

## Фотодиоды для регистрации излучения квантово-размерных дисковых лазеров, работающих на модах шепчущей галереи (2.2–2.3 мкм)

© Е.В. Куницына<sup>1</sup>, М.А. Ройз<sup>2</sup>, И.А. Андреев<sup>1</sup>, Е.А. Гребенщикова<sup>1</sup>, А.А. Пивоварова<sup>1</sup>,  
М. Ahmetoglu (Afrailov)<sup>3</sup>, Е.В. Лебедок<sup>4</sup>, Р.Ю. Микулич<sup>4</sup>, Н.Д. Ильинская<sup>1</sup>, Ю.П. Яковлев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> University of Helsinki,  
Helsinki 00014, Finland

<sup>3</sup> Department of Physics, Uludag University,  
16059 Gorukle, Bursa, Turkey

<sup>4</sup> ГНПО „Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника“ Национальной академии наук Беларуси,  
220072 Минск, Республика Беларусь

E-mail: kunits@iropt9.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 25 февраля 2020 г.

В окончательной редакции 28 февраля 2020 г.

Принята к публикации 28 февраля 2020 г.

Фотодиоды, созданные на основе твердых растворов в системе GaSb-InAs, были впервые применены для исследования спектральных характеристик одиночных и сдвоенных дисковых WGM-лазеров, излучающих на модах шепчущей галереи в диапазоне 2.2–2.3 мкм. Емкость фотодиодов при диаметре фоточувствительной площадки 2.0 мм составляет  $C = 520$  пФ при  $U = -2$  В, что соответствует постоянной времени  $\tau = 53$  нс. Показано, что параметры созданных фотодиодов позволяют регистрировать излучение квантово-размерных дисковых лазеров при комнатной температуре и не использовать криогенное охлаждение.

**Ключевые слова:** фотодиоды, GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb-гетероструктуры, квантово-размерные дисковые лазеры, WGM-моды.

DOI: 10.21883/FTP.2020.07.49515.9378

### 1. Введение

В последнее десятилетие разработаны новые конструкции полупроводниковых лазеров, работающих на модах шепчущей галереи (WGM) в среднем ИК диапазоне при комнатной и близких к комнатной температурах [1,2]. Отличительной особенностью таких лазеров является использование дискового резонатора с высокой добротностью, что позволяет применять материалы с низким оптическим усилением. Кроме высокой добротности, дисковые WGM-лазеры демонстрируют более низкие значения порогового тока и расширенный диапазон частотной перестройки по сравнению с полосковыми лазерами [2], что делает их перспективными для создания оптических стандартов частоты.

Известно, что регистрация лазерного излучения в спектральном диапазоне 2–3 мкм является непростой научной и практической задачей. В данном диапазоне длин волн используются полупроводниковые фотоприемники на основе халькогенидов свинца, обнаружительная способность которых в настоящее время при неглубоком охлаждении приближается к теоретическому пределу [3]. Однако постоянная времени большинства фотоприемников на данных материалах составляет 100–400 мкс. В работе [4] сообщалось о создании быстродействующих фотоприемников на основе твердых растворов CdPbS для длин волн 2.1–2.4 мкм

с постоянной времени  $\tau = 20$ –50 мкс, а также фотоприемников на основе особоочищенной пленки PbS с  $\tau = 5$ –70 мкс при  $T = 295$  К. Авторами работы [5] был разработан PbS-фоторезистор, демонстрирующий спектральную чувствительность в диапазоне 0.4–3.0 мкм и  $\tau = 3$ –5 мкс. Такие приборы с рекордными параметрами востребованы в различных областях науки и техники, однако для работы с лазерами требуется существенно более высокое быстродействие. Следует отметить, что перспективными материалами следующего поколения для фотоприемников являются квантовые точки PbS и PbSe, включая коллоидные квантовые точки, и в этом направлении ведутся интенсивные исследования [6–8].

Другими широко применяемыми фотоприемниками, в том числе в диапазоне вблизи 3 мкм, являются фотодиоды на основе InSb [9]. Подробный обзор технологических аспектов выращивания материалов для InSb-фотодиодов методами MBE и MOCVD на подложках Si и GaAs дан в работе Разеги [10]. Одним из новых направлений в области создания высокочувствительных наноразмерных приборов является изучение фотоэлектрических свойств структур „металл–полупроводник–металл“ на основе нанопроволок InSb [11]. В последние годы развиваются исследования с целью создания HQT-InSb фотоприемников для детектирования ИК излучения при комнатной температуре [12]. Новые возможности в этой области, как было показано теоретически, открывает

Параметры эпитаксиальных слоев для фотодиодных гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb

Состав	Тип проводимости	Легирующая примесь	Температура выращивания, °С	Толщина, мкм
Ga <sub>0,78</sub> In <sub>0,22</sub> As <sub>0,18</sub> Sb <sub>0,82</sub>	<i>n</i>	Te	600	2.0–2.5
Ga <sub>0,66</sub> Al <sub>0,34</sub> As <sub>0,025</sub> Sb <sub>0,975</sub>	<i>p</i>	Ge	599	1.5–2.0

создание неравновесных *p-i-n* InSb-фотодиодов, обнаружительная способность которых может достигать  $3 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \text{Вт}^{-1}$  ( $T = 300 \text{ К}$ ) в спектральном диапазоне до 8 мкм [13]. Сообщалось о применении неохлаждаемых InSb фотодиодов с чувствительностью в диапазоне 2–7 мкм, объединенных в серии, для разработки сенсора таких газов, как CO<sub>2</sub>, CO и NO<sub>x</sub> [14]. Однако для эффективной работы большинства фотодиодов на основе InSb требуется охлаждение до 80–200 К.

