

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

часть 1

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)

Полупроводниковые вертикально-излучающие лазеры находят широкое применение в быстродействующих оптоволоконных системах передачи и обработки информации, датчиках и сенсорах различного типа, высокопроизводительных компьютерных системах. Последние достижения в области технологии вертикально-излучающих лазеров позволяют реализовать оптические системы со скоростью передачи данных до 40 Гбит/с на один канал.

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) обеспечивают основной объем передачи данных в сетях Интернет, междугородной телефонии, кабельного телевидения и других телекоммуникационных системах большой и средней дальности. Основными преимуществами ВОЛС по сравнению с другими типами каналов связи (как проводных, так и беспроводных) являются высокая скорость передачи информации, надежность и помехозащищенность. Однако широкое применение оптических технологий в информационных системах малой дальности (от десятков метров до нескольких километров) до недавнего времени ограничивалось относительно высокой стоимостью активных оптических компонентов (приемопередающих модулей) по сравнению с электронными аналогами.

Параметры и стоимость оптических приемопередающих модулей в основном определяются характеристиками основного активного компонента – полупроводникового лазерного диода (ЛД). В полупроводниковом ЛД, реализованном в классической полосковой геометрии контактов (рис.1), оптический резонатор Фабри-Перо, как правило, имеет большую длину по сравнению с периодом стоячей волны оптического поля. При этом оптическая волна распространяется в плоскости активного слоя и длина активной (усиливающей) области обычно совпадает с длиной резонатора, равной в данном случае геометрическому расстоянию между сколотыми торцевыми гранями лазерной структуры.

Полупроводниковые ЛД классической конструкции широко и успешно используются для ши-

рокого спектра практических приложений [1]. Однако им свойственны серьезные недостатки:

- невозможность адекватного тестирования приборных структур на пластине (подложке) до их разделения на индивидуальные кристаллы и монтажа на кристаллодержатель;
- несимметричная диаграмма выходного излучения ЛД и ее достаточно высокая расходимость, что затрудняет ввод излучения в оптическое волокно и требует использования прецизионной сборки для модулей излучателей ВОЛС;
- достаточно сильная температурная зависимость длины волны лазерного излучения ЛД с резонатором Фабри-Перо без дополнительных мер по стабилизации длины волны;

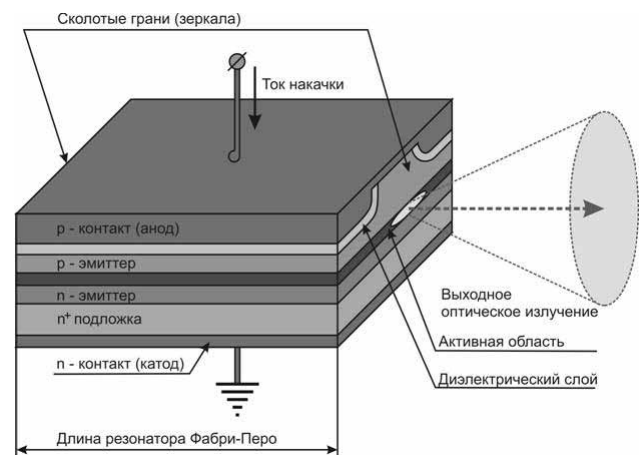


Рис.1. Схематическое изображение ЛД с классической полосковой геометрией контактов

- как правило, заметное возрастание порогового тока ЛД с ростом температуры;
- необходимость применения весьма сложных конструкций приборов для обеспечения высокого быстродействия (10 Гбит/с и выше) в случае использования наиболее простого и удобного метода прямой токовой модуляции.

