

ЭЛЕМЕНТЫ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СВЕРХКОРОТКИХ ОПТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ: ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Введение

Волоконно-оптические линии связи доминируют над проводными системами в высокоскоростных системах длиной больше 100 м, вследствие более широкой полосы модуляции оптического канала. Однако для более коротких расстояний проводные соединения все еще являются основной технологией из-за ее простоты и дешевизны исполнения. Как показывает рис. 1, проводные соединения достигнут своего максимума широкополосности в 15 ГГц уже к концу 2010 г. Переход от проводных соединений к оптическим должен быть гибким и зависеть не только от специфических требований к реальным системам, но также и от того, как быстро будет снижаться стоимость элементов вследствие улучшения технологии сборки; увеличиваться количество конечных потребителей; а также от перехода к более высокой степени интеграции систем и развития стандартов [1]. В этом случае наиболее вероятным видится переход в виде гибридных оптоэлектронных систем, в которых основные вычислительные функции выполняют электронные элементы, а их соединения обеспечивают оптические системы.

Исходя из закона Рента требования к ширине полосы модуляции прибора в соотношении с возможностью обработки C должны увеличиваться в пропорции C^α , где $0.5 < \alpha < 0.75$ [2].

Для увеличения полосы пропускания будущих поколений систем присмо-передачи может быть использован информационный оптический соединительный модуль, включающий в себя передающий и приемный блоки и волоконно-оптический (для расстояний от десятком сантиметров до 1 м), интегрально-оптический или беспроводный волноведущий канал (для более коротких расстояний), который в случае малых расстояний между приемником и передатчиком получили название *сверхкороткого оптического соединения* (СКОС) [3].

Полноценное управление процессом создания широкого класса оптоволоконных систем и используемых в них полупроводниковых приборов с квантовым ограничением требует новых методов и инструментов для моделирования, которые основаны на хорошем понимании физических процессов и точных знаниях об исходных параметрах.

В физике лазеров уже сформировалась новая область полупроводниковых лазерных гетероструктур с квантовым ограничением, которая обеспечила прорыв во многих направлениях оптоэлектроники, в том числе и в оптоволоконных системах передачи данных.

Квантово-размерные (КР) технологии с использованием многочисленных слоев толщиной, сравнимой с длиной волны де Бройля, позволяют изготовить лазеры с чрезвычайно широкой полосой модуляции [4 - 7].

Существующие приборы в настоящее время не удовлетворяют требованиям СКОС ввиду сложности интегрирования элементов на малой площади платы, пока еще высокого энергопотребления и существенного влияния температуры на изменение длины волны и величины порогового тока и др. Это определяет наличие проблемы создания активных и пассивных элементов СКОС с требуемым быстродействием, шириной спектра, энергопотреблением и адекватного теоретического описания физических процессов и наблюдаемых мощностных, модуляционных

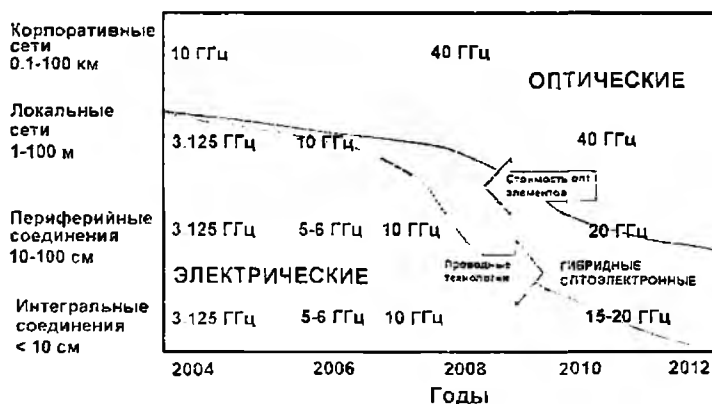


Рис. 1

теоретического описания физических процессов и наблюдаемых мощностных, модуляционных и спектральных характеристик данных систем.

Прежде всего перед исследователями стоит проблема адекватного теоретического описания физических процессов переноса носителей заряда в полупроводниковой структуре при разных режимах работы лазера и их взаимодействия между собой и с полем излучения. Это позволит с большей степенью точности объяснить причины ограничения широкополосности и дать практические рекомендации по совершенствованию технологии и конструкций гетеролазеров. Кроме того, целесообразно обеспечить совместимость методов анализа для разных типов конструкций гетеролазеров и создать универсальные и удовлетворительные средства их моделирования.

Качественный анализ физических аспектов, опыт предшествующих отечественных и зарубежных исследований и практических разработок показывает, что перспективным для решения указанной совокупности задач, а также развития теории и технологии активных и пассивных элементов современной оптоэлектроники является применение методов комплексного моделирования статических и динамических процессов с учетом влияния нерегулярного распределения носителей в сложных микро- и наноструктурах.

Решение проблемы в целом требует обширного теоретического и экспериментального исследования процессов переноса носителей заряда, генерации фотонов в многослойных симметричных и асимметричных квантово-размерных полупроводниковых структурах и распространения оптического сигнала через оптические каналы малой длины и формирования новых принципов построения эффективных источников оптического излучения для СКОС, а также исследования принципов ввода-вывода информации в СКОС. Результаты этих исследований могут найти применение в развитии разработок полупроводниковых приемо-передатчиков и сверхскоростных суперкомпьютеров нового поколения.

