

# Быстродействие вертикально-излучающих AlGaAs-лазеров с активной средой на основе субмонослойных внедрений InAs

© А.М. Надточий<sup>†\*</sup>, С.А. Блохин<sup>†\*</sup>, А. Мутиг<sup>‡</sup>, Дж. Лотт<sup>\*</sup>, Н.Н. Леденцов<sup>†\*</sup>,  
Л.Я. Карачинский<sup>†\*</sup>, М.В. Максимов<sup>†\*</sup>, В.М. Устинов<sup>†</sup>, Д. Бимберг<sup>‡</sup>

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

<sup>\*</sup> Санкт-Петербургский академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий  
Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>‡</sup> Institut für Festkörperphysik, Technische Universität Berlin,  
PW5-2, D-10623 Berlin, Germany

<sup>•</sup> VI Systems GmbH,  
10623 Berlin, Germany

(Получена 9 ноября 2010 г. Принята к печати 15 ноября 2010 г.)

Показано, что применение субмонослойных внедрений InAs в качестве активной среды вертикально-излучающих AlGaAs-лазеров позволяет достигать резонансных частот до 17 ГГц. При этом одномодовые приборы с меньшим диаметром токовой апертуры позволяют достичь более высоких частот при меньших плотностях тока, чем многомодовые приборы с большим диаметром апертуры. Максимальная безошибочная скорость передачи данных в режиме прямой модуляции по NRZ-формату составляет 20 Гб/с и ограничивается паразитной частотой отсечки. Высокая резонансная частота свидетельствует о том, что при дальнейшей оптимизации конструкции прибора, направленной на снижение электрической емкости и сопротивлений, в лазерах на основе субмонослойных внедрений может быть реализована скорость передачи данных вплоть до 40 Гб/с или выше.

## 1. Введение

Оптическая технология приема–передачи информации прочно заняла ведущие позиции в мире информационных систем и является одной из самых быстро развивающихся областей науки и техники. Непрерывный рост объемов информации (в 10 раз за последние 5 лет) стимулирует научное сообщество к поиску новых путей по увеличению пропускной способности оптических межсоединений в системах передачи данных на короткие дистанции (так называемая последняя миля) [1]. Новый стандарт IEEE 802.3ba, обеспечивающий высокоскоростные соединения нового поколения для серверов и высокоскоростную коммутацию в ядре сетей Ethernet, также стимулирует переход на оптические межсоединения стандарта вместо морально устаревающих медных, обладающих меньшими пропускной способностью и энергоэффективностью. Широкие перспективы в этом направлении открывают вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) спектрального диапазона 850 нм [2]. В настоящее время оптические приемники (трансиверы) на основе ВИЛ обеспечивают скорости передачи данных до 10 Гб/с и востребованы как для внутрисистемных (технология LightPeak), так и для межсистемных (стандарты Infiniband, FC16G, FC32G, IEEE 802.3ba) соединений современных информационных и вычислительных сетей. Так, суперкомпьютер Power 7 содержит более 400 тысяч оптических модулей на основе ВИЛ и в ближайшие 5 лет, по оценке компании IBM, мощность суперкомпьютеров увеличится в 100 раз, что приведет к росту

количества оптических модулей в одной системе до 2.5 миллионов со скоростью передачи 26 Гб/с на канал, а далее до 50 миллионов модулей на систему. Необходимо отметить, что подходы, использующиеся в телекоммуникационных системах связи, неприменимы для оптической технологии передачи данных на короткие расстояния. В этой связи разработка сверхскоростных ВИЛ представляет собой важную и крайне актуальную задачу.

В качестве одного из ключевых подходов повышения быстродействия ВИЛ (в режиме прямой модуляции) можно отметить исследования по увеличению дифференциального усиления активной среды, что позволяет избежать повышения рабочих токов и сокращения времени жизни приборов. Так, применение напряженных квантовых ям (КЯ) InGaAs в качестве активной среды позволило преодолеть рубеж в 20 Гб/с [3,4]. В самом деле, добавление небольшого количества In в КЯ ведет к расщеплению зон тяжелых и легких дырок, что в свою очередь приводит к существенному уменьшению плотности состояний в валентной зоне, которые необходимо заполнить носителями заряда для получения генерации [5]. Альтернативным подходом увеличения усиления в материале может служить создание центров локализации для носителей заряда. Согласно [6], в материале с центрами локализации (квантовыми точками) преобладает экситонный механизм рекомбинации, что приводит к изменению свойств активной среды, в частности к повышению дифференциального усиления. Так, ВИЛ на основе субмонослойных квантовых точек показали возможность реализации безошибочной передачи данных на скорости 20 Гб/с вплоть до 120°C [7].

