.7$ мкм, выращенная на слаболегированной подложке n-InAs (100) ($n = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$), к которой прилегал активный слой n-InAs_{1-x}Sb_x

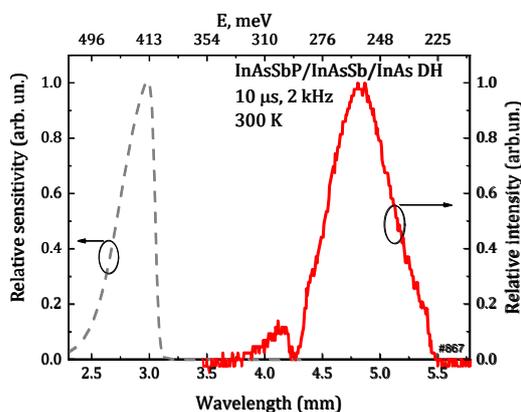


Рисунок 13. Чувствительность матрицы ИК микроскопа (прерывистая кривая) и спектр ЭЛ СД (сплошная кривая)

толщиной ~ 10 мкм и далее следовал контактный слой p-InAs_{1-x-y}Sb_xP_y(Zn). Зонная диаграмма данной гетероструктуры и её способность работать как в качестве ФД, так и в качестве СД описаны в работе [27]. Внутренняя квантовая эффективность ФД (300 К) составляет 0.5. При активации СД с $I_{LED} = 100$ мА на ближайшем ФД (ФД₁) регистрировался фототок 1 мкА. Данная обеспечивает отсутствие вклада электролюминесценции СД в изображении ИК микроскопа, так как их спектры не пересекаются, как это показано на рис. 13.

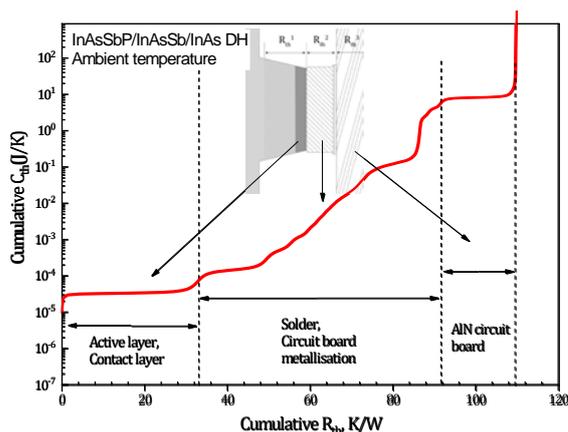


Рисунок 14. Кумулятивная структурная функция

$R_{th}^1 = 33 \text{ K/W}$, что соответствует теплопроводности слоя $K_1 \approx 24 \text{ W/(K*m)}$, составной слой, состоящий из припоя, металлизации платы и переходного участка металлизация-плата $R_{th}^2 = 33 \text{ K/W}$ ($K_2 \approx 31 \text{ W/(K*m)}$), а плата AlN $R_{th}^3 = 18 \text{ K/W}$ ($K_3 \approx 246 \text{ W/(K*m)}$). Полученные значения были использованы в моделировании температурного распределения внутри смонтированного чипа.

На рис. 15 (а) сплошными линиями показано распределение температуры T_{surf} на поверхности чипа по центру вдоль оси X, полученное с помощью ИК микроскопа, после обработки карты распределения интенсивностей приведенной на вкладке. Отрезками там же показана средняя температура активной области неактивированных диодов (T_{al}), полученная из анализа R_0 .

