

Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ

Узбекистан, г. Ташкент, НПО «Физика–Солнце»  
E-mail: karimov@uzsci.net

Дата поступления в редакцию  
19.12 2006 г.

Оппонент д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ  
(ДонНУ, г. Донецк)

## СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ВОЛНОВОДНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ $A^3B^5$

*Приведенный анализ представляет интерес при конструировании различных видов излучателей, предназначенных для оптических систем передачи информации.*

Передача информационных данных и видеосигналов с помощью обычных проволочных кабелей уже перестает удовлетворять постоянно растущие потребности абонентов, в то время как качество и скорость передачи сигналов с помощью оптических волокон постоянно возрастают. Оптическое волокно характеризуется широкой полосой и меньшими потерями, чем коаксиальный кабель [1]. Оно позволяет передавать изображения с высоким разрешением на весьма далекие расстояния без применения мощных усилителей или ретрансляторов. Кроме того, благодаря передаче сигнала в виде светового луча, а не электрического тока, система становится полностью невосприимчивой к любым видам электромагнитных помех, включая высоковольтные линии электропередачи [2].

Оптическое волокно является альтернативой металлическим коммуникационным линиям, кабелям, связывающим между собой два объекта. Прием и передача информации между ними с помощью оптического волокна представляет собой волоконно-оптическую систему связи. В такой системе выделяют три различные по скорости передачи информации и дальности связи группы линий связи, в которых используются разные виды светоизлучающих и фотоприемных элементов, а также светодиодов [3]. К первой группе относятся волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) с небольшой скоростью передачи информации (до нескольких десятков Мбит/с). В них в качестве светоизлучающих и фотоприемных элементов используются светодиоды и  $p-i-n$ -фотодиоды, многомодовые оптические волокна. Ко второй группе относятся волоконно-оптические системы на основе полупроводниковых лазеров и лавинных фотодиодов, работающих в полосе 1,3 мкм. К третьей группе относятся ВОЛС с высокой скоростью передачи информации и большой дальностью связи, использующие излучение от одномодового лазера с распределенной обратной связью с длиной волны 1,55 мкм с минимальной потерей излучения.

В настоящее время быстрыми темпами развиваются системы дальней оптической связи на расстоя-

ния в тысячи километров — благодаря появлению оптических усилителей на основе световодов, легированных эрбием, способных усиливать проходящие по световоду сигналы на 30 дБ [4]. Однако с ростом скорости передачи данных относительно низкое быстродействие эрбиевых усилителей вызовет ряд проблем, в результате чего рамановские волоконные усилители (ВКР) [5] становятся весьма перспективными. Появление новых оптических волокон, легированных германием, с "окном прозрачности" в 500 нм в диапазоне 1,2—1,7 мкм открывает новые возможности и требует совершенствования электронных компонентов систем передачи и приема оптических сигналов [6]. Вместе с тем создаются физические основы альтернативных — солитоновых систем связи.

На сегодняшний день основная задача ученых и разработчиков состоит в обеспечении оптимального сопряжения полупроводниковых элементов и оптических каналов связи. Для эффективного функционирования волоконно-оптических систем целесообразно подбирать и разрабатывать специальные волноводные излучатели с соответствующими размерами, высокой скоростью переключения, возможностью перестройки рабочей частоты, способностью работать при комнатной температуре [7—9], и фотоприемники [10—13] со стабильными параметрами.

В настоящей работе представлены результаты проводимых исследований электронных компонентов волоконно-оптических систем и их особенности, а также тенденции усовершенствования технологических аспектов различных волноводных излучателей.

### **Физико-технологические аспекты улучшения параметров оптоволоконных излучателей**

Успехи одного из наиболее быстро развивающихся направлений современной лазерной физики связаны с проведением широких комплексных фундаментальных исследований, которые обеспечили создание не только волоконных световодов с предельно низкими потерями, но и уникальных источников когерентного излучения в необходимом спектральном диапазоне. Однако требование увеличения скорости передачи и обработки информации ставит на повестку дня необходимость создания оптических каналов передачи информации со спектральным уплотнением. Именно на решение этой проблемы в значительной мере и направлены усилия ученых. Дальнейший прогресс невозможен без детальных фундаментальных иссле-

дований в области разработки новых элементов систем связи: высокоэффективных источников оптического излучения, оптических усилителей и волоконных световодов.