Современное состояние и перспективные направления развития протоколов ввода/вывода систем обработки информации следующего поколения

На рис. 2 представлена история развития протоколов ввода вывода и соответствующих скоростей передачи данных для проводных соединений на материнских платах современных компьютеров. Протоколы соединений Industry Standard Architecture (ISA) (частота 8.33 МГц, 16-разрядная шина) [8] и Peripheral Component Interconnect (PCI) (частота 33 МГц) [9] были преобладающими технологиями в 1980-х и в 1990-х годах соответственно. В технологии PCI была использована 32-разрядная шина для объединения периферийных устройств в компьютере. Увеличение полосы модуляции PCI шины требовало увеличения количества микросхем на плате, что привело к увеличению ее стоимости и размеров. Параллельно развивались и другие стандарты, такие как EISA (extended ISA – расширенная 32-разрядная ISA), MCA (Micro Channel Architecture – микроканальная архитектура выпущенная корпорацией IBM компьютеров PS/2), VESA (Video Electronics Standards Association – ассоциация по стандартам в видеоэлектронике), VLB (VESA Local Bus – локальная шина VESA) и др. Когда появились графические ускорители и, соответственно, трехмерные игры, пропускной способности PCI стало не хватать. Чтобы исправить сложившуюся ситуацию специалисты разработали стандарт AGP (Accelerated Graphics Port – Порт ускоренной графики), работающий на частоте 66 МГц. Позднее появились AGP 2-х, 4-х и 8-канальные, а пропускная способность перевалила за 2 ГГц. На данный момент протокол 3-го поколения PCIe (PCI express – ускоренный PCI), разработанный консорциумом Signal Interest Group (SIG), является промышленным стандартом [10]. PCIe, как ожидается, будет основным стандартом объединения периферийных устройств в настольных компьютерах, использующих структуру шины точка-точка (point-to-point). PCIe – шина последовательная, что в нынешних условиях предполагает более высокую производительность [11]. Каждый канал работает на частоте 250 МГц в каждую сторону, что почти вдвое больше пропускной способности обычной PCI. Всего каналов может быть 32, а суммарная пропускная способность достигать 16 ГГц.

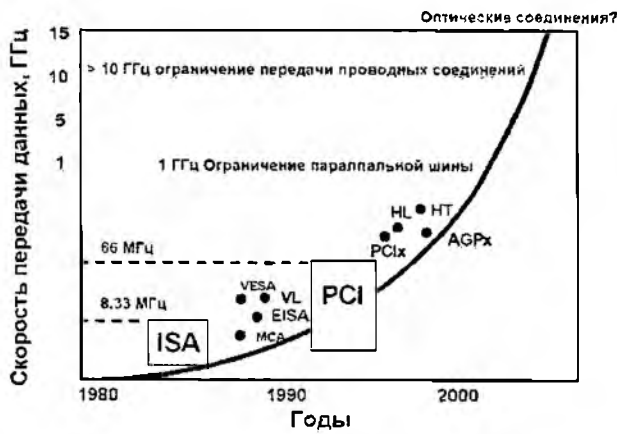


Рис. 2

что вызывает повышенное реактивное сопротивление проводника электрическому току. Реактивная составляющая плоского проводника (дорожка на печатной плате) определяется формулой

$$R_{\text{дс}} = \frac{2.61 \cdot 10^{-7} \sqrt{f \rho_r}}{2(w+h)}, \quad (1)$$

где $R_{\text{дс}}$ — реактивное сопротивление, Ом/мм; f — частота, Гц; $\rho_r = 1$ — удельное сопротивление меди; w и h — ширина и толщина проводника (в миллиметрах) соответственно. Из этой формулы следует, что при частоте сигнала в 15 ГГц типовая дорожка печатной платы шириной 0.15 мм и толщиной 0.04 мм имела бы реактивное сопротивление 2.66 Ом/мм. Удвоение толщины дорожки уменьшит реактивное сопротивление всего на 17 %, тогда как удвоение ширины дорожки уменьшит сопротивление на 44 %. Таким образом, очевидно, что на высоких частотах общая площадь поверхности проводника важнее, чем площадь его поперечного сечения, но, в то же время, должны увеличиваться и размеры платы.

Кроме того, химические соединения металла токопроводящего слоя с кислородом и азотом воздуха, образующиеся на поверхности провода в результате коррозии, обладают диэлектрическими и полупроводниковыми свойствами, что, в свою очередь, способствует росту потерь и искажений. Уменьшение потерь при частоте 15 ГГц возможно за счет применения новых материалов проводников [14], использования технологий многоуровневого декодирования [15] или охлаждения соединений до криогенных температур с целью уменьшения сопротивления (данная технология используется в некоторых видах суперкомпьютеров). Однако подобные технологии существенно увеличивают стоимость конечного оборудования. Такие разработки не согласуются с законом Мура, согласно которому новое поколение компьютеров должно обладать более высоким уровнем сложности обработки данных без существенного увеличения стоимости оборудования.

Таким образом, на данный момент возможности проводных соединений уже не удовлетворяют современным требованиям увеличения скорости обработки данных из-за влияния паразитных емкостей на частотах свыше 15 ГГц.

Единственным приемлемым решением проблемы увеличения полосы пропускания оборудования является использование оптических линий для соединения электронных устройств обработки данных. Первое предложение об использовании оптических соединений было выдвинуто Леонбергером более 20 лет назад [16]. Однако одним из решающих вопросов развития подобных систем является стоимость оптических элементов.

