

УДК 621.373.826.038.825.4

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДНЫЕ ЛАЗЕРЫ

**И. С. Байков**

Всероссийский научно-исследовательский институт  
межотраслевой информации, Москва, Россия

**В. В. Безотосный**

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

*Обзор содержит краткую информацию об основных научных и производственных центрах России, ведущих исследования и разработки в области полупроводниковых инжекционных лазеров. Представлены современные направления фундаментальных и прикладных работ, в частности в области создания инжекционных лазеров на основе наноструктур и квантовых ям, а также лазеров с напряженными гетерослоями. Рассмотрен ряд работ, направленных на получение генерации в новых спектральных диапазонах, повышение мощности в одномодовом режиме, создание линеек инжекционных лазеров для накачки твердотельных активных сред и получение ультракоротких импульсов света. Приведена справочная информация о номенклатуре выпускаемых промышленностью инжекционных лазеров (ИЛ), излучающих оптических модулей и мощных светоизлучающих диодов.*

Сегодня лазерная техника уверенно вошла в повседневную жизнь страны. Без лазерных приборов и установок невозможно представить себе современное машиностроительное предприятие, производство изделий микроэлектроники или систему телекоммуникаций. Отечественные ученые и инженеры внесли большой, во многих случаях определяющий, вклад в разработку практически всех известных лазеров и лазерных технологий. Организация промышленного производства лазеров в нашей стране началась еще в 1962 г., когда по решению правительства в Минэлектронпроме был создан первый специализированный лазерный центр — НИИ “Полус” во главе с М. Ф. Стельмахом. В 1970—1980-е гг. лазерную технику активно осваивали все ведущие машиностроительные отрасли страны. Был создан мощный исследовательский и производственный потенциал по развитию и производству лазерной техники. К концу 1980-х гг. лазерная индустрия по научно-технологическому уровню уверенно вышла на третье место в стране [1], уступая только атомной промышленности и авиакосмическому комплексу. Распад СССР и вхождение России в рыночную экономику поставили лазерную индустрию страны в тяжелое положение. Состояние отечественного рынка лазерной техники тесно связано с положением российской промышленности, которая в настоящий момент испытывает большие трудности: оборудование морально устарело, отсутствие средств у предприятий и большая инфляция практически исключили заказы не только на разработки, но и на серийные новые изделия. Единственный сегмент рынка лазеров, развитие которого в настоящее время еще возможно, — медицинские установки.

Отсутствие развитого рынка сбыта в России оказало в последние годы серьезное влияние и на научные исследования в области лазеров и лазерной техники, приведя к сужению фронта НИОКР и относительно большей ориентации на развитие теоретических исследований и небольших разработок, позволяющих получить быструю отдачу. Вышеизложенные обстоятельства типичны и для развития полупроводниковых лазеров.

#### ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ

Полупроводниковые лазеры теоретически были предсказаны в 1959 г. Н. Г. Басовым, Б. М. Вулом и Ю. М. Поповым, а в 1962 г. реализован первый инжекционный лазер на основе GaAs. За прошедшие годы созданы полупроводниковые лазеры, испускающие когерентное излучение в УФ, видимом и ИК-диапазонах (0,32—32 мкм) и использующие в качестве активной среды более 50 полупроводниковых материалов.

Изменяя состав активной среды лазера, можно варьировать длину волны излучения в относительно широком интервале за счет изменения ширины запрещенной зоны. Более плавную и меньшую перестройку длины волны в данном материале можно осуществить за счет изменения температуры, гидростатического давления, применения решетки в качестве дисперсионного элемента во внешнем резонаторе и т. д.

Вынужденное излучение полупроводникового лазера — это рекомбинационное излучение в р-п-переходе полупроводникового диода. Рекомбинационные процессы в р-п-переходе требуют создания электронно-дырочных пар. Их создание наряду с возбуждением происходит путем:

инжекции носителей заряда (наиболее часто используемая форма накачки полупроводниковых лазеров, поэтому последние называют инжекционными, диапазон излучения 0,57—32 мкм);

возбуждения электронным пучком;

столкновительной или туннельной ионизации кристалла высоким электрическим полем;

оптической накачки с помощью импульсных ламп или лазеров (типичные удельные мощности накачки  $\sim 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>).

Полупроводниковые лазеры с накачкой электронным пучком были впервые предложены и реализованы в СССР в начале 60-х гг. Этот тип полупроводниковых лазеров не получил такого широкого распространения, как инжекционные (диодные) лазеры и, по-видимому, не получит и в будущем. Тем не менее есть ряд прикладных проблем, где лазеры с электронной накачкой могут иметь преимущество перед другими типами, обеспечивая более высокие параметры или более низкую стоимость.

В России разработаны промышленные технологии получения лазеров с электронной накачкой в виде отпаянных электронно-лучевых трубок. На их основе уже созданы устройства отображения информации на экранах коллективного пользования, работающие как в телевизионном режиме, так и в дисплейном. Разработана также промышленная технология изготовления импульсных лазерных трубок, позволяющих генерировать наносекундные импульсы света мощностью в несколько мегаватт практически в любом спектральном интервале в диапазоне от среднего ИК до ближнего УФ. Средняя мощность генерации лазеров данного типа достигает десятков ватт при КПД  $\sim 10\%$ , а их импульсная мощность — от нескольких милливатт до десятков мегаватт.

Получен очень широкий диапазон длин волн генерации лазеров с электронной накачкой 0,33—30 мкм; экспериментально показана возможность плавной пере-

стройки частот генерации в широкой ( $\Delta\lambda \sim 100$  нм) области спектра с быстрым электронным управлением.

Более подробно с достижениями в разработке полупроводниковых лазеров с накачкой электронным пучком можно ознакомиться в обзоре, подготовленном одним из их создателей, проф. О. В. Богданкевичем [2].

Гораздо большее развитие получили ИЛ. По экспертным оценкам, в 1994 г. мировой объем продаж этих лазеров в натуральном выражении превысил 84 млн. шт., а в стоимостном выражении составил более четверти общего объема продаж лазеров всех типов. Это объясняется существенным прогрессом в развитии диодных лазеров и постоянным снижением стоимости их производства.

Инжекционные (диодные) лазеры отличаются от всех других типов лазеров высоким КПД по мощности (выше 10 % и до 65 %); непосредственным преобразованием электрической энергии в когерентное излучение как в непрерывном, так и в импульсном режиме работы; возможностью прямой модуляции электрическим током до ГГц-диапазона; малыми размерами (десятые доли миллиметра и менее); низким напряжением накачки; механической надежностью и большим сроком службы (до  $10^6$  и для изделий, создаваемых, в частности, для подводных линий связи). Изготовление полупроводниковых лазеров требует высокоразвитой современной технологии.

В ИЛ накачка осуществляется путем пропускания электрического тока через р-п-переход лазерного диода в прямом направлении, при этом в активную область инжектируются избыточные электроны и дырки. Вследствие короткого времени термализации (внутризонной релаксации в результате электрон-электронных, электрон-фононных и электрон-примесных столкновений) носители заряда переходят на более низкие энергетические уровни в зонах проводимости и валентной, приобретая распределение по энергиям, соответствующее распределению Ферми-Дирака. Время жизни избыточных носителей определяется временем рекомбинации и составляет порядка  $10^{-9}$  с, что на три-четыре порядка превышает время термализации ( $10^{-12}$ – $10^{-13}$  с). Условие получения инверсии для межзонных переходов получается из следующих соображений: вынужденные переходы с испусканием квантов света превышают переходы с поглощением, когда вероятность заполнения верхних уровней превышает вероятность заполнения нижних уровней, т. е. когда разность квазиуровней Ферми электронов и дырок превысит ширину запрещенной зоны полупроводника. Для получения лазерного эффекта в полупроводниковом кристалле необходимо, чтобы оптическое усиление превысило все потери в резонаторе.

Первые ИЛ, появившиеся в 1962 г., изготовлялись методом диффузии акцепторной примеси (цинка) в арсенид галлия и получили название "гомолазеров" в отличие от гетеролазеров, получаемых методами эпитаксиального наращивания полупроводниковых материалов разного состава на подложках GaAs, InP, GaSb и других полупроводников. Главный недостаток гомолазеров — высокая плотность порогового тока (более 50 кА/см<sup>2</sup>), что не позволило получить генерацию при комнатной температуре. С момента получения первого инжекционного лазера прошло более 30 лет и все эти годы шла напряженная работа в области физики и технологии ИЛ, причем такой бурный прогресс в этой области стал возможен благодаря тесному взаимодействию физиков с технологами.

В 1968 г. был изготовлен первый гетеролазер. Он представлял собой структуру, состоящую из слоя AlGaAs, выращенного методом жидкофазной эпитаксии на подложках GaAs. Благодаря тому, что ковалентные радиусы Ga и Al отличаются незначительно, возможно выращивание высококачественных слоев AlGaAs на подложках GaAs. С увеличением содержания Al в AlGaAs ширина запрещенной зоны увеличивается, в такой структуре уменьшается утечка инжектированных электро-

нов из активного слоя, благодаря чему удается снизить пороговый ток до уровня  $7 \text{ кА/см}^2$  и получить генерацию при комнатной температуре.

Одновременно с функцией ограничения электронов широкозонный слой AlGaAs создает оптическое волноводное ограничение световой волны в направлении, перпендикулярном р-п-переходу. Существенным недостатком такого волновода является его асимметрия. Как известно, несимметричные волноводы имеют ненулевую отсечку фундаментальной пространственной моды, т. е. локализованные решения волнового уравнения (моды волновода) могут существовать, когда размер волновода превышает некоторую величину. Инжекционные лазеры с одним гетеропереходом называются лазерами на основе односторонней гетероструктуры (ОГС). Следующим шагом в совершенствовании ИЛ явилось создание в 1969 г. в СССР лазеров на основе двух гетеропереходов (так называемых ДГС-лазеров) [3]. В ДГС-лазерах достигается как электронное, так и оптическое ограничение носителей, благодаря чему пороговая плотность тока может быть снижена до уровня  $1 \text{ кА/см}^2$  и получена непрерывная генерация при комнатной температуре. С созданием ДГС-лазера более широким фронтом стали проводиться работы по созданию лазеров на основе других полупроводниковых соединений, в частности InGaAsP/InP. Этому в большой мере способствовали открытие в СССР принципа изопериодического замещения в твердых растворах полупроводниковых соединений и создание первых лазеров на основе InGaAsP/InP [4].

Важным этапом в совершенствовании ИЛ стало создание ДГС-лазеров с отдельным электронным и оптическим ограничением, в которых между широкозонными эмиттерами и активным слоем введены слои промежуточного состава, играющие роль одновременно оптического волновода и барьеров для носителей, инжектированных в активный слой. Благодаря использованию структур с отдельным ограничением (РО) удалось снизить пороговые плотности тока примерно в два раза (до  $0,5 \text{ кА/см}^2$ ).

Следующими шагами было создание структур с отдельным ограничением (РО), в которых волноводные слои имеют градиентный состав (ширина запрещенной зоны увеличивается в направлении от активного слоя к широкозонным эмиттерам), и использование очень тонких активных слоев (толщиной  $50\text{--}150 \text{ \AA}$ ). Создание таких структур потребовало развития совершенно новых технологий эпитаксии: МОС-гидридной и молекулярно-лучевой эпитаксии (МОСVD, МВЕ).

Современные ИЛ, как правило, изготавливаются методом МОСVD и имеют структуру с РО. Активная область содержит одну или несколько (по современным представлениям две—четыре) ультратонких (квантоворазмерных) активных областей. Пороговые токи в лучших структурах составляют  $100\text{--}200 \text{ А/см}^2$ . Освоение технологии выращивания ультратонких слоев позволило создать гетероструктуры и ИЛ на их основе с напряженными слоями, имеющие рекордные параметры по плотности порогового тока и работающие в новых спектральных диапазонах (в частности,  $0,95\text{--}1,06$  и  $0,63\text{--}0,67 \text{ мкм}$ ). В основе этих достижений лежит то обстоятельство, что в напряженных структурах параметры материалов уже не являются изотропными, а различны в разных направлениях. В частности, в полупроводниках меняются основные параметры, определяющие вероятность переходов. Подбором оптимальных параметров напряженных слоев (величины сжатия или растяжения) можно добиться улучшения излучательных параметров среды в направлении лазерной генерации (т. е. в плоскости р-п-перехода) и соответственно снизить пороговый ток, повысить дифференциальную эффективность и КПД. В итоге возможно значительное увеличение выходной мощности ИЛ.

Среди тенденций, определяющих развитие ИЛ, следует указать усилия, направленные на создание автоматизированных технологий изготовления одно- и двумерных массивов ИЛ. В перспективе это даст возможность в полной мере использовать в данной области опыт и оборудование планарного цикла на кремнии,

что значительно снизит стоимость ИЛ и уже в ближайшее время сделает реальной замену многих типов твердотельных и газовых лазеров на полупроводниковые.

Следует отметить разработки в области лазерных структур с 45-градусным поворотом излучения и ИЛ с поперечным резонатором (VCSEL).

Интересные практические результаты могут дать разработки в области наноструктур (квантовые нити и квантовые точки), поскольку в них можно сильно модифицировать энергетический спектр носителей и соответственно спектр усиления.

ИЛ начинает испускать когерентное излучение, если плотность электрического тока накачки превышает пороговую величину, которая зависит от полупроводникового материала, оптической волновой структуры, величины электронного ограничения, рабочей температуры и режима работы (непрерывный или импульсный). Увеличение температуры активной области ИЛ при пропускании электрического тока приводит к увеличению порогового тока, снижению дифференциальной эффективности и смещению спектральной полосы излучения. Разогрев активной области ЛД происходит как в непрерывном, так и в импульсном режиме работы, причем в импульсном режиме существенными являются длительность и частота следования импульсов.

В импульсном режиме работы лазерного кристалла обычно различают четыре основных диапазона длительностей импульсов: режим ультракоротких импульсов (субнаносекундные длительности), режим коротких импульсов (1—200 нс), режим длительных импульсов (0,2—100 мкс) и так называемый квазинепрерывный режим (100—1000 мкс).

