

4. Заключение

Лазерное охлаждение как метод получения ультрахолодных температур и атомная оптика как новый тип оптики материальных частиц привели к стремительному прогрессу в области технологического развития современной физики. Ультрахолодные атомные ансамбли, в том числе квантово-вырожденные бозе- и ферми-газы, стали легко доступными в физических лабораториях. С достижениями в оптической спектроскопии высокого разрешения стали доступны и инструменты для когерентного управления внешними и внутренними степенями свободы атомной материи. Атомная оптика, пройдя относительно короткий путь развития, нашла практическое применение во многих областях, в том числе в атомной интерферометрии, квантовых стандартах частоты и времени, атомной нанолитографии. Атомные интерферометры за 20-летний период их развития прошли путь от демонстрации самой возможности своего существования до тестирования фундаментальных законов физики и создания самых точных квантовых часов, акселерометров, гравитометров и градиометров. Атомные интерферометры, возможно, найдут применение в детектировании гравитационных волн на Земле и в космосе. Другим многообещающим направлением развития атомной оптики является атомный чип — атомная микрочиповка на основе магнитных и световых полей. Этот монолитный микроманипулятор атомных волн обещает его широкое использование в квантовой информационной технологии. Атомная нанолитография сейчас рассматривается как альтернативный метод нанолитографии будущего. Дальнейшее развитие исследований с ультрахолодными атомами и исследований в атомной оптике позволит достичь более глубокого понимания квантовой физики и расширения областей применения ультрахолодного вещества в различных технологиях.

Список литературы

- Hänsch T W, Schawlow A L *Opt. Commun.* **13** 68 (1975)
- Андреев С В, Балькин В И, Летохов В С, Миногин В Г *Письма в ЖЭТФ* **34** 463 (1981) [Andreev S V, Balykin V I, Letokhov V S, Minogin V G *JETP Lett.* **34** 442 (1981)]
- Letokhov V S, Minogin V G *Phys. Rep.* **73** 1 (1981)
- Balykin V I, Minogin V G, Letokhov V S *Rep. Prog. Phys.* **63** 1429 (2000)
- Lett P D et al. *J. Opt. Soc. Am. B* **6** 2084 (1989)
- Kasevich M, Chu S *Phys. Rev. Lett.* **69** 1741 (1992)
- Aspect A et al. *Phys. Rev. Lett.* **61** 826 (1988)
- Migdall A L et al. *Phys. Rev. Lett.* **54** 2596 (1985)
- Grimm R, Weidemüller M, Ovchinnikov Yu B *Adv. At. Mol. Opt. Phys.* **42** 95 (2000)
- Raab E L et al. *Phys. Rev. Lett.* **59** 2631 (1987)
- Balykin V I, Letokhov V S *Appl. Phys. B* **48** 517 (1989)
- Aminoff C G et al. *Phys. Rev. Lett.* **71** 3083 (1993)
- Ketterle W, Van Druten N J *Adv. At. Mol. Opt. Phys.* **37** 181 (1996)
- Cornell E A, Wieman C E *Rev. Mod. Phys.* **74** 875 (2002); Корнелл Э А, Виман К Э *УФН* **173** 1320 (2003)
- Ketterle W *Rev. Mod. Phys.* **74** 1131 (2002); Кеттерле В *УФН* **173** 1339 (2003)
- DeMarco B, Jin D S *Science* **285** 1703 (1999)
- Bloch I, Dalibard J, Zwerger W *Rev. Mod. Phys.* **80** 885 (2008)
- Balykin V I, Letokhov V S *Phys. Today* **42** (4) 23 (1989)
- Балькин В И, Летохов В С *УФН* **160** (1) 141 (1990) [Balykin V I, Letokhov V S *Sov. Phys. Usp.* **33** 79 (1990)]
- Balykin V I, Letokhov V S *Atom Optics with Laser Light* (Chur, Switzerland: Harwood Acad. Publ., 1995)
- Meystre P *Atom Optics* (New York: AIP Press/Springer, 2001)
- Балькин В И *УФН* **179** 297 (2009) [Balykin V I *Phys. Usp.* **52** 275 (2009)]
- Mewes M-O et al. *Phys. Rev. Lett.* **78** 582 (1997)
- Bloch I, Hänsch T W, Esslinger T *Phys. Rev. Lett.* **82** 3008 (1999)
- Baudon J, Mathevet R, Robert J J *Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* **32** R173 (1999)
- Cronin A D, Schmiedmayer J, Pritchard D E *Rev. Mod. Phys.* **81** 1051 (2009)
- Balykin V I et al. *Phys. Rev. Lett.* **60** 2137 (1988)
- Zurek W H *Rev. Mod. Phys.* **75** 715 (2003)
- Blatt R, Wineland D *Nature* **453** 1008 (2008)
- Jost J D et al. *Nature* **459** 683 (2009)
- Балькин В И, Летохов В С *ЖЭТФ* **94** 140 (1988) [Balykin V I, Letokhov V S *Sov. Phys. JETP* **67** 78 (1988)]
- Balykin V I, Letokhov V S *Opt. Commun.* **64** 151 (1987)
- McClelland J J "Nanofabrication via atom optics", in *Handbook of Nanostructured Materials and Nanotechnology* Vol. 1 (Ed. H Nalwa) (San Diego: Academic Press, 1999) p. 335
- Balykin V, Klimov V, Letokhov V *Opt. Photon. News* **16** (3) 44 (2005)
- Балькин В И и др. *Письма в ЖЭТФ* **84** 544 (2006) [Balykin V I et al. *JETP Lett.* **84** 466 (2006)]
- Melentiev P N et al. *Metamaterials* **3** 157 (2009)
- Feynman R J *Microelectromech. Syst.* **2** 4 (1993)

