

Микродисковые лазеры на основе InGaAs/GaAs-квантовых точек, монолитно-интегрированные с волноводом

© Н.А. Фоминых¹, Н.В. Крыжановская¹, С.Д. Комаров¹, И.С. Махов¹, К.А. Иванов¹, Э.И. Моисеев¹, Е.Е. Антонов¹, Ю.А. Гусева², М.М. Кулагина², С.А. Минтаиров², Н.А. Калюжный², Р.А. Хабибуллин³, Р.Р. Галиев³, А.Ю. Павлов³, К.Н. Томош³, А.Е. Жуков¹

¹ Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, 190008 Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

³ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской академии наук, 117105 Москва, Россия

E-mail: fominy-nikita@yandex.ru

Поступила в Редакцию 10 февраля 2024 г.

В окончательной редакции 18 марта 2024 г.

Принята к публикации 5 апреля 2024 г.

Исследованы микродисковые лазеры диаметром 30 и 40 мкм с активной областью на основе InGaAs/GaAs-квантовых точек, латерально сопряженные с оптическим волноводом. Микролазеры и волноводы были изготовлены в едином процессе на одной подложке GaAs. Проведено исследование спектральных характеристик при протекающих через микролазер и (или) волновод токах инжекции, превышающих порог генерации до 4 раз. Показана возможность снижения потерь на поглощение в волноводе с помощью приложения к нему прямого смещения. Реализована оптопара, в которой источником излучения служит микродисковый лазер, сопряженный с волноводом, а приемником излучения — волноводный фотодетектор. Плотность темного тока волноводного фотодетектора составила 1.1 мкА/см² при обратном смещении –6 В.

Ключевые слова: микролазеры, квантовые точки, оптический волновод, оптопара, волноводный фотодетектор.

DOI: 10.61011/FTP.2024.02.57878.6049

1. Введение

Фотонные интегральные схемы (ФИС) обладают, по сравнению с электронными, более высокой скоростью передачи данных и меньшим энергопотреблением [1]. Реализация ФИС на GaAs представляет собой перспективную альтернативу ФИС на Si, так как оба материала имеют в отличие от Si, GaAs является прямозонным полупроводником [2]. В качестве источников излучения в ФИС могут быть использованы полупроводниковые микролазеры с резонатором дисковой формы, поддерживающим моды шепчущей галереи (МШГ) [3]. Микродисковые (МД) лазеры обладают высокой добротностью, а их излучение распространяется в плоскости подложки [4]. Для успешной реализации ФИС на основе таких микролазеров необходим направленный вывод излучения, которому препятствует круговая симметрия МД резонатора [5]. Одним из наиболее перспективных решений этой проблемы является оптическая связь МД лазеров с оптическим волноводом (ОВ) [6]. Реализация такого типа связи может быть выполнена в вертикальной [7,8] или латеральной конфигурации [9]. Благодаря своей компактности и стабильности наибольший интерес представляет монолитная интеграция МД лазера и ОВ. В таком случае оба элемента сформированы из одной эпитаксиальной структуры. Ранее это было продемонстрировано для AlGaInAs/InP-микролазеров [10]. По сравнению с материалами на InP, материалы на GaAs

характеризуются большими энергетическими разрывами зон и скачками показателя преломления, а также более высокой теплопроводностью.

В работе [11] впервые была показана возможность монолитной интеграции МД лазера и ОВ, созданных на основе гетероструктуры с квантовыми точками (КТ) на GaAs-подложке. Потери на поглощение излучения, вызванные „межзонными“ переходами в КТ активной области ОВ, изготовленного из той же эпитаксиальной структуры, что и МД лазеры, ограничивали выводимую мощность. В настоящей работе нами изучена возможность снижения потерь на поглощение в ОВ при приложении к нему прямого смещения. Активная область на основе квантовых точек InGaAs/GaAs характеризуется низким уровнем накачки, необходимым для просветления, что позволяет уменьшить разогрев структуры. Еще одним преимуществом КТ являются чрезвычайно малые (уровня мкА/см²) темновые токи при их использовании в качестве активной области фотодетектора (ФД) [12,13]. В волноводных ФД поглощение излучения происходит на всей длине полоска, что особенно важно для наноструктур, характеризующихся относительно невысоким уровнем поглощения. Таким образом волноводные ФД на основе КТ могут совместно с МД лазерами с КТ активной областью формировать оптопару с согласованной рабочей длиной волны, которая может быть использована, например, как компактный микродатчик [14]. Нами рассмотрена