Для получения непрерывного режима при больших мощностях ИЛ необходимо эффективно отводить тепло от активной области, поэтому при монтаже кристаллов ИЛ применяется специальная технология пайки на радиаторы из меди, алмаза, кремния или теплопроводящей керамики. Гетероструктуры для непрерывных лазеров оптимизированы для получения минимальной плотности порогового тока и максимальной дифференциальной эффективности. Тем не менее, при получении высокой мощности от ИЛ, как правило, необходимо принудительное охлаждение с помощью термоэлектрических охладителей (ТЭМО), систем жидкостных охладителей, обладающих рекордными характеристиками по тепловой нагрузке. Отводимая микроканальными охладителями тепловая мощность может быть на уровне 2—5 кВт/см<sup>2</sup>.

Предельная мощность генерации в полупроводниковых лазерах ограничивается разогревом активной области под действием тока накачки и разрушением зеркал резонатора оптическим полем собственного излучения при превышении потоком мощности генерации, характерного для данного материала порога (обычно 1—10 МВт/см<sup>2</sup>).

Наряду с диффузией акцепторов в однородный, легированный донорами основной полупроводник *n*-типа, в России освоены следующие методы получения полупроводниковых структур [5, 6]:

жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ, в процессе охлаждения требуемое растворенное соединение смешанного кристалла выпадает из насыщенного раствора и осаждается на подложке);

эпитаксия из паровой фазы (при контакте с холодной подложкой химических компонент из горячей зоны разлагаются летучие составляющие, необходимая твердая фаза синтезируется из элементов и кристаллизуется в виде монокристаллического слоя);

химическое осаждение из газовой фазы металлоорганических соединений (MOCVD);

молекулярно-лучевая эпитаксия (MBE, в наиболее совершенной форме — атомное, послойное осаждение; происходит эпитаксиальный рост слоя на подложке при

конденсации направленных пучков молекул или атомов в системе с высоким вакуумом).

ИЛ высокого качества получены с использованием ЖФЭ, МOCVD и MBE-технологий. Однако в полной мере всем приборным требованиям (включая срок службы) отвечают ИЛ, изготовленные методами ЖФЭ и МOCVD.

Для создания лазеров из полученных полупроводниковых структур обычно используется фотолитография. Чрезвычайно быстрый рост исследований в последние годы по наноструктурам потребовал развития новых технологий, позволяющих осуществлять контроль на атомном уровне. Конечно, такие технологии (структурная эпитаксия, молекулярная самосборка и др.) еще только зарождаются и осваиваются в отдельных лабораториях.

#### **НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ЦЕНТРЫ РОССИИ ПО РАЗРАБОТКЕ И ВЫПУСКУ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ**

В настоящее время можно указать ряд исследовательских и промышленных центров в России, которые занимают ведущее положение по разработке, промышленному освоению и выпуску полупроводниковых лазеров, а также приборов и оборудования на их основе. Среди академических институтов, занимающихся разработкой и фундаментальными исследованиями диодных лазеров, следует указать Физический институт им. П. Н. Лебедева (Москва), Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе (С.-Петербург), Институт общей физики (Москва). Крупнейшими разрабатывающими организациями и изготовителями диодных лазеров и сопутствующего оборудования являются НИИ "Полюс" с заводом "Полюс" (Москва), НИИ "Волга" (г. Саратов), ПО "Восход" (КРЛЗ, г. Калуга), ПО "Север" (г. Новосибирск), АО "Полупроводниковые приборы" (С.-Петербург).

НИИ "Полюс" объединяет 11 НТЦ, занимающихся разработкой лазерных систем: "Лазер-прибор", "Микролазер", "Полюс-квант", "Навигатор", "Лазермаш", "Лазермед", "Смерш", "Полюс-1", "Спектр", "Система", "Мянилазер".

Кроме того, НИИ "Полюс" выступил учредителем еще 11 базирующихся на его территории дочерних предприятий в форме ТОО или АО закрытого типа с участием его ведущих специалистов. Это — "ИРЭ-полюс", "Лазер-компакт", "Лазер-полюс", "Квантекс", "Норма", "Пульсар", "Надис", "ЭОС", "Кварк", "Элатем", "Лангран".

Наиболее передовые позиции в разработке и производстве диодных лазеров занимают НТЦ "Микролазер" и малые предприятия "ИРЭ-полюс" и "Лазер-компакт".

Остановимся подробнее на разработках НТЦ "Микролазер", поскольку этот центр является крупнейшим разработчиком и производителем диодных лазеров [7]. Работы по полупроводниковой квантовой технике начались в НТЦ "Микролазер" в 1962 г. незадолго до получения в США первого эффекта генерации стимулированного излучения на p-n-переходе в GaAs. Основные усилия коллектива НТЦ в течение его тридцатилетней истории были сосредоточены на разработке высоких технологий для производства полупроводниковых приборов квантовой электроники, в первую очередь, лазерных диодов, фотодиодов, светодиодов, суперлюминесцентных излучателей, приемных и передающих модулей, а также медицинских приборов для лазерной диагностики и терапии. Центр оснащен современным отечественным и импортным технологическим и контрольным оборудованием, обеспечивающим полный цикл изготовления и исследования лазерных диодов и других приборов квантовой электроники.

В НТЦ "Микролазер" освоен следующий ряд технологических процессов производства полупроводниковых лазеров:

1. Метод жидкофазной эпитаксии и МOC-гидридной технологии выращивания гетероструктур AlGaAs-GaAs, GaInP-InP, AlGaInP-GaAs на подложках GaAs и InP для лазерных диодов и фотодиодов.

2. Комплекс высокоточных методов изготовления лазерных активных элементов, включающих в себя:

лазерное и магнетронное напыление термостабильных омических контактов;

прецизионное ионно-химическое вытравление рельефных структур в эпитаксиальных слоях;

низкотемпературную эпитаксию высокоомных полупроводниковых пленок для бокового токового и оптического ограничения;

формирование интерференционных зеркал с повышенной лучевой прочностью из последовательности эпитаксиальных широкозонных материалов и многослойных диэлектрических пленок;

разделение пластины на кристаллы и их монтаж в герметизированные корпуса, включая операции согласования с волоконно-оптическими кабелями;

термоэлектротренировку каждого изделия с использованием высокопроизводительного оборудования.

Номенклатура приборов (лазерных и суперлюминесцентных диодов, светодиодов, приемных модулей), выпускаемых НТЦ "Микролазер", практически перекрывает диапазон излучения от 0,63 до 1,65 мкм. Они предназначены для следующих областей применения:

1. Системы оптической памяти, принтеры, сканирующие устройства, созданные на базе лазерных диодов с длиной волны 0,78 и 0,82 мкм.

2. Волоконно-оптические системы на длины волн 0,83; 1,3 и 1,55 мкм, удовлетворяющие требованиям следующих областей применения:

протяженные цифровые системы связи со скоростью передачи информации до 2,4 Гбит/с;

локальные абонентские сети;

компьютерные системы связи;

аналоговые системы передачи информации с полосой частот до 19 ГГц;

системы передачи информации в суперЭВМ со скоростью до 2 Гбит/с.

3. Накачка легированного эрбием волокна, обеспечивающего создание волоконных усилителей в диапазоне 1,5—1,56 мкм с коэффициентом усиления 30 дБ. Для этой цели созданы одномодовые высокоомощные ЛД (30—50 мВт) с длиной волны 0,98 и 1,48 мкм.

4. Накачка твердотельных лазеров с помощью высокоомощных полупроводниковых лазеров с длиной волны 0,81 мкм и мощностью излучения 0,25—1 Вт.

5. Датчики физических величин амплитудного типа и одномодовые волоконно-оптические гироскопы на основе суперлюминесцентных диодов.

6. Диагностическое и терапевтическое медицинское оборудование на базе полупроводниковых лазеров. Например, разработанный диагностико-терапевтический лазерный комплекс "Колокольчик" нашел широкое применение в областях медицины: акупунктура, лечение артритов, артрозов, остеохондрозов, детского церебрального паралича и др.

Все перечисленные приборы, создаваемые в НТЦ "Микролазер", поставляются на рынок, а их параметры можно найти в регулярно издаваемом НТЦ каталоге.

В настоящее время в НТЦ "Микролазер" проводятся исследования и разработки в следующих перспективных направлениях:

создание полупроводниковых лазеров на длины волн 1,3 и 1,55 мкм с повышенной степенью когерентности излучения (полуширина линии менее 1 МГц) для ис-

пользования в высокоскоростных когерентных линиях волоконной связи, а также в различного рода интерферометрических системах;

разработка полупроводниковых (на длину волны 1,3 мкм) и волоконно-оптических усилителей (на длину волны 1,5 мкм) на основе волокна, легированного Er, с использованием однододовых ЛД с длинами волн 0,85, 0,98 и 1,48 мкм, что обеспечит создание более эффективных волоконных сетей, кабельного ТВ и протяженных ВОЛС;

разработка ЛД в видимом диапазоне спектра. Созданы красные лазеры на длину волны 0,67 мкм и с длиной волны, близкой к длине волны He—Ne газового лазера (0,63—0,64 мкм). Создаются лазеры зеленого и синего диапазона спектра (длины волн 0,53—0,42 мкм), получаемого путем удвоения частоты полупроводникового лазера (соответственно 1,06—0,84 мкм) в нелинейных диэлектрических кристаллах и волноводах;

разработка высокоомощных одноэлементных (1—5 Вт) лазеров, а также линсек и решеток (5—100 Вт), полупроводниковых лазеров, работающих в непрерывном режиме, и лазеров (0,3—1 кВт) — в импульсном режиме для накачки активных диэлектрических кристаллов в целях создания высокоэффективных и малогабаритных твердотельных лазеров;

в области лазерной медицинской аппаратуры в НТЦ создается новое диагностико-терапевтическое медицинское оборудование:

аппарат для профилактики кариеса для массового применения;

многоканальный аппарат лазерной терапии для применения в хирургии и пульмонологии;

прибор лазерной неинвазивной диагностики;

аппарат фотодинамической терапии рака;

аппарат для облучения крови в ближнем ИК-диапазоне.

Производственное объединение "Север" разрабатывает и серийно выпускает полупроводниковые инъекционные лазерные излучатели видимого (0,67 мкм) и инфракрасного (0,78—0,92 мкм) диапазонов непрерывного и импульсного режимов работы. Мощности серийных изделий 3—5 мВт, экспериментальных образцов — до 100 мВт. На базе трех базовых конструкций производится более 40 модификаций излучателей. Размер торца тела свечения излучателей от 0,6x2,5 до 1,5x20 мкм. Длина когерентности — до 5 м. Поставлена задача довести в 1995 г. производство лазерных полупроводниковых излучателей до 100 тыс. шт.

НИИ полупроводниковых приборов (г. Томск) занимается разработкой мощных светоизлучающих диодов и осуществляет их мелкосерийный выпуск [8]. Разработанные в НИИ мощные ИК-излучающие диоды предназначены для систем открытой атмосферной оптической связи. Они отличаются повышенной силой излучения и устойчивостью к дестабилизирующим воздействиям. В диодах использованы кристаллы на основе ДГС AlGaAs/GaAs (патент Российской Федерации № 1463086) и модернизированный корпус — теплоотвод ИК-диода АЛ148. Для формирования диаграммы направленности излучения разработан концентратор в форме параболоида с внутренней полусферической или полуэллиптической линзой (патент Российской Федерации № 1819488). Основная особенность концентратора — использование наряду с эффектом преломления эффекта полного внутреннего отражения излучения от границы раздела двух сред. В зависимости от соотношения геометрических размеров концентратора и поверхности излучающей площадки может быть получен унифицированный ряд ИК-диодов с углом излучения 5—150 град и силой излучения 0,5—15 Вт/ср при токе 1А. Типичные параметры двух модификаций ИК-диодов — ТОМ120Н и ТОМ120Н! при прямом постоянном токе 1 А и температуре 25 °С приведены в табл. 1.

В импульсном режиме в зависимости от скважности ИК-диоды допускают накачку токами до 10—20 А. При токе 6 А (скважность — 2, длительность импуль-

са — 50 мкс) полная мощность излучения для обеих модификаций составляет 1,0—1,1 Вт.

Минимальная наработка при постоянном или среднем токе 1,5—2,0 А не менее 25 тыс. ч.

Таблица 1  
(НИИ ПП, г. Томск)

Параметры	ТОМ120Н	ТОМ120Н1
Мощность излучения, мВт	160—200	160—200
Постоянное прямое напряжение, В	1,4—1,8	1,4—1,8
Угол излучения, град	10—14	7—10
Сила излучения, Вт/ср	2,8—3,2	8—10
Максимальный диаметр концентратора, мм	12	12

Диоды пригодны для применения в системах скрытой оптической связи с открытым каналом в пределах прямой видимости, в системах пеленгации, сопровождения, управления и контроля параметров движущихся объектов, в медицине, биологии, животноводстве, растениеводстве и других областях.

Разработанный НИИ мощный красный светодиод ТОМ120К предназначен для диагностико-терапевтического воздействия на биообъекты и применения в светотехнических устройствах большого радиуса действия — от 5 до 200 м и более: маячной, светофорной и семафорной сигнализации, оповещательных световых знаков путей сообщения и транспортных средств и т. д. Выдерживает нагрузку постоянным электрическим током до 1—3 А. Основные параметры диода при 25 °С и прямом постоянном токе составляют: длина волны излучения — 0,66 мкм, прямое падение напряжения — не более 3,0 В, мощность излучения — до 70 мВт, сила света — 700—1000 мкд.

Кристалл светодиода со светоизлучающей поверхностью 1,0x1,0 мм изготовлен на основе многослойной гетероструктуры в системе алюминий — галлий — мышьяк, полученной методом жидкофазной эпитаксии. Светодиод пригоден для работы в импульсном режиме до токов 10 А (скважность не менее 10) и в частотном режиме — до 10—30 МГц (времена нарастания и спада импульса света составляют около 50 нс), конструктивно выполнен на металлокерамическом корпусе с полимерным концентратором света. Конструкция допускает использование параболического концентратора света с полным внутренним отражением, что позволяет получить силу света в несколько десятков кандел.

НИИ полупроводниковых приборов разработало мощный двухволновый излучающий диод для медицинской светотерапевтической аппаратуры. Диод выдерживает токовую нагрузку до 3 А постоянного тока или до 10 А импульсного (скважность не менее 10) тока в режиме как ИК-излучения, так и излучения красного света. Мощность диода не менее 150 мВт, сила света 700—1000 мкд, сила излучения — не менее 535 мВт/ср. Излучатель содержит два излучающих кристалла на основе многослойной гетероструктуры алюминий—галлий—мышьяк, размещенных на едином держателе и снабженных единым концентратором излучения.