В данной работе рассмотрена возможность применения фотодиодов, созданных на основе твердых растворов в системе GaSb-InAs, для регистрации излучения квантово-размерных дисковых WGM-лазеров с длиной волны 2.2–2.3 мкм при комнатной температуре.

## 2. Создание экспериментальных образцов и методы исследования

Одиночные и сдвоенные дисковые WGM-лазеры были изготовлены на основе квантово-размерной GaInAsSb/GaAlAsSb-гетероструктуры, процесс выращивания которой описан в работе [15], методом фотолитографии и жидкостного химического травления. Диаметр резонатора составлял 400 мкм, высота — около 3 мкм при высоте мезы 7 мкм. Лицевой омический контакт в форме кольца формировался с использованием взрывной фотолитографии и высоковакуумного термического напыления системы Cr/Au/Ni/Au. Далее проводилось утолщение лицевого контакта методом селективного электрохимического осаждения Au. Для создания сплошного омического контакта со стороны подложки GaSb проводилось последовательное напыление систем Cr/Au/Ni/Au и Cr/Au. Контакты вжигались в атмосфере водорода при температуре 300°C. Лазерные чипы монтировались на стандартном корпусе ТО-18.

Фотодиоды были созданы на основе гетероструктур *n*-GaSb/*n*-GaInAsSb/*p*-GaAlAsSb. Данные гетероструктуры выращивались методом ЖФЭ на подложках *n*-GaSb(100), легированных теллуром до концентрации носителей  $(1-5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Областью поглощения являлся эпитаксиальный слой узкозонного твердого раствора GaIn<sub>0,22</sub>AsSb ( $E_g = 0.53 \text{ эВ}$ ), толщиной 2.0–2.5 мкм (см. таблицу). В качестве „широкозонного окна“ использовались эпитаксиальные слои: GaAl<sub>0,34</sub>AsSb ( $E_g = 1.1 \text{ эВ}$ ), толщиной 1.5–2.0 мкм. При выращивании Al-содержащих слоев для введения As в расплав в процессе гомогенизации использовалась насыщающая монокристаллическая подложка GaAs, находящаяся в контакте с расплавом. В случае применения

данного двухфазного метода концентрация As в расплаве определяется температурой и практически не зависит от содержания других компонент.

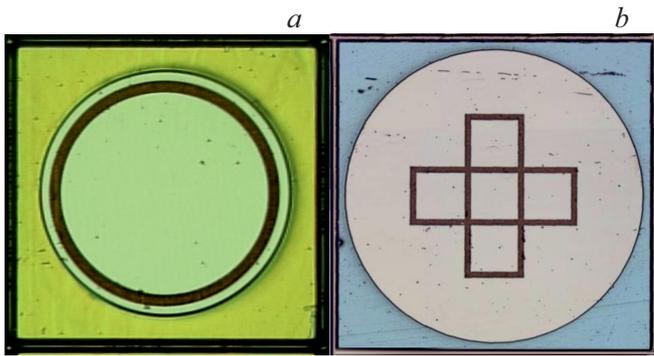
Эффективное разделение носителей заряда обеспечивается при формировании в фотодиодных гетероструктурах GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb достаточно широкой области пространственного заряда. Классический *p-i-n*-фотодиод включает область *i* с концентрацией носителей, близкой к собственной в выбранном материале. В эпитаксиальном *i*-слое толщиной *d* при обратном смещении  $U_{rev}$  образуется область пространственного заряда шириной *W* со встроенным полем, напряженностью  $E(x)$ . Приложенное  $U_{rev}$  должно быть достаточным для истощения *i*-слоя и обеспечения условия  $W \leq d$ . С другой стороны, для полного поглощения излучения в активном слое должно выполняться условие  $\alpha \cdot W \gg 1$ , где  $\alpha$  — коэффициент поглощения материала. В прямозонных полупроводниках, в частности в твердом растворе GaInAsSb, для излучения с энергией кванта, большей  $E_g$  материала, коэффициент поглощения  $\alpha$  превышает  $10^4 \text{ см}^{-1}$ . В таком случае *W* должна составлять несколько микрон, поэтому выбор толщины активной области GaInAsSb 2–3 мкм обеспечивает практически полное поглощение падающего излучения.

Активная область GaInAsSb легировалась теллуром до концентрации  $n = (2-5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , „широкозонное окно“ GaAlAsSb — германием до концентрации  $p = (6-8) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . При легировании твердых растворов Ga<sub>0,78</sub>In<sub>0,22</sub>As<sub>0,18</sub>Sb<sub>0,82</sub> теллуром возможно получать материал *n*-типа проводимости. При этом степень компенсации полупроводника определяется как

$$\frac{N_D + N_A}{N_D - N_A},$$

где  $N_A$  — концентрация природных акцепторов,  $N_D$  — концентрация нескомпенсированных доноров [16]. В материале активной области исследуемых фотодиодов:  $N_A \sim 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_D - N_A = (2-5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , тогда  $K \sim 10$ .

