

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩИЕ ЛАЗЕРЫ СО СКОРОСТЬЮ ПЕРЕДАЧИ ДО 40 Гбит/с

часть 2

С.Блохин, к.ф.-м.н., Л.Карачинский, к.ф.-м.н., А.Кузьменков, к.ф.-м.н.,
Н.Малеев, к.т.н., «Коннектор Оптикс» (Санкт-Петербург),
ФТИ им.А.Ф.Иоффе (Санкт-Петербург)

В первой части обзора были исследованы частотные характеристики полупроводниковых вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) и факторы, лимитирующие их быстродействие. Продолжая эту тему, авторы предлагают конструкторские и технологические решения повышения быстродействия ВИЛ вплоть до 40 Гбит/с, показав принципиальную возможность реализации безошибочной (коэффициент ошибок BER <math><10^{-12}</math>) оптической передачи данных вплоть до скоростей 38 Гбит/с.

Время жизни фотонов в резонаторе определяется главным образом выходными оптическими потерями (потери на зеркалах). Однако малое время жизни фотонов означает, что оптические потери на выход велики и, следовательно, требуется высокая плотность носителей в активной области для достижения условия лазерной генерации. Поскольку усиление логарифмически зависит от плотности носителей, то более высокие плотности носителей соответствуют все меньшей величине дифференциального усиления. Более того, увеличение уровня оптических потерь ведет к росту порогового тока, и для достижения заданной плотности фотонов уже необходим более высокий уровень тока накачки, что, в свою очередь, ведет к существенному разогреву лазера, уменьшению усиления активной области и ухудшению деградационной стабильности прибора. В этой связи для повышения быстродействия необходим поиск компромисса между выходной оптической мощностью и пороговым током.

* Часть 1 см.: Фотоника, 2010, №5.

Следует учесть, что даже если нам удастся существенно поднять резонансную частоту за счет увеличения плотности фотонов, предельная полоса модуляции будет ограничена затуханием. Следовательно, повышение быстродействия «идеального» лазера может быть достигнуто в основном за счет уменьшения времени жизни фотонов и увеличения дифференциального усиления.

На относительно высоких частотах (более 2–5 ГГц) уже нельзя пренебрегать элементами электрической эквивалентной схемы, поскольку паразитные емкости и сопротивления фактически формируют RC-фильтр низких частот, который шунтирует модулирующий ток параллельно активной области на частотах, превышающих полосу пропускания RC-фильтра. Поэтому для расширения полосы модуляции лазера необходима минимизация величин паразитных элементов.

Факторы, лимитирующие быстродействие ВИЛ (см. 1-ю часть обзора), взаимосвязаны между собой, поэтому на практике надо решить систему взаимосвязанных задач:

- увеличить дифференциальное усиление активной среды;
- понизить уровень внутренних оптических потерь;
- повысить выходную мощность;
- уменьшить последовательное и тепловое сопротивление;
- минимизировать паразитную емкость лазера.

Известно, что сравнительно низкое дифференциальное усиление активной области в спектральном диапазоне 850 нм для структур на основе GaAs квантовых ям (КЯ) связано с большой плотностью состояний в валентной зоне, тогда как введение механических напряжений (например, за счет внедрения некоторого количества In) в активную область ведет к расщеплению зон для тяжелой и легкой дырки, что в совокупности с меньшей толщиной КЯ обеспечивает более высокое дифференциальное усиление [15]. В то же время быстродействие ВИЛ на InGaAs КЯ обычно лимитировано затуханием дифференциального усиления, а не частотой отсечки RC-фильтра, образуемого паразитными элементами, определяемыми конструкцией при-