Интересны разработки НИИ знаковосинтезирующей электроники “Волга” (г. Саратов) миниатюрных полупроводниковых инжекционных излучателей на основе лазерного диода со встроенным кремниевым PIN-фотодиодом (JIM1-350) и торцевого суперлюминесцентного диода (JIM2-850) с выводом излучения из шестивыводного герметического металлостеклянного корпуса через волоконный световод с ди-

аметром сердцевины 5 мкм [9]. Мощность излучения в непрерывном режиме на выходном торце световода до 2 мВт, длина волны 830 нм. Излучатели могут применяться при изготовлении печатных плат, в волоконно-оптических датчиках, системах связи, телевизионной и измерительной технике.

В табл. 2 приведены основные характеристики серийно выпускаемых в России полупроводниковых и лазерных диодов [10].

Таблица 2

Фирма	Мощность излучения, мВт	Длина волны, нм	Режим
ПО "Север"	10	650—690	Импульсный
	3—5	760—920	Непрерывный
	10—50	760—800	—
ПО "Восход"	10—50	760—890	Непрерывный
	10—50	850—910	Импульсный
	50—750	800—870	Непрерывный
АО "Полупроводниковые приборы"	1—3 Вт	800—870	Импульсный
	3—5	650—680	Непрерывный
НИИ "Полюс"	35—45	975—985	"
	—	1270—1330	"
	—	760—870	"
	8—12 Вт	890	Импульсный
	60 мкДж	904	"
	50—60 Вт	807—860	"

Физический институт им. П. Н. Лебедева, сотрудники которого первыми в мире предложили полупроводниковый лазер, по праву остается в России лидером по их разработке и совершенствованию. Большая часть работ по полупроводниковым лазерам выполняется в Отделении квантовой радиофизики ФИАН (директор ОКРФ — академик Н. Г. Басов). Здесь создана лаборатория инжекционных лазеров (руководитель — проф. П. Г. Елисеев), которая проводит работы по разработке и исследованию мощных ЛД и полупроводниковых усилителей по направлениям:

нелинейные оптические эффекты в мощных ЛД и усилителях;

физические причины ограничения мощности ЛД, в частности, связанные с оптической прочностью лазерного полупроводникового материала;

экспериментальные исследования фазированных и нефазированных многоэлементных лазерных излучателей для оптической накачки твердотельных лазеров.

В исследованиях используются современные квантоворазмерные лазерные структуры с топологическими размерами квантовых ям 7—10 нм. Плотность мощности в пике импульса излучения может составлять 20—50 МВт/см<sup>2</sup> в арсениде галлия и до 80 МВт/см<sup>2</sup> — в арсениде индия—галлия (980 нм) с диэлектрическим защитным покрытием.

Остановимся на последних разработках этой лаборатории [11—29].

В 1994 г. в ходе экспериментальных исследований гетеролазеров на основе квантоворазмерных структур в системе InGaAs/GaAs обнаружены аномалии спектров суперлюминесценции, а также сдвиг центрального максимума картины излучения в дальнем поле [11]. Теоретический расчет показал, что в гетеролазерах образуется объемный резонатор в направлении, перпендикулярном слоям, влияние которого на излучательные характеристики лазеров существенным образом зависит от качества волноводных слоев. Это свойство может быть использовано в дальнейшем при конструировании лазеров с низким пороговым током и устойчивым одномодовым режимом работы.

Повышение мощности излучения в таком режиме — одна из важнейших задач в области ИЛ. Работа в данном направлении стимулируется практическими потреб-

ностями в таких областях, как межспутниковая связь, оптическая локация и дальнометрия, а также необходимость преобразования излучения во вторую гармонику, согласования с оптическими и волоконно-оптическими системами. Основными конструктивными вариантами решения проблемы являются схемы типа задающий генератор—усилитель, селективный резонатор либо многополосковая фазированная решетка инжекционных лазеров.

Основными причинами многомодовой генерации ИЛ являются технологические неоднородности оптических свойств гетероструктур и сильная оптическая нелинейность полупроводниковой усиливающей среды, вызванная зависимостью показателя преломления от концентрации носителей и, соответственно, от интенсивности излучения. В работе [12] проведены исследования пространственных и мощностных характеристик квантоворазмерных гетеролазеров на основе гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs на длине волны 940 нм. Для повышения мощности излучения в одномодовом режиме использовали внешний микроселектор. Для выращивания структур был применен метод МОС-гибридной эпитаксии, позволяющий получать образцы лазеров с более высокой однородностью излучательных характеристик по сравнению с методом жидкофазной эпитаксии и уменьшить толщину активной области до 5—10 нм. Лазеры с такой тонкой квантоворазмерной активной областью имеют меньший коэффициент амплитудно-фазовой связи, влияющий на зависимость диэлектрической постоянной среды от концентрации.

На поверхности гетероструктуры формировалась мелкая мезаструктура с шириной мезополоскового контакта по гребню 50 нм. Микроселекторы представляли собой зеркала с радиусом кривизны в плоскости полоскового контакта 200 мкм. Точной настройкой была получена симметричная диаграмма направленности излучения, очень близкая к однолепестковой. Распределение излучения в дальней зоне сохраняло стабильность, как и ширина основного максимума, близкая к дифракционному пределу. Максимальная мощность излучения в режиме селективной составляла 250 мВт. При фиксированном токе накачки мощность, содержащаяся в центральной лепестке, составила 55 % мощности лазера без селективного элемента. По мнению авторов, предложенная конструкция является более простой по сравнению со схемой внешнего селектора, использующей плоское зеркало [30], не требует промежуточной внешней оптики, имеет малые габаритные размеры и может быть внедрена в промышленных образцах.

В работе [13] изготовлены монолитные линейки ИЛ на длине волны 805—810 нм на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs, выращенных методом МОС-гибридной эпитаксии, с общей шириной излучающей поверхности 1 см. Они предназначены для применения в системах накачки твердотельных лазеров. Ватт-амперные характеристики, полный КПД, спектральный состав излучения и форма светового импульса линеек изучены в диапазоне длительностей импульсов накачки 0,1—1 мс. Максимальная импульсная мощность 70 Вт при токе 80 А была ограничена источником накачки.

В 1994 г. продолжалось изучение ИЛ с напряженным активным слоем InGaAs, работающих в диапазоне 980 нм. При толщине слоя 6—7 нм минимальная пороговая плотность тока составила при комнатной температуре  $120 \text{ А/см}^2$  при длине резонатора 540 мкм. В полосковых ЛД типа RW (ridge-waveguide) изучены явления, сопровождающие исчезновение рефрактивного бокового ограничения вследствие "антиволнового" влияния избыточных носителей: срывы и бистабильный режим генерации, гистерезис мощности, изменение диаграммы направленности. Представлены расчеты модового усиления в RW-лазерах при различных параметрах геометрии и в зависимости от концентрации избыточных носителей. Показано, что модовое усиление может проходить максимум и затем существенно снижается с ростом накачки, что использовано в объяснении срыва генерации и гистерезиса мощности [14].

Изучены дифференциальные вольт-амперные характеристики низкопороговых лазеров на основе гетероструктур InGaAs/GaAlAs с напряженным активным слоем. В согласии с простой моделью контактного эффекта порог генерации сопровождается отрицательным перепадом дифференциального сопротивления диода. Срыв генерации ведет к скачкообразному приросту напряжения на диоде, что коррелирует со скачком выходной мощности [15]. Рассмотрена проблема оптической "утечки" из активной области при толщине активного слоя 5—10 нм и дана интерпретация спектральных и пространственных особенностей излучения из квантоворазмерных структур InGaAs/GaAs [11, 16].

В работе [26] обсуждаются ограничения на мощности полупроводниковых лазеров различной геометрии, обусловленные нелинейными процессами в световом пучке. Эти процессы могут приводить к нарушению пространственной устойчивости пучка в активной среде и проявляться при интенсивностях, меньших уровня оптического разрушения, ограничивающего функциональные возможности лазера. При высоких мощностях наиболее важна пространственная неустойчивость, обусловленная эффектом самофокусировки пучка, когда показатель преломления растет вместе с ростом локальной интенсивности излучения. GaAs и аналогичные лазерные материалы при прохождении порога ведут себя как самофокусирующие среды. Самофокусировка возмущает волновой фронт, что может вызвать филаментацию пучка (разбиение на нити), его завихрение, динамическую неустойчивость. На практике эти явления, по крайней мере, ухудшают качество пучка, а иногда могут привести к раннему срыву работы лазера, если излучение в результате самофокусировки сконцентрируется до интенсивностей выше уровня оптического разрушения в какой-то области. В ЛД полосковой геометрии некоторые аномалии пучка и выходной мощности усиливаются эффектом самофокусировки (деформация моды, изменение порядка моды, самоподдерживающиеся пульсации). Поскольку вторичные эффекты самофокусировки, подобные филаментации, чувствительны к геометрии активной области, то оптимизация конфигурации может предотвратить нежелательные последствия неустойчивости пучка даже при искажении его волнового фронта. Показано, что порог рассмотренной неустойчивости в лазерах с неволноводным резонатором может быть значительно поднят (до многих ватт).

Теоретически рассмотрен новый тип наноразмерных гетероструктур — квантовые ямы с периодической модуляцией глубины или ширины в одном или двух направлениях. Показано, что такие структуры могут иметь свойства квантоворазмерных структур более низкой размерности — квантовых нитей или квантовых ячеек, что можно рассматривать как альтернативный путь улучшения характеристик лазеров. Основное их преимущество в том, что при этом может использоваться планарная технология [18]. На основе полосковых наноструктур созданы излучающие лазерные линейки, пригодные для накачки твердотельных лазеров [13].

#### ПРИМЕНЕНИЕ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ НАКАЧКИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ

Использование полупроводниковых лазеров для продольной накачки кристаллов обеспечило резкое повышение КПД твердотельных лазеров, высокую стабильность амплитуды и частоты их излучения. Применение различных активных материалов и методов нелинейной оптики позволяет получить от таких лазеров излучение в широком спектральном диапазоне (0,45—3 мкм). Потенциальными кандидатами для резонансной диодной накачки являются активные среды, содержащие редкоземельные ионы (неодим, эрбий, тулий, гольмий и др.) и имеющие полосу поглощения в интервале оптического излучения полупроводникового лазера. Для накачки YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазера, излучающего на длине волны 1,06 мкм, обычно используют полупроводниковые лазеры на основе GaAs и GaAlAs, излучающие в полосе поглощения активной среды твердотельного лазера (0,8 мкм). Мощность этих

полупроводниковых лазеров в непрерывном или импульсном режиме типично достигает 10—100 Вт на 1 см активной длины. Стандартная линия излучения вблизи 0,8 мкм имеет ширину менее 5 нм. Однако максимальную эффективность накачки активной среды  $\text{YAG:Nd}^{3+}$ -лазера удается получать только при использовании относительно маломощных одномодовых полупроводниковых лазеров при температурной настройке частоты генерации последних на максимум линии поглощения  $\text{YAG:Nd}^{3+}$ . При использовании же для накачки мощных полупроводниковых лазеров, а тем более полупроводниковых лазерных решеток, КПД  $\text{YAG:Nd}^{3+}$ -лазера уменьшается из-за расширения спектра излучения, увеличения расходимости излучения и площади излучающей поверхности полупроводникового лазера.

Использование активных сред, обладающих широкими и интенсивными линиями поглощения излучения накачки, значительно облегчает ситуацию. Один из способов решения этой задачи — введение в матрицу активной среды дополнительных примесей, обеспечивающих эффективную передачу энергии активным ионам. Это имеет место, например, при дополнительной активации галлиевых гранатов с неодимом ионами  $\text{Cr}^{3+}$ .

Более эффективным направлением кажется поиск кристаллов, в которых активные ионы ( $\text{Nd}^{3+}$ ) имеют широкие и интенсивные полосы поглощения. С этой точки зрения перспективен ванадат иттрия ( $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$ ) — кристалл, обладающий очень хорошими генерационными характеристиками, однако достижение высокого качества таких кристаллов сопряжено с техническими трудностями.

В работе [31] получены новые лазерные кристаллы гадолиниевого ванадата с неодимом  $\text{GdVO}_4:\text{Nd}$ , характеризующиеся высокой технологичностью, интенсивным поглощением, достигающим  $74 \text{ см}^{-1}$  в области 0,8 мкм, и высокими сечениями перехода в области 1,06 и 1,34 мкм. Получена генерация на переходах  ${}^4\text{F}_{3/2} - {}^4\text{I}_{11/2}$ ,  ${}^4\text{I}_{13/2}$  ионов неодима; при селективном возбуждении дифференциальный КПД в области 1,06 мкм составил 54 %. Эти данные свидетельствуют о перспективности данного материала для создания лазеров с диодной накачкой, в том числе мини-лазеров.

В работе [32] создан и исследован эффективный лазер на кристалле  $\text{CdVO}_4:\text{Nd}^{3+}$  с диодной накачкой. Источником накачки служил серийный полупроводниковый лазер ИЛПН-112А, излучение которого фокусировалось на поверхность активного элемента размерами 2,5x5x5 мм. Лазер ИЛПН-112А работал в многомодовом режиме, ширина линии его излучения составляла около 3 нм, расходимость по двум ортогональным направлениям составляла 36 и 15°, температурный сдвиг максимума линии излучения  $\Delta\lambda/\Delta T = 0,3 \text{ нм/К}$ , мощность излучения 250 мВт. Фокусирующая система обеспечивала подведение к активному элементу до 90 % падающей мощности. Измеренная длина генерации  $\text{GdVO}_4:\text{Nd}^{3+}$  оказалась равной 1062,9 нм. Новый лазерный материал продемонстрировал очень хорошие генерационные качества, обусловленные большим взаимодействием как с излучением накачки, так и с генерируемым излучением. Это позволило получить высокий (до 54 %) КПД при использовании излучения многомодового полупроводникового лазера сравнительно невысокого качества. Кроме того, малая длина поглощения излучения накачки облегчает достижение одночастотной генерации, что позволяет использовать данный лазер для высокостабильной внутрирезонаторной ГВГ. Высокий коэффициент усиления при умеренных накачках ( $\kappa \sim 20\%$ ) и широкая полоса усиления открывают возможность для эффективной синхронизации мод такого лазера.