<sup>†</sup> E-mail: al.nadtochy@mail.ioffe.ru

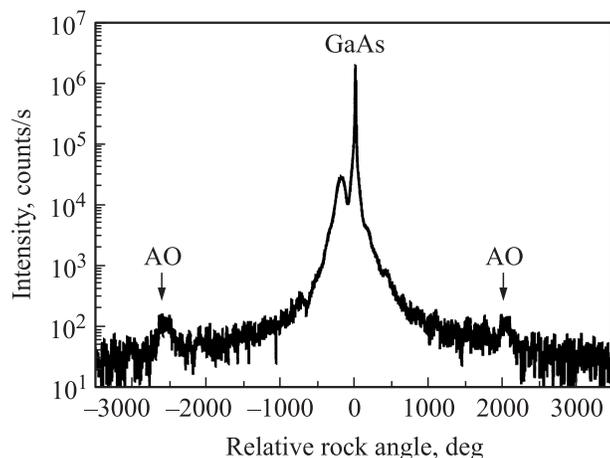
В настоящей работе исследуется возможность использования плотного массива напряженных InAs-внедрений (центров локализации) для реализации ВИЛ спектрального диапазона 850 нм в геометрии с легированными зеркалами. Предложенная активная область — это попытка совместить преимущества описанных выше подходов.

## 2. Оптические структуры

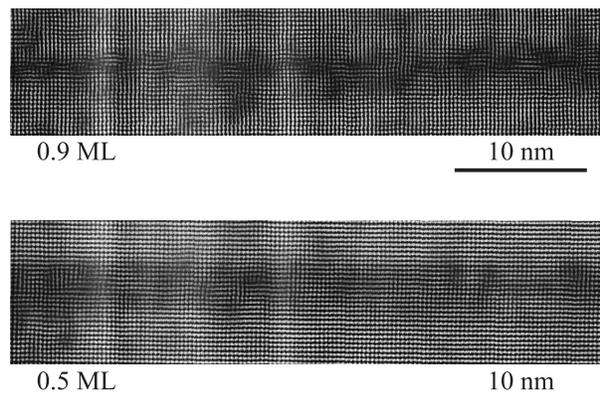
Исследуемые структуры были выращены на полуизолирующих подложках GaAs (001) методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на установке с твердотельными источниками Varian Gen II. Оптические структуры содержали три слоя субмонослойных (СМС) InAs-внедрений в матрице  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ . Один слой СМС внедрений формировался путем осаждения слоя InAs номинальной толщиной 0,5, 0,9 и 1,5 монослоя (МС/ML) в середину слоя GaAs толщиной 3,4 нм. Рост квантово-размерных слоев осуществлялся при температуре 510°C. Для предотвращения утечки неравновесных носителей при проведении оптических исследований в приповерхностную область и в область подложки активная область ограничивалась с обеих сторон барьерными слоями  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ . Слои  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  и  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  реализованы в рамках технологии „цифровых сплавов“ [8].

## 3. Рентгеновская дифракция

Для оценки реально полученных толщин слоев выращенные структуры были исследованы методом рентгеновской дифракции (РД) по стандартной двойной схеме ( $\text{CuK}_\alpha$ -излучение). На рис. 1 приведен спектр РД для одного из выращенных образцов. Узкий яркий пик соответствует дифракции на подложке GaAs, а дифракция на эпитаксиальных слоях образует плавную интерференционную картину. Маркерами АО обозначены пики,



**Рис. 1.** Спектр рентгеновской дифракции структуры с СМС внедрениями InAs номинальной толщины 0,5 МС.



**Рис. 2.** ПЭМВР-изображения структур с СМС внедрениями InAs номинальной толщины 0,9 и 0,5 МС. Инверсия контраста ярко выражена и свидетельствует о переходе состава через среднее состояние In 20%. Направление роста — вдоль вертикали.

соответствующие квантово-размерной области с СМС InAs-внедрениями. Согласно результатам моделирования в рамках простой модели (составы слоев фиксированы, а толщины варьируются), отклонение расчетных значений толщин эпитаксиальных слоев от проектных значений не превышает 10%.