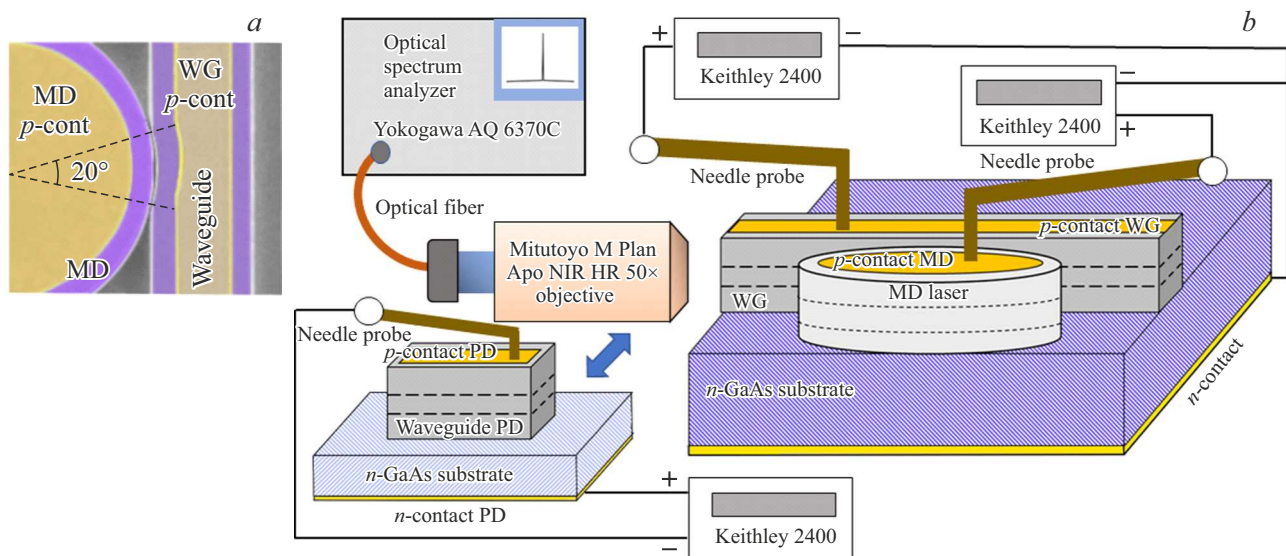


Рис. 1. *a* — 30 мкм МД лазер, сопряженный с ОВ с огибающей секцией, соответствующей углу 20° , *b* — схема экспериментальной установки и оптопары. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

возможность реализации оптопары, состоящей из МД лазера с активной областью на основе InGaAs/GaAs КТ, монолитно сопряженного с ОВ, и волноводного ФД, сформированного из аналогичной гетероструктуры с КТ.

2. Эксперимент

Синтез гетероструктуры происходил методом газофазной эпитаксии из металорганических соединений на подложке n^+ -GaAs, разориентированной на 6° относительно плоскости (100). Структура состояла из буферного слоя n^+ -GaAs, нижнего эмиттерного слоя n -AlGaAs толщиной 1.5 мкм с уровнем легирования $\sim 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 0.75 мкм нелегированного волноводного слоя GaAs, 1.5 мкм верхнего эмиттерного слоя p -AlGaAs ($7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) и контактного слоя p^{++} -GaAs толщиной 0.35 мкм. Мольная доля AlAs в слоях AlGaAs составляла 39%. В волноводном слое находилась активная область, состоящая из 5 слоев КТ InGaAs/GaAs. Формирование КТ происходило путем осаждения слоя $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ толщиной 2 нм, слои КТ были разделены спейсером GaAs толщиной 40 нм. Механизм образования КТ при таком способе осаждения обсуждается в работе [15].

Для формирования МД лазеров и ОВ использовалась технология глубокого плазменного реакционно-ионного травления полупроводника (ICP-RIE Sentech SI500, BCl_3/Ar). В качестве жесткой маски применялась разработанная в ИСВЧПЭ РАН многослойная система диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, рисунок в которой также анизотропно травился с помощью многостадийного процесса сначала в хлорной плазме, затем во фторсодержащей плазме. В качестве первичной маски использовался рисунок в негативном электронном резисте ma-N2403 (Microresist Technology GmbH), сформированный методом электронно-лучевой литографии (Raith

Voyager, 50 кВ). В результате была достигнута большая глубина травления мезы с вертикальной стенкой и малой величиной зазора между микролазером и ОВ. Глубина травления при формировании как МД, так и ОВ равнялась 4 мкм, т.е. гетероструктура была протравлена насквозь. Ширина ОВ была выбрана 10 мкм, а его длина составляла 440 мкм. Диаметр МД был равен 30 и 40 мкм. Расстояние между микролазерами и ОВ составляло 100 нм. Как было отмечено в работе [10], выводимая с торца ОВ мощность лимитируется малой эффективностью оптической связи. Для повышения эффективности оптической связи [10,16] ОВ огибал МД лазер по дуге, соответствующей углу 20° (рис. 1, *a*). P -контакты были сформированы с помощью нанесения AgMn/Ni/Au-металлизации к контактному слою p^{++} -GaAs. На ОВ контакты были выполнены в виде полосы шириной 8 мкм, а на МД лазерах они имели форму кругов разного диаметра (28 или 38 мкм). GaAs-подложка была утончена и на ее тыльную сторону был нанесен AuGe/Ni/Au n -контакт.

Для создания ФД была использована гетероструктура, аналогичная лазерной, но в волноводном слое GaAs размещалось 6 слоев КТ InGaAs/GaAs. ФД полосковой формы шириной 50 мкм и длиной поглощающей области 92 мкм были изготовлены методами фотолитографии и сухого травления (STE ICPe68). Высота мезы ФД составляла ~ 5.5 мкм. Омические контакты формировали по технологии МД лазера. Светопоглощающие грани ФД структур были сформированы с помощью колки кристаллов ФД без нанесения дополнительных просветляющих покрытий.