В работе [33] был предложен импульсный твердотельный лазер с активными элементами из ГСГГ: $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$  с оптической накачкой решетками лазерных диодов (РЛД). Решетки имели поперечные размеры 2x3 мм и содержали 180 ЛД с двойной гетероструктурой GaAlAs. Размеры излучающей площадки каждого диода составляли 1x270 мкм. Расходимость излучения по двум ортогональным направле-

ниям была 35 и 17°. Одна решетка обеспечивала в импульсе 2 мДж при длительности импульса до 80 нс (25 Вт в импульсе). Конструкция теплоотвода позволяла получать максимальную среднюю мощность при частоте повторения импульсов около 20 Гц. Для накачки твердотельного лазера использовались три РЛД, излучавших на длине волны 805 нм. Излучение фокусировалось на активный элемент твердотельного лазера с размером 2x4x50 мм. При длительности импульсов накачки 80 нс выходная энергия излучения твердотельного лазера составляла 0,1 мДж с частотой повторения до 20 Гц. При соответствующем увеличении числа решеток и оптимизации размеров активного элемента на основе разработанной технологии можно получить в импульсе твердотельного лазера излучение с энергией 10 мДж и выше. Конечно, сегодня результаты этой работы выглядят весьма скромно на фоне мировых достижений разработки мощных непрерывных и импульсных твердотельных лазеров с накачкой мощными решетками полупроводниковых ЛД: для неодимовых лазеров (1,06 мкм) достигнуты средние мощности более киловатта при непрерывной накачке и в импульсном режиме получена энергия в импульсе более джоуля при длительности порядка 10 нс и частоте повторения 100 Гц (сотни мегаватт в импульсе и сотни ватт средней мощности).

Во ВНИЦ "ГОИ им. С. И. Вавилова" (С.-Петербург) проводятся работы по совершенствованию твердотельных лазеров с диодной накачкой [34, 35]. Значительное внимание уделяется формированию и доставке лазерного излучения заданного качества (размер пятна, равномерность облучения, форма и длительность импульса и т. д.) к активному элементу. Ведется поиск увеличения КПД и средней мощности твердотельного лазера за счет совершенствования систем накачки, уменьшения тепловыделения, уменьшения поперечных размеров активного элемента, его секционирования и т. п. В работе [36] предложено использовать плоские активные элементы с покрытием из двуокиси кремния для упрощения конструкции лазера со скользящим зигзагообразным ходом лучей за счет снижения требований к окружающим активный элемент охлаждающим средам и элементам накачки.

Преобразование оптической накачки в генерируемое излучение в твердотельных лазерах сопровождается потерями заметной части энергии накачки на тепловыделение в элементах системы. Температурные градиенты в активном элементе и его деформации приводят к неоднородностям в пространственном распределении показателя преломления активного элемента, вызывают увеличение расходимости генерируемого излучения сверх дифракционного предела и ограничивают возможность получения высокоинтенсивных сфокусированных пучков. Существенное улучшение пространственно-энергетических характеристик выходного излучения твердотельного лазера достигается при использовании тонких (дисковых) активных элементов, охлаждаемых со стороны основания. В этом случае термоупругие эффекты в активном элементе не приводят к абберациям волнового фронта, поскольку пересекающие активный элемент резонаторные лучи испытывают одинаковые термоиндуцированные изменения оптического пути. Преимущества дисковых активных элементов особенно заметны при их накачке полупроводниковыми лазерами. Спектр излучения некоторых из разработанных полупроводниковых лазеров практически оптимально согласован со спектром поглощения активаторов твердотельного лазера. При этом тепловыделение в активном элементе определяется в основном стоксовыми потерями и близко к физически минимальному. Кроме того, полупроводниковые лазеры имеют высокие КПД, миниатюрны, что позволяет формировать из них высокоомощные матрицы, и могут работать в импульсном и непрерывных режимах.

В работе [37] предложена схема компактного твердотельного лазера с несферической оптикой и тонким дисковым активным элементом, который со стороны основания накачивается излучением матрицы полупроводниковых лазеров. Резонаторное зеркало, диодная матрица, активный элемент и система охлаждения

объединены в одном устройстве. Показано, что применение в составе лазера гибридного устойчиво-неустойчивого резонатора позволяет уменьшить диффракционное рассеяние сфокусированного лазерного пучка и приводит к увеличению плотности мощности в фокусе. Рассмотренная схема лазера может использоваться при конструировании мощных широкоапертурных лазеров с минимальными массогабаритными характеристиками.

В работе [38] предложены новые типы миниатюрных твердотельных лазеров с активными элементами в виде монокристаллических лент и листов с микронными толщинами с генерирующими ионами лантаноидов и переходных металлов. Первым кристаллом для лазеров этих типов стало слюдоподобное ромбическое соединение  $KY (MoO_4)_2:Nd^{+3}$ , генерирующее при комнатной температуре с ламповой или диодной накачкой (канал  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/12}$ ). Генерирующим тонкослойным элементам этих лазеров можно придавать различные формы, они могут прогибаться, на их широкие поверхности могут наноситься оптически активные и защитные покрытия и т. д. Потенциально пригодны для использования в ленточных и листовых лазерах также кристаллы  $LaNdO_4$ , активированные  $Nd^{3+}$  или  $Ho^{3+}$  и способные генерировать при комнатной температуре в ближнем и среднем ИК-диапазонах спектра.

В работе [39] предложены лазеры на кристаллах  $Gd_3Ga_5O_{12}:Cr$ ,  $Nd$  как альтернативные источники для гольмиевых лазеров (2,09 мкм), применяемых в медицине. На этих кристаллах получена генерация излучения на длине волны 1,4237 нм со средней мощностью 2,4 Вт (в импульсе 2,3 Дж, частота следования 13 Гц) при ламповой накачке. Разработка лазеров с диодной накачкой на этих кристаллах позволит существенно увеличить КПД.

#### ИНЖЕКЦИОННЫЕ ЛАЗЕРЫ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ (ВОЛС)

ИЛ являются самыми перспективными источниками излучения для ВОЛС, так как сочетают в себе свойства генератора несущей частоты и модулятора в широком диапазоне частот.

В основу физических принципов конструирования ИЛ и передающих оптических модулей для ВОЛС заложены следующие требования [40, 41]: непрерывный или квазинепрерывный режим работы при комнатной температуре и выше; высокая квантовая эффективность; низкий пороговый ток; широкая полоса модуляции; линейная зависимость мощности излучения от тока; малая излучающая площадь, позволяющая получить высокий коэффициент связи с волокном; высокая стабильность мощности; высокая яркость; малые шумы; большой ресурс работы.

Наиболее полно отвечают вышеизложенным требованиям лазеры на основе  $InGaAsP/InP$  зарощенной мезаполосковой конструкции с длинами волн 1,3—1,55 мкм. Спектральный диапазон 1,3—1,55 мкм обеспечивает наличие минимума оптического поглощения в кварцевых световодах.

В качестве подложки при изготовлении зарощенного мезаполоскового (ЗМ) лазера используется полупроводник  $InP$ . В работе [42] впервые предложено использовать подложку  $p-InP$  для изготовления ЗМ-лазеров, впоследствии эта технология была внедрена авторами в НИИ "Полус".

Гетероструктуры с отдельным ограничением света и электронов создавались как методом жидкофазной эпитаксии, так и методом МОС-гибридной технологии. При этом толщина активной области уменьшалась до 10 нм и менее, что обеспечивало снижение плотности порогового тока до сотен  $A/cm^2$ . Пороговый ток уменьшается также при сужении ширины мезаполоски.

Другой важной проблемой при изготовлении низкороговых лазеров являлось зарощивание мезаполоска. Успешное зарощивание мезаполоска решает две практические задачи: предотвращает утечки тока и снижает паразитную емкость лазер-

ного диода до 2 пФ. С этой целью наращивание мезаполоска осуществлялось методом МОС-гибридной технологии высокоомным слоем InP, легированным Fe. Ширина мезаполоска составляла 1—2 мкм, длина резонатора 300 мкм. При этом значение порогового тока составляло ~10 мА и менее, а дифференциальная квантовая эффективность — более 40 %. Такая малая величина порогового тока позволяет работать лазерным диодам на основе InGaAsP/InP в непрерывном режиме при комнатной температуре и выше, тем самым выполняются первые три требования из вышеперечисленных.

Уменьшение площади свечения  $W \times d$ , где  $W$  — ширина мезаполоска, а  $d$  — толщина активной области, позволяет улучшить коэффициент связи с волокном. Такие лазеры имеют линейную характеристику выше порога.

Зарощенные гетероструктуры обеспечивают волноводное усиление лазерного излучения и улучшение стабильности боковых мод. Лазеры с зарощенной гетероструктурой позволяют получить генерацию в одной моде, обладают лучшей временной стабильностью и обеспечивают частоту модуляции 20 ГГц и более.

Угловая расходимость излучения лазера зависит от толщины активной области и скачка показателя преломления в гетероструктуре в плоскости, перпендикулярной к р-п-переходу. Обычно диапазон углов, в котором интенсивность превышает половину максимальной величины, составляет  $40^\circ$  в плоскости, параллельной к р-п-переходу, угол расходимости  $10$ — $20^\circ$  и зависит от ширины мезаполоска и скачка показателя преломления в плоскости р-п-перехода.

Основное воздействие на спектральные характеристики лазера оказывает число возбужденных продольных мод. При узкой полоске в лазерах с волноводным усилением (зарощенная меза) обычно возбуждается много мод, и ширина спектра составляет 1—10 нм. С ростом тока накачки над порогом число продольных мод меняется: по мере увеличения тока одна или две моды становятся доминирующими над остальными.

Уменьшение резонатора приводит к возрастанию межмодового расстояния, так что только некоторые моды могут попадать в пределы линии усиления. Ширина спектральной линии одной продольной моды составляет порядка  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  нм.

Стабильную в одночастотном режиме генерацию обеспечивают лазеры с распределенной обратной связью (РОС-лазеры).

Вольт-амперные характеристики мезаполосковых лазеров, используемых для ВОЛС, имеют прямое падение напряжения около вольта и дифференциальное сопротивление 5—7 Ом. Обратное пробивное напряжение составляет 5—15 В.

Ватт-амперные характеристики зарощенных мезаполосковых лазеров имеют удовлетворительную линейность при токе выше порога до максимальной мощности в непрерывном режиме ~20 мВт и в импульсном — 100 мВт и более. Стабильность характеристик сохраняется при высоких положительных температурах ( $70^\circ\text{C}$ ).

Особое место при использовании ИЛ в оптической связи занимает надежность приборов. В этой связи вопросу деградации уделяется самое пристальное внимание. Требуемый срок службы составляет 400 тыс. ч и более, поэтому необходимо найти средство для изучения процессов деградации и способов обнаружения ранних стадий ухудшения работы приборов. В результате испытания на срок службы ведутся при высокой окружающей температуре и повышенной плотности тока накачки [43, 44].

Результаты исследований показали, что лазеры на основе InGaAsP/InP более надежны, чем лазеры на основе GaAlAs/GaAs. Это связано с тем, что в длинноволновых лазерах для создания дефектов требуется более высокая энергия активации.

К настоящему моменту довольно большое количество лазеров имеют при натуральных испытаниях ресурс работы 100 тыс. ч и более. Натурные испытания обычно проводятся при комнатной температуре, а ускоренные — при температурах 50, 70, 80 и  $90^\circ\text{C}$ .

Ускоренные и натурные испытания показали, что лазеры, изготовленные на основе InGaAsP/InP, обладают прогнозируемым ресурсом работы  $10^6$  ч.

Вышеизложенные обстоятельства позволяют сделать вывод, что зарощенные мезаполосковые лазеры отвечают практически всем основным требованиям, предъявляемым к лазерам при их использовании в световодных системах связи.

В настоящее время промышленностью разработан комплекс излучателей и передающих оптических модулей на длины волн 1,3 и 1,5 мкм для оптической связи. Конструктивно передающие оптические модули содержат лазерный диод, фотодиод обратной связи, терморезистор, микроохладитель, отрезок одномодового волокна с унифицированным оптическим разъемом и оптический изолятор.

На длину волны 1,3 мкм выпускаются излучатели и передающие оптические модули следующих типов: ИЛПН-202, ИЛПН-206, ИЛПН-216, ПОМ-6, ПОМ-14, ПОМ-15 и др.

На длину волны 1,55 мкм освоены и выпускаются передающие оптические модули ПОМ-8, ПОМ-12, ПОМ-13, ПОМ-14В, ПОМ-15В и др.

#### Техническая характеристика лазерных модулей

Длина волны, мкм .....	1,3—1,55
Спектральная ширина (РОС), Å .....	0,1
Спектральная ширина (Фабри-Перо), Å .....	50
Ток, мА:	
пороговый .....	10—30
рабочий .....	40—90
Оптическая мощность на выходе одномодового ВОК, мВт .....	1,5—2
Фототок обратной связи, мкА .....	80
Ток термоохладителя, А .....	0,3
Скорость передачи информации, Гбит/с, не более .....	2,4
RIN, дБ/Гц .....	140
Оптическая изоляция отраженного сигнала, дБ .....	30
Рабочая температура, °С .....	—40 ÷ +60
Ресурс работы, тыс. ч .....	100

Перечень выпускаемых промышленностью полупроводниковых излучателей, оптических усилителей и передающих модулей для ВОЛС публикуется, например, в работе [45].

Таким образом, в России созданы ИЛ и передающие оптические модули на их основе для ВОЛС, работающие в диапазоне длин волн 1,3—1,55 мкм. Лазеры такого типа обладают характеристиками, приемлемыми для массового эффективного применения в системах передачи информации по волоконным световодам в широком диапазоне скорости передачи информации. Дальнейшие работы по созданию лазеров этого класса направлены на стабилизацию модового состава, сужение спектральной линии излучения и повышение ресурса работы [46, 47].

В работе [48] разработаны узкополосные лазеры на основе волокна, легированного  $Nd^{3+}$ , для диапазона длин волн 1,05—1,13 мкм. Накачка осуществлялась диодным лазером на длине волны 0,81 мкм с максимальной мощностью до 650 мВт. Применение узкополосных отражателей на основе интерферометров Маха-Цендера дало возможность создать перестраиваемый по длине волны волоконный лазер с высоким КПД (10 %) и малой шириной линии излучения (порядка 1 нм) при выходной мощности 70 мВт. Применение волоконных брэгговских отражателей позволило достичь дальнейшего сужения линии генерации до 100 МГц с выходной мощностью 15 мВт. Возможна перестройка длины отражения брэгговского зеркала в значительных пределах (до 20 нм) в результате изменения эффективного показателя

теля преломления гофрированного волновода, что существенно расширяет функциональные возможности волоконных лазеров с брэгговскими отражателями.