PACS numbers: **42.62.-b**, **42.82.-m**, **85.40.-e**
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201108h.0884

Новое поколение вертикально-излучающих лазеров как ключевой элемент компьютерно-коммуникационной эры

Н.Н. Леденцов, Дж.А. Лотт

1. Введение

В настоящее время суперкомпьютеры становятся одной из основных движущих сил развития человеческой цивилизации, которая обеспечивает прогресс в геномике, биомедицинских науках, аэродинамике, механическом конструировании, предсказании природных катаклизмов и техногенного воздействия человека на окружающую среду и во многих других стратегических областях науки и технологии. Важную роль суперкомпьютеры играют в нейронном моделировании и работах в области искусственного интеллекта. Развитие высокоскоростных телекоммуникаций и интернет-технологий позволяет коммерциализировать использование высокопроизводительных компьютеров и кардинально расширить круг их применений.

Постоянное уменьшение характерного размера элемента кремниевой интегральной схемы приводит к удвоению плотности дискретных элементов на кристалле каждые два года. Соответственно, кардинально возрастают производительность процессоров и ёмкость памяти. Для эффективного обмена данными как между процессорами, так и между процессорами и памятью или периферийными устройствами оказывается необходи-

Н.Н. Леденцов. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, РФ, Санкт-Петербургский академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий РАН, Санкт-Петербург, РФ
VI Systems GmbH, Hardenbergstr. 7, 10623 Berlin, Germany
E-mail: nikolay.ledentsov@v-i-systems.com
Дж.А. Лотт (J.A. Lott). VI Systems GmbH, Berlin, Germany

мым увеличивать скорость передачи информации на один канал. Постепенно коммуникации между элементами системы становятся её "узким местом", особенно из-за необходимости постоянного скалирования¹ пространственной плотности элементов и скорости передачи данных как на уровне контактов одиночной интегральной схемы (ИС), так и всех производных модулей и плат. Для поддержания скалирования скорости передачи данных при сохранении или уменьшении размеров межсоединений все современные стандарты электрических межсоединений вынуждены примерно удваивать скорость передачи на один канал каждые 2–3 года. При скоростях передачи более 10 гигабит в секунду (Гб с^{-1}) использование медных межсоединений делается затруднительным и, соответственно, кардинально возрастает роль оптических линий связи. Современный суперкомпьютер Blue Waters (IBM 2011) производительностью в 10 петафлопс (10^{16} флопс, флопс — одна операция с плавающей запятой в секунду) уже содержит около пяти миллионов оптических межсоединений, где каждое соединение работает со скоростью 10 Гб с^{-1} . При этом повышение производительности суперкомпьютера в 10 раз по сравнению с моделью 2008 года Roadrunner (IBM, 5 Гб с^{-1}) привело к увеличению числа оптических межсоединений на два порядка. Суперкомпьютеры производительностью в 20–30 раз выше чем система Blue Waters, ожидаемые к 2015 году, будут потреблять около миллиарда оптических межсоединений. В экзафлопсных системах (10^{18} флопс) до 80 % потребляемой мощности и до 90 % производительности системы будут определяться оптическими межсоединениями [1]. Следует отметить, однако, что и создание энергоэффективных, компактных и экономичных оптических линий передачи данных является далеко не тривиальной задачей для скоростей передачи в $50\text{--}100 \text{ Гб с}^{-1}$ на один канал, которые должны быть достигнуты, соответственно, в ближайшие 3–6 лет. В данном кратком обзоре рассматриваются вертикально-излучающие лазеры как основной элемент современных оптических линий связи в сетях передачи данных на короткие расстояния и перспективы дальнейшего повышения их быстродействия для соответствия требованиям вычислительных систем ближайшего будущего.

2. Основные применения и стандарты

Основой развития современных систем обработки данных является кремниевая микроэлектроника. Скалирование характерного размера интегральной схемы в 1,4 раза каждые два года приводит к экспоненциальному увеличению вычислительной мощности процессоров. Рост производительности достигается в основном увеличением числа ядер на одной ИС (80 ядер в современных процессорах Intel). Характерный топологический размер элемента достиг 22 нм, а требуемые скорости устройств ввода–вывода на один канал — 26 Гб с^{-1} ($2,6 \times 10^{10}$ бит — примерно соответствует числу песчинок, выложенных по диаметру планеты Земля). При этом прототипы ИС с

характерными размерами элементов 18 нм и даже 14 нм уже разработаны и функционируют. Таким образом, скалирование размера и скорости передачи в кремниевой технологии будет продолжаться, и нагрузка в сетях локальной передачи данных кардинально возрастет.

Стратегически важным стандартом приёмопередачи в системах высокопроизводительных вычислительных систем является стандарт Infiniband. Удвоение скорости передачи на один канал происходит в среднем каждые 2,5 года. К 2014 году скорость передачи должна превысить 50 Гб с^{-1} , а к 2016–2017 году — 100 Гб с^{-1} .

Аналогичным образом происходит скалирование и других важнейших интерфейсов. В сетях хранения информации наиболее распространённым является стандарт Fibre Channel. Здесь стандартизированная скорость передачи на один канал достигла 14 Гб с^{-1} уже в 2009 году, а к 2012 году ожидается стандартизация интерфейсов на 28 Гб с^{-1} . Использование линий связи на основе меди при таких скоростях ограничивается длиной порядка 1 м для кабеля и 10 см по плате. С точки зрения энергопотребления, создаваемых помех, размера кабелей и разъёмов использование меди оказывается нецелесообразным и при существенно меньших расстояниях. Новый стандарт появляется на рынке на следующий год после принятия и начинает доминировать примерно через 2–2,5 года. Когда стандарт на 28 Гб с^{-1} будет принят, то доминирующим на рынке будет являться интерфейс на 14 Гб с^{-1} .