Все исследования электролюминесценции (ЭЛ) в данной работе происходили при комнатной температуре, а питание структур осуществлялось в непрерывном режиме. Контакт к верхнему электроду исследуемых

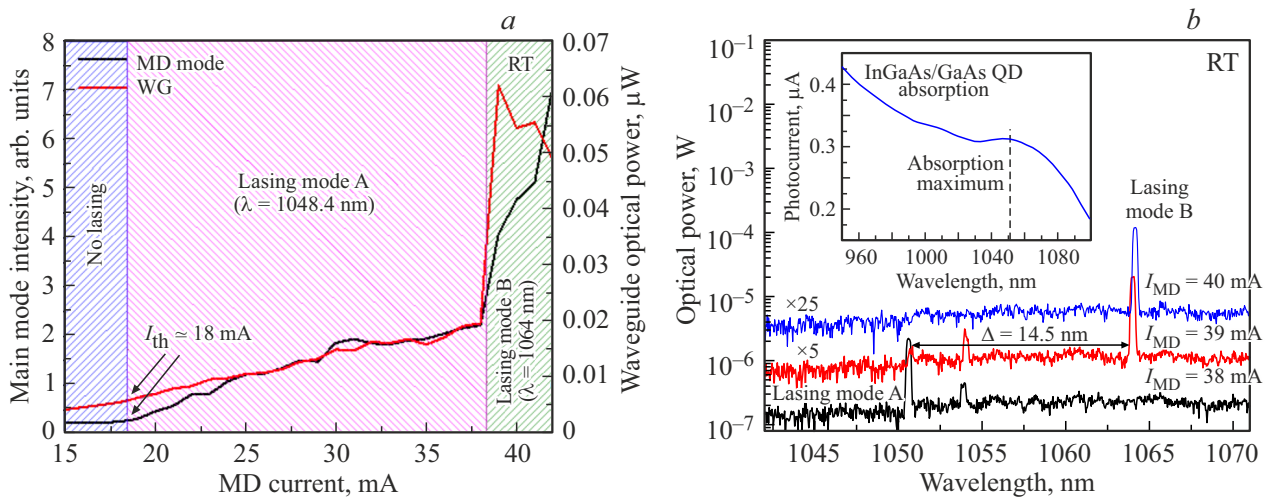


Рис. 2. *a* — зависимости выходной оптической мощности с торца ОБ и интенсивности основной лазерной моды от тока накачки МД лазера диаметром 30 мкм. *b* — спектры ЭЛ 30 мкм МД лазера. Спектры для облегчения восприятия сдвинуты по оси ординат. На вставке приведена зависимость фототока от длины волны для ФД со светопоглощающей областью на InGaAs/GaAs КТ [13].

структур осуществлялся с помощью игольчатого зонда из вольфрама диаметром 15 мкм. Образец помещался *n*-контактом вниз на медный держатель. Электрическая схема приложения прямого смещения к ОБ и электрическая схема накачки МД лазера обладали общим отрицательным контактом. В качестве источника тока был использован источник-измеритель Keithley 2400. Сбор излучения происходил с помощью микрообъектива Mitutoyo M Plan Apo NIR HR 50x при его фокусировке на исследуемый МД лазер или на торец сопряженного с ним ОБ. Спектр ЭЛ регистрировался на оптическом анализаторе спектра Yokogawa AQ 6370C со спектральным разрешением 0.2 нм. При измерении оптической мощности излучение, собранное микрообъективом, через оптическое волокно поступало на фотодиодный датчик измерителя оптической мощности Thorlabs PM100D. В случае сбора излучения с МД лазера мы предполагаем, что лишь порядка 30% от общей оптической мощности попадают на фотодиодный датчик в силу азимутальной изотропии излучения микролазера [17]. Схема установки ЭЛ приведена на рис. 1, *b*.

При реализации оптопары МД лазер, сопряженный с ОБ, и ФД находились на разных чипах. Для точного позиционирования волноводного ФД относительно торца ОБ были использованы микрометрические подвижки. Подача обратного смещения на ФД и измерение фототока осуществлялось источником-измерителем Keithley 2400 в соответствии со схемой на рис. 1, *b*

3. Экспериментальные результаты

Вначале были выполнены исследования интенсивности, а также спектров излучения микролазера с торца ОБ без приложения смещения к ОБ. На рис. 2, *a* представлена зависимость интегральной интенсивности