Продолжалась разработка  $C^3$ -лазеров (диодные лазеры с двумя связанными плоскими резонаторами [40]) для применения в многоуровневых системах оптической связи с частотной модуляцией, аналоговых преобразователях, устройствах логики и коммутации оптических каналов [49, 50]. Переход в последние годы к излучателям с тонкими квантоворазмерными структурами позволил значительно улучшить спектральные характеристики  $C^3$ -лазера и обеспечить дополнительные средства для управления параметрами излучения. В работе [51] создан одномодовый РО ДГС  $C^3$ -лазер большой мощности, излучающий в диапазоне 0,8 мкм с шириной линии менее 70 МГц при подавлении боковых мод 20 дБ.

Для систем дальней волоконно-оптической связи и систем ВОЛС с большим числом каналов разрабатываются мощные полупроводниковые лазеры диапазона 1,3 мкм с прямой амплитудной модуляцией излучения по току инжекции. В работе [52] представлены зарощенные мезополосковые РОС ДГС-лазеры на основе гетероструктур (InGa)AsP/InP со сверхтонкими активными слоями (12—25 нм), излучающие на длине волны 1,3 мкм. Пороговая плотность тока составляла 0,5—3,0 кА/см<sup>2</sup> в зависимости от ширины активного канала  $d$  (3—100 мкм). Максимальная непрерывная выходная мощность достигала 0,1 Вт при максимальной ширине активного канала (100 мкм). Показано, что наиболее эффективно аналоговая амплитудная модуляция в полосе частот более 1 ГГц реализуется у лазеров с узким активным каналом ( $d = 4$  мкм), работающих в пространственно-одномодовом режиме.

#### ДИОДНЫЕ ЛАЗЕРЫ 780–850-НМ-ДИАПАЗОНА

Область длин волн 780 нм, перекрываемая наиболее распространенными сейчас полупроводниковыми гетеролазерами GaAlAs/GaAs, является, по-видимому, наиболее удобной для широкого использования лазерных диодов в устройствах записи и считывания информации, принтерах, различных датчиках и других областях техники. Для создания лазерных диодов повышенной мощности в этом спектральном диапазоне применяются различные методы защиты торцевых граней активного кристалла: разгрузка лазерных диодов за счет рупорного сужения активного слоя перед выходом на торцевую грань (происходит локальное расширение оптического луча и интенсивность на торце уменьшается), создание на торцах прозрачных "окон" с помощью диффузионной техники (например, широкозонных окон из эпитаксиально наращенного селенида цинка ZnSe) и др.

Проведенные в работе [53] теоретические и экспериментальные исследования показали, что полосковые гетероструктуры с направляющим утолщением (RW типа), изготовленные методом МOCVD с вакуумным осаждением ZnSe (на этапе наращивания мезополоски и нанесения защитных торцевых покрытий), позволяют осуществить достаточно управляемое и заранее рассчитанное формирование пространственного излучения, например, получение гладкого одномодового профиля пучка при мощности 80 мВт. При таких параметрах пучка лазерные диоды оказываются наиболее подходящими источниками для сверхбыстрых систем записи и считывания информации и других практических применений. За счет нанесения ZnSe-окон на торцевые грани повышена их оптическая прочность, а максимальная мощность излучения в непрерывном режиме доведена до 150 мВт, одномодовый режим получен при мощностях до 40 мВт. Доказано, что боковое наращивание селенидом цинка позволяет получить необходимое боковое оптическое ограничение и управлять характеристиками профиля лазерной моды, например, снижать эллиптичность пучка при оптимальной ширине полоски.

В работе [54] созданы GaAlAs/GaAs-лазеры с плоским резонатором, генерирующие на длине волны 780—850 нм с мощностью до 20 мВт в одночастотном режиме. Лазеры имеют минимальную ширину линии генерации 35 МГц и подавление боковых мод более 20 дБ. Возможные области применения: когерентные ВОЛС, датчики, накачка квантовых стандартов частоты.

В работе [55] на основе полупроводникового ДГС AlGaAs/GaAs-лазера с неоднородной накачкой созданы многофункциональные излучатели и модули с выводом излучения через одномодовый волновод, которые могут работать в режиме суперлюминесцентного диода, одночастотного ЛД, бистабильного лазера и лазера с модулированной добротностью. Изменение режима работы осуществляется путем изменения схемы включения излучателя.

Области применения: системы оптической записи и считывания информации с компакт-дисков, датчики, накачка волоконных усилителей, легированных Nd.

На протяжении последних 10 лет достаточно много сил было потрачено на получение мощного остронаправленного излучения на основе полупроводниковых лазеров с помощью многоэлементных фазированных лазерных излучателей (МФЛИ) [56, 57]. МФЛИ представляет собой ряд усилительно-фазовращательных каналов, синхронно возбуждаемых одним генератором и формирующих диаграмму направленности посредством изменения фаз и амплитуд излучения в каждом канале. Были разработаны диодные решетки, работающие в устойчивом синфазном режиме генерации при 10-кратном превышении порога, с узкой диаграммой направленности (шириной в несколько градусов) и мощностью одномодового излучения несколько сот милливатт. Однако добиться стабильной однолепестковой диаграммы направленности с расходимостью, близкой к диффракционному пределу при больших мощностях в МФЛИ, не удалось. В последние годы также интенсивно разрабатываются мощные квантоворазмерные AlGaAs/GaAs-лазеры с широким контактом, генерирующие излучения с высокой степенью пространственной когерентности, имеющие однолепестковую диаграмму направленности с расходимостью, близкой к диффракционному пределу [58], а также создаваемые на их основе линейки и решетки [13, 19]. Такие системы обладают более низкими пороговыми токами и высокой дифференциальной квантовой эффективностью.

В работе [59] разработана технология селекции и перестройки частоты излучения в пределах линии усиления в полупроводниковом лазере с внешним резонатором.

В работах [60, 61] исследовано влияние астигматического расстояния ЛД на уровень оптической обратной связи с внешним неселективным резонатором. Показана возможность 100%-го согласования для внешнего резонатора с параллельным пучком.

#### **МОЩНЫЕ ЗАРОЩЕННЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ InGaAsP/GaAs**

Одномодовые InGaAsP-лазеры отдельного ограничения широко используются как источники излучения в диапазонах длин волн 0,75 и 1,1—1,65 мкм. В работах [62—67] показана возможность создания мощных мезаполосковых зарощенных РО ДГС-лазеров на InGaAsP/GaAs с длиной волны 0,77—0,82 мкм и рассмотрены технологические аспекты этой проблемы. Лазеры этого типа имеют значительно меньший перегрев зеркал по сравнению с аналогичными лазерами на AlGaAs/GaAs, что позволяет увеличить время жизни приборов. Для зарощенного лазера с узким вскрытием контакта в слое SiO<sub>2</sub> над мезаполосковым при сохранении ширины мезы порядка 10 мкм была получена значительная разница в плотностях инжекционного тока под контактом и на краю активной области в случае, когда эффективные длины растекания и диффузии были меньше или сравнимы с разностью ширин актив-

ной области и контакта. Это компенсировало пространственное выедание носителей полем нулевой моды в середине полоска. При разности ширин в 4—6 мкм достигалось значительное улучшение модового состава излучения. Сужение контакта приводило к уменьшению порогового тока примерно на 10 % по сравнению с лазером той же геометрии с полным вскрытием (сужение контакта уменьшает концентрацию не дающих вклада в усиление носителей на краях активной области).

На основе вышеизложенного предложена и создана новая конструкция одномодовых лазеров с узким контактом, позволяющая получать до 200 мВт в непрерывном одномодовом режиме генерации (при токе 240 мА) и 1,8 Вт в импульсном режиме [64]. Однако ухудшение теплового режима в лазерах такого типа послужило причиной поиска альтернативной конструкции, позволяющей сохранить одномодовый режим генерации и высокую оптическую мощность за счет увеличения ширины мезы. Такой альтернативный подход был сделан в работе [68], в которой впервые с целью увеличения мощности одномодового оптического излучения изготовлены и исследованы РО ДГС лазеры на основе InGaAsP/GaAs и InGaAsP/InP с тонким волноводом на длины волн 0,8 и 1,3 мкм. В работе использовались планарные гетероструктуры с раздельным оптическим и электронным ограничением и одиночной квантовой ямой, выращенные модифицированным методом жидкофазной эпитаксии на подложках InP и GaAs. Толщина активной области составляла 200 Å для лазеров с длиной волны 0,8 мкм и 300 Å — для лазеров с 1,3 мкм. Уменьшение толщины волноводов лазерных гетероструктур достигалось путем сокращения времени контакта подложки с ростовыми расплавами, из которых выращивались волноводные слои.

Коэффициент оптического ограничения в прямоугольном диэлектрическом волноводе определяется эффективным показателем преломления, зависящим от толщины активной области и волновода, ширины мезы, показателей преломления активной области, волноводных слоев, зарощенных областей и эмиттеров. Изменение показателей преломления волноводных и эмиттерных слоев связано с технологическими трудностями, возникающими при подборе составов выращиваемых эпитаксиальных слоев. Увеличение показателя преломления блокирующих слоев может привести к ухудшению их блокирующих свойств. Наиболее удобным способом для изменения эффективного показателя преломления, допускающим увеличение ширины мезы, является изменение толщины волновода. Были проведены расчеты зависимости ширины мезы, при которой достигается отсечка первой поперечной моды, от толщины волновода для экспериментальных структур с фиксированной толщиной активной области. На основании расчетов выбрана толщина волновода 0,15—0,2 мкм, которая приводила к двукратному возрастанию пороговой плотности тока.

Лазеры вышеописанной конструкции сохраняли непрерывный одномодовый режим генерации до мощностей 260 мВт (длина волны 0,8 мкм) и 250 мВт (1,3 мкм) при ширинах мез 9 и 4,5 мкм соответственно. Эти значения мощности являются на сегодняшний день рекордными для лазеров на основе твердых растворов InGaAsP. Пороговые плотности тока были 0,7 и 1,2 кА/см<sup>2</sup>, примерно вдвое больше оптимальной пороговой плотности в лазерах с расширенным волноводом.

В работе [69] созданы лазеры на квантоворазмерных гетероструктурах In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs/AlGaAs, выращенных методом МОС-гибридной технологии. Получено излучение в диапазоне длин волн 0,95—1,016 мкм в широком диапазоне составов (0,1 < x < 0,4) и толщин активной области (4—25 нм). Получена непрерывная одномодовая генерация до мощностей 100 мВт, а предельная мощность составила 4 Вт.

#### МОЩНЫЕ ОДНОМODOVЫЕ InGaAsP/GaAs ЛАЗЕРЫ ДИАПАЗОНА 0,9—1,1 мкм

Мощные одномодовые диодные лазеры, излучающие в диапазоне 0,9—1,1 мкм, очень перспективны для накачки твердотельных лазеров и волноводных усилите-

лей на основе редкоземельных ионов (оптические усилители, легированные эрбием, имеют полосу поглощения на длине волны 0,98 мкм). Такие лазеры создаются на основе напряженных структур с квантовыми ямами InGaAs/(Al)GaAs и требуют относительно большого содержания InAs в активной области или большой ширины квантовой ямы.

Авторы работы [70] создали лазер с длиной волны 0,98 мкм мезаполосковой конструкции на основе вышеуказанных гетероструктур, используя метод химического травления. В работе [71] сообщается о разработке мощных одномодовых лазеров мезаполосковой конструкции, изготовленных на основе гетероструктур, выращенных методом MOCVD, используя метод реактивного ионного травления [72]. Активная область InGaAs толщиной 8 нм находилась между слоями GaAs толщиной 10 нм, которые располагались в середине волноводного слоя  $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$  толщиной 300 нм. Толщина р- и п-эмиттеров  $Al_{0,6}Ga_{0,4}As$  составляла 1500 нм каждый. Лазеры с широким полосковым контактом, изготовленные из таких структур, имели пороговые токи около 100 А/см<sup>2</sup>. Мезы с необходимой шириной полоска и глубиной травления для реализации одномодового режима формировались методом реактивного ионного травления. В качестве электрической изоляции служил слой пиролитически осажденного SiO<sub>2</sub>. При ширине мезы 6 мкм и толщине волновода 0,27 мкм была получена высокая мощность излучения в одномодовом режиме генерации, причем дальнее поле излучения было однолепестковым во всем диапазоне токов накачки. Типичные пороговые токи лазеров составляли 6—10 мА при длине резонатора 500 мкм. Одномодовый режим генерации наблюдался до 120 мВт, при мощности 200 мВт доля нулевой моды составляла не менее 70 % при длине волны генерации 980 нм.

В работе [73] сообщается о разработке технологии выращивания вышеуказанных гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

В работе [74] были исследованы спектральные характеристики мощных одномодовых InGaAs/GaAs лазеров мезаполосковой структуры RIDGE с длиной волны 0,98 мкм, изготовленных на основе гетероструктур, выращенных методами MOCVD и ЖФЭ. Было обнаружено, что при токах накачки выше нескольких пороговых значений (более 3—5 раз) у большинства лазеров наблюдался эффект скачкообразного уширения спектра, т. е. переход одночастотного спектра в квазисплошной широкий спектр. По-видимому, данное явление связано с разогревом активной области при больших токах.

Созданию и исследованию лазеров с длиной волны 0,98 мкм на основе гетероструктур InGaP/GaAs/InGaAs, выращенных методом MOC-гибридной эпитаксии при атмосферном давлении, посвящена работа [75]. Гетероструктуры имели активный слой InGaAs толщиной 0,01 мкм. ЛД с шириной активной области 100 мкм изготавливались путем химического травления контактного слоя вне активной полоски с последующей протонной имплантацией вскрытой поверхности InGaAs. Аналогично изготавливались лазерные линейки, содержащие пять активных полосок шириной 100 мкм, располагавшихся с периодом 400 мкм. ЛД с шириной активной области менее 10 нм имели гребенчатый волновод (RW типа), созданный с помощью химического травления мез до стоп-слоя, нанесения изолирующего SiO<sub>2</sub>-слоя толщиной 0,2 мкм и вскрытия полоски для омического контакта. После раскалывания чипы напаивались на медные теплоотводы структурой вниз. Лазеры не имели просветляющего и отражающего покрытий.