Преимущества оптических соединений над проводными состоят в следующем:

- Широкая полоса пропускания — обусловлена чрезвычайно высокой частотой несущей 10^{14} Гц. Это дает потенциальную возможность передачи по одному оптическому волокну потока информации в несколько терабит в секунду. Большая полоса пропускания — это одно из

Однако выше 15 ГГц использование проводных соединений является проблематичным из-за частотно зависимых потерь, таких как поверхностный эффект (skin effect) [12] проводящих материалов соединений и диэлектрических материалов подложки [13]. При этом большая часть движущихся электрических зарядов из-за электромагнитной индукции располагается вблизи поверхности токопроводящего слоя. Отрицательное действие поверхностного эффекта проявляется в том, что большая центральная часть токопроводящего слоя не участвует в переносе электрических зарядов.

наиболее важных преимуществ оптического волокна над медной или любой другой средой передачи информации.

- Низкий уровень шумов в волоконно-оптическом кабеле позволяет увеличить полосу пропускания путем передачи различной модуляции сигналов с малой избыточностью кода.

- Высокая помехозащищенность. Поскольку оптическая линия изготовлена из диэлектрического материала, она невосприимчива к электромагнитным помехам со стороны окружающих проводных соединений. Это особенно важно, к примеру, для канала задающего генератора частоты на плате. Кроме того, в параллельных волоконных каналах также не возникает проблема перекрестного влияния электромагнитного излучения, присущей электрическим соединениям.

- Высокая защищенность от несанкционированного доступа. Поскольку ВОК практически не излучает в радиодиапазоне, то передаваемую по нему информацию трудно перехватить, не нарушая приема-передачи.

- Экономичность ВОК. Волокно изготовлено из кварца, основу которого составляет двуокись кремния, широко распространенного, а потому недорогого материала, в отличие от меди, стоимость которой растет год от года.

- Длительный срок эксплуатации. Со временем волокно испытывает деградацию. Однако, благодаря совершенству современных технологий производства оптических волокон, этот процесс значительно замедлен, и срок службы ВОК составляет примерно 25 лет. За это время может смениться несколько поколений/стандартов приемопередающих систем.

Тем не менее, существующие промышленные образцы оптоэлектронных приборов не удовлетворяют требованиям СКОС ввиду таких недостатков:

- Сложность интегрирования элементов на малой площади платы.

- Высокая себестоимость элементов в сравнении с проводными соединениями из-за использования компонентов на основе арсенида галлия и германия – более дорогостоящих, чем кремний.

- Высокое энергопотребление.

- Существенное влияние температуры на изменение длины волны и величину порогового тока.

- Технология оптических проводников по сравнению с традиционной методикой требует более тонкой юстировки (т. е. взаимного выравнивания интегральных компонентов оптической подсистемы), что усложняет разработку и производство оптического оборудования.

Таким образом, можно констатировать, что оптические межкомпонентные соединения смогут повсеместно заменить электрические проводники тогда, когда будет достигнут приемлемый показатель цена/производительность, а также более высокий уровень производственных возможностей. Вследствие этого текущие исследования в данной области главным образом сосредоточены на повышении экономической эффективности технологии, особенно с точки зрения производства.

Поэтому, в первую очередь, такие технологии будут актуальны для производителей суперкомпьютеров, в которых в цену конечного оборудования заложены значительные средства на внедрение новых разработок, но которые впоследствии подтолкнут развитие более дешевых систем серверного оборудования, и, в конечном счете, персональных компьютеров.

Для того чтобы определить потенциальные возможности, области применения и основные проблемы, препятствующие развитию СКОС, рассмотрим его структуру и основные характеристики.

Элементы и характеристики СКОС

Любую передающую систему можно схематически представить в виде четырех функциональных групп [17]:

- Передатчик.

- Линия передачи.

- Переключатель/усилитель.

- Приемник.

В качестве источника СКОС лучше всего подходят полупроводниковые лазеры из-за их малых размеров и низкого энергопотребления. Полупроводниковые лазеры можно разделить на два основных класса: лазеры с торцевым излучением (Edge emitting lasers (EEL)) [18] (рис. 3, а) и с вертикальным излучением (Vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL)) [19] (рис. 3, б).

Наибольший интерес представляет «поверхностно излучающий лазер с вертикальным резонатором» (VCSEL) – полупроводниковый лазер, излучающий свет в направлении, перпендикулярном поверхности кристалла, в отличие от обычных лазерных диодов, излучающих в плоскости, параллельной поверхности.

Основные преимущества VCSEL в сравнении с EEL следующие:

- Более низкий пороговый ток за счет меньшего объема активной области.
- Высокий КПД за счет применения зеркал с коэффициентом отражения близким к 100 %.
- Одномодовый режим работы из-за меньшей длины резонатора.
- Более узкая ширина спектра излучения.
- Круговая форма выходного излучения не требует применения коллиматоров для фокусировки излучения в световод.
- Более простая технология изготовления плотно упакованных двумерных матриц лазеров.
- Возможность проведения тестирования непосредственно после изготовления.
- Относительно низкое влияние температуры на изменение длины волны и величины порогового тока.