основной (наиболее яркой) лазерной моды от инжекционного тока МД лазера. Пороговый ток (I_{th}) определялся по перегибу этой зависимости и для МД лазера диаметром 30 мкм составил 18 мА. При токе накачки ~ 39 мА, составляющем $\sim 2I_{th}$, наблюдается резкое увеличение интенсивности основной лазерной моды. На рис. 2, *a* также показана зависимость выходной оптической мощности с торца ОБ, которая, как видно, в целом повторяет ход зависимости интенсивности основной моды. Исследование спектров ЭЛ МД лазера (рис. 2, *b*) показало, что при токе накачки от I_{th} до 38 мА в спектре ЭЛ доминирующей является лазерная мода А. Спектральное положение данной моды при инжекционном токе, равном пороговому, соответствует 1048.4 нм, а когда ток накачки увеличивается до 38 мА — 1050.5 нм. При токе инжекции $\sim 2I_{th}$ (39–40 мА) имеет место переключение лазерной генерации с длины волны ~ 1050.5 нм на ~ 1064 нм (лазерная мода В). Такое переключение связано с саморазогревом лазера и смещением спектра усиления в длинноволновую область. Спектральное расстояние между данными модами (14.5 нм) значительно больше межмодового интервала ($FSR \approx 3.3$ нм) для МШГ МД лазера диаметром 30 мкм. Столь сильное изменение длины волны лазерной генерации, таким образом, не может быть объяснено перескоком генерации на соседнюю, более длинноволновую МШГ вследствие разогрева микролазера при увеличении тока, которое часто наблюдается в МД лазерах, не связанных с волноводом.

Мы полагаем, что подобное поведение можно связать с дополнительными потерями, вызванными поглощением излучения микролазера в ОБ. Для МШГ вблизи максимума поглощения InGaAs/GaAs КТ будут вноситься наибольшие потери. Максимум поглощения в InGaAs/GaAs КТ соответствует длине волны

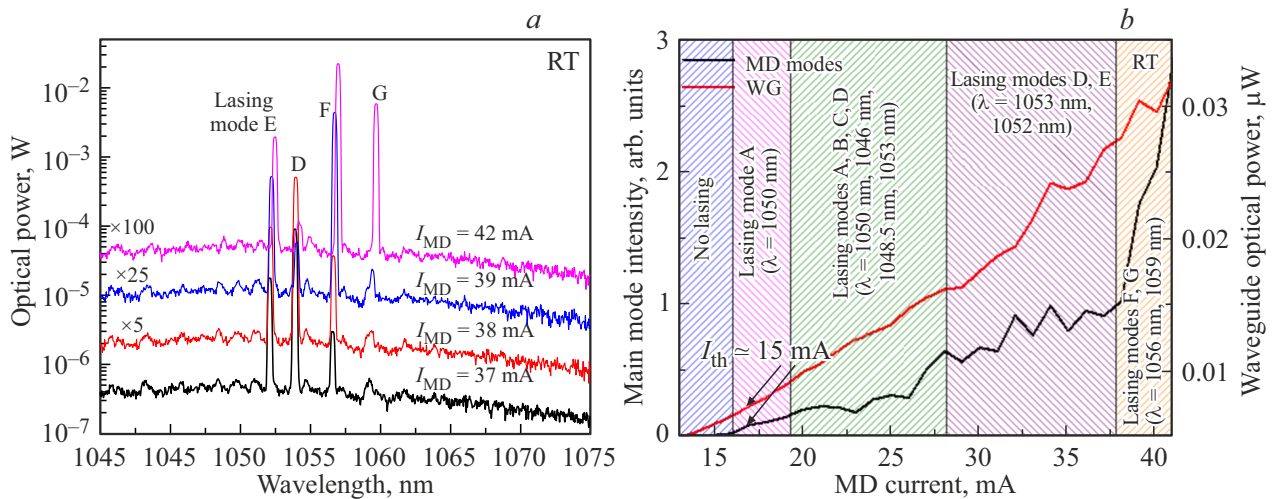


Рис. 3. *a* — спектры ЭЛ 40 мкм МД лазера. Спектры для облегчения восприятия сдвинуты по оси ординат. *b* — зависимости выходной оптической мощности с торца ОВ и интенсивности основной лазерной моды от тока накачки МД лазера диаметром 40 мкм.

$\lambda \approx 1052$ нм (см. вставку к рис. 2, *b*). Так как вблизи этой длины волны возникает и лазерная генерация (~ 1048.4 нм), максимум спектра усиления накачанной активной области находится примерно в этом же спектральном диапазоне. Таким образом, вблизи порога генерации лазерная мода сильно поглощается волноводом. Для более длинных волн усиление, развиваемое активной областью МД лазера вблизи порога генерации, недостаточно для преодоления оптических потерь даже с учетом того, что поглощение в ОВ для них меньше. Однако, когда ток накачки становится достаточно большим, возникает лазерная генерация на длине волны ~ 1064 нм (мода В), а более коротковолновая мода А гаснет. Это указывает на тот факт, что в активной области МД лазера при достижении порога генерации не происходит пиннинга уровня Ферми, а продолжается рост концентрации носителей заряда. Это в свою очередь вызывает постепенное увеличение усиления длинноволновой области. При изменении тока накачки с 38 до 39 мА происходит появление лазерной моды В на длине волны ~ 1064 нм, которая обладает почти в 3 раза большей интенсивностью, чем более коротковолновая мода А. Как уже упоминалось, в этот момент также скачкообразно растет и выводимая с торца ОВ мощность (рис. 2, *a*). Следует отметить, что перескок длины волны генерации указывает на то, что резкий рост мощности не связан с просветлением волновода излучением, выходящим из микродиска. В этом случае нет причин для перескока длины волны.