Лазеры с гребенчатым волноводом с узкой полоской 5 мкм имели пороговый ток 25—35 мА и внешнюю дифференциальную квантовую эффективность 20—22 % при длине резонатора 750 мкм. Одномодовая генерация осуществлялась до мощности 25 мВт с одной сколотой грани, причем ширина линии излучения на полуспаде интенсивности составляла менее 0,4 нм. При увеличении выходной мощности до 30 мВт в спектре появлялись дополнительные поперечные моды.

В лазерах с шириной активной полоски 100 мкм получена мощность излучения до 750 мВт с одной сколотой грани и внешняя дифференциальная квантовая эффективность — 42 %. Лазерные линейки, состоящие из пяти таких излучающих полосок, имеют мощность до 2 Вт в непрерывном режиме. Сборка линеек, содержащая 60 излучателей, имела разброс по длинам волн излучения в пределах 5 нм и мощность излучения 18 Вт при токе 60 А в квазинепрерывном режиме (импульсы тока длительностью 100 мкс с частотой 200 Гц). Линейки и сборки линеек пригодны для использования в качестве источников накачки твердотельных лазеров.

#### **ДЛИННОВОЛНОВЫЕ ПОЛОСКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ $\text{InAsSb}$ , ИЗЛУЧАЮЩИЕ В ДИАПАЗОНЕ 3,0–3,9 мкм**

Для газового анализа и лазерной спектроскопии необходимы одномодовые перестраиваемые лазеры, генерирующие в диапазоне расположения линий поглощения многих газов 3,0—3,9 мкм узкую спектральную линию. Освоение данного спектрального диапазона необходимо для решения многих фундаментальных и прикладных задач, таких как молекулярная спектроскопия высокого разрешения, химический анализ, контроль загрязнений окружающей среды и т. п. Кроме этого, излучение таких лазеров перспективно использовать в качестве когерентной частотно-управляемой затравки мощных твердотельных лазерных источников. В Физико-техническом институте (С.-Петербург) для вышеуказанного диапазона были впервые разработаны одномодовые ДГС-лазеры на основе  $\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$  [76, 77]. Лазерные структуры изготавливались методом жидкофазной эпитаксии на подложке  $\text{InAs}$ , имели мезаполосковую конструкцию с шириной полоска 10—60 мкм и длиной резонатора 75—2000 мкм. Генерация только продольной пространственной моды происходила при ширине мезаполоска менее 13 мкм. При токах, превышающих пороговый в 1,5—2 раза, в спектре преобладала одна мода шириной около 10 МГц, которая перестраивалась в процессе импульса. Диапазон перестройки при длинах резонатора 200—300 мкм достигал 5—10 Å. Появление поперечных мод с увеличением ширины полоска и образование предела для порогового тока при уменьшении ширины полоска объясняются наличием существенной поверхностной рекомбинации в широкозонном ограничивающем р-слое  $\text{InAsSbP}$ . Достаточно длинные резонаторы обладают коллимирующим эффектом, уменьшающим расходимость излучения в плоскости р-п-перехода и плоскости, перпендикулярной плоскости р-п-перехода.

Созданные лазеры использованы в составе автоматизированного лазерного спектрометра и с их помощью были зарегистрированы спектры пропускания метана и этилена в районе 3,24 мкм, которые позволили определить спектральные характеристики источника излучения.

Типичные режимы работы лазеров: рабочие температуры 80—120 К, ток накачки 0,5—2,5 А, частота повторения импульсов 100 Гц, длительность импульсов 10—500 мкс. Область перестройки моды генерации составляла 0,25—0,6  $\text{см}^{-1}$ , что достаточно для регистрации групп линий поглощения таких легких молекул, как метан и этилен. Полученные спектры поглощения молекул метана и этилена позволили определить свойства лазеров данного типа (даже более общего вида — ДГС-лазеров на основе узкозонных соединений  $\text{A}^3\text{B}^5$ ): диапазон плавной перестройки частоты, скорость перестройки, спектральное разрешение, отношение сигнал — шум, и наметить пути совершенствования технологии их изготовления.

ЛАЗЕРЫ И СВЕТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ  $\text{InAsSbP}$  ДЛЯ ДИАПАЗОНА 2,6–3,0 мкм

Спектральный диапазон 2,6–3,0 мкм перспективен для целей влагометрии и газового анализа, поскольку в нем находятся линии поглощения  $\text{H}_2\text{O}$  в области 2,75–2,85 мкм и линии поглощения некоторых важных газов, например  $\text{CO}_2$  — 2,64–2,87 мкм и  $\text{H}_2\text{S}$  — 2,63 мкм.

Гетеролазеры на основе полупроводников  $\text{A}^3\text{B}^5$  работают в широком спектральном диапазоне — от 0,5 до 3,9 мкм. Однако в этом диапазоне имелся сравнительно узкий спектральный участок 2,5–3,0 мкм, где когерентное излучение долгое время не удавалось получить.

Попытки проникнуть в этот узкий спектральный диапазон как с коротковолновой, так и с длинноволновой стороны долгое время не имели успеха.

Когерентное излучение, соответствующее коротковолновой границе этого диапазона (2,50 мкм), было получено в гетероструктурах на основе  $\text{GaInAsSb/AlGaAsSb}$ , изготовленных методом жидкофазной эпитаксии. Более длинноволнового излучения от этой структуры не удавалось достичь из-за приближения к границе несмешивания твердых растворов  $\text{GaSb-InAs}$  [78]. В гетероструктурах на основе  $\text{InGaAs/InAsSbP}$  была получена верхняя граница когерентного излучения по длине волны 2,52 мкм. Такие структуры выращивались методом газофазной эпитаксии по подложке  $\text{InP}$  и имели рассогласование в параметрах решетки около 2%. Продвижение в более длинноволновую область в этих структурах успеха не имело, вероятно, из-за возрастания рассогласования параметров решеток структуры и подложки.

Попытки получить когерентное излучение в диапазоне 2,5–3,0 мкм, продвигаясь со стороны длинных волн, также длительное время не приносили успеха.

В гетеролазерах на основе твердых растворов  $\text{InAsSbP/InGaAs}$ , получаемых методом жидкофазной эпитаксии, была достигнута длинноволновая генерация (длина волны 3 мкм) с очень низкой пороговой плотностью тока 100–300  $\text{A}/\text{cm}^2$  при азотных температурах [76, 78, 105]. Несколько более длинноволновая генерация (3,2 мкм) достигнута в гетеролазерах на основе твердых растворов  $\text{InAsSbP/InAsSb}$  [79].

Первый успех в продвижении в коротковолновую область с длинноволновой стороны (3 мкм) был достигнут в работе [80], где было предложено использовать в активной и широкозонных областях лазерной структуры один и тот же изопериодный с подложкой  $\text{InAs}$  твердый раствор  $\text{InAsSbP}$ , но разного состава. На основе этих растворов была достигнута более коротковолновая генерация (2,55–2,7 мкм), однако небольшое содержание фосфора в ограничительных областях (широкозонные эмиттерные слои) не смогло обеспечить удовлетворительного оптического и электрического ограничения, в результате в этих лазерных структурах наблюдались большие пороговые токи и их резкая зависимость от температуры.

Авторы работы [81] впервые создали низкопороговые ИЛ в диапазоне 2,7–3,0 мкм с высоким содержанием фосфора в ограничительных областях на основе  $\text{InAsSbP}$ , работающие при азотных температурах. На основе этих же структур были разработаны светодиоды, излучающие в области 2,6–3,0 мкм при комнатной температуре [82].

Лазеры, сконструированные в работе [81], представляли собой двойную гетероструктуру с активным слоем  $p$ -типа, расположенную между ограничительными слоями  $p$ - и  $r$ -типа. Толщина активной области 0,5 мкм, толщина обеих широкозонных — порядка 3 мкм. Был получен твердый раствор  $\text{InAsSbP}_x/\text{InAs}$  с максимальным содержанием фосфора  $x = 0,35$  при температуре эпитаксии 570 °C. На его основе изготавливались широкозонные слои лазеров, излучавших в диапазоне 2,7–3,0 мкм. В узкозонной области  $x$  варьировалось в пределах 0,02–0,10. Затем из ла-

зерной эпитаксиальной структуры методом фотолитографии изготавливались мезаполосковые лазеры с шириной полоска 20—40 мкм и длиной резонатора 250—500 мкм. Детальное исследование спектральных характеристик излучения таких лазеров подтвердило их перспективность для использования в спектроскопии высокого разрешения.

#### **ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ЛАЗЕРЫ И СВЕТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ GaInAsSb ДЛЯ ДИАПАЗОНА 1,8–2,5 мкм**

В диапазоне 1,8—2,5 мкм расположены молекулярные спектры многих экологически грязных веществ, поэтому создание перестраиваемых лазеров и светодиодов весьма актуально для высокоточного аналитического детектирования атмосферных загрязнений. В работах [83—89] созданы и исследованы инфракрасные диодные лазеры для перестраиваемой спектроскопии на основе GaInAsSb гетероструктур с разделным оптическим и электронным ограничением и различной толщиной активной области, излучающие в обсуждаемом частотном диапазоне в интервале температур 77—300 К.

Типичные лазерные структуры создавались методом жидкофазной эпитаксии на подложках n-GaSb, легированных Te. Имели узкозонный слой n-GaInAsSb, волноводные ограничительные слои GaAlAsSb толщиной по 2 мкм n-типа и p-типа и один—два слоя GaSb толщиной порядка 1 мкм каждый, прилегающие к узкозонному слою. Толщина активного слоя варьировалась в интервале 0,3—2 мкм. Методами стандартной фотолитографии изготавливались лазерные диоды глубокой мезаполосковой конструкции. Ширина полоска 30 мкм, длина резонатора 200—400 мкм.

В лазерах с тонким узкозонным слоем (менее 0,54 мкм) с большей вероятностью достигался одномодовый режим и их пороговый ток слабее зависел от температуры, чем у лазеров с толстым слоем.

В работе [90] сообщается о разработке перестраиваемого светодиода, излучающего в среднем ИК-диапазоне, на основе одиночной гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb. Получена токовая перестройка положения максимума электролюминесценции в спектральном диапазоне 2,1—2,6 мкм при комнатной температуре и 1,9—2,4 мкм — при азотной. Перестройка достигалась за счет смещения квазиуровней Ферми носителей, локализованных в области смещенного p-p-гетероперехода с большими разрывами зон проводимости и валентности.

#### **ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ СВЕРХМОЩНЫХ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ (УКИ) СВЕТА**

Генераторы пикосекундных световых импульсов на основе полупроводниковых лазеров, модулируемых импульсами тока, разрабатываются для применения в измерительных системах с высоким временным и пространственным разрешением. Минимальные длительности выходных оптических импульсов (порядка пикосекунды) удается получить при использовании гетеролазеров с нелинейным насыщающимся поглотителем, у которых релаксационные колебания в переходном процессе выражены значительно ярче, чем у гетеролазеров с однородной инжекцией. Для лазеров полосковой геометрии с шириной активного канала в несколько микрон пиковые импульсные мощности достигают нескольких ватт у гетероструктур на основе (GaAl)As, излучающих на длинах волн 0,8—0,9 мкм, и сотен милливатт у гетероструктур на основе (InGa)PAs, излучающих на 1,3 мкм. При этом плотность выходной мощности может превзойти  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>, что превышает порог катастрофической деградации в стационарном или квазистационарном (длительность импульсов более 100 мс) режиме, а энергия отдельных световых импульсов составляет соответственно десятки или единицы пикоджоулей и даже более.

Высокое пространственное разрешение, обеспечиваемое пикосекундными сигналами, необходимо для ряда задач метрологии волоконно-оптических систем передачи информации (например, для зондирования световодных каналов по обратному оптическому рассеянию) с целью повышения чувствительности и надежности таких систем и увеличения дальности зондирования, а также для других приложений.

В работах [91—94] разработаны конструкции полупроводниковых AlGaAs/GaAs-лазеров с плоским резонатором и пассивной модуляцией добротности для генерации мощных УКИ света с плотностью мощности внутри резонатора до  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Впервые экспериментально наблюдались когерентные оптические переходные процессы и СВЧ-осцилляции (1,1 ГГц) в полупроводниковом лазере, а также динамическое спектральное расщепление, индуцированное генерируемым самим лазером оптическим полем, и появление двухкомпонентного спектра излучения генерируемых импульсов.

В работе [95] получена и исследована генерация субнаносекундных мощных оптических импульсов при прямой токовой модуляции РО ДГС лазеров на основе (GaAl)As и (InGa)PAs. Впервые измерена зависимость мощности излучения гетеролазеров от тока инжекции вплоть до 1000-кратного превышения порога в условиях пренебрежимо малого разогрева кристаллической решетки. Созданные лазеры на длине волны 1,3 мкм могут быть использованы в волоконных системах контроля обратного оптического рассеяния. Генераторы с широкой излучающей областью (на длину волны 0,85 мкм) перспективны для открытых систем лазерной локации, управления быстродействующими оптоэлектронными переключателями и других применений.

В работе [96] обсуждаются особенности и преимущества использования РОС-лазеров с брэгговским отражением от плоскостей кристаллической решетки для генерации ИКИ в оптическом и ИК-диапазонах.

#### НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В НИИ "Волга" (г. Саратов) разработаны одномодовые диодные лазеры для записи и считывания информации с оптических дисков [97], работающие в диапазоне длин волн 0,76—0,83 мкм с мощностью до 30 мВт, имеющие стабильное пространственное распределение излучения в дальней зоне, малую астигматическую разность и низкий уровень шумов. Излучатели изготовлялись на основе жидкофазных GaAlAs-ДГС двух типов: с диффузионным полосковым контактом и зарощенного типа. Величина астигматизма не превышала 2—3 мкм. Увеличение мощности излучения достигалось путем подбора уровня отражения зеркальных граней лазерного кристалла. Использование подслоя оксида европия при напылении диэлектрических покрытий на зеркала позволило изменять уровень отражения в пределах 0—20 % для просветляющих покрытий и 40—98 % — для отражающих. Излучатели изготовлены в корпусах, соответствующих мировому стандарту.