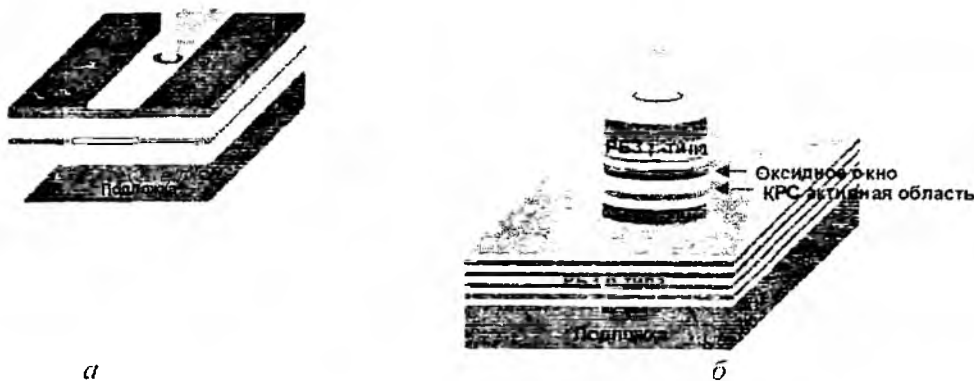


Рис. 3

Впервые лазер с направлением излучения перпендикулярно плоскости электродов был продемонстрирован Ирвасом Мелнгайлсом в Масачусетском технологическом институте в 1965 г. [20]. В качестве активной области был использован материал InSb и излучение было получено при температуре 10 K в сильном магнитном поле. В 1979 г. в Токийском технологическом институте впервые лазерное излучение в вертикальном направлении было получено при температуре 77 K для GaInAsP/InP материалов [21]. Зеркала в этом лазере сформированы на плоскости кристалла и противоположной стороне подложки. Поскольку характеристики данного лазера были намного хуже популярных в то время EEL, эта работа не привлекла должного внимания. Последующие работы в этом направлении [22 – 25] показали возможности дальнейшего улучшения свойств прибора, что привело к появлению первого VCSEL, работающего при комнатной температуре в постоянном режиме оптической накачки [26].

Другие важные усовершенствования привели к повышению внимания к данным приборам, среди них наиболее важным явилась разработка полупроводниковых Брэгговских отражателей (ПБО) с абсолютным коэффициентом отражения на заданной длине волны [27].

Последующие разработки велись с целью улучшения характеристик приборов и использования различных материалов активной области и зеркал для получения различных рабочих частот. VCSEL на данный момент может работать в широком диапазоне частот от ультрафиолетового (320 нм) [28] до дальнего инфракрасного излучения (более 4 мкм) [29]. Также значительно улучшились и пороговые характеристики лазера от десятков ампер до единиц микроампер. С 1992 г. GaAs VCSEL и связанные с этим материалом тройных соединений

являлись объектом пристального изучения и развития, что привело к появлению коммерческих продуктов с рабочими длинами волн 0.98, 0.85, 0.78 мкм. В 1993 г. группа исследователей под руководством Кеничи Ига продемонстрировали GaInAsP/InP VCSEL с рабочей частотой 1.3 мкм, работающий при комнатной температуре [30], а применение технологии послойного склеивания [31] позволило создать приборы с длиной волны 1.55 мкм.

Аналогично лазерам с торцевым излучением VCSEL имеет два типа ограничения тока: с помощью управления значением коэффициента преломления и с управлением коэффициентом усиления. Первый тип ограничивает ток и оптическую моду за счет вытравливания части структуры [32], таким образом регулируя размер волновода. Для получения устройств второго типа используют технологии протонного имплантирования [33] или оксидирования части структуры [34] для ограничения распределения тока. Технология оксидирования, или получения оксидного окна, на данный момент является самой простой и относительно дешевой, что дает ей большие преимущества для коммерческого применения [35].

VCSEL по месту размещения контактов могут быть разделены на 2 типа: с внешними контактами [36] и внутренними контактами [37]. В первом случае носители инжектируются в активную область через распределенные зеркала Брэгга (РЗБ). Чтобы уменьшить сопротивление РЗБ и, соответственно, улучшить квантовую эффективность лазера, необходимо изготавливать зеркала с градиентным изменением состава материала с технологически сложной процедурой легирования. Такие технологии, в свою очередь, приводят к увеличению оптических потерь на РЗБ и стоимости конечного устройства. В VCSEL с внутренними контактами носители инжектируются через высоколегированные слои, расположенные непосредственно с активной областью. В этом случае носители не проходят через РЗБ и подложку, что позволяет использовать нелегированные зеркала с минимальными оптическими потерями и максимальными отражательными свойствами.

Модуляционные свойства VCSEL можно оценить с помощью параметра частоты релаксационных колебаний. Для тока накачки выше порогового при эффективном ограничении носителей частота резонанса может быть представлена в виде [19]:

$$f_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\eta_i \frac{\Gamma_V}{qV} g'(I - I_{th})}. \quad (2)$$

где η_i – внутренняя квантовая эффективность, Γ – коэффициент оптического ограничения; q – заряд электрона; V – эффективный объем резонатора, включающий глубину проникновения оптического поля в РЗБ; g' – дифференциальное усиление; I – ток накачки; I_{th} – пороговый ток.

Частота может быть определена паразитной емкостью и сопротивлением [39]:

$$f_R \sim (R_{in} C_{par})^{-0.5}, \quad (3)$$

где R_{in} – полное сопротивление прибора, C_{par} – паразитная емкость.

В VCSEL с внешними контактами ток движется практически в вертикальном направлении через множественные слои РЗБ, что приводит к более эффективному растеканию тока по структуре и более равномерному распределению носителей по активной области. В VCSEL с внутренними контактами ток течет в горизонтальном направлении из-за тонких контактных слоев. В этом случае носителям не хватает места для равномерного перераспределения по активной области, и ток в основном протекает по краю оксидного окна. Такое поведение называется эффектом нагромождения тока [38].

Эффективное подавление этого феномена достигается следующими способами.

Разделение верхнего дырочного контактного слоя – с большой концентрацией примесей у контакта малой вблизи оксидного окна [38]. Следовательно, чем меньше концентрация примесей в слое возле активной области, тем больше его сопротивление, тем более равномерно распределяются носители под оксидным окном. Но с другой стороны, слишком большое сопротивление слоя приведет к увеличению общего сопротивления прибора, что также ухудшает характеристики (см. формулу (3)). Таким образом, необходимо найти оптимальную величину сопротивления, удовлетворяющую всем указанным требованиям.