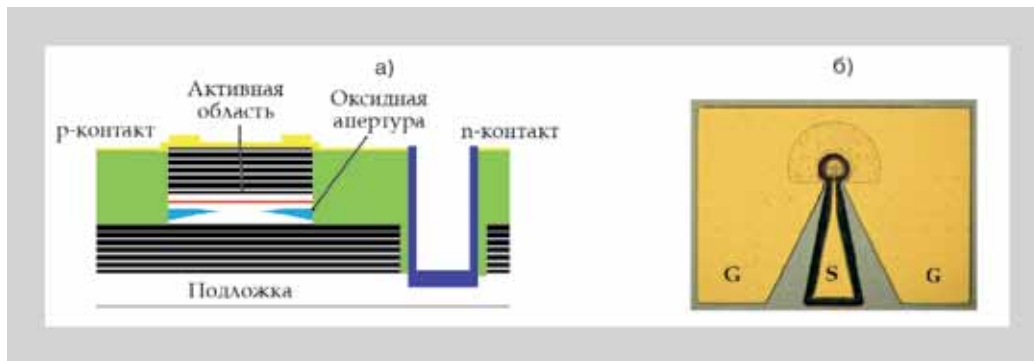


Рис. 4. Оптимизированная конструкция быстродействующего ВИЛ-лазера: а – схематическое поперечное сечение; б – фотография кристалла ВИЛ-лазера в высокочастотной копланарной геометрии

бора [16]. В данном контексте нульмерные наногетероструктуры, так называемые квантовые точки, обладающие экситонным механизмом усиления и дискретным спектром состояний [17], представляются идеальным кандидатом для активной области сверхскоростных ВИЛ-лазеров. Однако применение In(Ga)As-квантовых точек (КТ), выращенных в режиме роста Странски-Крастанов (СК-КТ), сопряжено с рядом внутренних проблем. Так, низкое усиление и большое неоднородное уширение приводит к быстрому насыщению усиления с током накачки [18]. Тогда как большая плотность квантовых состояний в прилегающих областях по сравнению с плотностью состояний СК-КТ ведет к сублинейному росту инверсной заселенности в СК-КТ с плотностью тока и в итоге уменьшает дифференциальное усиление

активной области [19]. Указанные механизмы насыщения усиления приводят к необходимости использования высокодобротных оптических резонаторов при реализации ВИЛ на основе СК-КТ [20], а также лимитируют динамические характеристики структур с СК-КТ [21].

Решение проблемы может быть найдено за счет применения в качестве активной области ВИЛ In(Al,Ga)As-наногетероструктур, сформированных методом молекулярно-пучковой эпитаксии или эпитаксии из паров металлоорганических соединений в режиме субмонослойного осаждения, позволяющем обеспечить формирование гетероструктур с пространственной модуляцией как по составу, так и по толщине квантово-размерных слоев. Ранее было показано, что такие структуры перспективны для создания ВИЛ спектрального диапазона 980 нм с высокими характеристиками [22].

На практике для достижения высокого быстродействия необходима не только тщательная оптимизация параметров активной области, эпитаксиальной гетероструктуры в целом, а также топологии кристалла ВИЛ. Усилия, предпринятые коллективом исследователей из компании VI Systems GmbH, Технического университета (Берлин) и ФТИ им. А.Ф.Иоффе позволили реализовать ВИЛ спектрального диапазона 850 нм с рекордным быстродействием в режиме прямой токовой модуляции [23, 24].

Оптимизация параметров эпитаксиальных структур ВИЛ велась в направлении выбора оптимальной спектральной расстройки между максимумом спектра фотолюминесценции активной области и резонансной длиной волны вертикального микро-