На основе перестраиваемых полупроводниковых лазеров разработан ряд оптико-электронных устройств [98] для открытой оптической связи и дальнометрии. В этих устройствах реализован оригинальный способ управления излучением полупроводникового лазера. Применение непрерывных полупроводниковых лазерных излучателей в режиме импульсной модуляции при постоянном смещении выше порога с последующей спектральной селекцией позволяет получить последовательно оптических импульсов, каждая из которых строго синхронизирована друг с другом, имеет максимальный контраст и может быть использована для решения различных задач. На этой базе, используя выпускаемые промышленностью изделия типа 32ДЛ-105, 32ДЛ-106, ИЛПН-102, ИЛПН-108, ИЛПН-112, разработана

простая и надежная система оптической связи, двухканальные импульсный и рециркуляционный дальномеры с высокой точностью измерения, предложен способ получения пикосекундных импульсов, а также создан полупроводниковый лазерный излучатель с программируемыми спектральными характеристиками для различных приложений лазерной диодной спектроскопии высокого разрешения.

Авторы работы [99] разработали лидары для измерения скорости объекта на базе выпускаемых промышленностью ИЛ на длине волны 0,8 мкм. Регистрируются скорости в диапазоне 0,1—10 м/с. Уровень отношения сигнал — шум на частоте сдвига составляет 30—40 дБ для сосредоточенных моделей объекта и 5—15 дБ — для аэрозольных потоков. Прибор дает возможность производить бесконтактное измерение поля скоростей при удалении объекта, превышающем несколько метров.

В работе [100] разработаны бесконтактные лазерные высокоточные измерители геометрических размеров объектов на базе полупроводниковых промышленных излучателей, например, типа ИЛПН-108.

Широкое применение находят ИЛ в волоконно-оптических датчиках для измерения и контроля различных физических параметров [101].

#### НОМЕНКЛАТУРА СЕРИЙНО ВЫПУСКАЕМЫХ ПРОМЫШЛЕННОСТЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ

Научно-технический центр "Микролазер" (НИИ "Полус", Москва) и завод "Полус" выпускают полупроводниковые лазеры непрерывного и импульсного режимов генерации, приемно-передающие модули ВОЛС, фотодиоды для применения в областях: проигрыватели на компакт-дисках и оптическая память, лазерные принтеры, оптическая связь, накачка твердотельных лазеров, оптические датчики измерительной аппаратуры. Характеристики излучателей приведены в табл. 3 и 4 [7].

Таблица 3

Полупроводниковые лазеры непрерывного режима работы (НИИ "Полус")

Модель	Длина волны, нм	Выходная мощность, мВт	Ток накачки, мА	Спектральная ширина линии, нм	Дополнительные данные
ИЛПН-670	660—680	3—5	80—120	3—8	ST, ML, PD
ИЛПН-0354-1А	760—800	2—5	65—80	30—90 МГц	ST, SL, PD
ИЛПН-230В	760—800	3—5	80—100	2,0	ST, ML, PD
ИЛПН-780А	770—790	30	60—80	—	"
ИЛПН-780В	770—790	40	70—100	—	"
ИЛПН-780С	770—790	50	80—120	—	"
ИЛПН-0354-1Б	777—783	2—5	65—80	30—90 МГц	ST, SL, PD
ИЛПН-112Б	780—880	250—280	650—900	3—8	PD
ИЛПН-850А	780—880	500	1500	4	"
ИЛПН-850Б	780—880	1000	2000	4	"
ИЛПН-230А	800—840	3—5	80—100	2,0	ST, ML, PD
ИЛПН-232Д	800—840	25	120—170	—	$P_{\text{пик}} = 20—25 \text{ мВт}$ ST, ML, PD
ИЛПН-820А	800—840	30	60—80	—	"
ИЛПН-232Г	800—840	35	140—190	—	"
ИЛПН-820В	800—840	40	70—100	—	"
ИЛПН-820С	800—840	50	80—120	—	"
ИЛПН-361	800—860	1,5—2,0	125—140	13—18	SRD, SF, TEC
ИЛПН-232В	800—870	10	100—150	—	ST, ML, PD
ИЛПН-232Б	800—870	20	110—160	—	"

Окончание табл. 3

Модель	Длина волны, нм	Выходная мощность, мВт	Ток накачки, мА	Спектральная ширина линии, нм	Дополнительные данные
ИЛПН-232А	800—870	30	130—180	—	
ИЛПН-215Б	800—870	30	130—180	—	ST, ML, PD
ИЛПН-215А	800—870	40	150—280	—	ST, ML, PD, TEC
ИЛПН-301	810—860	0,1	120—200	—	SRD, MF
ИЛПН-304	810—880	0,1	80—100	—	SRD
ИЛПН-108	810—890	40	150—380	—	MM, PD
ИЛПН-233Б	820	5; 10; 5	47; 70	—	Трехлучевой
ИЛПН-233А	820	5; 10; 5	47; 70	—	"
ИЛПН-233М3	820	15; 15	75	—	Двухлучевой, PD
ИЛПН-233М2	820	25; 25	95	—	То же
ИЛПН-233М1	820	35; 35	120	—	"
ИЛПН-0354-2А	830—870	2—5	35—65	30—90 МГц	ST, SL, PD
ИЛПН-230А	800—840	3—5	80—100	2,0	ST, ML, PD
ИЛПН-230Б	840—880	3—5	80—100	2,0	"
ИЛПН-0354-2Б	847—853	2—5	35—65	30—90 МГц	ST, SL, PD
ИЛПН-960	940—980	40—60	180—300	3—8	ST, ML PD
ИЛПН-980	975—985	20—30	170—300	1,3	ST, ML, TEC, PD, MF
ИЛПН-303	1200—1350	0,06	100—140	60	SRD, MF
ПОМ-0354-1	1240—1350	1,0	40—85	—	PD, SF, 2Гбит/с
ПОМ-0354-2	1200—1350	2,0	40—85	—	То же
ИЛПН-216А	1240—1350	3,0	30—85	—	ST, SL, PD, TEC
ИЛПН-360-2	1250—1350	0,004—0,006	60—	100	длит. фр. 250 пс LED, SF, TEC
ИЛПН-360-1	1250—1350	0,03—0,05	60	100	длит. фр. 2—5 нс LED, SF, TEC
ПОМ-361	1250—1350	—16—10 дБм	—	100	длит. фр. 2—5 нс стандарт EDDJ 125 Мбит/с
ПОМ-15А	1270—1330	0,5—1,0	40—80	5	PD, SF, TEC, 5 Гбит/с
ИЛПН-206М	1270—1330	1,0—2,0	40—80	3—10	MF, PD, 144 Мбит/с
ИЛПН-206-2	1270—1330	1,5—2,5	30—80	5	То же
ПОМ-14А	1270—1330	1,5—2,5	40—80	0,1—8	ST, ML, SF, TEC, 560 Мбит/с
ПОМ-14М	1270—1330	1,5—3,0	40—80	0,1—8	ST, ML, MF, PD, TEC, 560 Мбит/с
ИЛПН-202	1300	1,5	60	6,0	ST, ML, MF
ИЛПН-206	1300	1,5	60	6,0	ST, ML, MF, PD
ПОМ-15Б	1500—1580	0,5—1,0	70—120	0,01	PD, SF, TEC, ST, SL, 2,4 Гбит/с
ПОМ-13А	1500—1580	0,5—1,0	80—120	0,1	PD, SF, TEC, ST, SL, 560 Мбит/с
ПОМ-13Б	1500—1580	0,5—1,0	80—120	0,1	PD, SF, TEC, ST, SL, 3 Гбит/с
ИЛПН-234А	1500—1600	3,0	30—85	—	ST, SL, PD, TEC
ИЛПН-234Б	1500—1600	4,0	45—100	—	ST, ML, PD, TEC
ПОМ-14Б	1520—1580	1,0—2,0	40—80	0,1—8	PD, SF, TEC, ST, ML, 560 Мбит/с

Примечание. ST — одна поперечная мода; PD — фотодиод обратной связи; SRD — суперлюминесцентный диод; SF — одномодовое волокно; TEC — термоэлектрический холодильник; MF — многомодовое волокно; MM — многомодовый.

Таблица 4

## Полупроводниковые лазеры импульсного режима работы (НИИ "Полюс 2")

Модель	Длина волны, нм	Импульсная мощность, Вт	Длительность импульса, нс	Частота повторения, кГц	Дополнительные данные
ИЛПИ-110	840	150—200	120	3	С интегратором
ЛПИ-120	890	8—12	70—150	15	—
ИЛПИ-111	904	—	1000	0,1	$E_{\text{имп}} = 100—120$ мкДж
ИЛПИ-130	904	250	150	0,1	$E_{\text{имп}} = 100$ мкДж

Продукция Производственного объединения "Север" представлена в табл. 5 [102].

Таблица 5

## Модификации и параметры полупроводниковых лазерных излучателей видимого и инфракрасного диапазонов (ПО "Север")

Модель	Длина волны, нм	Средняя мощность, мВт	Ток накачки, мА	Спектральная ширина линии, нм	Дополнительные данные
ИЛПН-102	820—920	5	500	4	
ИЛПН-103	910—920	5	500	4	T
ИЛПН-205А; Б	760—800	5	200	0,2; 4	
ИЛПН-207А; Б	760—800	5	200	0,2; 4	T
ИЛПН-210А; Б	760—800	3	150	0,2; 4	F
ИЛПН-210-1А; Б	800—900	3	75	0,2; 4	"
ИЛПН-210-2А; Б	760—800	3	75	0,2; 4	"
ИЛПН-2—7кА; Б	650—690	10х	600	0,1; 4	F, T
ИЛПН-2-8кА; Б	650—690	10х	600	0,1; 4	T
ИЛПН-1—6; 1—7	800—900	20	500	4	F, T
ИЛПН-2—1—1А; 2А; 3А	760—800	3; 10; 20	75; 150 200	0,2	F
ИЛПН-2—1—1Б; 2Б; 3Б	760—800	3; 10; 20	75; 150 200	0,2	F
ИЛПН-2П-10А; Б	760—800	10	150	0,2; 4	
ИЛПН-2ПФ-10А; Б	760—800	10	150	0,2; 4	F
ИЛПН-2П-20А; Б	760—800	20	200	0,2; 4	
ИЛПН-2ПФ-20А; Б	760—800	20	200	0,2; 4	F
ИЛПН-2П-40А; Б	760—800	40	300	0,2; 4	
ИЛПН-2ПФ-40А; Б	760—800	40	300	0,2; 4	F
ИЛПН-2Т-10А; Б	760—800	10	150	0,2; 4	T
ИЛПН-2ТФ-10А; Б	760—800	10	150	0,2; 4	T, F
ИЛПН-2Т-20А; Б	760—800	20	200	0,2; 4	T
ИЛПН-2ТФ-20А; Б	760—800	20	200	0,2; 4	T, F
ИЛПН-2Т-40А; Б	760—800	40	300	0,2; 4	T
ИЛПН-2ТФ-40А; Б	760—800	40	300	0,2	T, F
ИЛПН-2К-40А; Б	760—800	40	300	2,2; 4	
ИЛПН-2КФ-40А; Б	760—800	40	300	0,2; 4	T

Примечание. F — прибор содержит встроенный фотоприемник; T — прибор в термостатированном корпусе.

Акционерное общество "Восход" разрабатывает и выпускает полупроводниковые инжекционные излучатели видимого и ближнего ИК-диапазонов, работающие в режимах непрерывной и импульсной генерации. В серийном производстве освоено 10 базовых конструкций, на основе которых выпускается 26 типов полупроводниковых лазерных излучателей. Все излучатели непрерывного режима работы содержат встроенный фотоприемник для включения в цепь стабилизации уровня выходной мощности. Импульсные лазерные излучатели имеют встроенный формирователь импульсного тока накачки. Выпускаемая продукция находит применение в различных отраслях науки и техники: ВОЛС, телефонная связь, кабельное телевидение, вычислительная техника, системы охранной сигнализации, неконтактные датчики цели, оптические лазерные головки для считывания и записи информации, лазерные принтеры и в медицине. Ассортимент выпускаемых излучателей приведен в табл. 6 и 7 [103], полупроводниковых излучателей, выпускаемых НИИ "Волга", — в табл. 8 и 9 [104].