Оптический передатчик преобразует входной электрический сигнал в модулированный световой поток для его дальнейшей передачи по оптоволокну, обычно это полупроводниковый лазер или светодиод. Оба служат одной и той же цели — генерации микроскопического светового пучка диаметром 10—65 мкм, который можно с высоким КПД ввести в волокно и с высокой частотой модулировать (изменять по интенсивности). В современных оптических линиях связи наиболее широко используются полупроводниковые лазеры с распределенной обратной связью. Лазеры обеспечивают более высокую интенсивность пучка, чем светодиоды, и допускают более высокую частоту модуляции, поэтому они часто используются для широкополосных линий большой протяженности (например, телекоммуникации или кабельное телевидение). С другой стороны, светодиоды — более дешевые и вполне подходящие для большинства систем небольшой или средней протяженности [14].

Помимо функционального назначения (т. е. какой сигнал нужно передавать), волоконно-оптический передатчик характеризуется еще двумя важными параметрами, определяющими его свойства. Первый — это выходная мощность оптического излучения, а второй — длина волны испускаемого света. Обычно это 850, 1310 или 1550 нм — значения, выбранные из условия совпадения с окнами прозрачности в характеристике пропускания материала оптического волокна.

Несмотря на разнообразие технологии и структуры полупроводниковых лазеров, основная проблема — температурная зависимость их параметров — свойственна всем категориям полупроводниковых лазеров. В основе этой проблемы лежит еще сравнительно большая плотность пороговых токов, которую, по возможности, необходимо уменьшать.

В области лазерной физики и технологии наблюдается тенденция непрерывного обогащения новыми данными. Теоретические обоснования улучшения параметров полупроводниковых лазеров при переходе на технологию с квантовыми точками находят экспериментальное подтверждение. Так, в работе [15] теоретически подробно рассмотрены зависимости коэффициента усиления, тока прозрачности, порогового тока, характеристической температуры и порога многомодовой генерации от поверхностной концентрации и дисперсии размеров ансамбля квантовых точек, длины полоски и толщины волноводной области резонатора, свойств гетероконтактов и температуры. Результаты анализа представлены в виде рекомендаций для практической реализации лазеров на квантовых точках, существенно превосходящих по своим рабочим параметрам используемые в настоящее время полупроводниковые лазеры. На основании структур InAs–InGaAs с квантовыми точками в буферном слое InGaAs, выращенных на подложках GaAs, с содержанием индия около 20% получены длинноволновые (1,46—1,5 мкм) лазеры [16]. Максимальная выходная мощность лазеров составила 7 Вт

в импульсном режиме при комнатной температуре. Дифференциальная эффективность прибора с длиной резонатора 1,5 мм составила 50%. Температурная зависимость пороговой плотности тока в диапазоне 10—73°C описывается характеристической температурой 61 К.

Методом МОС-гидридной эпитаксии получены лазеры на гетероструктурах InGaAsP/InP с широким мезаполосковым контактом (100 мкм), излучающие в диапазоне 1,3—1,5 мкм [17]. В них обнаруживался перегрев активной области лазерного диода на 30—60°C относительно медного тепловода в режиме насыщения мощности излучения в непрерывном режиме генерации. При этом достигнута оптическая мощность излучения 3 и 2,6 Вт в непрерывном режиме генерации, 9 и 6,5 Вт — в импульсном режиме генерации соответственно на длинах волн 1,3 и 1,5 мкм. Установлена сильная зависимость максимальной мощности от температуры.

Обращают внимание приемы улучшения параметров лазеров, работающих в спектральном диапазоне 980—1100 нм и перспективных для применения в кабельном телевидении, сети передачи данных, телефонии и др. Для уменьшения температурной чувствительности лазерных InGaAs/GaAs/AlGaAs-гетероструктур, получаемых МОС-гидридной эпитаксией, предлагается увеличить глубину потенциальной ямы активной области путем оптимизации геометрии и профиля легирования структуры [18]. В результате на таких структурах в непрерывном режиме генерации оптическая мощность излучения доведена до 6,5 Вт на длине волны излучения 0,98 мкм при внутреннем квантовом выходе 85—95%. Исследования проводились в температурном диапазоне 0—70°C. В работе [19] путем подбора состава активной области InGaAs/AlGaAs/GaAs-гетероструктуры получены лазеры, излучающие в спектральном диапазоне 1,03 мкм. При постоянной температуре тепловода 10°C в непрерывном режиме достигнута выходная мощность 9,2 Вт. При длине резонатора 2 мм получен максимальный КПД 66%.