Изготовление металлических контактов в виде полуколец, находящихся друг против друга [40]. При этом достигается перекрестное движение носителей через активную область, что приводит к более равномерному распределению носителей в активной области, а также уменьшению паразитной емкости контактных слоев.

Перечисленные способы позволяют увеличить усиление и улучшить модуляционные свойства прибора. Дополнительно к этому базовый анализ геометрических параметров показывает, к примеру, что при увеличении диаметра активной области увеличивается объем резонатора, но, с другой стороны, уменьшение активной области приводит к увеличению сопротивления прибора. Оба процесса приводят к уменьшению резонансной частоты, т. е. существует область оптимальных значений диаметра активной области, когда величина резонансной частоты максимальна. Таким образом, необходимо оценить, какие параметры можно оптимизировать, чтобы получить максимальную полосу модуляции VCSEL.

Фотоприемники

В качестве приемника излучения используются полупроводниковые фотодиоды.

Фотонные эффекты [41], использование которых сыграло значительную роль в развитии фотоприемников, могут проявляться в нескольких формах. К ним относятся все виды взаимодействия внешнего излучения с электронами вещества, которые могут быть как связанными с решеточными атомами, так и со свободными.

Фотонные эффекты можно разделить на два типа: внутренние и внешние. К внутренним относятся все те явления, при которых возбужденные излучением носители остаются в пределах образца. Существует множество внутренних фотонных эффектов, но только фотопроводимость и фотогальванический эффект нашли широкое применение [42].

Как известно, имеется несколько типов фотопроводимости: с электрическим смещением; собственная; примесная фотопроводимость. Фотогальванический эффект можно реализовать: на *p-n* переходе: в лавинном диоде; в *p-i-n* диоде; в диоде с барьером Шоттки; и при объемном фотоэффекте;

По принципу действия можно выделить такие основные типы фотодиодов:

- Лавинный фотодиод [41];
- Фотодиод с барьером Шоттки [42].
- *p-i-n* фотодиод [43];

Основные параметры для каждого прибора представлены в таблице:

Тип ФД	Материал	Чувствительность, $R, A/Wm$	Кв. Эфф. $\eta, \%$	G	Быстродействие, с	λ, nm
Лавинный	Si	50-65	60-65	100	$10^{-4} \dots 10^{-5}$	900
	GaInAsP/InP		45			1200
	Ge	≥ 0.55	38		$10^{-4} \dots 10^{-6}$	1060 1550
	GaInAsSb	1.1	60		$2.5 \cdot 10^{-7}$	2440 2550
<i>p-i-n</i>	AlGaAs/GaAs	0.83	65	3-7	$\leq 10^{-7}$	820
	AlInAs/GaInAs	1-3	40-60	2-7	$\leq 10^{-7}$	1300
	GaInAs/InP	1.5-3	40-60	3-7	$\leq 10^{-7}$	1350

p-i-n ФД являются наиболее распространенным видом приемников излучения. Схематическое изображение *p-i-n* ФД показано на рис. 4, а.

Излучаемые световые сигналы поглощаются в *i*-области, создавая фототок. Для увеличения быстродействия детектора необходимо, чтобы *i*-область была как можно уже, что приводит к снижению квантовой эффективности.

Отличие резонансного фотодиода (РФД) (рис. 4, б) заключается в следующем: активная гетероструктура помещена в оптический резонатор, зеркала которого являются отражателями Брэгга.

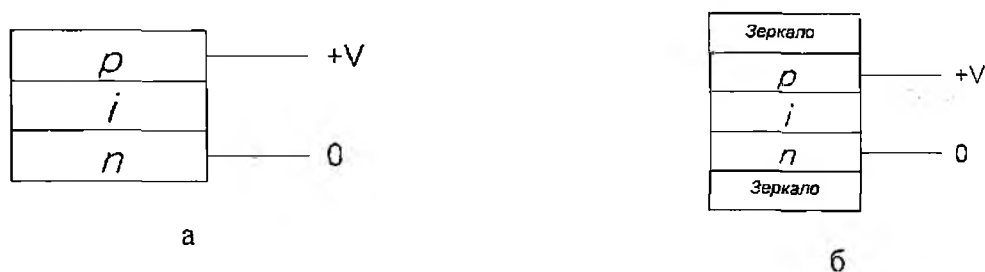


Рис. 4

Преимущества такого технического решения над обычными p-i-n ФД состоят в следующем:

- усиление оптического поля на резонансной частоте внутри РФД. Это позволяет при малой i-области (порядка десятков нанометров) получить высокую квантовую эффективность (близко к 100 %).

- быстродействие диода (которое прямо зависит от ширины i-области) остается высоким.

Поскольку РФД имеет такую же структуру, как и VCSEL, они могут быть выращены на одной подложке, что значительно упрощает требования совместимости приемника и передатчика и позволяет создавать интегрированные системы (рис. 5).