Таблица 6

Полупроводниковые лазеры непрерывного режима работы (АО "Восход")

Модель	Длина волны, нм	Выходная мощность, мВт	Ток накачки, мА	Спектральная ширина линии, нм	Дополнительные данные
ИЛПИ-301	860	0,1	120	—	SRD
ИЛПИ-303	1300	0,06	100	—	"
ИЛПИ-304	860	0,1	80	—	"
ИЛПИ-108	850	40	230	—	MM
ИЛПИ-206—1	1280	1,0	120	—	ST
ИЛПИ-212А	780	4	50	—	"
ИЛПИ-212Б	780	4	50	—	"
ИЛПИ-212В	780	4	50	—	"
ИЛПИ-212Г	810	4	50	—	"
ИЛПИ-212Д	810	4	50	—	"
ИЛПИ-212Е	810	4	50	—	"
ИЛПИ-212Ж	830	4	50	—	"
ИЛПИ-212И	830	4	50	—	"
ИЛПИ-212К	830	4	50	—	"
ИЛПИ-203	840	3,5	50	—	"
ИЛПИ-114	850	200	400	—	MM
ИЛПИ-115	850	30	250	—	ST
ИЛПИ-236	780	7	50	—	"
ПО1—1	850	1	90	—	"

Таблица 7

Полупроводниковые лазеры импульсного режима работы (АО "Восход")

Модель	Длина волны, нм	Импульсная мощность, Вт	Длительность импульса, нс	Частота повторения, кГц	Дополнительные данные
ЛПИ-101	910	5,0	120	6,000	—
ЛПИ-102	910	6,5	120	6,000	—
ЛПИ-120	870	12	100	15,000	—
Мощный лазер	900	200	250	1,000	—
Лазер с формирующей оптикой	900	6	100	16,000	—
ФИТ-1	—	—	150	25,000	—
Лазер с формирующей оптикой	890	6	100	16,000	MM

Таблица 8  
Полупроводниковые лазеры непрерывного режима работы (НИИ "Волга")

Модель	Длина волны, нм	Выходная мощность, мВт	Ток накачки, мА	Спектральная ширина линии, нм	Дополнительные данные
32ДЛ106	830	5	100	4	Бескорпусный
ЛДН-7	760—860	3	—90	4	PD
ЛДН-8	800—840	30	160	4	"
ЛДН-10	800—840	30	160	4	"
ЛДН-11	800—840	5	90	4	"
ЛДН-12	760—800	4	80	4	"
ЛДН-14	800—840	20	150	4	"
ЛДН-16	800—840	3	200	15	"
ЛДН-19	800—860	1000	1900	15	"
ИЛПН-109М	830	3	120	4	ММ
ИЛПН-110М	830	0,1	80	40	"
ЛМ1-850	830	1	120	4	SF
ЛМ2-850	830	0,5	200	15	"
ЛМ1-1300	1300	1	100	4	"
ЛМ2—1300	1300	0,2	150	15	"
ЛМ3—1300	1300	1	100	4	ММ
ЛМ4—1300	1300	0,03	100	40	"
ЛМ6; 7; 8	780—820	1,5—5	100	5	С формир. оптикой
ЛЛД-16(32)	830	3	—	2	Линейка ЛД

Таблица 9

Полупроводниковые лазеры импульсного режима работы (НИИ "Волга")

Модель	Длина волны, нм	Импульсная мощность, Вт	Длительность импульса, нс	Частота повторения, кГц	Дополнительные данные
ЛПИ-10	810—930	5	100	6	СТ
ЛПИ-12	850—930	5	100	6	"
ЛПИ-14	850—930	30	100	0,5	"
ЛПИ-15М	850—930	3	100	0,25	"
ИЛПИ-102	850—930	68	100	1,6	"
ИЛПИ-103	850—930	18	100	6	"
ИЛПИ-104	850—930	16	100	6	"
ИЛПИ-105	850—930	6	100	12	"
ИЛПИ-107	850—930	10	100	25	"
ИЛПИ-108	850—930	4	100	6	"
ИЛПИ-110	800—860	110	120	1,6	ИИ
ИЛПИ-112	850—930	150	70	1,6	СТ
ИЛПИ-113	860—920	75	60	1,6	"
ИЛПИ-114	800—860	320	120	5,2	ИИ
ЛПИ-105	850—930	8	50—120	12	"
ЛД-15	860—920	5	100	6	Бескорпусный
ИЛД-8	880—905	6	150	6	Корпус ТО-18-02
ИЛД-9	940—980	5—20	10	15	То же
ИЛД-10	880—905	8	150	6	"
ИЛД-1	850—930	1	100—300	6	—

Примечание. СТ — со встроенным согласующим импульсным трансформатором; ИИ — в конструкции имеется интегратор излучения.

Кроме указанных серийных моделей, предприятия принимают заказы на разработку и изготовление полупроводниковых излучателей по индивидуальным проектам.

Нужно отметить, что производственные мощности предприятий, выпускающих полупроводниковые излучатели, используются не в полную меру. Общий объем ежегодного выпуска лазерных диодов в России не превышает 1 % их мирового производства. Между тем, производство инжекционных лазеров входит в число базовых отраслей промышленности, определяющих темпы научно-технического прогресса, прежде всего в области систем связи, обработки информации, НИОКР и высоких технологий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на все трудности переходного периода в России, полупроводниковые лазеры занимают все более прочные позиции во многих областях техники, заметно тесня в ряде применений лазеры других типов. За последние годы расширилось использование лазерных диодов для накачки всевозрастающего количества материалов, найдены новые лазерные материалы, более эффективно поглощающие излучение лазерных диодов; разработан ряд новых конструкций твердотельных лазеров с диодной накачкой; решены многие принципиальные вопросы по разработке уникальных и мощных диодных лазеров, излучающих в широком спектральном диапазоне, на основе которых создаются новые приборы различного назначения, в том числе для ВОЛС. Однако широкое внедрение диодных лазеров в народное хозяйство тормозится отсутствием должного финансирования научно-исследовательских работ и ограниченностью существующего рынка сбыта продукции в стране.

Вместе с тем, российский рынок волоконно-оптической связи потенциально обладает широчайшими возможностями. Промышленность также нуждается в реконструкции, а это, в принципе,— огромные области потребления лазерных диодов. Поэтому крупномасштабные инвестиции в их производство могли бы принести в будущем значительные дивиденды.

## Литература

1. Ковш И. Б. // Конверсия в машиностроении. 1994. № 2. С. 16.
2. Богданкевич О. В. // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. С. 1193.
3. Алферов Ж. И. и др. // ФТП. 1994. Т. 3. С. 1328.
4. Богатов А. П. и др. // Квантовая электроника. 1974. Т. 1. С. 2294.
5. Байков И. С., Головашкин А. И. // Прикладная физика. 1994. № 1. С. 4.
6. Байков И. С., Головашкин А. И. // Там же. № 2. С. 3.
7. Швейкин В. И. // Лазерная техника и оптоэлектроника. 1992. № 3—4. С. 3.
8. Электронная промышленность. 1994. № 3. С. 53.
9. Квантовая электроника, 1991. Т. 18. № 8.
10. Laser Market. 1994. № 7. P. 10.
11. Богатов А. П. // Краткие сообщения по физике. 1994. № 1—2. С. 55.
12. Безотосный В. В. и др. // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. С. 57.
13. Безотосный В. В. и др. // Там же. 1995. Т. 22. № 4.
14. Елисеев П. Г. и др. // Там же (в печати).
15. Елисеев П. Г. и др. // Там же. № 2.
16. Аржанов Э. В. и др. // Там же. 1993. Т. 20. С. 633.
17. Eliseev P. G. // Proc. SPIE. 1994. V. 2146. P. 433.
18. Eliseev P. G. et al // Proc. SPIE. 1994. V. 2146. P. 185.
19. Безотосный В. В. и др. // Межд. конф. по оптике лазеров: Тезисы. — С.-Петербург, 1993. С. 207.
20. Безотосный В. В. и др.: Тр. ФИАН, 1992. Т. 216. С. 130.
21. Елисеев П. Г., Карга П. В. // Межд. конф. по оптике лазеров: Тезисы. — С.-Петербург, 1993. С. 220.
22. Елисеев П. Г., Лык Ву Ван // Изв. АН. Сер. Физ. 1994. Т. 58. № 7. С. 125.

23. Eliseev P. G. et al.//Laser Physics. 1994. V. 4. P. 485S.
24. Onishenko A.I., Eliseev P. G.//Proc. SPIE. 1994. V. 2146. P. 457.
25. Eliseev P. G. et al.//IEEE J. Quantum Electron. 1994. V. 30. P. 2271.
26. Eliseev P. G. et al.//IEE Proceedings of Optoelectronics, 1995.
27. Eliseev P. G., VuVan Lus//Journal of European Optical Society, 1995.
28. Eliseev P. G. et al.//Journal of European Optical Society, 1995.
29. Акимова И. В. и др.//Квантовая электроника. 1994. Т. 21. С. 405.
30. Snipes M. B., J. G. Mc. Inerney.//Proc. SPIE. 1992. V. 1634. P. 542.
31. Загуменный А. И. и др.//Квантовая электроника. 1992. Т. 19. С. 1149.
32. Загуменный А. И. и др.//Там же. 1993. Т. 20. С. 1152.
33. Грошкова Н. Н. и др.//Там же. 1991. Т. 18. С. 294.
34. Мак А. А.//Оптический журнал. 1994. № 1. С. 5.
35. Мак А. А. и др.//Лазеры на неодимовом стекле. — М.: Наука, 1990.
36. Винокуров Г. Н. и др.//Квантовая электроника. 1991. Т. 18. С. 1188.
37. Аполлонов В. В. и др.//Там же. 1994. Т. 21. С. 577.
38. Каминский А. А. и др.//Там же. С. 1111.
39. Дорошенко М. Е. и др.//Там же. 1993. Т. 20. С. 569.
40. Физика полупроводниковых лазеров. — М.: Мир, 1989.
41. Дураев В. П.//Лазерная техника и оптоэлектроника. 1992. № 3—4. С. 40.
42. Безотосный В. В. и др.//Квантовая электроника. 1980. Т. 7. С. 1990.
43. Андреева Р. И., Кочетков А. А.//Там же. 1991. Т. 18. С. 294.
44. Андреева Р. И. и др.//Там же. 1993. Т. 20. С. 45.
45. Амбарцумян М. А. и др.//Лазерная техника и оптоэлектроника. 1992. № 3—4. С. 6.
46. Быковский Ю. А. и др.//Квантовая электроника. 1992. Т. 19. С. 657.
47. Гавриленко Н. Н. и др.//Там же. С. 845.
48. Сычугов В. А. и др.//Там же. 1994. Т. 21. С. 21.
49. Быковский Ю. А. и др.//Там же. 1986. Т. 13. С. 1061.
50. Быковский Ю. А. и др.//Там же. 1987. Т. 14. С. 342.
51. Быковский Ю. А. и др.//Там же. 1994. Т. 21. С. 414.
52. Гарбузов Д. З. и др.//Там же. 1991. Т. 18. С. 281.
53. Давыдова Е. И. и др.//Там же. 1992. Т. 19. С. 1024.
54. Журавлева О. В. и др.//Там же. 1994. Т. 21. С. 205.
55. Жучков Ю. А. и др.//Там же. 1991. Т. 18. С. 1294.
56. Елисеев П. Г., Безотосный В. В.//Препринт 180/ФИАН, 1986.
57. Безотосный В. В. и др.//Препринт 55/ФИАН, 1991.
58. Данилина О. В. и др.//Квантовая электроника. 1991. Т. 18. С. 1313.
59. Голдина Н. Д. и др.//Межд. конф. по оптике лазеров: Тезисы. — С.-Петербург, 1993. С. 213.
60. Котова С. В. и др.//Там же. С. 222.
61. Котова С. В. и др.//Квантовая электроника. 1993. Т. 20. С. 509.
62. Garbuzev D. Z. et al.//XII IEEE Int. Semicond. Laser Conf. Davos, Switzerland, 1990.
63. Garbuzev D. Z. et al.//Appl. Phys. Lett. 1993. V. 63. N 10.
64. Гарбузов Д. З. и др.//ФТП. 1994. Т. 28. № 3. С. 315.
65. Garbuzev D. Z. et al.//J. Appl. Phys. 1992. V. 72. N 1. P. 319.
66. Garbuzev D. Z. et al.//Там же. 1993. V. 72. N 10. P. 1062.
67. Бородинский М. Л. и др.//Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. № 21. С. 78.
68. Берещев И. Э. и др.//Там же. 1994. Т. 20. № 7. С. 41.
69. Горбылев В. А. и др.//Квантовая электроника. 1993. Т. 20. С. 62.
70. Belov A. V. et al.//Soviet Lightwave Communications. 1993. V. 3. N 3.
71. Бородинский М. Л. и др.//Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. № 6. С. 62.
72. Dulkín A. E. et al.//Microelectronic Engineering. 1992. V. 17. P. 345.
73. Егоров А. Ю. и др.//ФТП. 1994. Т. 28. № 4. С. 604.
74. Лившиц Д. А. и др.//Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. № 19. С. 6.
75. Аверуцкий И. А. и др.//Квантовая электроника. 1994. Т. 21. С. 921.
76. Баранов А. Н. и др.//Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. С. 30.
77. Яковлев Ю. М. и др.//Квантовая электроника. 1993. Т. 20. С. 839.
78. Именков А. Н. и др.//Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. № 24. С. 19.
79. Баранов А. Н. и др.//Там же. 1992. Т. 18. № 22. С. 6.
80. Akiba et al.//Electronics Lett., 1988. V. 24. P. 1069.
81. Данилова Т. Н. и др.//Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. № 4. С. 87.
82. Данилова Т. Н. и др.//Там же. № 10. С. 10.
83. Аветисов В. Г. и др.//Там же. 1990. Т. 16. № 14. С. 66.
84. Андаспаева А. А. и др.//ФТП. 1991. Т. 25. № 3. С. 394.
85. Именков А. Н. и др.//Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. № 23. С. 13.

86. Баранов А. Н. и др.//Там же. 1991. Т. 17. № 17. С. 54.
87. Баранов А. Н. и др.//Там же. 1992. Т. 18. № 17. С. 18.
88. Баранов А. Н. и др.//ФТП. 1992. Т. 26. № 11. С. 1971.
89. Именков А. Н. и др.//Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. № 20. С. 89.
90. Попов А. А.//Там же. С. 78.
91. Беленов Э. М., Васильев П. П.//ЖЭТФ. 1989. Т. 96. С. 1629.
92. Беленов Э. М., Васильев П. П.//Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 48. С. 416.
93. Vasil'ev P. P.//IEEE J. Quantum Electron. 1988. V. 24. P. 2386.
94. Васильев П. П.//Квантовая электроника. 1994. Т. 21. С. 585.
95. Шраменко М. В. и др.//Там же. 1993. Т. 20. С. 758.
96. Ляхов Г. А. и др.//Там же. С. 941.
97. Адливанкин Ф. С. и др.//Межд. конф. по оптике лазеров: Тезисы. — С.-Петербург, 1993. С. 206.
98. Жарников С. Д. и др.//Там же. С. 204.
99. Маругин А. В., Цареградский В. Б.//Там же. С. 507.
100. Шлычков В. И., Левков А. Н.//Там же. С. 513.
101. Егоров С. А. и др.//Там же. С. 515.
102. Новые промышленные технологии. 1994. № 1. С. 46.
103. Лазерная техника и оптоэлектроника. 1993. № 1—2. С. 86.
104. Там же. 1992. № 3—4. С. 38.
105. Айдаралиев П. и др.//Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 15. С. 49.

Поступила в редакцию 20 февраля 1995 г.

## **SEMICONDUCTOR DIODE LASERS**

**I. S. Baikov**

The All-Russia Research Institute of Interbranch Information, Moscow, Russia

**V. V. Bezotosny**

P. N. Lebedev Institute of Physics RAS, Moscow, Russia

*The review contains brief information about the main scientific and industrial centers in Russia, engaged in the development and production of semiconductor injection lasers. Modern directions of fundamental and applied works are submitted, including the injection lasers on the base of quantum wells, nanostructures and stressed heterolayers. Series of publications, directed on the development of injection lasers in new spectral regions, high-power single-mode operation, ultrashort laser pulses generation and high-power laser arrays for solid-state active material pumping are examined. Associated reference information on the nomenclature of industrial-type injection lasers, light-emitting modules for fiber-optic communications and high-power light emitting diodes is presented.*