По спектральному составу используемые в волоконно-оптических системах лазеры могут иметь как многомодовый, так и одномодовый, в пределе одночастотный, режимы генерации в зависимости от назначения и конструкции. В этом аспекте представляют интерес экспериментальные и теоретические исследования внутреннего квантового выхода стимулированного излучения лазерных диодов на основе двойных InGaAsP/InP-гетероструктур отдельного ограничения ( $\lambda=1,5\dots 1,6$  мкм) с различным дизайном волноводного слоя [20]. Лазерные гетероструктуры с различным дизайном волноводного слоя изготавливались методом МОС-гидридной эпитаксии. Максимальное значение внутреннего квантового выхода стимулированного излучения  $\approx 97\%$  было достигнуто в структуре с двойным ступенчатым волноводом, характеризующейся минимальными утечками в *p*-эмиттер за порогом генерации за счет образования низкой концентрации неравновесных носителей на границе "волновод—*p*-эмиттер". В работе [21] продемонстрирована возможность генерации излу-

чения 1,2—1,5 мкм в непрерывном режиме в AlGaInAs/InP многоямных лазерных гетероструктурах при температуре окружающей среды 170°C без принудительного охлаждения. Абсолютные значения порогового тока достигали 10 мА для лазерных диодов с шириной полоски  $W=4,5$  мкм и длиной резонатора 200 мкм. Пороговые плотности тока составили 500—650 А/см<sup>2</sup> при длине резонатора 1,0 мм.

Преимуществами лазерных диодов являются малые размеры тела свечения и, как следствие, узкая диаграмма направленности (3—20°), большая мощность излучения, линейная зависимость излучаемой мощности от тока накачки и высокая частота модуляции. Поэтому они используются для широкополосных одномодовых линий связи большой протяженности. Недостатком лазерных диодов является необходимость их термостатирования для обеспечения одномодового режима работы, что влечет за собой удорожание оптического передатчика.

В волоконно-оптических системах, предназначенных для передачи сигнала на не очень большие расстояния, в качестве источника оптического излучения могут применяться светодиоды. В отличие от лазера, обладающего остро направленным когерентным лучом, в светодиоде излучение происходит спонтанно (самопроизвольно), и луч имеет меньшую мощность (5—20 мВт) и широкую направленность (60—80°). Светодиоды также обладают высокой линейностью модуляционной характеристики, устойчивы к изменениям окружающей температуры и характеризуются низкой стоимостью. Поэтому они наиболее часто используются в технике охранного телевидения. Передатчик часто имеет миниатюрные размеры, что позволяет смонтировать его непосредственно в кожухе вместе с камерой. В этом направлении проводятся интенсивные теоретические и экспериментальные исследования различных вариантов структур с оптическими микрорезонаторами и активными слоями на основе квантовых точек InGaAs/GaAs, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs [22]. В частности, реализованы светодиоды диапазона 1,3 мкм, обладающие узкой спектральной характеристикой и низкой расходимостью светового пучка. В структуре с оксидированными зеркалами AlO/GaAs получена лазерная генерация в вертикальном направлении на длине волны 1,3 мкм при инжекционной накачке. Следует отметить, что в зависимости от характера исходного сигнала в передатчике может использоваться как линейная амплитудная, частотная, так и различные типы импульсной модуляции.

Таким образом, независимо от технологии изготовления или конструкции волноводного излучателя, всем им свойственна температурная зависимость параметров, обусловленная высоким значением плотности рабочих токов. Одним из путей уменьшения порогового тока, возможно, является создание физических условий, обеспечивающих процессы внутреннего усиления излучаемого сигнала или создание безынкционного излучателя.

### Вывод оптического излучения и технология получения полупроводниковых структур

Наряду с инженерией квантовых точек набирает темпы получение излучения новыми способами [23—25]. В работе [25] вместо излучения фотонов предлагают использовать испускание оптических фононов. До сих пор этот процесс приводил к тому, что электрон, пройдя 40 каскадов типичного каскадного лазера, испускал только один фотон, а все остальное — оптические фононы. Теперь оптический фонон стал использоваться для получения излучения, т. е. переход с испусканием оптического фонона позволил быстро очищать нижний уровень и поддерживать лазерный режим терагерцовой генерации.

Использование кольцевого микрорезонатора, частота моды которого совпадает с резонансной частотой перехода электрона между уровнями энергии в квантовой яме гетероструктуры GaAs/Al<sub>0,15</sub>Ga<sub>0,85</sub>As, позволил получить терагерцовый каскадный лазер, излучающий волны в диапазоне частот 3,0—3,8 ТГц [26]. В работе [27] для создания квантовых каскадных лазеров с когерентным (баллистическим) транспортом электронов предлагается использовать трехбарьерные полупроводниковые гетероструктуры, у которых переходы электронов осуществляются на уровень трехбарьерной структуры, рождающийся из уровней смежных квантовых ям, имеющих разную четность волновых функций электронов. При этом можно добиться существенного расширения этого уровня по сравнению со случаем одной четности, что, в свою очередь, позволяет облегчить условия когерентного транспорта электронов и увеличить интегральную отрицательную динамическую проводимость структуры.