Предложенная в конце 70-х годов прошлого века группой японских исследователей конструкция поверхностно-излучающего ЛД с вертикальным оптическим резонатором (vertical cavity surface emitting lasers – VCSELs) [2] принципиально позволяет решить большинство из указанных проблем. Однако прошло около 15 лет, прежде чем развитие полупроводниковых технологий, в первую очередь методов эпитаксиального выращивания сложных многослойных гетероструктур, позволило к концу 1990-х годов реализовать поверхностно-излучающие ЛД с вертикальным оптическим резонатором (далее – вертикально-излучающие лазеры, ВИЛ), пригодные для практического использования [3]. Современные варианты конструкции ВИЛ (рис.2) основаны на использовании вертикальных оптических микрорезонаторов с зеркалами в виде распределенных брэгговских отражателей (РБО) (distributed Bragg reflector – DBR) на основе чередующихся четвертьволновых слоев полупроводниковых материалов различного состава (например, твердых растворов AlGaAs с различным содержанием Al). При этом в качестве активной (светоизлучающей) области, как правило, используются одна или несколько квантовых ям (КЯ), помещенных вблизи максимума распределения оптического поля. Активная область прибора (область протекания тока и излучательной рекомбинации носителей) пространственно ограничивается с помощью селективно-окисленных апертурных слоев AlGaAs с высоким содержанием Al или с помощью имплантации протонов.

К числу основных преимуществ ВИЛ по сравнению с традиционными инжекционными лазерами полосковой конструкции относятся малая угловая расходимость и симметричная диаграмма направленности выходного оптического излучения,

возможность обеспечения субмиллиамперных пороговых токов, повышенная температурная и радиационная стабильность, групповая технология изготовления и возможность тестирования приборов непосредственно на пластине. Планарная технология ВИЛ позволяет формировать интегрированные линейные массивы и двумерные матрицы с большим числом индивидуально адресуемых излучателей.

В последние годы полупроводниковые вертикально-излучающие лазеры находят все более широкое применение в быстродействующих оптоволоконных системах передачи и обработки информации, датчиках и сенсорах различного типа (например, оптических манипуляторах типа «мышь»), а также высокопроизводительных компьютерных системах [4]. В частности, большинство систем волоконно-оптической связи на короткие расстояния (до 300 м) работают с использованием ВИЛ с длиной волны излучения 840–860 нм, создаваемых на основе гетероструктур в системе материалов AlGaAs-GaAs.

Пожалуй, наиболее яркий пример практического использования принципиальных преимуществ ВИЛ по сравнению с классическим ЛД связан с современными суперкомпьютерами. Идея перехода от электрических межсоединений к оптическим применительно к высокопроизводительным вычислительным системам начала активно развиваться в конце 1990-х – начале 2000-х годов [5, 6]. Разработчики систем довольно быстро остановили свой выбор на вертикально-излучающих лазерах в качестве основных компонентов оптоэлектронных передающих модулей, принимая во внимание требования минимальной потребляемой мощности, высокого быстродействия, возможности изготовления интегральных массивов и пригодность к массовому производству. В современном суперкомпьютере IBM Roadrunner обмен информацией между отдельными стойками вычислительной системы осуществляется исключительно по оптическим каналам, общее число которых достигает 50 тыс. Используемые приемо-передающие модули соответствуют требованиям стандарта Infiniband, предусматривающего передачу сигнала по многомодовому оптическому волокну, оптимизированному для передачи сигнала в спектральном диапазоне 850 нм, со скоростью до 10 Гбит/с, причем в качестве активного элемента передатчика используются исключительно ВИЛ [7]. Ожидается, что в первой суперкомпьютерной системе с производительностью 10 петафлоп (IBM Blue Waters), запланированной к появлению в 2011 году, будут использоваться оптические каналы связи между отдельными модулями, а их общее число достигнет 1 млн. на систему [8].

На сегодняшний день ВИЛ, обеспечивающие скорость передачи данных 10 Гбит/с, производятся всего несколькими ведущими компаниями, преимущественно для реализации собственных передатчиков. В то же время, согласно утвержденным планам развития стандарта Infiniband, в кабелях следующего поколения (2011) скорость передачи