Спектры ЭЛ исследованного МД лазера диаметром 40 мкм, которые были получены при нулевом прямом смещении на ОВ, приведены на рис. 3, *a*. Для микролазеров такого диаметра в спектре ЭЛ присутствует большое число лазерных мод. Данный факт можно связать с меньшей эффективностью вывода излучения в ОВ из

этого более добротного микрорезонатора. В частности, это проявляется в меньшей величине порогового тока (15 мА) исследованных 40 мкм МД лазеров по сравнению с 30 мкм (18 мА).

Вблизи порога генерации 40 мкм микролазеры также демонстрируют лазерную генерацию в спектральной области, близкой к максимуму поглощения КТ. Анализ зависимости оптической мощности от тока накачки демонстрирует, как и в случае 30 мкм микролазеров, заметное увеличение интенсивности излучения МД лазера с торца ОВ начиная с некоторого тока инжекции сверх порога генерации. При этом также наблюдается и скачкообразное изменение интенсивности основной лазерной моды. Для микролазеров диаметром 40 мкм ток, соответствующий этим эффектам, составлял ~ 37 мА (рис. 3, *b*). Аналогично 30 мкм МД лазерам скачкообразные изменения интенсивности основной лазерной моды и величины оптической мощности с торца ОВ связаны с появлением длинноволновых мод на длинах волн 1056 и 1059 нм (моды F и G). При этом, однако, рост выводимой оптической мощности с торца ОВ не столь значителен, как в случае 30 мкм МД лазеров. Это, видимо, связано с большей добротностью 40 мкм МД лазеров и поэтому меньшим вкладом в общие потери, которые вносит вывод излучения в ОВ.

Приложение к ОВ прямого смещения может уменьшить поглощение в нем за счет инжекции неравновесных носителей заряда. Таким образом, поглощение в ОВ будет уменьшаться с ростом прямого смещения вплоть до полного просветления активной области. Однако прямое смещение также приводит к появлению спонтанной ЭЛ самого ОВ. При этом интенсивность этого эффекта будет расти пропорционально величине тока через ОВ. В дополнение к этому в ОВ при достаточно высоких токах накачки может возникнуть лазерная генерация.

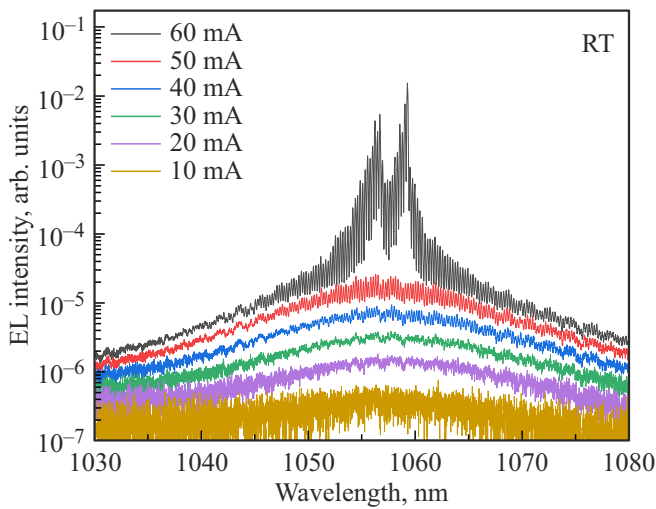


Рис. 4. Типичные спектры ЭЛ при разном прямом смещении на исследованном ОВ.

Таким образом, спектры ЭЛ МД лазера, полученные с торца ОВ при приложении к нему прямого смещения, будут содержать также и излучение ОВ. Для правильной оценки эффекта просветления активной области ОВ желательно из полученных результатов исключить его вклад. Для этого нами были измерены спектры ЭЛ ОВ при разном прямом смещении на нем, тогда как ток накачки МД лазера был равен нулю (рис. 4). При достижении током прямого смещения величины ~ 60 мА возникает лазерная генерация самого ОВ. Этот эффект приводит к тому, что излучение с ОВ перекрывает излучение микролазера, при этом структура сильно нагревается и тепловой загиб оптической мощности МД лазера возникает при меньших значениях тока накачки. При последующих измерениях ток на ОВ не превышал 35 мА.

На рис. 5 приведены зависимости оптической мощности МД лазеров, полученной с торца ОВ, от тока накачки лазера и при различных токах на ОВ (от 0 до 35 мА). При нулевом токе через МД лазер и ненулевом прямом смещении на ОВ оптическая мощность, попадающая на детектор, состояла только из излучения самого ОВ. Чтобы исключить его вклад, величину оптической мощности, полученную в отсутствие тока на МД лазере, мы приняли за 0. Как можно видеть из рис. 5, приложение прямого смещения на ОВ приводит к значительному увеличению выводимой с его торца оптической мощности собственно МД лазера, как для 30 мкм, так и для 40 мкм микролазеров. Наибольшая использованная в работе величина тока прямого смещения на ОВ 35 мА приводит к увеличению выводимой оптической мощности МД лазера почти на порядок во всем диапазоне токов накачки МД лазера выше порогового. При этом во всем исследованном диапазоне токов на ОВ изменения порогового тока МД лазеров не происходило (в пределах ± 0.5 мА).