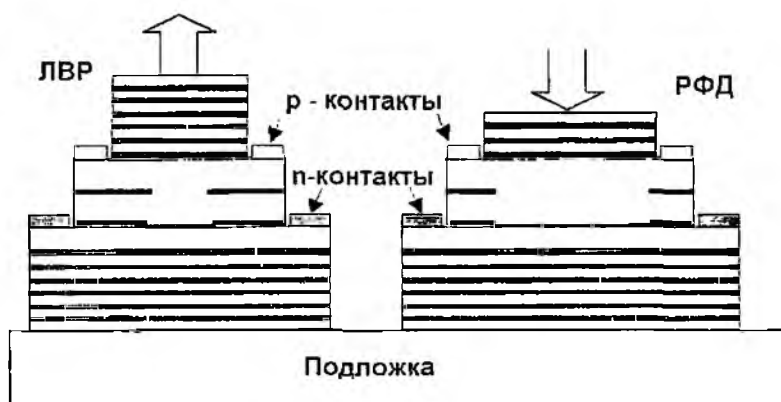


Рис. 5

Наряду с преимуществами РФД, существует один значительный недостаток – более узкий спектр пропускания РФД (порядка 10^{-9} м) в сравнении с p-i-n ФД (порядка 10^{-7} м) и температурная зависимость частоты может привести к смещению спектров приемника и передатчика и ухудшению качества приема.

Расхождение в значениях длин волн между передатчиком и приемником возможна за счет влияния следующих эффектов:

- неравномерность распределения длины волны резонатора по плоскости подложки;
- нагрев чипа с матрицей ЛВИ;
- разница температур между терминалами (процессор-материнская плата (МП), плата памяти-МП, графический процессор-МП).

Далее обсуждается значимость юстировки для волн между ЛВИ и РФД, а также рассмотрены методы перестройки частоты вследствие неравномерности роста структуры по площади подложки и за счет управления фазой коэффициента отражения.

Значимость сведения частот приемника-передатчика

Спектральная ширина полосы $\Delta\lambda$ РФД может быть представлена в виде

$$\Delta\lambda \propto \frac{\lambda^2}{2\pi h} \cdot \frac{1 - R_t R_b}{(R_t R_b)^{1/2}}, \quad (4)$$

где λ – резонансная длина волны; h – длина резонатора; R_t и R_b абсолютные величины коэффициентов отражения верхнего и нижнего зеркал, соответственно.

В РФД максимальное значение квантовой эффективности может быть достигнуто при соблюдении условия

$$R_t = R_b \exp(-2\bar{\alpha}d). \quad (5)$$

где d и $\bar{\alpha}$ – толщина и коэффициент поглощения активного слоя с учетом эффекта стоячей волны. Подставляя (5) в (4) получим

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2\pi h} \cdot \frac{1 - e^{-2\bar{\alpha}d} R_b^2}{(e^{-\bar{\alpha}d} R_b)^{1/2}}. \quad (6)$$

Поскольку значение R_b равно $\sim 99.99\%$, спектральная полоса $\Delta\lambda$, исходя из уравнения (6), составляет единицы нанометра. Следовательно, небольшое расхождение между резонансными длинами волн ЛВИ и РФД приведет к значительному уменьшению чувствительности приемника и увеличению частоты появления ошибок (bit-error rate -BER). Например,

если смещение частот между ЛВИ и РФД, работающих на длине волны в 980 нм, составляет 0.9 нм, квантовая эффективность приемника падает с 98% до примерно 40% и уменьшению чувствительности на 4 дБ (рис. 6). Чувствительность приемника P_{rec} обратно пропорциональна отклику ФД [44]:

$$P_{\text{rec}} \propto -10 \log(R) \propto -10 \log\left(\eta \frac{q\lambda}{hc}\right), \quad (7)$$

где η – квантовая эффективность РФД, q – заряд электрона, h – постоянная Планка, c – скорость света.

Поскольку требования к величине BER

для компьютерных платформ выше, чем к традиционным системам передачи, значимость юстировки частот приемника и передатчика становится важным фактором.

Неравномерность распределения выращенной слоистой структуры по плоскости подложки

Резонансная частота в зависимости от положения на плоскости подложки может отличаться из-за неравномерности условий роста и погока осаждаемых частиц. Стандартная погрешность колеблется в области 1–10 нм и зависит от качества настройки ростовой камеры и систем эпитаксиального выращивания. На рис. 7, а показано распределение длины волны в зависимости от положения на 3-дюймовой подложке для структуры с длиной волны 980 нм. Измерения проводились с помощью фотолуминесцентной системы сканирования RPM 2000 (ACCENT) с разрешением в 0.2 нм. В каждой точке сканирования коэффициент отражения измерялся в диапазоне длин волн от 880 до 1080 нм с разрешением до 0.1 нм. Резонансная длина волны определялась из спектральных характеристик в каждой точке сканирования. Показано, что 60% поверхности имеет длину волны 978.2 ~ 979.0 нм и 20% – 979.0 ~ 983.0 нм. Таким образом, чтобы выполнить условия неравномерности длин волн в диапазоне 0.8 нм, полезная площадь подложки составляет не более 60% [45].