При создании фотодиодов следует учитывать, что высокая степень компенсации материала активной области приводит к росту генерационно-рекомбинационной составляющей темнового тока. Этот эффект в компенсированных полупроводниках обусловлен снижением эффективного времени жизни носителей в слое объемного заряда  $\tau_{eff}$  по сравнению с чистыми материалами. При больших обратных смещениях  $U_{rev}$ , соответствующих электрическим полям с напряженностью порядка  $E \sim 10^4 - 10^5 \text{ В/см}$ , высокая степень компенсации



**Рис. 1.** Микрофотография фотодиодных чипов с диаметром фоточувствительной площадки 2.0 (а) и 2.8 мм (b), созданных на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb.

приводит к росту туннельной составляющей темнового тока, обусловленной туннелированием через энергетические состояния в запрещенной зоне. Известно, что флуктуации напряженности электрического поля, обусловленные неоднородностями легирования, прямо пропорциональны степени компенсации материала  $K$ . В таком случае при легировании теллуром твердых растворов GaInAsSb даже до концентрации  $n = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  ( $K = 10$ ) флуктуации электрического поля на порядок выше, чем в гетероструктурах на основе чистого материала. Таким образом, дальнейшее снижение концентрации в активной области GaInAsSb за счет легирующей примеси приводит к росту темнового тока и сильным флуктуациям электрического поля. Для решения данной проблемы необходимо применять такие методы, как выращивание с использованием редкоземельных элементов либо нейтрального растворителя [16].

Из выращенных образцов фотодиодных гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb методами контактной фотолитографии и жидкостного химического травления были созданы чипы с диаметром фоточувствительной площадки 0.5, 2 и 2.8 мм. Для защиты боковой поверхности мезы и  $p$ - $n$ -перехода использовался анодный оксид, полученный в растворе электролита (винная кислота 0.3% /этиленгликоль в соотношении 1:2). Толщина оксида, образованного при  $U = 60 \text{ В}$  и  $j = 5 \text{ мА/см}^2$ , была  $\sim 0.3 \text{ мкм}$ .

В качестве контактной системы к Al-содержащему эпитаксиальному слою  $p$ -типа проводимости использовались система Cr/Au/Ni/Au и слой гальванического Au, полученный селективным электрохимическим осаждением. Такое усиление контакта позволяет осуществлять сборку фотодиодов методом пайки при повышенных температурах припоя 200–230°C. Сплошной контакт к подложке  $n$ -GaSb создавался путем напыления системы Cr/Au/Ni/Au с последующим напылением дополнительного слоя Cr/Au для осуществления сборки. Лицевой контакт для фотодиодов с диаметрами фоточувствительной площадки 0.5 и 2.0 мм формировался в виде кольца (см. рис. 1, а). Однако при большем диаметре

светочувствительной площадки — 2.8 мм (см. рис. 1, b) использовался крестообразный контакт, который позволял более эффективно осуществлять сбор фототока. Выбранный контакт отвечал оптимальному соотношению величины получаемого фототока и степени затенения. Фотодиодные чипы монтировались на корпуса ТО-5 с термоохладителем для установления и стабилизации температуры от  $-70^\circ\text{C}$  до  $+100^\circ\text{C}$ .

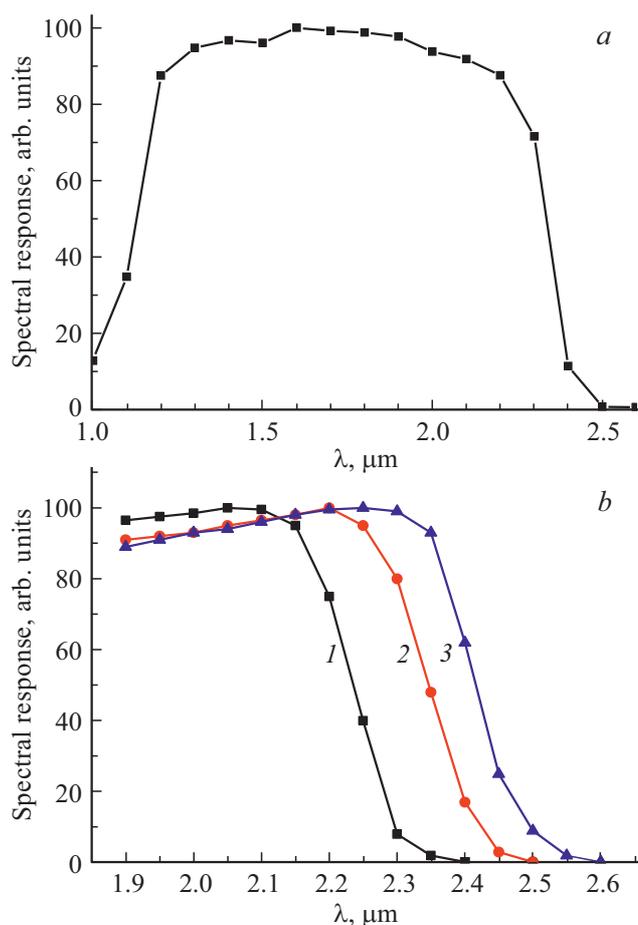
Вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотодиодов исследовались с помощью автоматизированного измерителя ВАХ. Графики выводились в режиме реального времени на монитор компьютера. Измерения спектров фоточувствительности исследуемых образцов фотодиодов проводились по схеме синхронного детектирования с использованием призматического монохроматора SPM2 (Carl Zeiss), механического модулятора и синхронного детектора Stanford Research SR830. Для определения токовой монохроматической чувствительности  $S_I(\lambda_{\text{max}})$  использовался метод сравнения с калиброванным приемником излучения.