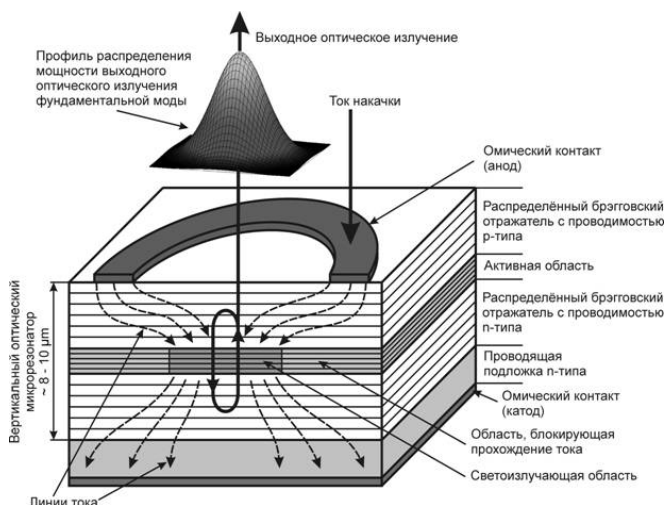


Рис.2. Схематическое поперечное сечение структуры ВИЛ

данных должна составлять 26 Гбит/с. Кроме того, новый интерфейс USB 3.0 будет работать со скоростью 5 Гбит/с с возможностью подключения оптоволокна, при этом протокол передачи данных позволяет достичь 25 Гбит/с в ближайшем будущем. Таким образом, существует потребность развития технологии ВИЛ, обеспечивающей скорость передачи данных в диапазоне 25 Гбит/с и выше.

Динамическая модель, описывающая частотные свойства инжекционного лазера, работающего выше порога генерации в режиме прямой токовой модуляции, строится на базе системы скоростных уравнений [1]. Частотные характеристики инжекционного лазера, в том числе ВИЛ, определяются как внутренними свойствами источника лазерного излучения, так и конструктивными параметрами, определяющими величины паразитных элементов электрической эквивалентной схемы (различные емкости и сопротивления). В рамках модели эквивалентного четырехполюсника паразитные элементы можно изолировать от собственно «идеального» лазера, определив в качестве последнего активную (светоизлучающую) область, ограниченную токовой апертурой, где носители заряда и фотоны взаимодействуют через спонтанное/стимулированное излучение и поглощение (см. рис.2). В свою очередь электрические паразитные элементы, работающие как RC-фильтр, можно разделить на паразитные элементы, связанные с контактными площадками, и внутренние паразитные элементы структуры лазера (области между металлическими контактами и активной областью). Используя метод малосигнального частотного анализа (small signal frequency response), частотный отклик системы при гармонической модуляции тока накачки с частотой f (при постоянном токе смещения I_0 , он определяет так называемую рабочую точку) есть произведение передаточной функции «идеального» лазера $H_{int}(f)$ (низкочастотный фильтр второго порядка с коэффициентом затухания) и $H_{ext}(f)$ функции однополюсного низкочастотного фильтра:

$$H(f) = \left[const \cdot \frac{f_r^2}{f_r^2 - f^2 + j \cdot \gamma \cdot (f/2\pi)} \right] \cdot \left[\frac{const}{1 + j \cdot (f/f_p)} \right], \quad (1)$$

где f_r – резонансная частота системы, γ – коэффициент затухания (damping), f_p – паразитная частота отсечки.

Согласно уравнению (1) для повышения быстродействия ВИЛ необходимо увеличить как резонансную частоту f_r , характеризующую «идеальный» лазер», так и частоту отсечки f_p низкочастотного фильтра, образованного паразитными элементами электрической эквивалентной схемы, представленной на рис.3.

В использованной эквивалентной электрической схеме с высокочастотным источником напряжения, обладающим внутренним импедансом, паразитные элементы контактных площадок объединены в емкости контактных площадок C_p , а внутренние паразитные элементы лазерного кристалла (чипа) – в паразитном сопротивлении R_m и пара-

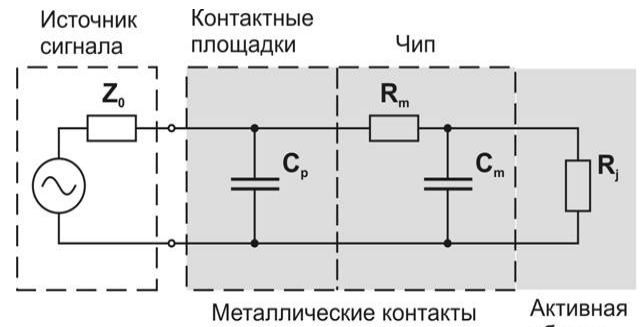


Рис.3. Эквивалентная электрическая схема вертикально-излучающего лазера

зитной емкости C_m . «Идеальный» лазер моделируется сопротивлением R_l .