Исследователи работы [28] получили транзисторный лазер, способный работать при комнатной температуре на частоте 3 ГГц, обеспечивающий быструю обработку сигналов и повышение эффективности электрически и оптически интегрированных схем. Также в [28] появились сообщения о создании нового твердотельного лазера, потребляющего меньше энергии по сравнению с известными структурами излучателей. Теоретически этот лазер может передавать более 100 млрд. бит в секунду против 20 млрд. бит в секунду, имеющих место в типичных излучателях. Основой нового лазера является фотонный кристалл толщиной 300 нм, в котором вытравлен массив регулярно расположенных (9×9) отверстий, каждое диаметром 400 нм. Пространства между отверстиями, называемые микрополостями, захватывают свет.

Кристалл состоит из четырех слоев GaInAsP, так называемых «квантовых колодцев». Соответственно, при облучении кристалла светом энергия света «закачивается» в «квантовые колодцы», заставляя их переизлучать на требуемой длине волны. Многократно отражаясь от стенок микрополостей, световое излучение формирует лазерный луч. Полученный таким образом лазер имел выходную мощность 12 мВт при мощности накачки  $2,4 \cdot 10^{-3}$  Вт, т. е. был примерно в 20 раз эффективнее лазера с одиночной полостью. Кроме того, этот лазер очень мал: около 400 тыс.

таких лазеров можно разместить на чипе площадью 1 см<sup>2</sup>. В перспективе планируется накачивать лазер не с помощью света, а с помощью электричества, и разработать методы интеграции лазера в чипы, чтобы создать оптическую передачу данных внутри компьютера, повысив тем самым его быстродействие.

Наряду с новыми принципами, в качестве одного из перспективных подходов к повышению выхода оптического излучения рассматривается использование квантового размерного эффекта не только в полупроводниковых соединениях, но и в кремниевых структурах. Вместо пористого кремния, получаемого травлением с-Si в растворах плавиковой кислоты, теперь основное внимание сосредоточено на технологически удобных и стабильных наноструктурах. Так, группа исследователей [29] сообщила о практически промышленном методе формирования люминесцирующих кремниевых нанокристаллов со средними размерами от 2 до 8 нм, сравнительно узким распределением по размерам (0,5—0,7 нм) и производительностью 14—52 мг/ч.

И вот, пока основные усилия исследователей концентрировались на «нанокристаллическом» и «редкоземельном» направлениях борьбы за свечение кремния, произошел «прорыв» в несколько неожиданном месте. В частности, сразу несколькими группам удалось преодолеть термическое гашение краевой люминесценции с-Si за счет формирования в активной области дислокационных петель с размерами 10—100 нм (рис. 1, 2) [30], которые ограничивали диффузию и безызлучательную рекомбинацию носителей заряда. Дислокационные петли образовывались

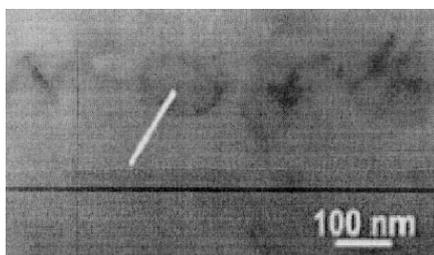


Рис. 1. Изображение в светлом поле просвечивающего электронного микроскопа вблизи [110] Si образца с петлями дислокаций, образованными при ионной имплантации бора [30]

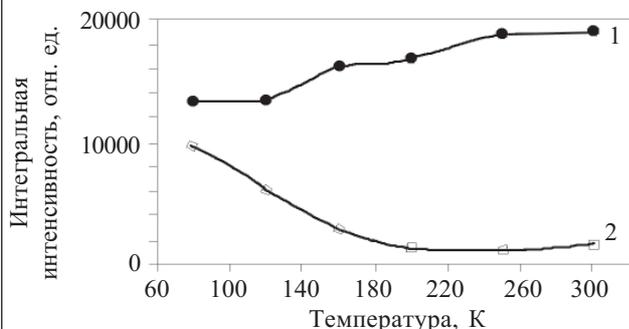


Рис. 2. Температурная зависимость интегральной интенсивности электролюминесценции для обычного светодиода (1) и светодиода с дислокационными петлями (2).  $I_{\text{прям}} = 3 \text{ А/см}^2$  [30]

в результате имплантации бора и последующего отжига. Были получены кремниевые светодиодные структуры, излучающие на длине волны 1,15 мкм с квантовыми эффективностями 0,1% [7] и 0,02% [8] при комнатной температуре. Аналогичные результаты получены в работе [9] в кремниевых светодиодах, работающих при комнатных температурах при введении (с помощью пластической деформации) дислокаций, т. е. с квантовой эффективностью 0,1% на длине волны около 1,5 мкм (энергия фотонов 0,8 эВ, что соответствует положению уровней энергии дислокационных состояний).