На зависимостях, приведенных на рис. 5, присутствует резкий перегиб (скачок интенсивности), аналогичный обсужденному выше для случая ОВ без накачки. При этом ток на МД лазере (I_{bend}), соответствующий этому перегибу, уменьшается с увеличением прямого смещения на ОВ. Например, для МД лазера диаметром 30 мкм значение тока, при котором возникает скачок, уменьшается с 39 до 33 мА. Как уже отмечалось выше, резкое увеличение оптической мощности возникает при появлении в спектре ЭЛ микролазера более длинноволновых мод. Таким образом, просветление активной области ОВ, вызванное приложением прямого смещения к нему, ведет к повышению добротности (снижению потерь) длинноволновых мод МД лазера и, соответственно, их появлению в спектре при меньших величинах инжекционного тока через микролазер.

Далее нами была реализована и исследована оптопара, представляющая собой МД лазер, сопряженный с ОВ, и волноводный ФД. Диаметр использованного микролазера равнялся 30 мкм. Длина волноводного ФД составляла 92 мкм, а ширина ~ 50 мкм. Темновой ток ФД оказывает существенное влияние на его характеристики, поэтому была получена зависимость данной характеристики от величины обратного смещения на ФД (рис. 6, а). Значения темнового тока не превышали 1.2 нА (26 мкА/см^2) при обратном смещении ~ 20 В. При смещении ~ 6 В темновой ток составил величину ~ 40 пА, что соответствует плотности тока $\sim 0.9 \text{ мкА/см}^2$. Для сравнения, в работе [18] для фотодетекторов на основе InAs/InGaAs-квантовых точек сообщалась плотность темнового тока 0.35 мкА/см^2 , однако обратное напряжение составило всего -1 В. Как видно из рис. 6, а, величина темновых токов при обратном смещении меньше -6 В находится в пределах погрешности используемого прибора. Однако следует отметить, что экстраполяция измеренных результатов (красная пунктирная линия на рис. 6, а) в область -2 В дает значение ~ 10 пА (0.21 мкА/см^2). Столь малые темновые токи исследованного ФД свидетельствуют о высоком структурном совершенстве его гетероструктуры и малой величине поверхностных утечек.

При реализации оптопары волноводный ФД находился параллельно ОВ, расстояние между их торцами составляло 260 мкм. Для обеспечения максимальной эффективности захвата излучения активная область ФД находилась на одном высотном уровне с активной областью ОВ. На рис. 6, б приведены зависимости фототока от инжекционного тока МД лазера, которые были получены при разной величине обратного смещения на ФД (от 0 до -10 В). Для каждой из полученных зависимостей величина фототока при нулевой накачке МД лазера была приведена к 0 путем вычитания темнового тока ФД. Увеличение обратного смещения на ФД приводит к росту фототока в связи с более сильным искривлением $p-n$ -перехода. Зависимость оптической мощности МД лазера, выводимой с торца ОВ, от инжекционного тока МД лазера также приведена на рис. 6, б (правая ось). Одинаковый характер зависимостей фототока и