Важной особенностью некоторых интерфейсов, например, стандарта Ethernet, доминирующего в сетях передачи и обработки данных, является не только необходимость в скалировании скорости передачи на один канал, но и числа каналов (рис. 1). При сохранении той же площади коммутационной платы область пространства, выделенная на один канал, должна, таким образом, уменьшаться при одновременном увеличении быстродействия межсоединения. При этом повышение скорости передачи неизбежно приводит к возрастанию роли электромагнитных помех. Поэтому тенденции повышения скорости приёмопередачи на один канал и создания всё более компактных приёмопередающих устройств находятся в очевидном противоречии.



Рис. 1. "Дорожная карта" для роста скорости передачи на один канал в стандарте Ethernet (центры по обработке данных) и интегральной скорости передачи внутри системы. Число линий передачи на одну интегральную линию постоянно возрастает (с 2-х в 2000 году до 10 в 2010 году), а скорость устройства ввода–вывода выросла с 500 Мб с^{-1} до 10 Гб с^{-1} , соответственно.

¹ Скалирование — технологический термин, означающий пропорциональное изменение физических размеров компонентов на кристалле. В кремниевой технологии происходит постоянное уменьшение характерного размера при сохранении базовой геометрии. Это и называется "silicon scaling".

В области интерфейсов потребительского рынка наибольшей скоростью передачи данных на один канал в 10 Гб с^{-1} обладает Thunderbolt, применяемый в устройствах Apple (MacBook, iMac). Соответственно, и в области потребительской электроники следует ожидать быстрой замены электрических межсоединений оптическими (например, по технологии Intel "Lightpeak").

3. Вертикальные лазеры с токовой модуляцией

В настоящее время в системах оптической передачи данных доминируют так называемые вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) [2]. В отличие от так называемых "полосковых" лазеров на двойных гетероструктурах [3], где свет распространяется параллельно поверхности эпитаксиальных слоёв по волноводу из полупроводникового материала с большим показателем преломления, чем ограничивающие волновод слои, в ВИЛ излучение осуществляется перпендикулярно к поверхности подложки. При таком дизайне отдельные приборы и их массивы могут производиться в рамках планарной технологии и иметь очень малый размер в плоскости пластины. Соответственно, выход годных структур оказывается высоким, а себестоимость одного излучателя — низкой. Активной областью и в том и в другом случае служат слои материала с меньшей шириной запрещённой зоны, куда инжектируются неравновесные носители заряда. В последнее время наиболее активно используются слои с квантовыми ямами, квантовыми проволоками и квантовыми точками [4], так как они позволяют кардинально улучшить свойства лазеров. Так, InAs квантовые точки позволяют реализовать вертикальные и полосковые лазеры до $1,3 \text{ мкм}$ [5] в рамках стандартной и экономичной арсенид-галлиевой технологии. В полосковых лазерах продемонстрирована уникальная температурная стабильность характеристик и лазерная генерация выше 220°C и скорости передачи при прямой модуляции более 25 Гб с^{-1} на один канал [6].

3.1. Геометрия прибора

Схематическая диаграмма ВИЛ с токовой модуляцией представлена на рис. 2. Прибор состоит из микрорезонатора с планарной резонансной полостью с толщиной, кратной половине длины волны. Внутри полости находится активная среда, в которую инжектируются неравновесные носители заряда, создаётся инверсия населённостей уровней и формируется усиление на один проход света в вертикальном направлении. Сверху и снизу от микрополости находятся многослойные структуры из чередующихся слоёв толщиной примерно в четверть длины волны с более высоким и низким коэффициентом преломления (например, из $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с низким и высоким составом по алюминию соответственно). Данная последовательность удовлетворяет брэгговскому условию и позволяет реализовать высокие коэффициенты отражения зеркал, для того чтобы потери света вследствие конечного отражения зеркал оставались ниже усиления на один проход и лазерная генерация была возможной. Структура выращивается на подложке GaAs. Слои AlAs в районе микрополости подвергаются селективному оксидированию в парах воды для формирования токовой апертуры и ограничения оптических мод микрорезонатора областью с меньшим коэффи-

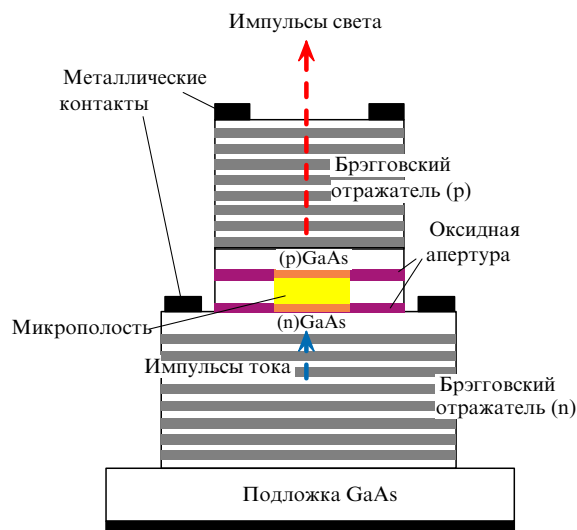


Рис. 2. Схематическое изображение вертикально-излучающего лазера с токовой модуляцией интенсивности.