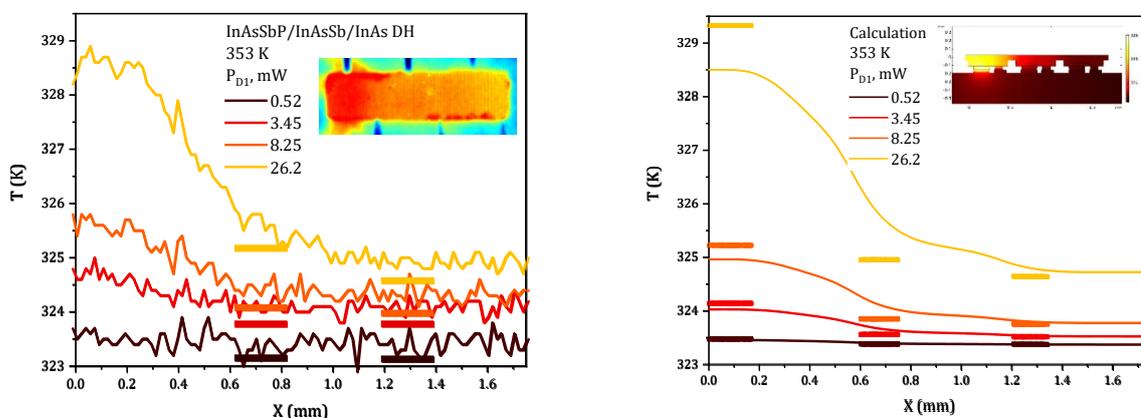


Рисунок 15. а) Сплошные линии - распределение температуры на поверхности подложки сенсора, полученное с помощью ИК микроскопа

Микрооптопара на основе данной ДГС была методом флип-чип смонтирована на печатной плате из AlN. Зависимость теплопроводности смонтированного чипа от теплового сопротивления представлена на рис. 14. Активный и контактный слой чипа имеют тепловое сопротивление

при различных токах в D1. Отрезки – температура активной области D2 и D3, полученная из измерения R_0 b) Расчетные значения, полученные на участках аналогичных (а).

На рис. 15 (b) показаны расчетные распределения температуры на поверхности чипа и в его активных областях аналогично рис. 15 (a), относительное отклонение расчетных данных от экспериментальных составило не более 5%, при этом соотношение между T_{al}^{PD} и T_{surf}^{PD} и характер зависимости величин T_{al}^{PD} и T_{surf} от мощности также одинаковы. Градиенты распределения вычисленной температуры, приведенные на вставках на рис. 15 (b) так же иллюстрируют распределение температуры по высоте чипа и показывают, что температура на его поверхности выше чем в области мезы.

Расчетная зависимость ($T_{al}^{LED} - T_{al}^{PD}$) от мощности линейна, как и в работе [14], и температура активной области СД исследуемой структуры Может быть выражена через температуры ФД как:

$$T_{LED} = \begin{cases} 163 * P + T_{PD1} \\ 176 * P + T_{PD2} \end{cases}.$$

Тогда реальная температура активной области СД при мощности $P = 26.2$ мВт, т.е. при $I_{LED} = 100$ мА на составит 329.5 К, что на 3.5 К выше, чем температура ФД₁.

Заключение

Таким образом, в ходе проведения работ получены следующие результаты: предложена конструкция миниатюрной монолитной микрооптопары с интегрированными в едином монокристаллическом чипе светодиоде, фотодиоде и волноводом на основе InAs; оптическая связь между светодиодом и фотодиодом осуществляется через прозрачную подложку из InAs, при этом полученные значения фототоков сопоставимы с достигаемыми в датчиках химического состава на основе аналогичных дискретных иммерсионных свето- и фотодиодов.

Нанесение периодического рельефа в виде фотонного кристалла на поверхность прозрачной подложки n-InAs диодной линейки, содержащей ряд индивидуально адресуемых активных областей из InGaAsSb, снижает зависимость коэффициента оптической связи между этими областями от расстояния между ними.

Коэффициент передачи по току (I_{ph}/I_{LED}) в монолитных диодных микрооптопарах уменьшается до 6 раз при увеличении рабочей длины волны с 3.4 до 4.7 мкм, что связано с увеличением безызлучательной Оже-рекомбинации в активной области прямосмещенного элемента оптопары.