Резонансная частота «идеального» лазера представляет собой частоту собственных релаксационных колебаний, характеризующих динамику взаимодействия между носителями заряда и фотонами:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{N_p \cdot v_g}{\tau_p} \frac{dg}{dN} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где v_g – групповая скорость фотонов, N_p – плотность фотонов в лазерном резонаторе, τ_p – время жизни фотонов в резонаторе, $\frac{dg}{dN}$ – дифференциальное усиление.

Согласно уравнениям (1), (2), релаксационная частота главным образом определяет, насколько быстро можно модулировать «идеальный» лазер. Для повышения резонансной частоты необходим высокий уровень дифференциального усиления активной области, высокая плотность фотонов в лазерном резонаторе и низкое время жизни фотонов.

В самом деле, времена спада и нарастания оптического сигнала при прямой модуляции в основном определяются величиной дифференциального усиления. Для увеличения дифференциального усиления можно, например, использовать гетероструктуры с квантовыми точками, обладающие квазидискретным спектром плотности состояний [9] либо легировать р-типом активную область для изменения положения квазиуровня Ферми для дырок [10]. Однако малое модальное усиление (вследствие малой плотности квантовых точек), в первом случае, и увеличение уровня внутренних оптических потерь (поглощение на свободных носителях), во втором случае, лимитируют эффективность предложенных методов. Наиболее перспективным подходом является внедрение напряжения/деформации в активную область, что позволяет не только увеличить кривизну валентной зоны, но и сместить квазиуровень Ферми для дырок к краю зоны [10, 11].

Для увеличения плотности фотонов достаточно увеличить ток смещения, определяющий ра-

бочую точку и/или уменьшить объем моды. Последнее возможно, например, за счет использования диэлектрических РБО [13] либо увеличения степени оптического ограничения за счет введения дополнительных токовых апертур [14].

Во второй части обзора мы обсудим взаимосвязь факторов, лимитирующих быстродействие ВИЛ и технологические методы решения возникающих проблем. Данная работа выполнялась при 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 годы, Госконтракт 14.740.11.0066.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Coldren L., Corzine S.** Diode lasers and photonic integrated circuits. Wiley, New York, 1995.
2. **Soda H., Iga K., Katahara C., Y. Suematsu.** GaInAsP/InP Surface-emitting injection lasers. – Japanese Journal of Applied Physics 1979, №18.
3. **Wilmsen C., Temkin H., Coldren L.** Vertical-cavity surface-emitting lasers. – Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
4. **Szweda R.** VCSEL applications diversify as technology matures. – III-Vs Review, vol.19, Issue, 2006, 1 February.
5. **Miller D.** Physical reasons for optical interconnection. – Int. J. Optoelectron, 1997, №11, 155.
6. «IBM and Agilent start optical interconnect program». – Compound Semiconductor, 11 September 2003
7. **Kash A., Pepeljugoski P., Doany F. et al.** Communication Technologies for Exascale Systems. – Photonics West 2009, San Jose CA, Jan 2009
8. **Fields M., Foley J., Kaneshiro R. et al.** Transceivers and Optical Engines for Computer and Datacenter Interconnects, in Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper OTuP1.
9. **Su C., Lanzisera V.** Effect of doping level on the gain constant and modulation bandwidth of InGaAsP semiconductor lasers. – Applied Physics Letters, 1984, №45, 1302.
10. **Arakawa Y., Yariv A.** Quantum-Well Lasers Gain, Spectra, Dynamics. – IEEE J. of Quantum Electronics, 1986, № 22, 1887.
11. **Suemune I.** Theoretical study of differential gain in strained quantum well structures. – IEEE J. of Quantum Electronics, 1991, № 27, 1149.
12. **Ralston J.D., Weisser S., Esquivias I. et al.** Control of differential gain, nonlinear gain and damping factor for high-speed application of GaAs-based MQW lasers. – IEEE Journal of Quantum Electronics 1993, № 29, 1648.
13. **Yashiki K., Suzuki N., Fukatsu K. et al.** 1,1- μm -range tunnel junction VCSELs with 27-GHz relaxation oscillation frequency, Optical Fiber Communication Conference 2007, Anaheim, USA, 25-29 March 2007, Paper no. OMK1.
14. **Chang Y.-C., Wang C., Coldren L.** – Electronic Letters, 2007, № 43, 396.