Исследования спектральных характеристик WGM-лазеров проводились на установке, включающей монохроматор DK-480 (CVI Laser Corp.), при комнатной температуре в импульсном режиме питания. В качестве предварительного усилителя использовался прибор PA-9 фирмы Judson Technologies. Применялась схема синхронного детектирования с использованием прибора Stanford Research типа SR810. Спектры WGM-лазеров исследовались при различных токах накачки. В качестве детектора лазерного излучения использовались созданные GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb-фотодиоды.

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Распределение спектральной чувствительности GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb-фотодиодов представлено на рис. 2. Длинноволновая граница спектральной чувствительности  $\lambda = 2.4 \text{ мкм}$  при комнатной температуре определяется шириной запрещенной зоны активной области. Как видно из рис. 2, а, длина волны полуспада спектральной характеристики —  $\lambda_{50\%} = 2.32 \text{ мкм}$ . Тогда ширина запрещенной зоны прямозонного твердого раствора GaIn<sub>0.22</sub>AsSb в активной области фотодиода, вычисленная по  $\lambda_{50\%}$ , составляет  $E_g = 0.53 \text{ эВ}$ , что полностью согласуется с данными фотOLUMИнесценции. При определении  $E_g$  по результатам измерений вольт-амперных характеристик фотодиодов при двух температурах по методу, предложенному в работе [17] изначально для полупроводниковых  $p$ - $n$ -гомоструктур, нами было получено близкое значение —  $E_g = 0.535 \text{ эВ}$ . Таким образом, мы полагаем, что данный метод может применяться для оценки  $E_g$  активной области узкозонных гетероструктур на основе GaSb с погрешностью  $\sim 1\%$ .

В более коротковолновой части спектра чувствительность плавно уменьшается в сторону коротких длин волн, что связано с поглощением на не прямых переходах



**Рис. 2.** Распределение спектральной чувствительности GaInAsSb/GaAlAsSb-фотодиодов: *a* — при комнатной температуре, *b* — при различных температурах,  $T$ , К: 1 — 253, 2 — 296, 3 — 313.

в слое Al-содержащего твердого раствора. Коротковолновая граница спектральной чувствительности, определяемая шириной запрещенной зоны „широкозонного окна“, при  $T = 300$  К —  $\lambda = 1.12$  мкм.

Токовая монохроматическая чувствительность GaInAsSb/GaAlAsSb-фотодиодов в максимуме спектральной характеристики ( $\lambda = 2.0$ – $2.3$  мкм) составляет  $S_I = 0.7$ – $1.0$  А/Вт, что соответствует квантовой эффективности  $\eta = 0.5$ – $0.7$ .

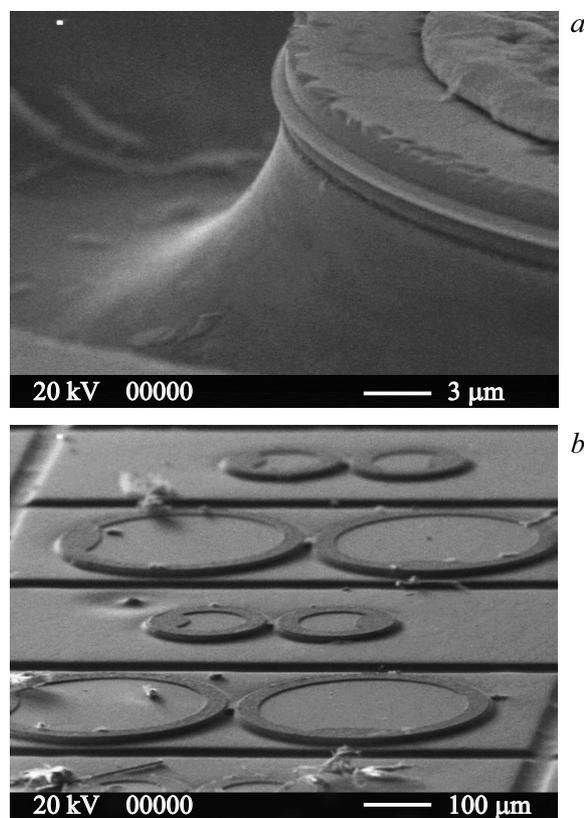
Как видно из рис. 2, *b*, с понижением температуры длинноволновая граница спектральной чувствительности смещается в сторону более коротких длин волн. Коэффициент температурного изменения длины волны составляет  $\Delta\lambda/\Delta T = 3.3 \cdot 10^{-3}$  мкм/К, что соответствует коэффициенту температурного изменения ширины запрещенной зоны активной области  $\Delta E_g/\Delta T = -7.7 \cdot 10^{-4}$  эВ/К в диапазоне температур  $\Delta T = 60$  К.