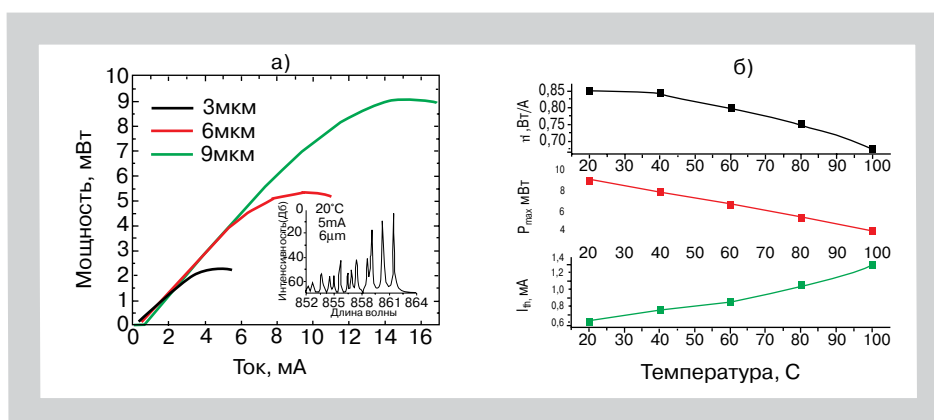


Рис. 5. Характеристики ВИЛ: а – ватт-амперные характеристики ВИЛ с диаметром токовой апертуры 3, 6 и 9 мкм, измеренные при температуре 20°C. На вставке – спектр лазерной генерации ВИЛ-лазера с диаметром токовой апертуры 6 мкм при рабочем токе 5 мА; б – эволюция величины порогового тока (I_{th}), дифференциальной эффективности (η) и максимальной выходной оптической мощности (P_{max}) с температурой для ВИЛ с диаметром токовой апертуры 9 мкм

резонатора; комплексной оптимизации параметров распределенных брэгговских отражателей (РБО) для одновременного обеспечения низкого последовательного сопротивления и приемлемого уровня внутренних оптических потерь; подавления паразитных волноводных мод и уменьшения паразитной емкости лазера. Структуры выращивались методами молекулярно-пучковой эпитаксии или газофазной эпитаксии из паров металлоорганических соединений.

Базовая конструкция исследованных приборов схематически представлена на рис.4. Ее основной особенностью является размещение контактной площадки анода на толстом слое диэлектрического материала с низким значением диэлектрической проницаемости (см. рис.4а), что обеспечивает малое значение паразитной емкости. В то же время конструкция предусматривает расположение контактных площадок положительных и отрицательных выводов, реализованных в компланарной геометрии (ground-source-ground – GSG), на одном уровне по высоте, что важно для возможности тестирования приборов непосредственно на пластине и оптимизации монтажа кристаллов (см. рис.4б).

Выбор геометрии мезаструктур и диаметра селективно-окисленной токовой апертуры является результатом определенного компромисса. Так, с точки зрения уменьшения паразитных ем-

костей нужны малые размеры мезаструктур и большая глубина травления (вплоть до подложки), однако с точки зрения оптимального отвода выделяемого тепла нужны большие размеры мез и мелкое травление. В свою очередь, малый размер токовой апертуры позволяет увеличить плотность фотонов и уменьшить значение порогового тока, но в то же время увеличивает плотность тока и лимитирует максимальную выходную мощность.

На рис.5а приведены статические характеристики для изготовленных ВИА-лазеров с различным диаметром токовой апертуры. Пороговый ток составляет 220, 330 и 620 мкА для диаметра токовой апертуры 3, 6 и 9 мкм, соответственно. Максимальная дифференциальная эффективность для всех приборов достигает 0,85 Вт/А, что соответствует квантовой эффективности ~60%. Выходная оптическая мощность достигает величин 2,5 и 9 мВт для апертур 3, 6 и 9 мкм, соответственно. Дифференциальное сопротивление приборов в районе рабочих токов лежит в диапазоне 90–110 Ом для приборов с диаметром апертуры 6–9 мкм, тогда как для приборов с меньшими размерами токовой апертуры сопротивление заметно выше и достигает 200 Ом. С точки зрения практического использования, наибольший интерес представляют многомодовые ВИА-лазеры с диаметром токовой апертуры более 5 мкм, так как для них харак-

терна более высокая деградационная стабильность в совокупности с приемлемыми рабочими характеристиками.