Достигнутые величины пока ниже рекордных (1%), полученных на сверхчистом с-Si со специально текстурированной поверхностью [31, 32]. Несмотря на это, авторы работ [27, 33, 34] полны оптимизма, поскольку они использовали достаточно стандартные *p-n*-переходы без оптимизации вывода излучения из структуры. При этом ожидается, что текстурирование поверхности позволит увеличить выход электролюминесценции в несколько раз.

Обнадеживающие результаты ожидаются также в связи с совершенствованием наноструктур, требующих получения гетероструктур с несовпадающими самоорганизующимися параметрами решеток пленки и подложки. Для достижения этих целей широкое применение находит жидкофазная эпитаксия, выбор которой обусловлен многолетним опытом, накопленным по развитию этого метода для получения полупроводниковых соединений  $A^3B^5$ , в особенности систем GaAs–InAs, GaAs–Ga(In)P, создающих непрерывный твердый раствор InGaAsP (рис. 3) с широким набором значений ширины запрещенной зоны и физических свойств. С использованием этого материала были созданы источники и приемники оптического излучения для оптоволоконных линий связи, работающих в ближнем инфракрасном диапазоне 1,3—1,5 мкм. В частности, широкозонные твердые растворы InGaAsP нашли применение при создании лазеров и светодиодов видимого диапазона.

В большинстве случаев тонкие пленки InGaAsP выращивались методом ступенчатого охлаждения ( $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ ) при низких температурах (670°C) на подложках GaAs [35]. Несмотря на наличие разницы в

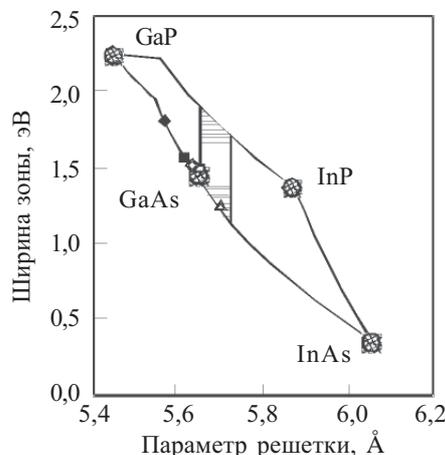


Рис. 3. Зависимость ширины запрещенной зоны в четверном твердом растворе InGaAsP от постоянной решетки [35]

параметрах решетки InAs и GaAs, эпитаксиальные слои InGaAs, выращенные на текстурированных подложках, можно рассматривать как свободные ненапряженные пленки [36]. Вместе с тем метод жидкостной эпитаксии имеет уникальные возможности и по части получения тонких слоев толщиной от 20 Å [37] и резких гетеропереходов, вплоть до получения квантовых точек.

Особенность этого метода в простоте и дешевизне, в возможности реализации разных сложных структур. Этот метод может сыграть решающую роль при создании безынджекционных излучателей, т. е. с внутренним усилением. Поэтому метод жидкостной эпитаксии широко используется для решения проблем улучшения параметров полупроводниковых структур, связанных с физико-технологическими задачами, такими как оптимизация состава, получение заданной концентрации носителей в активных областях, подавление перекрестного легирования между формируемыми областями структуры. Например, резкие переходы между слоями могут быть получены из раствора-расплава, охлаждаемого с уменьшающейся скоростью [38]. Специально разработанные устройства жидкостной эпитаксии [39] и предложенные способы [40] позволяют управлять составом выращиваемых индий- или алюминийсодержащих слоев полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  [41].