## 4. Электронная микроскопия высокого разрешения

Для детального исследования морфологии квантово-размерных слоев был использован метод просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМВР). На рис. 2 представлены ПЭМВР-изображения в химически чувствительном контрасте, полученные для СМС InAs-внедрений с номинальной толщиной 0,9 и 0,5 МС. Градации яркости характеризуют среднее содержание In в квантово-размерных слоях: чем темнее область, тем выше концентрация In. Отметим существенную модуляцию состава с характерным латеральным размером  $\sim (2-3)$  нм для обеих структур. Для количественной оценки глубины модуляции состава был введен параметр (см. таблицу)

$$k = S/M, \quad (1)$$

где  $S$  и  $M$  — среднее квадратичное отклонение изменения интенсивности и средняя интенсивность рефлексов InAs вдоль СМС InAs-внедрений. Наибольшая глубина контраста наблюдается для внедрений с номинальной толщиной 0,5 МС. Увеличение количества осажденного InAs приводит к уменьшению контраста вследствие появления выраженного „смачивающего слоя“ InAs, на который накладываются „островковые“ модуляции.

Условия съемки (рис. 2) были подобраны таким образом, что при среднем содержании In  $\sim 20\%$  наблюдается инверсия контраста: светлая решетчатая структура, ха-

Величина параметра  $k$  в зависимости от номинальной толщины СМС InAs-внедрений

Номинальная толщина InAs, МС	Глубина модуляции состава, $k$
0.5	0.17
0.9	0.08
1.5	0.04

рактически кристаллическую решетку полупроводника, становится темной, а узлы — светлыми (визуально воспринимается как искажение строго периодической структуры). Инверсия контраста отчетливо наблюдается как для вертикального, так и для латерального направлений. Следовательно, можно предположить, что среднее содержание In в СМС InAs-внедрениях превосходит 20%, что свидетельствует о достаточно сильном локальном изменении зонной структуры и формировании относительно глубоких центров локализации.

## 5. Оптические свойства

На рис. 3 приведены результаты спектроскопии фотолуминесценции (ФЛ) для синтезированных образцов при комнатной температуре и возбуждении Nd : YAG-лазером (энергия кванта  $\sim 2.33$  эВ) с плотностью мощности возбуждения  $5 \text{ кВт/см}^2$ . Длинноволновый пик обусловлен ФЛ буферного слоя и подложки GaAs, так как глубина проникновения лазерного излучения в структуру составляет  $\sim 700$  нм. Коротковолновый пик соответствует излучению исследуемых квантово-размерных слоев InAs/GaAs в матрице AlGaAs, при этом с ростом номинальной толщины слоя InAs происходит длинноволновый сдвиг полосы излучения. Отметим, что уровни размерного квантования получившейся системы лежат

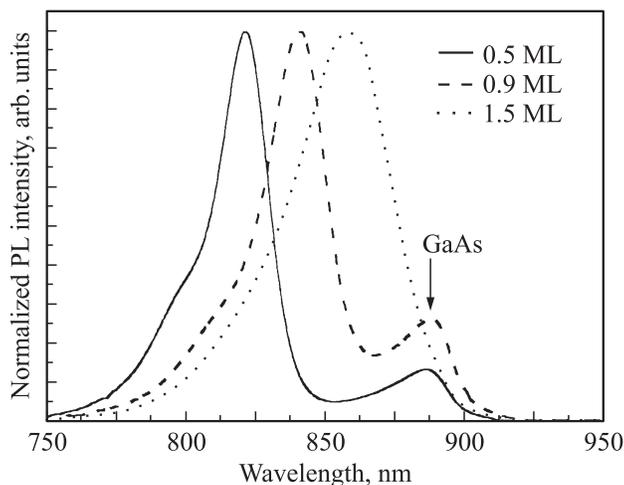


Рис. 3. Спектры фотолуминесценции (PL) структур с СМС InAs-внедрениями различной толщины при комнатной температуре и высокой плотности накачки.

глубже уровней квантовой ямы (КЯ) GaAs/AlGaAs. Согласно нашим теоретическим оценкам, внедрение InAs в КЯ GaAs/AlGaAs приводит к длинноволновому сдвигу излучения на 20–40 мэВ и повышает локализацию носителей заряда в предложенной квантово-размерной системе относительно состояний матрицы AlGaAs.