Проведены расчет и прямое измерение пространственного распределения температуры в монолитной микрооптопаре при подаче прямого смещения на светодиод; при этом зависимость температуры активной области светодиода от температуры активной области фотодиода близка к линейной.

В светодиодах InAsSbP/InAs с уменьшением площади активной области уменьшается относительный вклад безызлучательной Оже-рекомбинации с одновременным увеличением вклада процесса Джоуля в нагрев активной области.

В монолитной микрооптопаре на основе двойной гетероструктуры InAsSbP/InAs с прозрачной подложкой n^+ -InAs, фототок, индуцированный излучением светодиода, возрастает при уменьшении показателя преломления и коэффициента поглощения жидкости, имеющей контакт с поверхностью

подложки. Анализ фототока и сопротивления в нуле смещения фотодиода в совокупности с проведением предварительной калибровки позволяет отличать одну жидкость от другой и/или проводить количественный анализ состава жидкости, например, оценивать содержание спирта в водно-спиртовом растворе.

Полученные результаты открывают возможность создания миниатюрных и чувствительных в среднем инфракрасном диапазоне датчиков, измеряющих состав твердых или жидких сред методом МНПВО.

Список литературы

- [1] Lambrecht A and Schmitt K 2020 Mid-infrared gas-sensing systems and applications *Mid-infrared Optoelectronics* (Elsevier) pp 661–715
- [2] Tournié E and Cerutti L 2019 *Mid-infrared Optoelectronics: Materials, Devices, and Applications* (Woodhead publishing)
- [3] Матвеев Б and Сотникова Г 2019 Светодиоды средневолнового ИК диапазона на основе гетероструктур А 3 В 5 в газоаналитическом приборостроении. Возможности и применения 2014-2018 *Опт. и спектр.* **127** 300–5
- [4] Cortes A R and Chouikha M B 2021 Portable device and method for estimating a parameter of a polymer
- [5] Krier A 2007 *Mid-infrared semiconductor optoelectronics* vol 118 (Springer)
- [6] Комов А П, Власова И В and Терехова Е Н 2018 Применение ик спектрометрии многократно нарушенного полного внутреннего отражения для классификации различных объектов *Вестник Омского университета* **23**
- [7] Matveev B, Zotova N, Karandashev S, Remennyi M, Stus N and Talalakin G 2003 3.4/spl mu/m" flip-chip" LEDs for fiber optic liquid sensing *Proceedings of CAOL'2003. 1st International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers. Jontly with 1st Workshop on Precision Oscillations in Electronics and Optics (IEEE Cat. No. 03EX715)* vol 2 (IEEE) pp 138–40
- [8] Комков О С, Фирсов Д Д, Ковалишина Е А and Петров А С 2014 Спектральные характеристики поглощения в эпитаксиальных структурах на основе InAs при температурах 80 К и 300 К *Прикладная физика* 93–6
- [9] Карандашев, С А; Матвеев, Б А; Ременный, М А; Мохаммед Бен Чоуйка 2021 Датчик химического состава вещества (RF 2753854)
- [10] Карандашев С, Лухмырина Т, Матвеев Б, Ременный М and Усикова А 2021 Об использовании арсенида индия в качестве материала волновода при измерениях методом нарушенного полного внутреннего отражения. *Оптика и спектроскопия* **129** 2599–603
- [11] Karandashev S A, Lukhmyrina T S, Matveev B A, Remennyi M A and Usikova A A 2022 P-InAsSbP/n-InAs double heterostructure as an on-chip mid-IR evanescent wave sensor of liquids *Phys. status solidi (a)* **219** 2100456
- [12] Chen L, An X, Jing J, Jin H, Chu Z and Li K H 2020 Ultracompact chip-scale refractometer based on an InGaN-based monolithic photonic chip *ACS Applied Materials & Interfaces* **12** 49748–54
- [13] ГА Гаврилов, БА Матвеев, ГЮ Сотникова 2011 Предельная чувствительность фотоприемного устройства на основе фотодиодов А3 В5 среднего ИК-диапазона спектра *Письма в ЖТФ* **37** 50–7
- [14] Lawler J V and Currano J 2008 Thermal simulations of packaged IR LED arrays *Technologies for Synthetic Environments: Hardware-in-the-Loop Testing XIII* vol 6942 (International Society for Optics and Photonics) p 69420E
- [15] Bazovkin V, Mzhel'skii I, Kuryshv G and Polovinkin V 2011 Infrared scanning microscope with high spatial resolution *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* **47** 498–502
- [16] <http://www.micred.com/t3ster/> Simcenter T3STER
<http://www.micred.com/t3ster/>
- [17] Karandashev S, Matveev B and Remennyi M 2019 Indium arsenide-based spontaneous emission sources (Review: a Decade Later) *Semiconductors* **53** 139–49
- [18] Matveev B, Zadiranov Y M, Zakgeim A, Zotova N, Il'inskaya N, Karandashev S, Remennyi M, Usikova A, Usov O, Cherniakov A, and others 2009 Midinfrared ($\lambda = 3.6$ um) LEDs and arrays on InGaAsSb with photonic crystals *Photonic and Phononic Crystal*