Жидкостная эпитаксия обладает такими широкими возможностями, что с ее помощью, управляя температурным режимом и составом раствора-расплава, можно получить тонкие эпитаксиальные слои на трудносмачиваемых текстурированных поверхностях [42], а также создавать выращенные текстуры в процессе эпитаксиального роста [43]. В работе [42, с. 133—139] авторы показывают возможности и технологические нюансы получения пленки  $nGaAs$  и гетерослоев толщиной 0,5—1 мкм AlGaAs на микрорельефных подложках  $n^+GaAs$  (рис. 4, а) при принудительном охлаждении раствора-расплава в сдвиговом графитовом контейнере — “пенального” типа. Здесь следует отметить, что рост слоев на текстурирован-

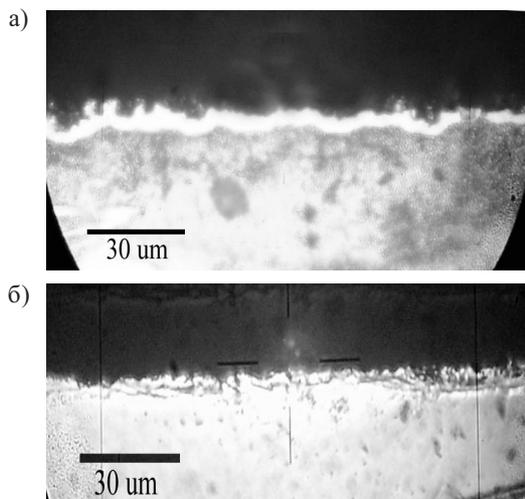


Рис. 4. Микрофотография скола подложки  $nGaAs$  с дендритообразной поверхностью (а) и с выращенным эпитаксиальным гетерослоем  $pAlGaAs$  (б)

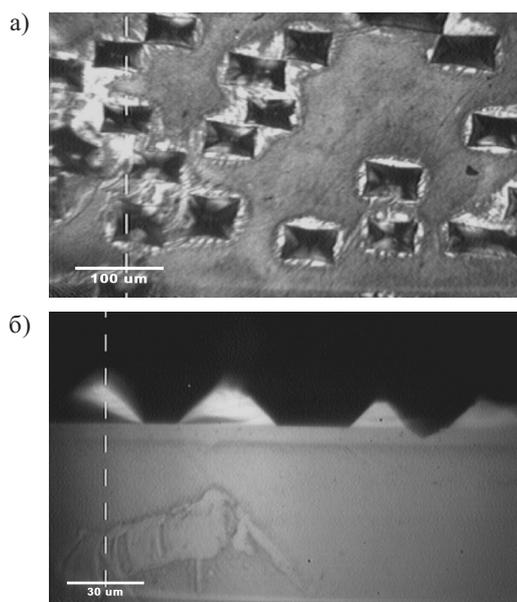


Рис. 5. Микрофотографии поверхности (а) и скола торца (б) выращенного из жидкой фазы поверхностного микрорельефа на структуре  $pAlGaAs$

ных поверхностях удалось получить за счет контролируемого управления степенью насыщения раствора-расплава.

Авторы работы [43] показали особенности применения технологии жидкостной эпитаксии при формировании  $nGaAs-pAlGaAs$ -структур с выращенным поверхностным микрорельефом. Как показано на рис. 5, поверхности структуры  $pAlGaAs$ , легированной различными примесями, покрыты так называемыми “звездочками” размерами порядка 4 мкм с соответствующими выступами, причем граница  $p-n$ -перехода является ровной.

Таким образом, анализ приведенных выше работ показывает, что ведутся интенсивные исследования по получению структур с квантовыми точками и ямами, со сверхрешетками на плоских, пористых и микрорельефных поверхностях кремния и арсенида галлия с применением различных технологий. Среди них можно выделить широкие возможности метода жидкостной эпитаксии как одной из технологий, представляющих интерес для создания волноводных излучателей с внутренним усилением на основе соединений  $A^3B^5$ .

### Заключение

За последние годы быстрыми темпами развивается лазерная физика, разрабатываются новые принципы преобразования электрического и оптического сигналов, технологии получения нано- и гетероструктур. Однако, независимо от технологии изготовления или конструкции волноводных излучателей, всем им свойственна температурная зависимость параметров, обусловленная высоким значением плотности рабочих токов. Одним из путей уменьшения порогового тока может быть создание физических условий, обеспечивающих процессы внутреннего усиления излучаемого сигнала, т. е. создание безынджекционного излучателя.