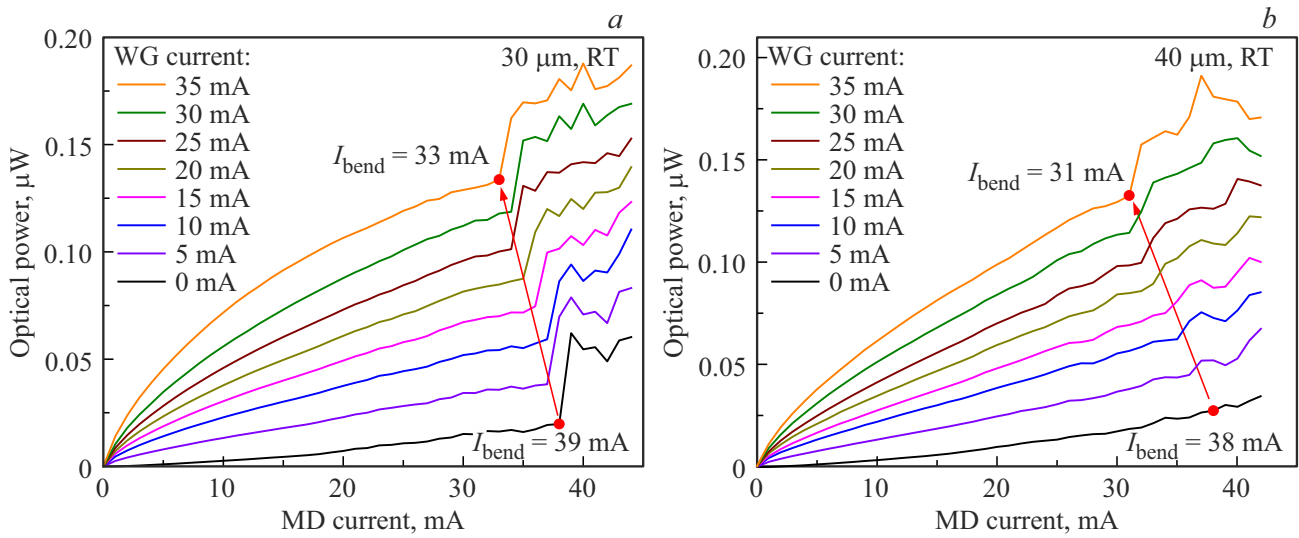


Рис. 5. Зависимости оптической мощности, выводимой с торца ОБ, от тока накачки МД лазера, при разном токе прямого смещения на ОБ для 30 мкм (а) и 40 мкм (b) МД лазеров. Изменение величины тока (I_{bend}), при котором происходит перескок лазерной моды на более длинноволновую, с ростом тока через ОБ показано красной стрелкой. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

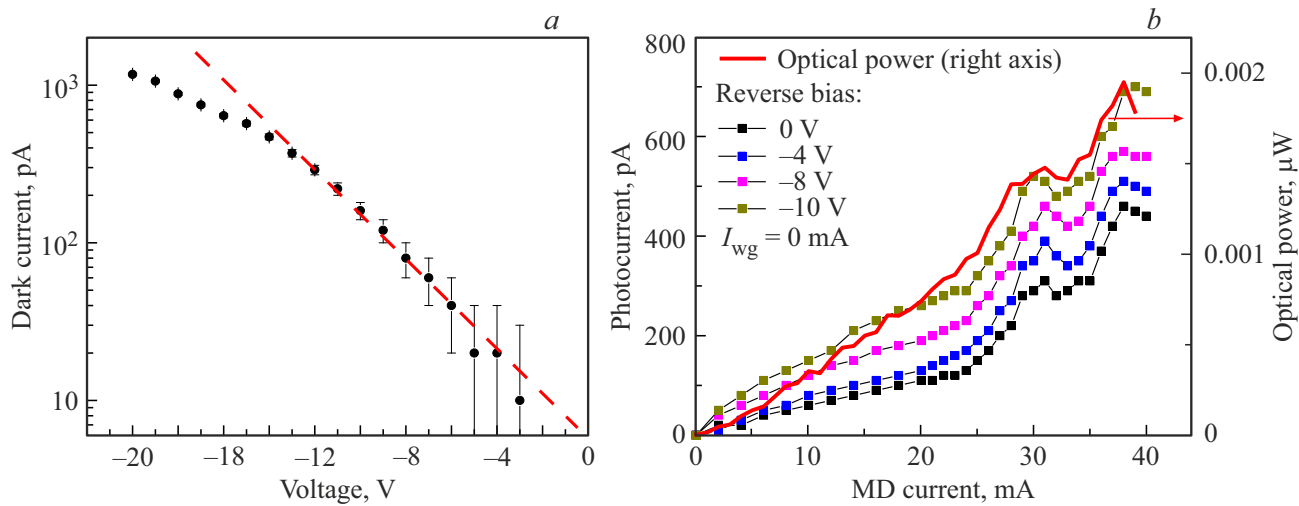


Рис. 6. а — зависимость величины темного тока ФД от обратного смещения. Красной пунктирной линией обозначена линейная аппроксимация результатов измерений при малом обратном смещении. б — зависимости величины фототока ФД от тока на МД лазере при разном обратном смещении (левая ось) и зависимость оптической мощности МД лазера, выводимой с торца ОБ, от тока накачки (правая ось).

зависимости оптической мощности свидетельствуют о детектировании ФД именно излучения МД лазера, т.е. об успешной реализации оптопары.

4. Заключение

В работе были исследованы спектральные характеристики при токе инжекции $\sim 2I_{\text{th}}$ МД лазеров разного диаметра с активной областью на основе InGaAs/GaAs КТ, латерально сопряженных с ОБ с огибающей секцией 20° . Продемонстрировано почти трехкратное увеличе-

ние выводимой с торца ОБ мощности при появлении в спектрах ЭЛ микролазеров лазерной линии в длинноволновой части спектра. Приложение к ОБ прямого смещения приводит к частичному просветлению его активной области и росту выводимой оптической мощности с его торца. При этом просветление активной области ОБ увеличивает добротность длинноволновых мод МД лазера, что вызывает их более раннее появление в спектре ЭЛ. Реализована оптопара с источником излучения в виде МД лазера, сопряженного с ОБ, и с приемником в виде волноводного ФД.