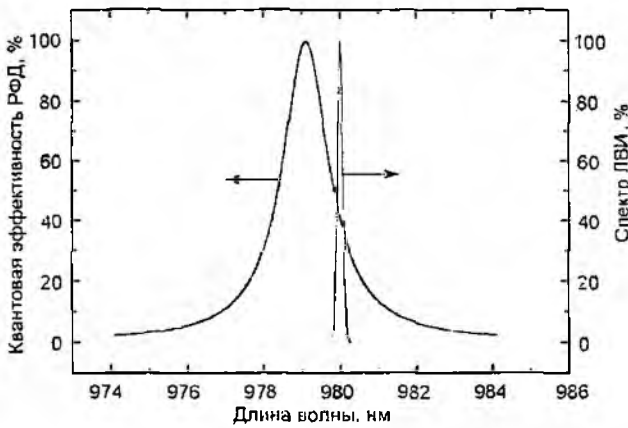


Рис. 6

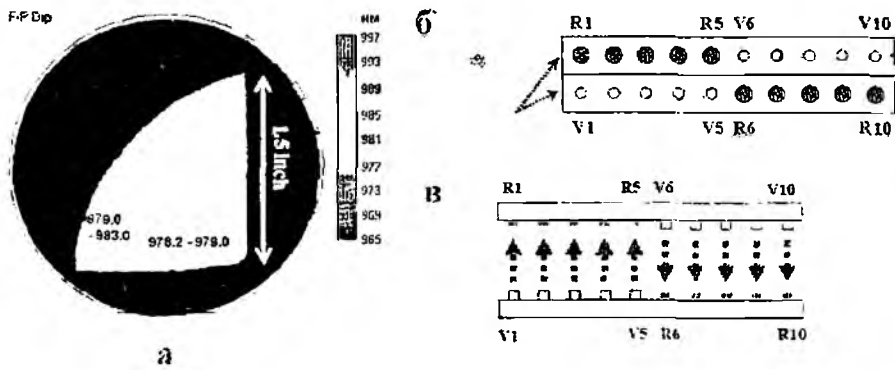


Рис. 7

Влияние эффекта неравномерного роста можно нивелировать за счет попарного формирования линеек ЛВИ и РФД из одной области подложки, как показано на рис. 7, б и дальнейшего использования этих линеек в соответствии с рис. 7, в. Абсолютные значения длины волны для приемника и передатчика уже не имеют большого значения, поскольку разница между ними незначительна. При этом данный метод может быть применен и для случая большей неравномерности длины волны по поверхности подложки, что уменьшает затраты на изготовление.

Температурное смещение длины волны в область больших длин волны

Резонансная длина волны и ЛВИ, и РФД увеличивается с ростом температуры. Резонансная длина волны λ_R может быть представлена в виде

$$\phi_i + \phi_h + \frac{4\pi n h}{\lambda_R} = 2\pi m, \quad (8)$$

где m – целое число; n и h – коэффициент преломления и длина оптического резонатора; ϕ_i и ϕ_h – фаза комплексного коэффициента отражения верхнего и нижнего зеркал.

Как показывает уравнение (8), увеличение коэффициента преломления с ростом температуры в структуре приводит к смещению длины волны в красную область со скоростью $d\lambda/dT \approx 0.07 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. При этом смещение одинаково и для приемника и для передатчика, поскольку они имеют одинаковую длину резонатора.

Изменение температуры может происходить как за счет эффекта нагрева структуры при увеличении тока накачки, так и за счет внешних излучателей тепла, таких как процессор или модуль памяти. Это иногда приводит к тому, что в разных точках соединения температура может быть разной, что схематически отражено на рис. 8.

Например, предположим, что у нас имеется СКОС для соединения процессора (рабочая температура 60°C) и модуля памяти (рабочая температура 25°C). Выходная мощность ЛВИ и эффективность подключения составляют 1 мВт и 33% , соответственно [46].

Разность между температурами ЛВИ и РФД на стороне процессора определяется температурой процессора и собственного

нагрева ЛВИ, тогда как разность между температурами на разных концах соединения определяется еще и разностью температур между процессором и модулем памяти.

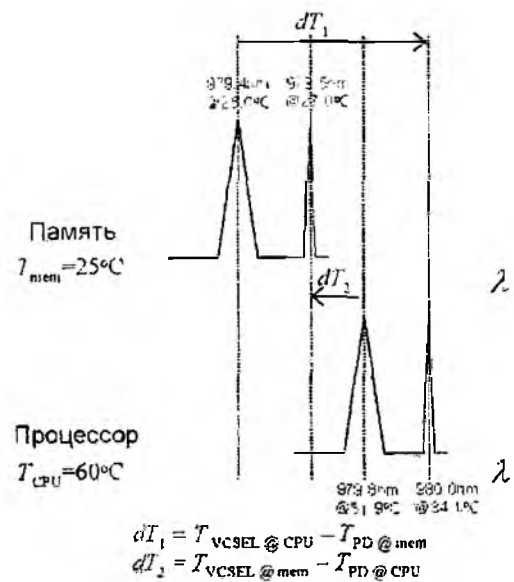


Рис. 8

Таким образом, чтобы настроить ЛВИ на процессоре и РФД на модуле памяти, необходимо увеличить длину волны РФД на величину $d\lambda/dT \cdot dT_1$. С другой стороны, чтобы настроить ЛВИ на модуле памяти и РФД на процессоре, необходимо уменьшить длину волны РФД на величину $d\lambda/dT \cdot dT_2$. Подобное смещение длины волны в сторону увеличения–уменьшения возможно за счет точного контроля толщины последнего слоя верхнего РЗБ приемника и будет подробно рассмотрен теоретически и экспериментально в последующих публикациях.

Несмотря на указанный недостаток, обладая высоким быстродействием и возможностью выделить необходимый узкий спектр колебаний, РФД являются наиболее подходящими устройствами для систем передачи данных. [44].

Модель взаимодействия процессов в лазере и постановка задачи

Теория полупроводниковых лазеров сводится, в основном, к описанию трех основных явлений в структуре – концентрации носителей, оптической мощности и температуры в устройстве [47], а также процессов их взаимодействия друг с другом, схематически представлена на рис. 9.