Наряду с технологией полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  быстрыми темпами развиваются методы формирования наноструктур на основе кремния. Получены лазеры с внутренним усилением на гетероструктурах GaAs/Al<sub>0,15</sub>Ga<sub>0,85</sub>As с квантовыми ямами и на с-Si, работающие при комнатной температуре, излучатели на транзисторах, различные оптические усилители. Метод жидкостной эпитаксии постоянно совершенствуется, открывая широкие возможности для создания структур нового поколения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Чео П. К. Волоконная оптика. Приборы и системы.— М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Оокоси Т. Оптоэлектроника и оптическая связь.— М.: Мир, 1988.
3. Забейайлов М. О., Томашук А. Л., Николин И. В. и др. Механизмы поглощения света в гамма-облученных заготовках для волоконных световодов на основе высококачественного кварцевого стекла // ПЖТФ.— 2005.— Т. 31, вып. 12.— С. 16—20.
4. Masuda H., Kawai S., Aida K. Wide-band and low-noise optical amplification using distributed Raman amplification and Er-doped fiber amplifier // OFC conference.— San Jose.— 1998.— PD7.
5. [http://www.radiator.net/radio\\_amator/optovolokno.php](http://www.radiator.net/radio_amator/optovolokno.php)
6. Дианов Е. М. Волоконно-оптические системы связи со спектральным уплотнением каналов // Вестник РАН.— 2000.— Т. 70, № 11.— С. 1010—1015.
7. Helm M. The realization of an efficient Si based light emitter or even a laser. // Microelectronics Journal.— 2005.— Vol. 36.— P. 957—962.
8. Lourenco M., Milosavljevic M., Gwilliam R. M. et al. Optimising dislocation-engineered silicon light-emitting diodes // Appl. Phys. Lett.— 2005.— Vol. 87.— P. 261108(1)—261108(3).
9. Schröter W., Hedemann H., Kveder V., Riedel F. Silicon light-emitting diodes based on dislocation-related // Ibid.— 2004.— Vol. 84.— P. 2106—2108.
10. Karimov A. V., Yodgorova D. M., Yakubov E. N. Research of structures corrugated photoreceiving surface // Journal Semiconductor Physics Quantum Electronics Optoelectronics.— 2004.— Vol. 7, N 4.— P. 378—382.
11. Муминов Р. А., Каримов А. В., Якубов Э. Н. Фотоприемники на основе арсенида галлия для инфракрасного диапазона // ДАН РУз.— 2004.— № 3.— С. 34—37.
12. Гордеев Н. Ю., Карачинский Л. Я., Новиков И. И. и др. Волноводные фотоприемники в системе InGaAsP/InP для измерения автокорреляционных функций излучения малой мощности на длине волны 1,55 мкм // ФТП.— 2002.— Т. 36, вып. 6.— С. 754—756.
13. Астахова А. П., Журтанов Б. Е., Именков А. Н. и др. Длинноволновые фотодиоды на основе двойной гетероструктуры n-GaSb/n-GaInAsSb/p-AlGaAsSb // ПЖТФ.— 2007.— Т. 33, вып. 1.— С. 23—29.
14. Зотова Н. В., Ильинская Н. Д., Карандашев С. А. и др. Флип-чип светодиоды на основе InAs с буферными слоями из InGaAsSb // ФТП.— 2006.— Т. 40, вып. 8.— С. 1004—1008.
15. Асрян Л. В., Сурис Р. А. Теория пороговых характеристик полупроводниковых лазеров на квантовых точках. Обзор // Там же.— 2004.— Т. 38, вып. 1.— С. 3—25.
16. Максимов М. В., Шерняков Ю. М., Крыжановская Н. В. и др. Мощные лазеры на квантовых точках InAs—InGaAs спектрального диапазона 1,5 мкм, выращенные на подложках GaAs // Там же.— 2004.— Т. 38, вып. 8.— С. 763—766.
17. Голикова Е. Г., Курешов В. А., Лешко А. Ю. и др. Свойства гетеролазеров на основе InGaAsP/InP с широким мезаполосковым контактом // Там же.— 2000.— Т. 34, вып. 7.— С. 886—890.
18. Булаев П. В., Капитонов В. А., Лютецкий А. В. и др. InGaAs/GaAs/AlGaAs-лазеры с широким контактом, полученные методом МОС-гидридной эпитаксии // Там же.— 2002.— Т. 36, вып. 9.— С. 1144—1148.
19. Лившиц Д. А., Егоров А. Ю., Кочнев И. В. и др. Рекордные мощностные характеристики лазеров на основе InGaAs/AlGaAs/GaAs-гетероструктур // Там же.— 2001.— Т. 35, вып. 3.— С. 380—384.
20. Скрынников Г. В., Зебря Г. Г., Пихтин Н. А. и др. О внутреннем квантовом выходе стимулированного излучения InGaAsP/InP-гетеролазеров ( $\lambda=1,55$  мкм) // Там же.— 2003.— Т. 37, вып. 2.— С. 243—248.