циентом преломления. Преимуществом системы арсенид галлия–арсенид алюминия для ВИЛ является возможность выращивания слоёв брэгговского отражателя с использованием бинарных AlAs и GaAs соединений или квазибинарных твёрдых растворов с малым составом по галлию или алюминию соответственно. Так как теплопроводность бинарных соединений на порядок выше, чем в случае твёрдых растворов, — активная среда не перегревается, а конструкция прибора упрощается. Кроме того, так как скачок коэффициента преломления на каждом интерфейсе арсенид алюминия–арсенид галлия превышает 0,5, то полная толщина многослойных отражателей мала (около 3–3,5 мкм на одно многослойное зеркало), что также облегчает теплопередачу и снижает себестоимость эпитаксиального выращивания. Большой скачок коэффициента преломления обуславливает широкую полку (60 нм) в спектре отражения многослойного зеркала, упрощая требования к точности контроля эпитаксиального роста, увеличивая выход годных пластин и снижая их цену.

Длина волны излучения прибора определяется энергией фотонного резонанса и, соответственно, толщиной слоя микрополости, а не шириной запрещённой зоны активной среды, как в случае полоскового лазера. Так как ширина запрещённой зоны с температурой меняется много быстрее, чем энергия фотонного резонанса, спектр усиления активной среды должен быть достаточно широк (не менее 50 нм), для того чтобы обеспечить функционирование прибора во всём требуемом диапазоне рабочих температур. Задачей оптического дизайна ВИЛ является:

- подавление паразитных мод излучения с максимальным усилением взаимодействия активной среды с модой вертикального излучения [7], например с использованием антиволноводного дизайна ВИЛ микрополости;

- оптимизация оксидных апертурных слоёв для обеспечения заданного модального состава излучения в поперечном направлении, например для реализации одномодового излучения;

— оптимизация коэффициента пропускания зеркал с оптимизацией числа периодов брэгговского отражателя или использование нескольких резонансных полостей для обеспечения требуемого времени жизни фотона в микрополости.

3.2. Активная среда

На рисунке 3а представлено схематическое изображение объёмного полупроводника, квантовой ямы (КЯ), массива квантовых проволок (КП) и массива квантовых точек (КТ), а на рис. 3б представлен схематический вид плотности состояний (штриховые линии) и заполнения состояний носителями заряда (сплошные линии) для активной области различной размерности.

Использование гетероструктур пониженной размерности [8] играет колоссальную роль в ВИЛ по нескольким причинам. Во-первых, при аналогичной геометрии прибора и том же рабочем токе его быстродействие тем выше, чем больше дифференциальное усиление прибора. Для КЯ-приборов дифференциальное усиление в основном определяется числом квантовых ям и дисперсией подзоны тяжёлых дырок, которой можно управлять напряжениями в случае использования упруго-напряжённых КЯ. Для лазеров на КТ дифференциальное усиление определяется латеральной плотностью КТ, которая может быть весьма велика в случае лазеров диапазона 850 нм (более 10^{12} см⁻² на один слой КТ), что позволяет при необходимости реализовать гигантские коэффициенты дифференциального и модального усиления.

На рисунке 4а представлено изображение КТ InAs, сформированных методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) в матрице Al_xGa_{1-x}As для диапазона 850 нм, полученное при обработке электронной микрографии высокого разрешения [9]. На рисунке 4б представлены спектры фотолюминесценции (ФЛ) от структур с InAs КТ и структур с GaAs КЯ при низкой температуре (77 К). Как видно из рисунка, спектры ФЛ от структур с КТ при умеренных плотностях накачки существенно шире, чем от структур с КЯ. При этом, однако, при больших плотностях тока ситуация кардинально меняется, и спектры усиления КТ, имеющие выраженный

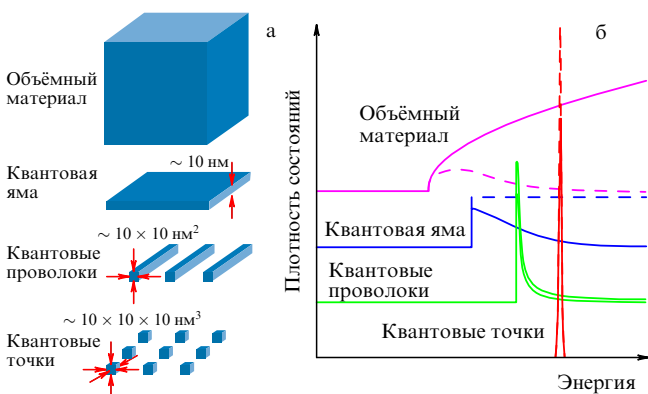


Рис. 3. (а) Схематическое изображение объёмного полупроводника, квантовой ямы (КЯ), массива квантовых проволок (КП) и массива квантовых точек (КТ). (б) Схематический вид плотности состояний (штриховые линии) и заполнения состояний носителями заряда (сплошные линии) для активной области различной размерности. В реальных структурах с КТ и КП спектр плотности состояний уширен как за счёт неоднородного уширения (дисперсия КТ и КП по форме и размерам), так и за счёт однородного уширения, например, вследствие взаимодействия с фононами.