Следует отметить, что исследованные многомодовые ВИА демонстрируют высокую температурную стабильность рабочих характеристик (рис.5б). В частности, нагрев лазера до 100°C приводит к падению

мощности всего в два раза, что критично для достижения высокого быстродействия ВИА-лазеров. При этом лазерная генерация наблюдается в требуемом спектральном диапазоне 840–870 нм.

Исследования динамических характеристик изготовленных ВИА в режиме малосигнальной модуляции показали, что ширина полосы частот модуляции по уровню спада -3 дБ уже при плотностях тока менее 8 кА/см² достигает величины 18 ГГц и растет с ростом тока накачки вплоть до 20 ГГц. При этом частота отсечки, обусловленная влиянием паразитных элементов эквивалентной схемы ВИА, составляет ~26–27 ГГц.

Как известно, критерием сохранности информации в цифровой системе связи является коэффициент ошибок BER (Bit Error Ratio), т.е. отношение количества неправильно распознанных битов к общему числу передаваемых битов. В системах связи LAN/SAN для передачи данных по коммуникационному протоколу FC при использовании коротких пакетов битов коэффициент ошибок BER должен быть ниже 10⁻¹². Поскольку BER является статистически средней величиной, то для ее оценки необходима последовательность с большим числом битов. Для реализации оптической связи в режиме прямой токовой модуляции ВИА-лазера наиболее простым вариантом представляется модуляция рабочего напряжения на лазере при выставленной рабочей точке по току I₀. На рис.6 схематически изображена экспериментальная установка, использованная для анализа оптической передачи информации в формате NRZ.

В качестве источника тактовой частоты использовался генератор сигналов Agilent E8247C. PRBS-последовательность длиной (27-1) битов формировалась в PRBS-генераторе SHF 12100B с временем нарастания сигнала 8 пс. Далее уровень сигнала модуляции увеличивался до необходимой амплитуды V_{pp} с помощью высокочастотных усилителей (время нарастания сигнала 6 пс). Затем вы-

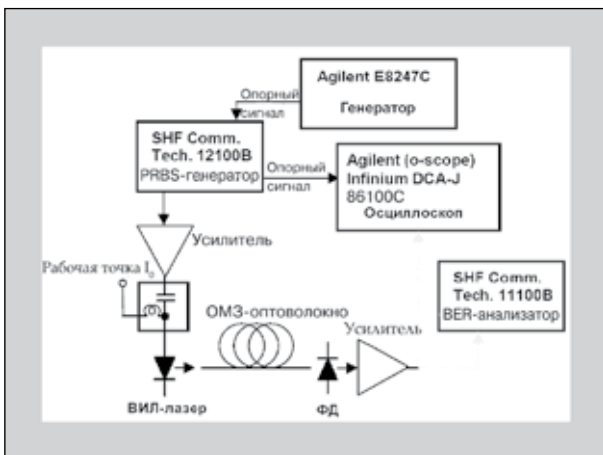


Рис.6. Схематическое изображение установки высокочастотной модуляции в режиме больших сигналов для реализации оптической связи и анализа качества передачи информации по формату NRZ