21. Слипченко С. О., Лютецкий А. В., Пихтин Н. А. и др. Низкопороговые лазерные диоды на основе AlInGaAs/InP гетероструктур (1,2—1,5 мкм) // ПЖТФ.— 2003.— Т. 29, вып. 3.— С. 65—73.
22. Сахаров А. В., Крестников И. Л., Малеев Н. А. и др. Вертикальные микрорезонаторы на 1,3 мкм с InAs/InGaAs-квантовыми точками и приборы на их основе // ФТП.— 2001.— Т. 35, вып. 7.— С. 889—893.
23. Дураев В. П. Источники оптического излучения // В кн.: Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы / Под ред. С. А. Дмитриева, Н. Н. Слепова.— М.: Connect, 2000.— С. 73—92.
24. Спирин А. А. Введение в технику волоконно-оптических сетей. <http://www.dlink.ru/technology/optic1.php>
25. <http://perst.issph.kiae.ru>. Т. 12, вып. 24. 30 декабря 2005 г. С. 1—8. Светоизлучающие кремниевые устройства.
26. Fasching G., Benz A., Unterrainer K. et al. Terahertz micro-cavity quantum-cascade lasers // Appl. Phys. Lett.— 2005.— Vol. 87.— P. 211112—211113.
27. Гельвич Э. А., Голант Е. И., Пашковский А. Б. Когерентный квантовый каскадный лазер на комбинации четных и нечетных уровней трехбарьерной структуры // ПЖТФ.— 2006.— Т. 32, вып. 5.— С. 13—18.
28. Оптические передатчики. (Обзор новостей, сентябрь—декабрь 2005) <http://livescience.ru/content/view/72/38/>
29. Mangolini L., Thimsen L. E., Kortshagen U. I made poly-disperse nanocrystals in the size range 5—50 nanometers // Nano Letters.— 2005.— Vol. 5.— P. 655—659.
30. Jiang Z. Y., Zhang Z., Friedrich K. Prediction on wear properties of polymer // J. Non-Crystalline Solids.— 2005.— Vol. 351.— P. 3325—3333.
31. Parretta A. Camera for recording light backscattered from textured photovoltaic samples // J. Opt. A: Pure Appl. Opt.— 2003.— Vol. 5.— P. 284—292.
32. Campbell P., Green M. A. Light trapping properties of pyramidally textured surfaces // Journal of Applied Physics.— 1987.— Vol. 62, N 1.— P. 243—249.
33. Chen Sh. A., Chuang K. R., Chao C. I., Lee H. T. Silicon radiation of white light // Syntetic Metals.— 1996.— Vol. 82.— P. 207—210.
34. Kittler M., Reiche M., Arguirov T. et al. Dislocation engineering for a silicon-based light emitter at 1.5  $\mu\text{m}$  // International Electron Devices Meeting.— 2005.— Digest.— P. 1005—1008.
35. Альперович В. Л., Болховитянов Ю. Б., Чикичев С. И. и др. Эпитаксиальный рост, электронные свойства и фотокатодные применения напряженных псевдоморфных слоев InGaAsP/GaAs // ФТП.— 2001.— Т. 35, вып. 9.— С. 1102—1110.
36. Солдатенков Ф. Ю., Улин В. П., Яковенко А. А. и др. Ненапряженные эпитаксиальные пленки In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As, полученные на пористом GaAs // ПЖТФ.— 1999.— Т. 25, вып. 21.— С. 15—20.
37. Алферов Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП.— 1998.— Т. 32, вып. 1.— С. 3—18.
38. Каримов А. В., Едгорова Д. М., Юлдашев Ш. Ш., Болтаева Ш. Ш. Физико-технологические основы получения резкого p-n-перехода // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА).— 2006.— № 4.— С. 59—60.
39. А. с. 913759 СССР. Устройство для жидкостной эпитаксии / А. В. Каримов, М. Мирзабаев, Ш. З. Миртурсунов, Н. Ф. Мухитдинова.— 1981.
40. А. с. 1037795 СССР. Способ эпитаксиального наращивания полупроводниковых соединений типа  $A^3B^5$  / А. В. Каримов, Ш. З. Миртурсунов.— 1983.
41. Yodgorova D. M., Karimov A. V. Features of growth epitaxial layers of firm solutions on a basis of indium's and aluminium's arsenide // Semiconductor Physics Quantum Electronics Optoelectronics.— 2004.— N 4.— P. 382—385.
42. Каримов А. В., Едгорова Д. М. Физические явления в арсенидгаллиевых структурах с микрослойным квазизопериодическим переходом.— Ташкент: Фан, 2005.
43. Yodgorova D. M., Karimov A. V. Formation of microrelief structures by epitaxial technology // RIO 5 "World Climate & Energy Event". Book of Proceedings.— 2005.— P. 97—102.