Подобные СМС внедрения активно исследовались методами электронной микроскопии и катодолуминесценции высокого спектрального и пространственного разрешения [9–11]. Было показано, что с помощью СМС осаждения InAs на поверхность Al(Ga)As можно создать плотный массив островков InAs высотой 1 МС. В этом случае захват носителей заряда на такие островки носит коррелированный (экситонный) характер. Это приводит к экситонному (одночастичному) механизму рекомбинации и соответственно к увеличению дифференциального усиления до 2 раз по сравнению со случаем некоррелированного захвата [6]. Согласно работе [11], энергия связи экситона в таких структурах возрастает до 40 мэВ, что приводит к величине критической концентрации свободных носителей, при которой начинаются эффекты экранирования,  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Это означает, что в таких структурах коррелированный захват носителей заряда в СМС InAs-внедрения, обусловленный кулоновским взаимодействием, будет иметь место даже в условиях лазерной генерации и при комнатной температуре. Следовательно, можно ожидать увеличения дифференциального усиления в структурах с СМС InAs-внедрениями по сравнению с традиционными КЯ GaAs/AlGaAs. Таким образом, квантово-размерная система на основе СМС InAs-внедрений с номинальной толщиной 0.5 МС представляется наиболее оптимальной активной средой для апробирования предложенной концепции.

## 6. Конструкция вертикально-излучающего лазера

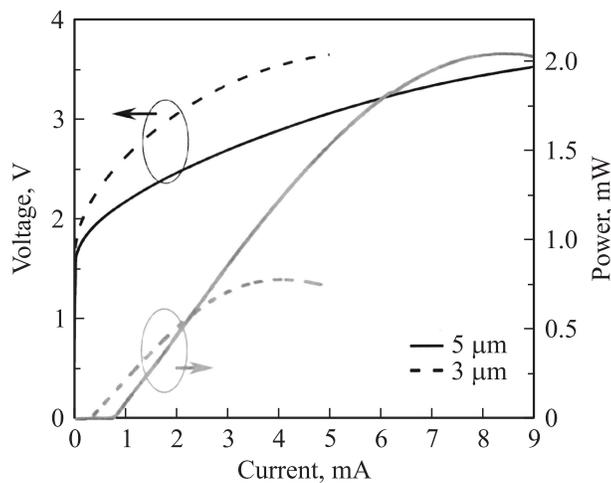
Структуры для ВИЛ были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на легированных Be подложках GaAs с ориентацией (001) в МПЭ-установке Varian Gen II. Эпитаксиальная структура состоит из нижнего распределенного брэгговского отражателя (РБО), содержащего 39 пар четвертьволновых слоев  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  с проводимостью  $p$ -типа, оптического резонатора AlGaAs и верхнего РБО, содержащего 25 пар четвертьволновых слоев  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  с проводимостью  $n$ -типа. В качестве легирующих примесей в слоях  $p$ - и  $n$ -типа проводимости использовались Be и Si соответственно. Для снижения омического сопротивления и высоты потенциальных барьеров на интерфейсах использовались линейные „дифровые“ градиенты толщиной 20 нм с модулированным профилем легирования. Оптический резонатор содержит активную область на основе трех слоев СМС InAs-внедрений (номинальная толщина 0.5 МС), помещенных в область максимума оптического поля, апертурный слой  $p$ -(AlAs/Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As), помещенный

в минимум оптического поля для минимизации дифракционных потерь, а также слой  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  с низким коэффициентом преломления для смещения максимума паразитной волноводной моды и уменьшения ее перекрытия с активной областью [12]. Толщины и состав слоев структуры были рассчитаны для получения резонансной длины волны 840 нм.