Исследование вольт-фарадных характеристик показало, что емкость фотодиодов при нулевом обратном смещении ( $U_{rev} = 0$  В) составляет:  $C = 150$  пФ при диаметре фоточувствительной площадки 0.5 мм,  $C = 685$  пФ при

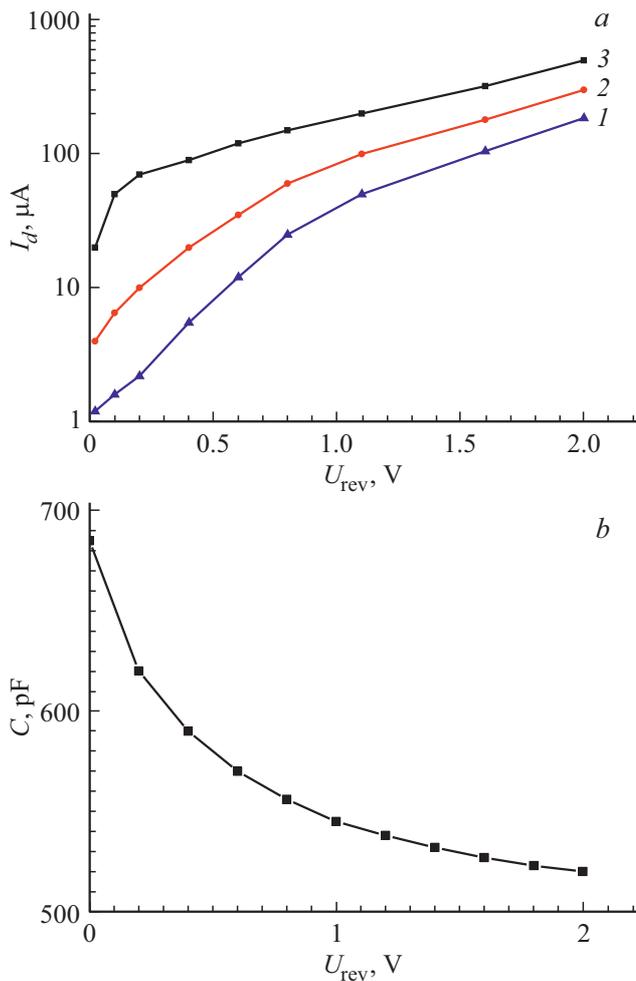
диаметре 2.0 мм и  $C = 1380$  пФ при диаметре 2.8 мм соответственно.

Созданные GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb-фотодиоды использовались нами для исследований спектральных характеристик одиночных и сдвоенных дисковых WGM-лазеров на основе квантово-размерной GaInAsSb/GaAlAsSb-гетероструктуры. На рис. 3, *a* представлено изображение боковой поверхности резонатора, полученное с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ). Химическое травление напряженных и ненапряженных слоев разного состава протекает с разной скоростью. В гетероструктуре GaInAsSb/GaAlAsSb изопериодные слои, содержащие алюминий, травятся быстрее, чем напряженный слой квантовых ям GaInAsSb, что ведет к формированию выпуклой части волновода резонатора, внутри которого распространяются WGM-моды по круговой траектории. Сдвоенные WGM-лазеры были изготовлены с перемычкой между резонаторами (см. рис. 3, *b*), ширина перемычки составляет 20–35 мкм, длина — 10–15 мкм, высота — 7 мкм (как и у мезы резонатора). Такая конструкция позволяет создать сильную оптическую связь между двумя дисковыми резонаторами лазера, поскольку излучение может переходить из одного резонатора в другой через перемычку, не покидая пределов резонаторов.

Длина волны излучения исследуемых WGM-лазеров лежала в диапазоне 2.2–2.3 мкм. После сравнения па-



**Рис. 3.** РЭМ-изображения полупроводниковых WGM-лазеров: *a* — боковая поверхность резонатора; *b* — сдвоенные лазеры с диаметром резонатора 400 и 200 мкм.



**Рис. 4.** Электрические характеристики GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb-фотодиода с диаметром чувствительной площадки 2.0 мм: *a* — зависимость обратного темнового тока  $I_d$  от приложенного напряжения  $U_{rev}$  при  $T = 173$  (1), 263 (2) и 296 К (3); *b* — вольт-фарядная характеристика при  $T = 296$  К.

параметров фотодиодов с различными диаметрами фоточувствительной площадки в качестве детектора для установки были выбраны образцы с диаметром площадки 2.0 мм. С одной стороны, такие фотодиоды имеют более низкий уровень обратных темновых токов и, соответственно, шумов, а также меньшую емкость (более высокое быстродействие), чем приборы с диаметром 2.8 мм. С другой стороны, по сравнению с фотодиодами с диаметром 0.5 мм, они демонстрируют более высокую спектральную чувствительность и значительно удобнее для юстировки установки при исследовании лазеров.