Благодарности

Работы выполнены на Уникальной научной установке „Комплексный оптоэлектронный стенд НИУ ВШЭ — Санкт-Петербург“.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-72-10002, <https://rscf.ru/project/22-72-10002/>. Исследование оптопары выполнено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] X. Mu, S. Wu, L. Cheng, H.Y. Fu. Appl. Sci., **10** (4), 1538 (2020).
- [2] P. Jiang and K.C. Balram. Opt. Express, **28** (8), 12262 (2020).
- [3] N. Kryzhanovskaya, A. Zhukov, E. Moiseev, M. Maximov. J. Phys. D: Appl. Phys., **54** (45), 453001 (2021).
- [4] F. Ou, X. Li, B. Liu, Y. Huang, S.T. Ho. Optics lett., **35** (10), 1721 (2010).
- [5] W.W. Wong, C. Jagadish, H.H. Tan. IEEE J. Quant. Electron., **58** (4), 1 (2022).
- [6] X.M. Lv, Y.Z. Huang, Y.D. Yang, H. Long, L.X. Zou, Q.F. Yao, X. Jin, J.L. Xiao, Y. Du. Opt. Express, **21** (13), 16069 (2013).
- [7] S.J. Choi, K. Djordjev, S.J. Choi, P.D. Dapkus. IEEE Photon. Technol. Lett., **15** (10), 1330 (2003).
- [8] W. Xie, T. Stöferle, G. Raino, T. Aubert, S. Bisschop, Y. Zhu, R.F. Mahrt, P. Geiregat, E. Brainin, Z. Hens, D.V. Thourhout. Advanced Mater., **29** (16), 1604866 (2017).
- [9] X. Xu, T. Maruizumi, Y. Shiraki. Opt. Express, **22** (4), 3902 (2014).
- [10] L.X. Zou, X.M. Lv, Y.Z. Huang, H. Long, Q.F. Yao, Y. Du. Optics and Photonics J., **3** (2), 66 (2013).
- [11] N.V. Kryzhanovskaya, K.A. Ivanov, N.A. Fominykh, S.D. Komarov, I.S. Makhov, E.I. Moiseev, J.A. Guseva, M.M. Kulagina, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, A.I. Lihachev, R.A. Khabibullin, R.R. Galiev, A.Yu. Pavlov, K.N. Tomosh, M.V. Maximov, A.E. Zhukov. J. Appl. Phys., **134** (10), 103101 (2023).
- [12] D. Inoue, Y. Wan, D. Jung, J. Norman, C. Shang, N. Nishiyama, S. Arai, A.C. Gossard, J.E. Bowers. Appl. Phys. Lett., **113** (9), 093506 (2018).
- [13] Н.В. Крыжановская, С.А. Блохин, И.С. Махов, Э.И. Моисеев, А.М. Надточий, Н.А. Фоминых, С.А. Минтаиров, Н.А. Калужный, Ю.А. Гусева, М.М. Кулагина, Ф.И. Зубов, Е.С. Колодезный, М.В. Максимов, А.Е. Жуков. ФТП, **57** (3), 202(2023).
- [14] Н.В. Крыжановская, Э.И. Моисеев, А.М. Надточий, А.А. Харченко, М.М. Кулагина, С.А. Минтаиров, Н.А. Калужный, М.В. Максимов, А.Е. Жуков. Письма ЖТФ, **46** (13), 7 (2020).
- [15] S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Lantratov, M.V. Maximov, A.M. Nadtochiy, S. Rouvimov, A.E. Zhukov. Nanotechnology, **26** (38), 385202 (2015).
- [16] M.K. Chin, S.T. Ho. J. Lightwave Technol., **16** (8), 1433 (1998).
- [17] F. Zubov, M. Maximov, E. Moiseev, A. Vorobyev, A. Mozharov, Yu. Berdnikov, N. Kaluzhnyy, S. Mintairov, M. Kulagina, N. Kryzhanovskaya, A. Zhukov. Optics Lett., **46** (16), 3853 (2021).
- [18] J. Huang, Y. Wan, D. Jung, J. Norman, C. Shang, Q. Li, K.M. Lau, A.C. Gossard, J.E. Bowers, B. Chen. ACS Photonics, **6** (5), 1100 (2019).

Редактор Г.А. Оганесян

Microdisk lasers based on InGaAs/GaAs quantum dots monolithically integrated with a waveguide

N.A. Fominykh¹, N.V. Kryzhanovskaya¹, S.D. Komarov¹, I.S. Makhov¹, K.A. Ivanov¹, E.I. Moiseev¹, E.E. Antonov¹, Yu.A. Guseva², M.M. Kulagina², S.A. Mintairov², N.A. Kalyuzhnyy², R.A. Khabibullin³, R.R. Galiev³, A.Yu. Pavlov³, K.N. Tomosh³, A.E. Zhukov¹

¹ Higher School of Economics National Research University,
190008 St. Petersburg, Russia

² Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

³ Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of the Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS),
117105 Moscow, Russia

Abstract Microdisk lasers with diameters of 30 and 40 μm with an active region based on InGaAs/GaAs quantum dots, laterally coupled to an optical waveguide, were studied. The microlasers and waveguides were fabricated in a single process on a single GaAs substrate. The spectral characteristics at elevated injection currents on the microlaser and/or waveguide exceeding the lasing threshold by up to 4 times were investigated. The possibility of reducing absorption losses in the waveguide by applying a direct bias to it was shown. An optocouple in which a microdisk laser coupled to a waveguide serves as a radiation source and a waveguide photodetector as a radiation receiver was realized. The dark current density of the waveguide photodetector was 1.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ at a reverse bias of -6 V .