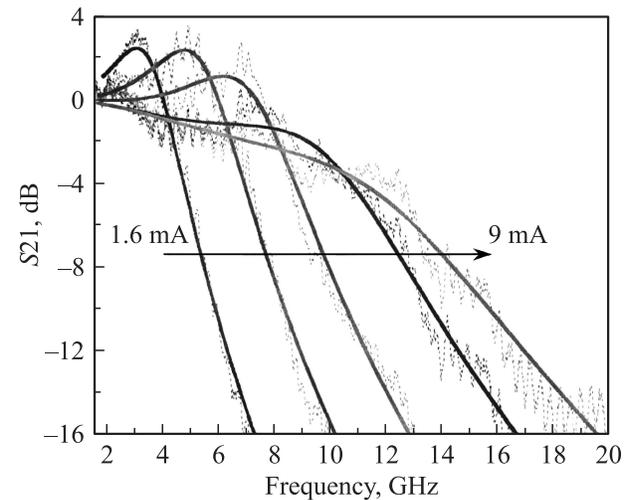
Для тестирования приборов на пластине были изготовлены экспериментальные образцы лазеров в высокочастотной геометрии с конфигурацией контактных площадок типа земля–источник–земля (GSG). Методом латерального селективного окисления слоя  $\text{AlAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  формировались токовые апертюры. Омические контакты к  $n$ - и  $p$ -слоям формировались напылением и вжиганием слоев металлизации  $\text{Ni}/\text{AuGe}/\text{Au}$  и  $\text{Ti}/\text{Pt}/\text{Au}$  соответственно. С целью улучшения высокочастотных характеристик для планаризации контактов использовался диэлектрик с низкой диэлектрической проницаемостью (bisbenzocyclobutene).

## 7. Приборные характеристики

На рис. 4 представлены типичные вольт-амперные и мощностные характеристики лазеров с токовыми апертюрами 3 и 5 мкм. В приборе с диаметром 3 мкм реализуется одномодовая (подавление боковых мод более 30 дБ) лазерная генерация вблизи 835 нм в непрерывном режиме при комнатной температуре с пороговым током 0,35 мА и максимальной выходной мощностью до 0,8 мВт. Относительно низкая дифференциальная эффективность (0,25–0,3 Вт/А), по-видимому, обусловлена высоким коэффициентом отражения верхнего зеркала. Увеличение размера токовой апертюры ведет не только к увеличению выходной мощности (до 2 мВт) и повышению порогового тока ( $\sim 0,85$  мА), но и к появ-



**Рис. 4.** Ватт-амперные и вольт-амперные характеристики одномодовых (штриховая линия) и многомодовых (сплошная линия) приборов с токовой апертюрой 3 и 5 мкм в непрерывном режиме при комнатной температуре.



**Рис. 5.** Экспериментальные (пунктирные линии) и расчетные (сплошные линии) кривые АЧХ многомодового ВИЛ для различных рабочих токов.

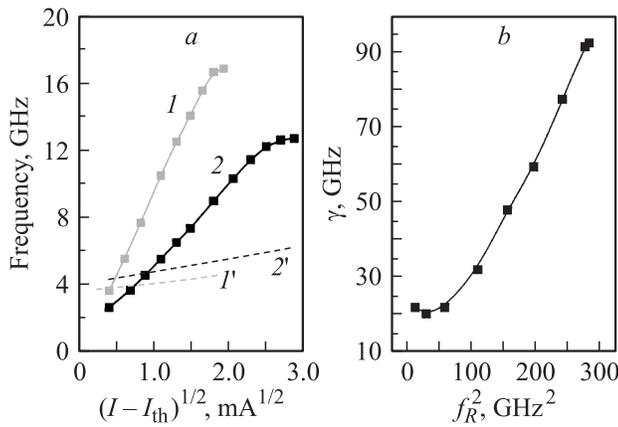
лению мод высокого порядка в модовом составе (многомодовая генерация). Повышенные дифференциальные сопротивления приборов (350 Ом для апертюры 3 мкм и 150 Ом для 5 мкм) связаны с накоплением Ве на гетерограницах вследствие быстрой диффузии.

Методом малосигнального частотного анализа амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и отражения сигнала (параметры  $S_{21}$  и  $S_{11}$ ) были проведены исследования высокочастотных свойств реализованных приборов. На рис. 5 приведены экспериментальные кривые АЧХ для многомодового ВИЛ при различных рабочих токах. Для экстраполяции ключевых параметров лазера была применена модель отклика лазера на синусоидальную модуляцию тока накачки с некоторой частотой  $f$  (при заданном рабочем токе) [13]:

$$H(f) \propto \frac{f_R^2}{[f_R^2 - f^2 + j\gamma(f/2\pi)][1 + j(f/f_P)]},$$

где  $f_R$  — резонансная частота,  $\gamma$  — коэффициент затухания (damping),  $f_P$  — частота среза паразитного электрического фильтра нижних частот (ФНЧ), образованного электрической емкостью и сопротивлением прибора. Отметим, что экспериментальные данные хорошо согласуются с данными моделирования АЧХ в рамках рассматриваемой модели.