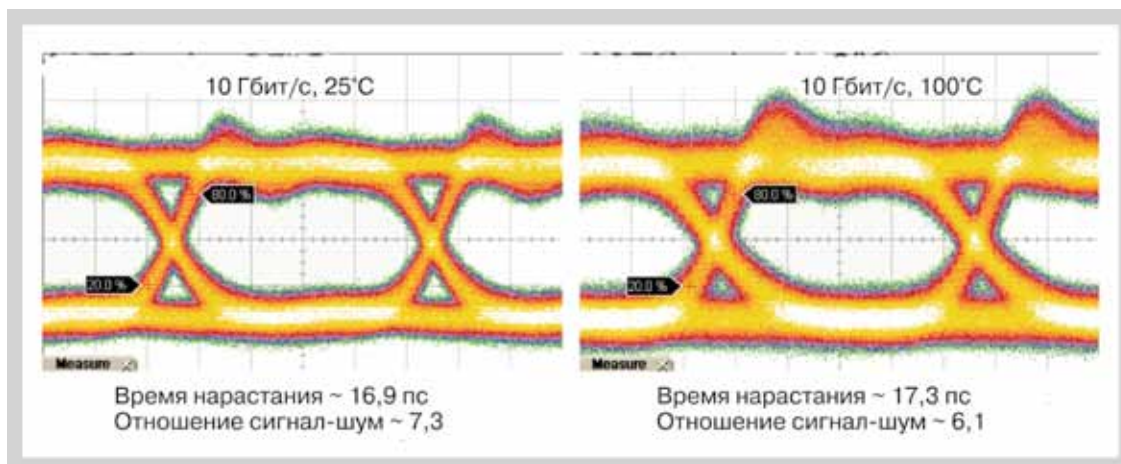


Рис.7. Оптические глаз-диаграммы на скорости 10 Гбит/с для ВИЛ-лазера с диаметром токовой апертуры 6 мкм при разных температурах

сокочастотный сигнал объединялся с постоянным сигналом, определяющим рабочую точку, и подавался на кристалл ВИЛ-лазера через высокочастотный GSG-разъем. Лазерное излучение с поверхности ВИЛ-лазера вводилось в ОМЗ многомодовое оптоволокно (диаметр сердечни-

ка 62,5 мкм) с эффективностью ввода более 50%. Для ослабления оптического сигнала использовался варьируемый аттенюатор JDSL OLA-54, с выхода которого оптический сигнал подавался на высокочастотный фотодетектор (GaAs-p-i-n-фотодиод с шириной полосы пропускания 30

Гц и временем нарастания сигнала 9 пс). Затем сигнал усиливался и подавался либо в осциллоскоп Agilent 86100С для регистрации глаз-диаграмм, либо в BER-анализатор SHF 11100В для изучения качества передачи информации. Оптическая мощность регистрировалась с по-

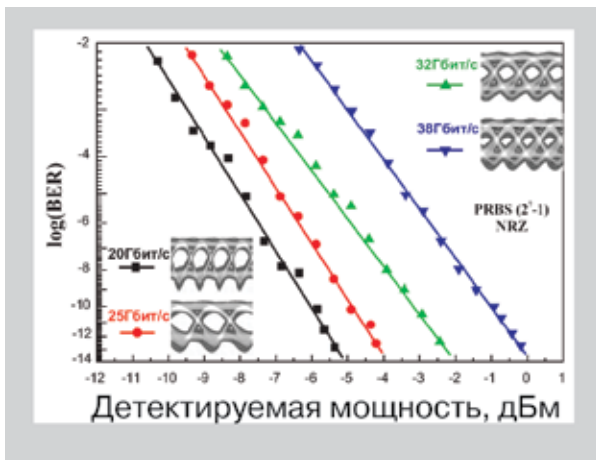


Рис.8. Зависимость коэффициента ошибок BER от регистрируемой оптической мощности на различных скоростях передачи данных для ВИЛ-лазера с диаметром токовой апертуры 9 мкм при температуре 25°C (на вставках приведены глаз-диаграммы на соответствующих скоростях)

мощью детектора JDSL OLP-55. На рис.7 представлены полностью открытые глаз-диаграммы на скорости передачи 10 Гбит/с для ВИЛ-лазера с диаметром токовой апертуры 6 мкм при различных температурах теплоотвода и фиксированном рабочем токе 5 мА.

Кроме незначительного ухудшения соотношения сигнал-шум (в основном вследствие падения выходной мощности лазера с температурой) и падения оптической амплитуды модуляции (ОМА) никаких существенных изменений в форме глаз-диаграммы выявлено не было. Характерное время нарастания сигнала ВИЛ-лазера, восстановленное методом деконволюции, не превышает 8–10 пс вплоть до температур порядка 100°C при достаточно низких плотностях тока (~10 кА/см²).