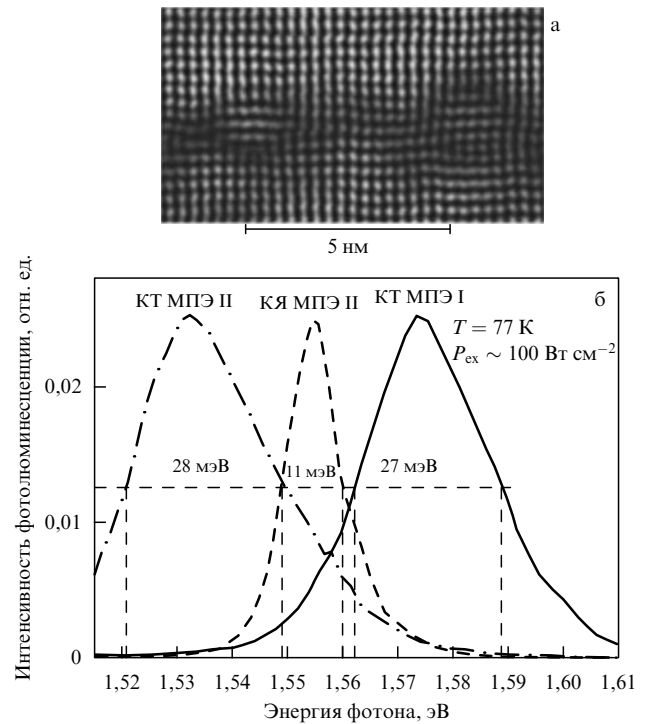


Рис. 4. (а) Изображение КТ InAs в матрице Al_xGa_{1-x}As, излучающей в диапазоне длин волн 850 нм. Области инвертированного контраста линий соответствуют областям с содержанием InAs выше и ниже 20 %. (б) Спектры фотолюминесценции (ФЛ) от структур с InAs КТ и структур с GaAs КЯ при низкой температуре (77 К).

ный максимум усиления, как правило, оказываются существенно уже по сравнению с бесструктурными широкими спектрами усиления КЯ обусловленными ступенчатой плотностью состояний (см. рис. 3).

3.3. Быстродействие ВИЛ

В случае стимулированного излучения время излучательной рекомбинации оказывается обратно пропорционально интенсивности оптического поля в резонаторе. Для ВИЛ при прочих равных условиях это означает необходимость повышения плотности тока для уменьшения времени стимулированного излучения при аннигиляции инжектированных электронов и дырок. Вместе с тем уменьшение времени излучательной рекомбинации приводит к сублинейной зависимости плотности неравновесных носителей и интенсивности поля при увеличении плотности тока. Резонансная частота, которая характеризует отклик системы на ступенчатое изменение тока, и, соответственно, быстродействие прибора, зависит от плотности тока также коренным образом. Так как период резонансной осцилляции состоит из положительной и отрицательной полуволн, время нарастания и спада сигнала определяется примерно четвертью периода. Максимальная скорость передачи оптических импульсов без искажений при отсутствии существенного затухания определяется суммой времён нарастания и спада сигнала, и, соответственно, примерно равна удвоенной резонансной частоте. Для повышения резонансной частоты и быстродействия в два раза требуется увеличение плотности тока накачки в четыре раза. Увеличение же тока накачки ВИЛ всего лишь в два раза приводит к кардинальному уменьшению его срока службы (в 30–40 раз). Это связано как с перегревом

активной области, так и с большей вероятностью безызлучательной рекомбинации (например, ожереконбинации) с передачей энергии кристаллической решётке, в том числе и с генерацией дефектов. Так как ВИЛ на GaAs КЯ на 10 Гб с^{-1} работают уже вблизи плотности тока, за которым начинается перегрев прибора и падение оптической мощности и быстродействия, то достижение резонансных частот, существенно превышающих 10 Гб с^{-1} , считалось маловероятным. Использование КТ в качестве активной среды способно заметно уменьшить скорость генерации и роста дефектов, ограничивая диффузионный транспорт неравновесных носителей к областям с повышенной скоростью безызлучательной рекомбинации.

Как уже отмечалось, управление напряжениями в активной среде и/или изменение её размерности позволяет кардинально увеличить дифференциальное усиление прибора и достичь тех же резонансных частот при много меньшей плотности тока. Уменьшение размера оксидной апертуры прибора также может приводить к улучшению частотных характеристик как за счёт улучшения теплоотдачи при той же плотности тока, так и вследствие уменьшения объёма оптической моды и дальнейшего подавления паразитного излучения. В случае использования фотонных кристаллов или микрополостей, позволяющих сконцентрировать оптическое поле в одной вертикальной моде малого объёма, сверхвысокое быстродействие может быть реализовано с использованием эффекта Перселла (Purcell) и без создания инверсии заселённости [10].

На рисунке 5 приведена зависимость резонансной частоты от тока в ВИЛ в непрерывном режиме генерации [11, 12]. Как следует из рисунка, в случае использования малых апертур реализуются резонансные частоты порядка 30 ГГц . Соответственно, при применении таких ВИЛ в случае подавления паразитного затухания (например, обусловленного высокими сопротивлением и ёмкостью прибора или большим временем жизни фотона в микрополости [13]) потенциально реализуемы скорости передачи 50 Гб с^{-1} и выше. Максимальные рабочие температуры тепловода таких ВИЛ диапазона 850 нм , при которых ещё наблюдается лазерная

генерация, достигают 200°C , а при температуре 100°C рабочие характеристики прибора меняются не более чем в пределах $10\text{--}20\%$.