Согласно рис. 6, а, в одномодовых лазерах резонансная частота достигает величины 17 ГГц, тогда как для многомодовых лазеров частота не превышает 13 ГГц. Дело в том, что увеличение апертюры ведет к увеличению объема моды и требует более высокого уровня дифференциального усиления, однако более высокие рабочие токи ведут к сильному разогреву приборов и преждевременному падению усиления. Если основным фактором, лимитирующим быстродействие лазера, являются тепловые эффекты, то максимально достижимая частота модуляции определяется



**Рис. 6.** *a* — эволюция резонансной частоты ( $I, 2$ ) и частоты отсечки ( $I', 2'$ ) от корня из разности рабочего тока ( $I$ ) и порогового ( $I_{th}$ ) для одномодового ( $I, I'$ ) и многомодового ( $2, 2'$ ) приборов. *b* — зависимость коэффициента затухания от квадрата резонансной частоты для многомодового прибора.

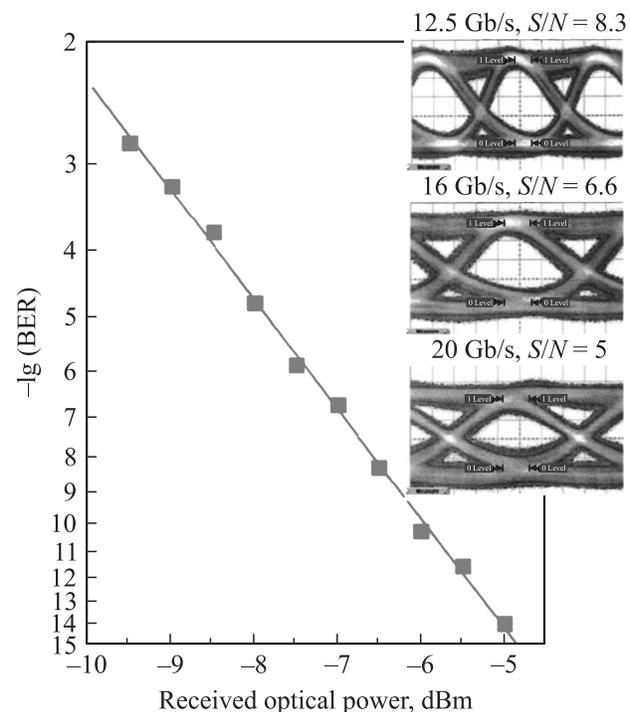
максимальной величиной резонансной частоты  $f_{R \max}$ :  $f_{3dB, thermal} \approx \sqrt{1 + \sqrt{2}} f_{R \max} \approx 1.55 f_{R \max}$ . Тогда, согласно эмпирической зависимости для скорости передачи данных ( $F \approx 1.55 f_{3dB}$ ), для достижения скорости передачи данных 40 Гб/с достаточно обеспечить резонансные частоты  $\sim (17-18)$  ГГц.

С другой стороны, пренебрегая тепловыми эффектами и ФНЧ, можно оперировать более фундаментальным параметром, так называемым  $K$ -фактором, который описывает зависимость роста коэффициента затухания с квадратом резонансной частоты [14]. Предельная теоретическая ширина полосы модуляции определяется как  $f_{3dB, damping} = 2\pi\sqrt{2}/K$ . Согласно рис. 6, *b*, коэффициент затухания линейно зависит от квадрата резонансной частоты при высоких частотах. Оценка  $K$ -фактора дает величину  $\sim (0.33-0.38)$  нс, что соответствует максимальной полосе модуляции  $\sim 27$  ГГц и скорости передачи данных  $\sim 42$  Гб/с.

Однако в реализованных ВИЛ паразитная частота отсечки лежит в диапазоне 4–6 ГГц, что в первую очередь и лимитирует экспериментальную ширину полосы модуляции приборов на уровне 10–11 ГГц. Согласно моделированию результатов измерений параметра  $S_{11}$  в рамках эквивалентной модели ВИЛ [15], несмотря на относительно высокие сопротивления РБО ( $\sim 60$  Ом), основной вклад в низкую величину частоты отсечки ФНЧ дает суммарная емкость прибора  $\sim 460$  фФ. Оценки показывают, что только уменьшение емкости в 3–4 раза за счет увеличения толщины  $i$ -области (нелегированной части резонатора) и оксидной апертуры приведет к увеличению частоты отсечки до 20–25 ГГц. Дополнительная оптимизация профиля легирования и применение углерода в качестве примеси для  $p$ -легирования позволят уменьшить влияние тепловых эффектов.