В результате дальнейшего повышения частоты сигнала прямой модуляции были получены открытые глаз-диаграммы на частотах вплоть до 40 ГГц. При этом соотношение сигнал-шум монотонно падал с увеличением частоты – с 7,4 при 16 Гбит/с до 2,2 при 40 Гбит/с. Однако следует отметить, что для реализации безошибочной передачи данных по протоколу FC требуется соотношение сигнал-шум более 4. Анализ уровня ошибок при оптической передаче дан-

ных в режиме прямой модуляции для ВИЛ-лазера с апертурой 9 мкм выявил принципиальную возможность реализации безошибочной (коэффициент ошибок BER < 10⁻¹²) оптической передачи данных вплоть до скоростей 38 Гбит/с при температуре 25°C (рис.8).

Насыщение фотодетектора при более высоких мощностях лимитирует возможность реализации устойчивой связи на скорости 40 Гбит/с. На вставках приведены глаз-диаграммы для соответствующих скоростей передачи информации, полученные при увеличении на 7 дБ коэффициента усиления сигнала после фотодетектора. Следует отметить, что наличие пиков по уровню нуля обусловлено особенностями функционирования использованного усилителя. Разработка более эффективных оптических приемников (повышение спектральной чувствительности) интегрированных с трансимпедансным усилителем (уменьшение шумов в оптическом канале) должна позволить преодолеть рубеж в 40 Гбит/с даже при имеющихся недостатках системы. Полученные результаты являются мировым рекордом для скорости передачи данных вертикально-излучающими лазерами диапазона 850 нм, работающими на принципах прямой токовой модуляции.

Кратко рассмотренные в настоящей работе конструкторские и технологические решения послужили основой для создания компании ООО «Коннектор Оптикс». Основные задачи компании – разработка отечественной промышленности высокоскоростных оптических компонентов для телекоммуникационных систем и высоко-

производительных компьютеров.

Работа выполнялась при частичной поддержке Программы №27 Президиума РАН, гранта РФФИ 09-02-12411-офи_м и Федеральной целевой программы «Научные и педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013, Госконтракт 14.740.11.0066

ЛИТЕРАТУРА

15. **Wurtemberg R., Aggerstam T., Runnstrom C.** et al. Simulations and measurements of the dynamic performance of 850 nm VCSELs with GaAs and InGaAs quantum well active regions. – LEOS Summer Topical Meeting 2002, 15–17 July 2002.
16. **Westbergh P., Gustavsson J., Haglund A.** et al. 32 Gbit/s multimode fibre transmission using high-speed, low current density 850 nm VCSEL. – Electronic Letters, 2009, v.45.
17. **Bimberg D., Grundmann M., Ledentsov N.** Quantum Dot Heterostructures. – Wiley, 1998.
18. **Ustinov V., Zhukov A., Egorov A., Maleev N.** Quantum dot lasers. – Oxford University Press, 2003.
19. **Fathpour S., Mi Z., Bhattacharya P.** High-speed quantum dot lasers. – Journal of Physics D: Applied Physics, 2005, v.38.
20. **Ustinov V., Maleev N., Kovsh A., Zhukov A.** Quantum dot VCSELs. – Physica Status Solidi (a), 2005, v. 202.
21. **Dery H., Eisenstein G.** The impact of energy band diagram and inhomogeneous broadening on the optical differential gain in nanostructure lasers. – IEEE Journal of Quantum Electronics, 2005, v. 41.
22. **Блохин С., Малеев Н., Кузьменков А.** и др. Вертикально-излучающие лазеры на основе массивов субмонослойных квантовых точек InGaAs. – ФТП, 2006, т. 40.
23. **Blokhin S., Lott J., Mutig A.** et al. Oxide-confined 850nm VCSELs operating at bit rates up to 40Gb/s. – Electronic Letters 2009, v. 45.
24. **Карачинский Л., Блохин С., Лотт Д.** и др. Вертикально-излучающие лазеры спектрального диапазона 850 нм со скоростью передачи данных 39 Гбит/с. Приглашенный доклад на IX Российской конференции по физике полупро-