Зависимость обратного темнового тока  $I_d$  от приложенного напряжения  $U_{rev}$  при различных температурах для GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb-фотодиода с диаметром чувствительной площадки 2.0 мм, смонтированного на термоэлектрическом модуле, представлена на рис. 4, *a*. Как видно из рисунка, при комнатной температуре при изменении  $U_{rev}$  в 10 раз, от 0.2 до 2 В,  $I_d$  также увеличивается в 10 раз, что говорит о возрастающем

влиянии туннельного механизма протекания тока. Значение емкости фотодиода падает от  $C = 685$  пФ при  $U_{rev} = 0$  В до  $C = 520$  пФ при  $U_{rev} = -2$  В (см. рис. 4, *b*), что позволяет увеличить быстродействие — постоянную времени от  $\tau = 75$  до  $\tau = 53$  нс.

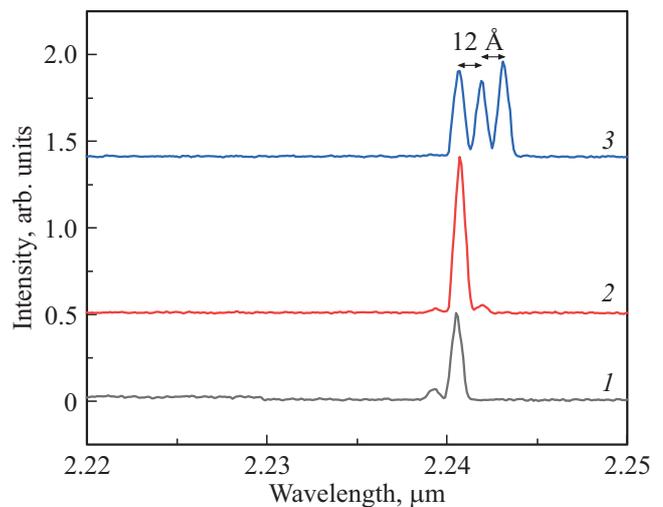
Генерация лазерного излучения одиночных WGM-лазеров возбуждалась при подаче электрических импульсов прямоугольной формы различной частоты и длительности. Диапазон рабочих частот  $\Delta f$  составлял 2–16 кГц, при этом длительность импульса  $t_i$  могла варьироваться от 2 до 60 мкс. Однако оптимальная работа лазера наблюдается при частоте следования импульсов  $f = 10$  кГц и длительности  $t_i = 2.7$  мкс. Данные значения параметров позволяют сохранить положение генерируемых лазерных мод на спектрах излучения во всем диапазоне рабочих токов накачки, т. е. позволяют избежать эффекта „красного смещения“ из-за нагрева образца.

На рис. 5 представлен спектр когерентного излучения одиночного WGM-лазера с диаметром резонатора 400 мкм при разных токах накачки, полученный при помощи монохроматора с двумя дифракционными решетками. На спектрах излучения наблюдаются четкие эквидистантные лазерные моды, расстояние между которыми составляет  $\sim 12$  Å. Данная величина согласуется со значением, полученным при помощи формулы для расчета межмодового расстояния мод первого порядка в WGM-лазере:

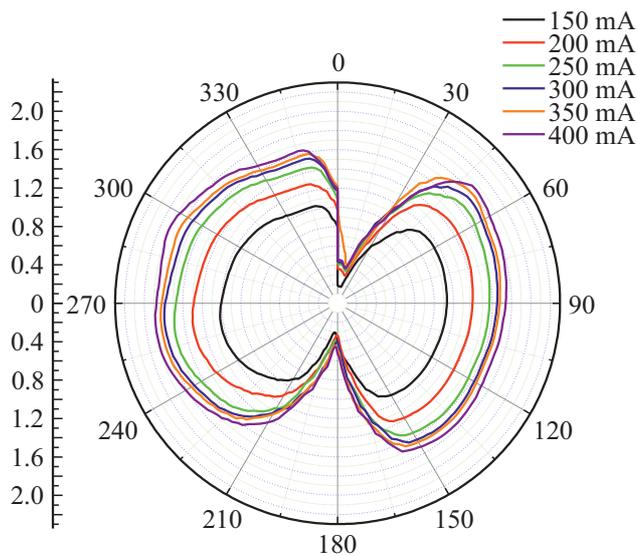
$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2\pi Rn}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — рабочая длина волны,  $\Delta\lambda$  — межмодовое расстояние,  $R$  — радиус резонатора,  $n$  — показатель преломления среды ( $n = 3.5$  для нашего случая).