Финальным этапом анализа быстродействия разработанных ВИЛ стали исследования работы приборов в режиме прямой модуляции по амплитудному формату

NRZ (без возвращения к нулю). Вследствие ограничений измерительной системы анализировались более мощные многомодовые приборы. С помощью генератора SHF 12100В и высокочастотного усилителя формировалась псевдослучайная последовательность битов (PRBS) длиной  $(2^7-1)$  и амплитудой модуляции  $\sim 1$  В. Затем высокочастотный сигнал объединялся с заданной рабочей точкой (в данном случае ток 8 мА) и подавался на лазер через высокочастотный GSG-разъем. Лазерное излучение ВИЛ вводилось в многомодовое оптоволоконно OM3 (ядро 62.5 мкм) с эффективностью не менее 50%, регистрировалось с помощью GaAs- $p-i-n$ -фотодиода с шириной полосы пропускания 30 ГГц, усиливалось на 20 дБ и подавалось либо на осциллоскоп Agilent 86100С для регистрации глаз-диаграмм (eye diagram), либо на анализатор ошибок SHF 11100В для изучения качества передачи информации. Согласно вставке к рис. 7, с увеличением частоты модуляции в глаз-диаграмме область устойчивого разделения нуля и единицы сужается, однако во всех случаях форма глаза симметричная, а отношение сигнал/шум удовлетворяет минимально допустимому значению ( $> 4$ ), необходимому для применения в коммерческих системах передачи данных. На рис. 7 представлена вероятность появления ошибок в оптическом канале в зависимости от уровня регистрируемой мощности при скорости передачи данных 20 Гб/с. Очевидно, что при средней оптической



**Рис. 7.** Зависимость вероятности появления ошибок BER от регистрируемой оптической мощности при скорости передачи 20 Гб/с и комнатной температуре для многомодового прибора. На вставке — глаз-диаграммы и соотношение сигнал-шум  $S/N$  при разных скоростях передачи данных и комнатной температуре для многомодового прибора.

мощности -5 дБм оптический канал связи обеспечивает безошибочную передачу данных (вероятность появления ошибок BER < 10<sup>-12</sup>), а зависимость вероятности появления ошибок от уровня оптических потерь хорошо аппроксимируется прямой, что исключает занижение вероятности ошибок из-за кросстока передающего и приемного каналов тестирующей системы.

## 8. Заключение

В работе был проведен анализ принципиальной возможности реализации вертикально-излучающих лазеров на основе напряженных слоев с субмонослойными InAs-внедрениями. Электронная микроскопия выявила сильную модуляцию состава с характерным латеральным размером ~ (2–3) нм при среднем содержании In ~ 20%, что свидетельствует о достаточно сильном локальном изменении зонной структуры. Согласно оптическим исследованиям, внедрение InAs в квантоворазмерную систему GaAs/AlGaAs приводит к длинноволновому сдвигу излучения на 20–40 мЭВ и к формированию относительно глубоких центров локализации носителей заряда.

Малосигнальный частотный анализ ВИЛ на основе СМС InAs-внедрений показал принципиальную возможность получения резонансных частот более 17 ГГц, что соответствует предельной теоретической ширине полосы модуляции прибора до 27 ГГц. Продемонстрирована цифровая оптическая передача данных по NRZ-формату с коэффициентом ошибок BER < 10<sup>-12</sup> на скоростях не менее 20 Гб/с. Увеличение частоты отсечки за счет уменьшения емкости прибора позволит поднять скорости передачи данных вплоть до 40 Гб/с.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2009–2013“, Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере и программы президиума РАН № 27 „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“.