Для использования ВИЛ в системах приёмопередачи наличие высокой резонансной частоты не является достаточным условием. Прибор не должен показывать переиспесков интенсивности при подаче прямоугольных импульсов тока, а произвольные последовательности единичных токовых импульсов должны давать одинаковый по амплитуде оптический сигнал. Эффекты накопления мощности в полости или, наоборот, её обеднения фотонами в зависимости от длительностей импульсов или промежутков между ними приводят к "плаванию" уровней "нуля" (минимальный сигнал) и "единицы" (максимальный сигнал). На рисунке 6а, б представлены экспериментальные "диаграммы глаза" на 20 Гб с^{-1} (а) и 40 Гб с^{-1} (б), полученные с использованием управляющих интегральных схем и микросборок передатчиков ВИЛ и PIN фотоприёмников компании VI-Systems GmbH. Как видно из изображений уровни единицы и нуля хорошо дискриминируются по уровню сигнала при любой произвольной последовательности импульсов (стандарт 2⁷-1 PRBS). Для 40 Гб с^{-1} безошибочная передача (менее одной ошибки на 10^{12} импульсов) реализована при оптической мощности в волокне в 1 мВт (0 дБм). В дальнейшем ожидается кардинальное уменьшение оптической мощности для достижения того же уровня шумов и повышения быстродействия. На рисунке 6в изображена микросборка из ВИЛ и управляющей интегральной схемы, а на рис. 6г — полный модуль, соединённый с многомодовым волокном (50 мкм), использованный в измерениях "диаграмм глаза".

3.4. Вертикальные лазеры на основе других соединений группы АЗВВ

Наиболее востребованы ВИЛ диапазона 850 нм на основе системы алюминий–арсенид галлия. Во-первых, длина волны 850 нм является основной для всех важнейших стандартов приёмопередачи на короткие расстояния. Соответственно, под эту длину волны адаптированы многомодовые оптические волокна, которые также подлежат отдельной стандартизации. Изготовление ВИЛ на основе InP, GaN, GaSb и производных твёрдых растворов представляет собой намного более сложную задачу, и они имеют менее существенный рынок по сравнению с GaAs ВИЛ, ориентированных на замену медных межсоединений. Годовой оборот медных межсоединений, не считая управляющих схем, в 2010 году составил более 130 миллиардов долларов. Существенным рыночным потенциалом обладают ВИЛ диапазона $1,3 \text{ мкм}$, которые могут быть использованы для передачи по стандартному одномодовому оптическому волокну и реализованы как на GaAs [5], так и InP [14] подложках. Работы в этом направлении активно продолжаются. ВИЛ диапазона 1300 нм на подложках GaAs могут быть наиболее легко получены с использованием технологии КТ. При этом, однако, в мире существует ограниченное число групп, обладающих достаточным технологическим знанием в области выращивания КТ лазеров, с одной стороны, и соответствующим технологическим оборудованием — с другой. Для реализации ВИЛ на КТ необходимо также знание специфики дизайна прибора под данный диапазон длин волн. Основной же проблемой для реализации лазеров на основе InP является низкая теплопроводность твёрдых растворов (In,Ga,Al)As и малый контраст в коэффициенте преломления много-

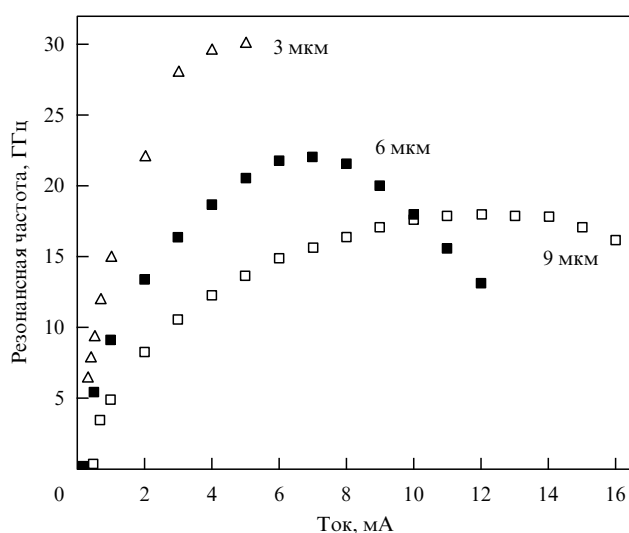


Рис. 5. Зависимость резонансной частоты ВИЛ от тока накачки в непрерывном режиме при различных диаметрах оксидной апертуры прибора.