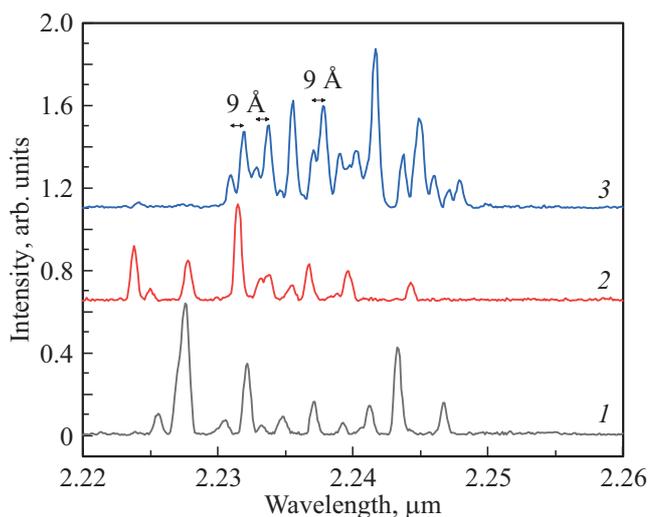
Соответствие экспериментального и рассчитанного значений межмодового расстояния  $\Delta\lambda$  подтверждает, что



**Рис. 5.** Спектры излучения одиночного WGM-лазера с дисковым резонатором диаметром 400 мкм при комнатной температуре и плотностях тока накачки  $I = 175$  (1), 180 (2), 200  $\text{A}/\text{cm}^2$  (3).



**Рис. 6.** Диаграмма направленности излучения дискового WGM-лазера при токах накачки  $I = 150\text{--}400$  мА.



**Рис. 7.** Спектры излучения двояных WGM-лазеров с резонаторами диаметром 400 мкм и перемычкой при подаче питания на первый резонатор (1), на второй резонатор (2) и на оба резонатора одновременно (3); спектры получены при комнатной температуре и плотности тока накачки  $I = 250$  А/см<sup>2</sup>.

данные лазеры работают на модах шепчущей галереи первого порядка.

В режиме питания, описанном выше ( $f = 10$  кГц,  $t_i = 2.7$  мкс), были проведены измерения диаграмм направленности. В отличие от большинства других типов лазеров, у дисковых WGM-лазеров отсутствует направленное излучение, поскольку излучение распространяется равномерно во всех направлениях за счет рассеяния на неоднородностях поверхности волновода. Это отчетливо наблюдается на типичной диаграмме направленности излучения одиночного дискового лазера с диаметром резонатора 400 мкм, полученной при различных токах

накачки (см. рис. 6). На данном рисунке видно, что распределение излучения однородно по всем направлениям, за исключением секторов от 0 до 30° и от 160 до 190°, где наблюдается спад интенсивности излучения. Это связано с тем, что дисковые WGM-лазеры монтировались на стандартном корпусе TO-18 с двумя изолированными выводами для обеспечения электрического контакта. Сектора спада интенсивности соответствуют положению данных контактных выводов.

При помощи GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb-фотодиодов были также измерены спектры излучения двояных WGM-лазеров с перемычкой между резонаторами. На рис. 7 представлены спектры лазера со двояными резонаторами диаметром 400 мкм. Как видно из рисунка, спектры двояных лазеров, включенных по отдельности (графики 1, 2), в значительной степени отличаются от случая, когда лазеры работают одновременно (график 3). Так, при подаче тока накачки на оба лазера одновременно наблюдается большое число новых лазерных мод, которые можно отнести к классу коллективных мод двояных резонаторов. По сравнению с WGM-модами одиночного лазера, коллективные моды имеют значительно более сложную структуру и могут существовать только в случае, когда их оптический путь проходит через оба резонатора.

Перемычка исследуемых двояных лазеров относительно широкая (35 мкм) по отношению к диаметру резонатора, в связи с чем эквидистантность лазерных линий при работе лазеров отдельно друг от друга нарушается, а в некоторых случаях исчезает (см. рис. 7, график 2). С другой стороны, при одновременной работе лазеров эквидистантность начинает проявляться вновь, и число генерируемых мод увеличивается. Межмодовое расстояние в данном случае составляет 9 Å (см. рис. 7, график 3), что меньше по сравнению со значением для одиночного диска. Это подтверждает, что оптический путь новых „коллективных мод“ в двояном резонаторе больше, чем оптический путь WGM-мод в одиночном резонаторе.

## 4. Заключение

Спектры излучения дисковых WGM-лазеров на основе квантово-размерной GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb-гетероструктуры впервые были исследованы с помощью фотодиодов, созданных также в системе твердых растворов GaSb-InAs. Фотодиоды были смонтированы на корпусах с термоохладителем, позволяющим удерживать и стабилизировать температуру от  $-20^\circ\text{C}$  до  $+60^\circ\text{C}$ . Диаметр фотодиодов 2.0 мм был выбран с целью оптимального для приборов на основе данных узкозонных материалов сочетания спектральной чувствительности, уровня обратных темновых токов и шумов соответственно, быстродействия и удобства юстировки. Емкость таких фотодиодов составляет  $C = 520\text{--}685$  пФ при обратном смещении  $U_{\text{rev}} = -2\text{--}0$  В, что соответствует постоянной времени  $\tau = 53\text{--}75$  нс. Данное

быстродействие на 2–3 порядка превосходит быстродействие широко применяемых фотоприемников на основе халькогенидов свинца. Было показано, что GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb-фотодиоды могут использоваться без охлаждения для регистрации излучения одиночных и сдвоенных WGM-лазеров с длиной волны излучения основной моды в диапазоне 2.2–2.3 мкм.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность С.И. Трошковой за создание РЭМ-изображений полупроводниковых WGM-лазеров.

### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-52-00027 Бел\_а. Исследования белорусской стороны поддержаны БРФФИ (проект Ф18Р-121).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] А.Н. Именков, В.В. Шерстнев, М.А. Сиповская, А.П. Астахова, Е.А. Гребенщикова, А.М. Монахов, К.В. Калинина, G. Boissier, R. Teissier, А.Н. Баранов, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **35** (18), 50 (2009).
- [2] A.N. Baranov, G. Boissier, R. Teissier, A.M. Monakhov, V.V. Sherstnev, M.I. Larchenkov, Yu.P. Yakovlev. Appl. Phys. Lett., **100**, 061112 (2012).
- [3] В.Г. Буткевич, В.Д. Бочков, Е.Р. Глобус. Прикл. физика, **6**, 66 (2001).
- [4] Р.Д. Мухамедьяров, И.Н. Мирошникова. [http://uralsemiconductor.ru/articles/Doklad\\_Kongress-2017\\_Ural\\_fotodetektory\\_r25.04-21.20%20.pdf](http://uralsemiconductor.ru/articles/Doklad_Kongress-2017_Ural_fotodetektory_r25.04-21.20%20.pdf)
- [5] А.В. Шнайдер, М.П. Миронов, А.В. Гусельников, В.Ф. Марков, Л.Н. Маскаева. Пожаровзрывобезопасность, **2**, 14 (2008).
- [6] H. Tang, J. Zhong, W. Chen, K. Shi, G. Mei, Y. Zhang, Z. Wen, P. Muller-Buschbaum, D. Wu, K. Wang, X. Sun. ACS Appl. Nano Mater., **2** (10), 6135 (2019).
- [7] M. Thambidurai, Y. Jang, A. Shapiro, G. Yuan, H. Xiaonan, Y. Xuechao, Q.J. Wang, E. Lifshitz, H.V. Demir, C. Dang. Optical Mater. Express, **7** (7), 1 2326 (2017).
- [8] L. Hu, S. Huang, R. Patterson, J. Halpert. J. Mater. Chem. C, **7**, 4497 (2019).
- [9] B.W. Jia, K.H. Tan, W.K. Loke, S. Wicaksono, K.H. Lee, S.F. Yoon. ACS Photonics, **5** (4), 1512 (2018).
- [10] M. Razeghi. Eur. Phys. J. Appl. Phys., **23** (3), 149 (2003).
- [11] C. Kuo, J. Wu, S. Lin, W. Chang. Nanoscale Res. Lett., **8**, 327 (2013).
- [12] P. Martyniuk, A. Rogalski. Opto-Electronics Rev., **21** (2), 239 (2013).
- [13] C. Shi, Y. Dong, Q. Li. IEEE Trans. Electron Dev., **66** (3), 1361 (2019).
- [14] E.G. Camargo, S. Tokuo, H. Goto, N. Kuze. Sensors Mater., **26** (4), 253 (2014).
- [15] D.A. Yarekha, G. Glastre, A. Perona, Y. Rouillard, F. Genty, E.M. Skouri, G. Boissier, P. Grech, A. Joulie, C. Alibert, A.N. Baranov. Electron. Lett., **36** (6), 537 (2000).
- [16] У. Шокли. УФН, **77** (1), 161 (1962).
- [16] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, Е.В. Куницына, Я.А. Пархоменко, Д.А. Васюков, Ю.П. Яковлев. ФТП, **35** (8), 941 (2001).
- [17] И.М. Викулин, Б.В. Коробицын, С.К. Криськив. ФТП, **50** (9), 1238 (2016).

Редактор Г.А. Оганесян

### Photodiodes for detecting the emission of quantum-sized disk lasers operating on whispering gallery modes (2.2–2.3 μm)

E.V. Kunitsyna<sup>1</sup>, M.A. Royz<sup>2</sup>, I.A. Andreev<sup>1</sup>, E.A. Grebenshchikova<sup>1</sup>, A.A. Pivovarova<sup>1</sup>, M. Ahmetoglu (Afrailov)<sup>3</sup>, Ya.V. Lebiadok<sup>4</sup>, R.Yu. Mikulich<sup>4</sup>, N.D. Iliinskaya<sup>1</sup>, Yu.P. Yakovlev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> University of Helsinki, Helsinki 00014, Finland

<sup>3</sup> Department of Physics, Uludag University, 16059 Gorukle, Bursa, Turkey

<sup>4</sup> SSPA „Optics, Optoelectronics & Laser Technology“, National Academy of Sciences of Belarus, 220072 Minsk, Belarus

**Abstract** Photodiodes developed in the GaSb-InAs system were first used for investigation the spectral characteristics of single and coupled disk lasers emitting on whispering gallery modes at 2.2–2.3 μm. The capacity of the photodiodes with a diameter of photosensitive area of 2.0 mm was  $C = 520$  pF at  $U = -2$  V, which corresponds to a time constant of  $\tau = 53$  ns. It is shown that the parameters of the developed photodiodes make it possible to detect the emission of quantum-sized disk lasers at room temperature and not to use cryogenic cooling.