## Список литературы

- [1] D. Collins, N. Li, D. Kuchta, F. Doany, C. Schow, C. Helms, L. Yang. Proc. SPIE, **6908**-09 (2008).
- [2] K. Iga. Jpn. J. Appl. Phys., **47**, 1 (2008).
- [3] P. Westbergh, J. Gustavsson, A. Haglund, H. Sunnerud, A. Larsson. Electron. Lett., **44**, 907 (2008).
- [4] Y.-C. Chang, C. Wang, L. Coldren. Electron. Lett., **43**, 1022 (2007).
- [5] S.W. Corzine, R.H. Yan, L.A. Coldren. Appl. Phys. Lett., **57**, 2835 (1990).
- [6] M. Grundmann, D. Bimberg. Phys. Status Solidi A, **164**, 297 (1997).
- [7] A. Mutig, G. Fiol, P. Moser, D. Arsenijevic, V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, S.S. Mikhrin, I.L. Krestnikov, D.A. Livshits, A.R. Kovsh, F. Hopfer, D. Bimberg. Electron. Lett., **44**, 1345 (2008).

- [8] M. Sundaram, A. Wixforth, R.S. Geels, A.C. Gossard, J.H. English. J. Vac. Sci. Technol. B, **9**, 1524 (1991).
- [9] I.L. Krestnikov, M. Strassburg, M. Caesar, A. Hoffman, U.W. Pohl, D. Bimberg, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, D. Litvinov, A. Rosenauer, D. Gerthsen. Phys. Rev. B, **60**, 8695 (1999).
- [10] N.N. Ledentsov, A.F. Tsatsul'nikov, A.Yu. Egorov, P.S. Kop'ev, A.R. Kovsh, M.V. Maximov, V.M. Ustinov, B.V. Volovik, A.E. Zhukov, Zh.I. Alferov, I.L. Krestnikov, D. Bimberg, A. Hoffmann. Appl. Phys. Lett., **74**, 161 (1999).
- [11] M.V. Belousov, N.N. Ledentsov, M.V. Maximov, P.D. Wang, I.N. Yasyevich, N.N. Faleev, I.A. Kozin, V.M. Ustinov, P.S. Kop'ev, C.M. Sotomayor Torres. Phys. Rev. B, **51**, 14 346 (1995).
- [12] N.N. Ledentsov, F. Hopfer, A. Mutig, V.A. Shchukin, A.V. Savel'ev, G. Fiol, M. Kuntz, V.A. Haisler, T. Warming, E. Stock, S.S. Mikhrin, A.R. Kovsh, C. Bornholdt, A. Lenz, H. Eisele, M. Dahne, N.D. Zakharov, P. Werner, D. Bimberg. Proc. SPIE, **6468**-47 (2007).
- [13] J.E. Bowers. Sol. St. Electron., **30**, 1 (1987).
- [14] L.A. Coldren, S.W. Corzine. *Diode lasers and photonic integrated circuits* (Wiley, 1995).
- [15] Y. Ou, J.S. Gustavsson, P. Westbergh, A. Haglund, A. Larsson, A. Joel. IEEE Photon. Technol. Lett., **21**, 1840 (2009).

Редактор Л.В. Шаронова

## Dynamic properties of vertical cavity surface emitting AlGaAs lasers with active region based on submonolayer InAs insertions

A.M. Nadtochiy<sup>†\*</sup>, S.A. Blokhin<sup>†\*</sup>, A. Mutig<sup>‡</sup>, J.A. Lott<sup>•</sup>, N.N. Ledentsov<sup>†•</sup>, L.Ya. Karachinskiy<sup>†\*</sup>, M.V. Maximov<sup>†\*</sup>, V.M. Ustinov<sup>†</sup>, D. Bimber<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

<sup>\*</sup> St. Petersburg Academic University — Nanotechnology Research and Education Centre, 195220 St. Petersburg, Russia

<sup>‡</sup> Institut für Festkörperphysik, Technische Universität Berlin, PW 5-2, D-10623 Berlin, Germany

<sup>•</sup> VI Systems GmbH, 10623 Berlin, Germany

**Abstract** It is shown that the use of submonolayer InAs insertions as an active region of AlGaAs vertical cavity surface emitting lasers allows to reach resonance frequency of 17 GHz. Under low current density singlemode devices with small current aperture exhibit higher frequencies than large aperture multimode ones. The rate of error-free data transmission in NRZ-format was limited by electrical parasitics and measured to be 20 Gb/s. High value of resonance frequency implies that decrease of parasitic capacitance and resistance by optimization of device design permits to realize data transmission rate of 40 Gb/s or higher for vertical cavity surface emitting lasers based on submonolayer insertions.