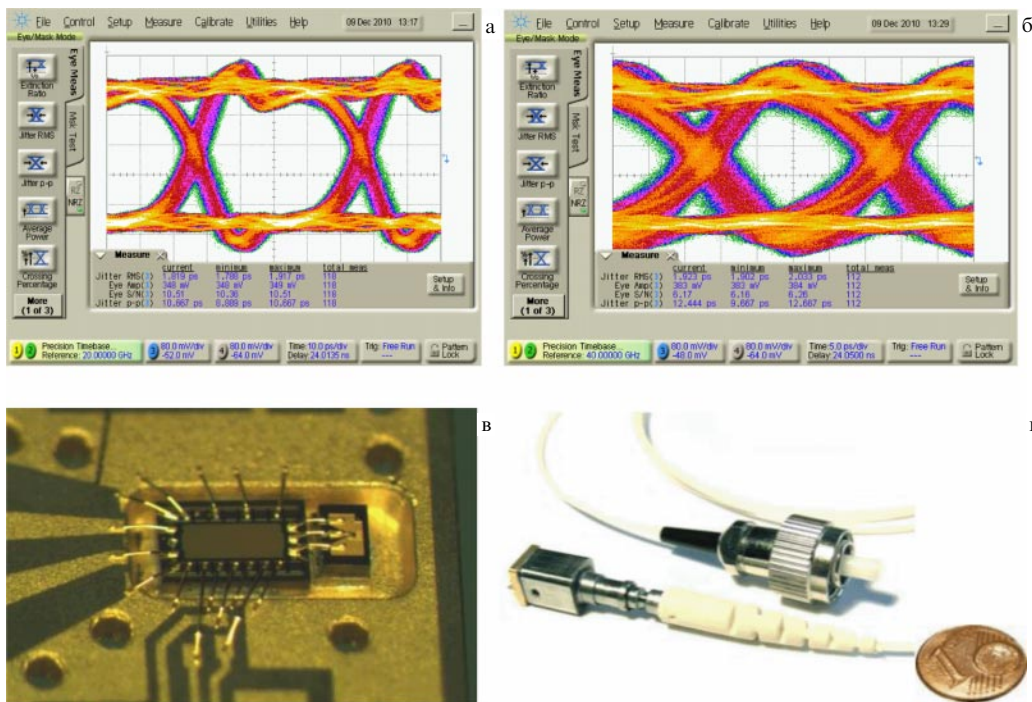


Рис. 6. Экспериментальные "диаграммы глаза" на 20 Гб с⁻¹ (а) и 40 Гб с⁻¹ (б) с использованием микросборок ВИЛ передатчиков и PIN фотоприёмников компании VI-Systems GmbH. (в) Микросборка из ВИЛ и управляющей интегральной схемы. (г) Полный модуль, соединённый с многомодовым волокном (50 мкм).

слоиных брэгговских зеркал. Толщина многослойного зеркала, необходимая для достижения того же коэффициента отражения, оказывается в два раза больше, а теплопроводность — в 30 раз хуже, чем для случая зеркал на основе GaAs–AlAs. Ширина полки отражения мала (25 нм) и требует высокопрецизионного контроля за процедурой эпитаксиального выращивания, а использование подложек InP и длительное время роста обуславливают высокую себестоимость эпитаксиальных пластин. Кроме того, так как технология селективного окисления неприменима для данной системы материалов, то для формирования области инжекции используется методика локального туннельного перехода с селективным травлением с последующим эпитаксиальным зарастиванием, что приводит к дополнительному усложнению технологии.

3.5. Альтернативные подходы к конструированию ВИЛ

Для преодоления вышеуказанных проблем нами было предложено решение, ориентированное на использование пассивных резонаторов. Известно, что приближение высокодобротного резонатора способно кардинально изменить диаграмму направленности и время излучения осциллятора. Соответственно родилась идея создания ВИЛ с пассивной микрополостью. В этом случае активная среда вставлена в слой брэгговского отражателя в области заметного затухания оптического поля, а область микрорезонатора оставлена "пустой" [15] (рис. 7). Такой прибор работает аналогично обычному ВИЛ вплоть до температур перехода выше 130 °С [15]. На первый взгляд такая конструкция представляется проигрышной, так как интенсивность поля в области активной среды уменьшается по сравнению с интенсивностью поля в пассивной микрополости. На самом же деле важна

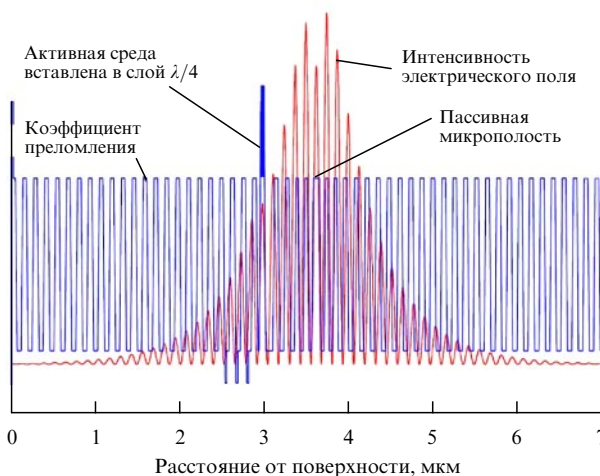


Рис. 7. Дизайн ВИЛ с пассивной микрополостью.

не относительная, а абсолютная интенсивность поля. Поэтому, например, при использовании диэлектрического микрорезонатора с гигантской плотностью мощности оптической моды, обусловленной гигантским скачком коэффициентов преломления (до 2 и более) на интерфейсах диэлектрических брэгговских отражателей, даже уменьшенная в несколько раз интенсивность поля в области активной среды существенно превысит интенсивность поля в максимуме поля при использовании брэгговских зеркал на основе "родных" полупроводниковых соединений с малым скачком коэффициента преломления и соответственно с широким распределением поля. Кардинальное уменьшение толщины "остаточных" полупроводниковых брэгговских зеркал, если таковые

вообще нужны, позволяет обеспечить эффективную теплопроводность прибора.

Наличие пассивной микрополости позволяет производить в ней структуры фотонных кристаллов, вставлять металлические наноструктуры, применять технологию нанопринт, использовать материалы с гигантским электрооптическим или пьезооптическим эффектом для управления длиной волны излучения и т.д. не беспокоясь о протекании тока, безызлучательной рекомбинации и теплопроводности в активной области.

4. Вертикальные лазеры с электрооптической модуляцией

Параллельно с развитием технологии ВИЛ с прямой модуляцией продолжают работы в области создания лазеров с электрооптической модуляцией. В данном случае, как показано на рис. 8, переменное напряжение прикладывается к секции электрооптического модулятора (ЭОМ), вертикально интегрированного с лазерной секцией, которая работает в непрерывном режиме. Изменение коэффициента преломления в активной среде ЭОМ (например, сверхрешётке) при приложении электрического поля приводит к спектральному смещению резонансной особенности в спектре пропускания ЭО секции. Соответственно, свет ВИЛ-секции или выпускается из прибора, или блокируется [16]. В зависимости от режима работы ВИЛ-секция может функционировать при очень малой плотности тока, обладая, таким образом, исключительно высоким сроком службы. С другой стороны, ЭОМ-секция, работающая при обратном смещении имеет исключительно низкую ёмкость и может обеспечивать рабочие частоты 60 ГГц [7] и более.