Materials and Devices IX vol 7223 (International Society for Optics and Photonics) p 72231B

[19] Matveev B, Zadiranov Y M, Zakgeim A, Il'inskaya N, Karandashev S, Remennyi M, Usikova A, Cherniakov A, and others 2010 InGaAsSb LED arrays ($\lambda = 3.7 \mu\text{m}$) with photonic crystals *Photonic and Phononic Crystal Materials and Devices X* vol 7609 (International Society for Optics and Photonics) p 76090I

[20] Зотова Н, Ильинская Н, Карандашев С, Матвеев Б, Ременный М and Стусь Н 2008 Источники спонтанного излучения на основе арсенида индия *Физика и техника полупроводников* **42** 641

[21] Matveev B, Zotova N, Karandashev S, Remennyi M, Stus N and Talalakin G 2002 Backside illuminated In(Ga)As/InAsSbP DH photodiodes for methane sensing at $3.3 \mu\text{m}$ *Proc. SPIE* vol 4650 p 173

[22] Krier A, Repiso E, Al-Saymari F, Carrington P, Marshall A, Qi L, Krier S, Lulla K, Steer M, MacGregor C, and others 2020 Mid-infrared light-emitting diodes *Mid-infrared Optoelectronics* (Elsevier) pp 59–90

[23] Карандашев С, Матвеев Б and Ременный М 2019 Источники спонтанного излучения на основе арсенида индия (обзор: десять лет спустя) *ФТП* **53** 147–57

[24] Zakgeim A, Il'inskaya N, Karandashev S, Lavrov A, Matveev B, Remennyi M, Stus N, Usikova A and Cherniakov A 2017 Spatial redistribution of radiation in flip-chip photodiodes based on InAsSbP/InAs double heterostructures *Semiconductors* **51** 260–6

[25] Jia X, Roels J, Baets R and Roelkens G 2021 A Miniaturised, Fully Integrated NDIR CO₂ Sensor On-Chip *Sensors* **21** 5347

[26] Карандашев С, Климов, АА, Лухмырина Т, Матвеев Б, Ременный М and Усикова А 2022 Микрооптопара ($\lambda = 3.4 \mu\text{m}$) на основе двойной гетероструктуры InAsSbP/InAs для измерения концентрации этанола в водном растворе методом МНПВО *Опт. и спектр. (принято в печать)*

[27] Brunkov P, Il'inskaya N, Karandashev S, Lavrov A, Matveev B, Remennyi M, Usikova A, and others 2015 InAsSbP/InAs_{0.9}Sb_{0.1}/InAs DH photodiodes ($\lambda_{0.1} = 5.2 \mu\text{m}$, 300 K) operating in the 77–353 K temperature range *Infrared Physics & Technology* **73** 232–7