Отличительной чертой ЭОМ ВИЛ является высокая линейность характеристик [7], которая позволяет реализовывать многоуровневое кодирование [17]. На рисунке 9 показаны "диаграммы глаза" ЭОМ ВИЛ на 10 Гб с⁻¹ на канал (полная скорость 20 Гб с⁻¹) с использованием QPSK кодирования на несущей частоте 13 ГГц.

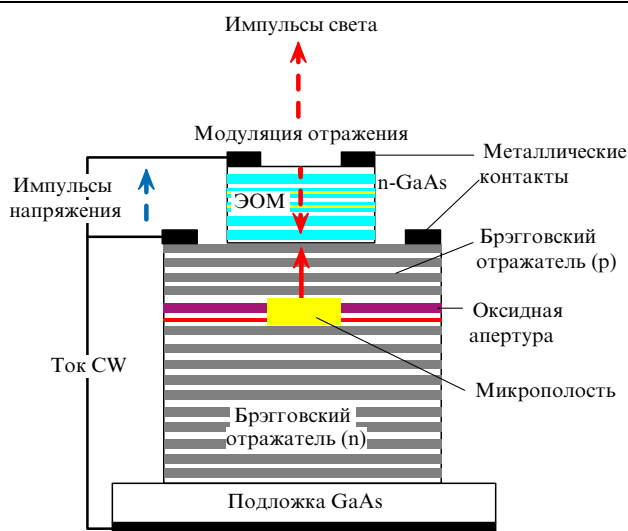


Рис. 8. ВИЛ с электрооптической модуляцией. Изменение коэффициента пропускания ЭОМ-секции при обратном смещении, приложенном к p-n (n-i-n, p-i-p) переходу ЭОМ-секции, обладающей низкой ёмкостью позволяет обеспечивать сверхвысокие рабочие частоты прибора.

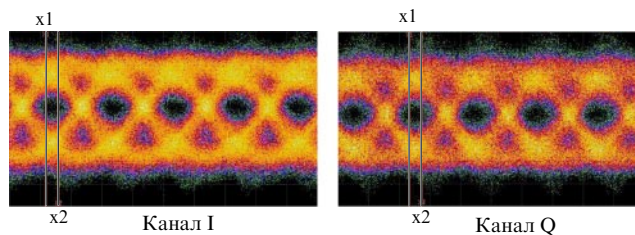


Рис. 9. "Диаграммы глаза" ЭОМ ВИЛ в режиме многоуровневого кодирования QPSK на 10 Гб с⁻¹ на канал (полная скорость линии 20 Гб с⁻¹) с использованием несущей частоты 13 ГГц.

Безошибочная передача данных реализована до 16 Гб с⁻¹. Следует ожидать быстрого прогресса и в данной области применений ВИЛ в ближайшем будущем.

5. Заключение

Современные ВИЛ представляют собой сложную комбинацию микро- и нанотехнологий. Малый размер и малая потребляемая мощность прибора как в токовой, так и в ЭОМ-версии позволяют надеяться на реализацию энергоэффективных оптических межсоединений со скоростью передачи 50 – 100 Гб с⁻¹ на один канал для новых поколений суперкомпьютеров, центров хранения и обработки данных и для электронных приборов потребительского сегмента рынка.

Благодарности. Авторы благодарят Ж.И. Алферова, Д. Бимберга, С.А. Блохина, А.Е. Жукова, В.М. Устинова и В.А. Щукина за полезные обсуждения. Работа поддержана Европейским Союзом (грант FP7/2007-2013 по соглашению No. 224211 ("VISIT")) и программой ЕС Eurostars (проект "Optical Link").

Список литературы

1. Benner A "Optical interconnects for HPC", in *Short Distance High Density Optical Interconnects Workshop. An OIDA Roadmapping Workshop, Stanford, CA, April 12–13, 2011*
2. Iga K *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **6** 1201 (2000)
3. Алферов Ж И *ФТП* **32** 3 (1998) [*Alferov Zh I Semiconductors* **32** 1 (1998)]
4. Ledentsov N N, Bimberg D, Alferov Zh I *J. Lightwave Technol.* **26** 1540 (2008)
5. Lott J A et al. *Electron. Lett.* **36** 1384 (2000)
6. Tanaka Yu et al. "25 Gbps direct modulation in 1.3- μ m InAs/GaAs high-density quantum dot lasers", in *Conf. on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest* (Washington, DC: Optical Society of America, 2010) CD, paper CTuZ1
7. Ledentsov N N, Hopfer F, Bimberg D *Proc. IEEE* **95** 1741 (2007)
8. Dingle R, Henry C H "Quantum effects in heterostructure lasers", U.S. Patent No. 3982207, September 21, 1976
9. Ledentsov N N et al. *Proc. SPIE* **7224** 72240P (2009)
10. Bennett A J et al. *Appl. Phys. Lett.* **90** 191911 (2007)
11. Mutig A et al. *Appl. Phys. Lett.* **95** 131101 (2009)
12. Ledentsov N N et al. *Proc. SPIE* **7952** 79520J (2011)
13. Westbergh P et al. *Electron. Lett.* **46** 938 (2010)
14. Hofmann W, Amann M-C *IET Optoelectron.* **2** 134 (2008)
15. Lott J A et al. *Electron. Lett.* **47** 717 (2011)
16. Shchukin V A et al. *Proc. SPIE* **6889** 68890H (2008)
17. Crisp M J et al. *Proc. SPIE* **7933** 79331D (2011)