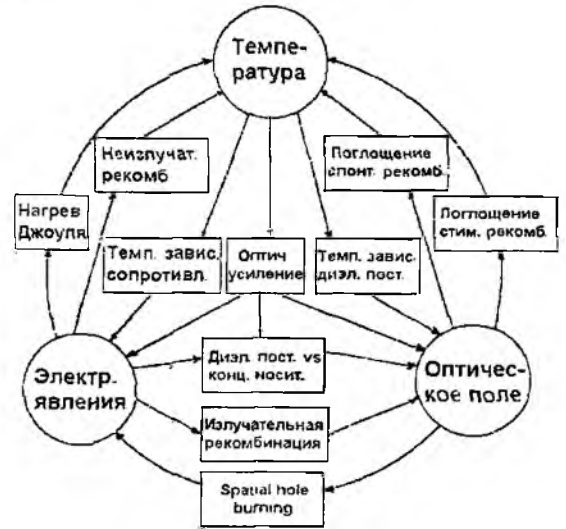


Рис. 9

Математическое представление оптического излучения

Согласно основным положениям макроскопической электродинамики электромагнитное поле в любой среде в каждый момент времени определяется четырьмя величинами: векторами \vec{E} и \vec{D} , характеризующими электрическое поле, и векторами \vec{H} и \vec{B} , характеризующими магнитное поле. Векторы электромагнитного поля зависят от трех пространственных координат (например, от декартовых координат x, y, z) и времени t . Они связаны между собой системой уравнений Максвелла.

Для того чтобы найти электрический \vec{E} и магнитный \vec{H} профили поля, резонансную длину волны λ и потери, связанные с рассеиванием и поглощением ($\alpha^{(рассеиван)} + \alpha^{(поглощен)}$) для каждой моды резонатора в азимутально-симметричных структурах VCSEL, необходимо решить векторное волновое уравнение, подчиненное соответствующим граничным условиям в каждом слое. Так как имеются несколько эквивалентных электромагнитных описаний любой системы, то можно написать волновые уравнения для электрического и магнитного полей в представлении скалярных или векторных потенциалов [48]. Наиболее мощный и удобный метод для решения этой задачи состоит в том, чтобы решить ее сначала для магнитного \vec{A} и электрического \vec{F} векторных потенциалов и, используя их, вычислить поля. В стационарном состоянии временных гармоник векторные потенциалы \vec{A} и \vec{F} подчиняются трехмерному векторному уравнению Гельмгольца (в гауссовых единицах):

$$\left\{ \nabla^2 + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon(\rho, z) \right\} \begin{Bmatrix} \vec{A}(\rho, \phi, z) \\ \vec{F}(\rho, \phi, z) \end{Bmatrix} = 0. \quad (9)$$

Здесь $\nabla^2 f = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial f}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа функции в цилиндрических координатах; c – скорость света; ρ, ϕ и z – цилиндрические координаты радиус, фаза и высота соответственно. \vec{A} и \vec{F} зависят от времени как $e^{i\omega t}$, $\omega = 2\pi c / \lambda$ – угловая частота; ϵ – цилиндрически симметричная, комплексная диэлектрическая функция:

$$\sqrt{\varepsilon} = N \equiv n + i \cdot \frac{g\lambda}{4\pi}, \quad (10)$$

где N – комплексный показатель преломления; g – материальное усиление в активной области [19]. Потери в зеркалах берутся со знаком минус. Мы принимаем $\mu = 1$ во всех областях.

Для азимутально-симметричной структуры векторные потенциалы разделяются по координате ϕ и зависят от нее как $e^{im\phi}$, где m – целое положительное число. Кроме того, при выражении потенциалов в цилиндрических координатах, компоненты \hat{z} подчиняются скалярному уравнению Гельмгольца

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \left(\frac{w^2}{c^2} \varepsilon(\rho, z) - \frac{m^2}{\rho^2} \right) \right\} \begin{Bmatrix} A_z(\rho, z) \\ F_z(\rho, z) \end{Bmatrix} = 0. \quad (11)$$

Чтобы найти поперечные магнитные моды (ТМ), мы должны решить уравнения для A_z , в то время как для нахождения поперечных электрических мод (ТЕ) необходимо решить уравнения для F_z . Так как произвольная мода может быть представлена как суперпозиция ТЕ и ТМ мод, то нам нужно только найти решение для двух неизвестных скалярных функций A_z и F_z . Векторы поля вычисляются в виде

$$\vec{E} = -\frac{ic}{w\varepsilon} \nabla \times \nabla \times \begin{pmatrix} \hat{z} A_z \\ \hat{z} F_z \end{pmatrix} - \nabla \times \begin{pmatrix} \hat{z} F_z \\ \hat{z} A_z \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$\vec{H} = \nabla \times \begin{pmatrix} \hat{z} A_z \\ \hat{z} F_z \end{pmatrix} - \frac{ic}{w\mu} \nabla \times \nabla \times \begin{pmatrix} \hat{z} F_z \\ \hat{z} A_z \end{pmatrix}. \quad (13)$$

что, в конечном счете, может быть представлено аналитическим классическим выражением для слабоограниченных волноводов [49]:

$$E_l^{k,m,s} = E_{k,m,s} \exp(ik\phi) \exp(i\beta_s z) * \begin{cases} J_k \left(\frac{ur}{r_A} \right) / J_k(u), & |r| \leq r_A \\ K_k \left(\frac{vr}{r_A} \right) / K_k(v), & |r| \geq r_A \end{cases}, \quad (14)$$

где $E_l^{k,m,s}$ – поперечная компонента электрического поля; $E_{k,m,s}$ – величина электрического поля при $r = r_A$; β_s – постоянная распространения продольной s -й моды. $J_k(u)$ и $K_k(u)$ – функции Бесселя и модифицированная функция Хенкеля k -порядка соответственно.

Комплексные параметры u и v могут быть определены из следующих выражений:

$$u = r_A \sqrt{k_0^2 n_{R1}^2 - \beta_s^2} \quad v = r_A \sqrt{\beta_s^2 - k_0^2 n_{R2}^2}. \quad (15)$$

Здесь n_{R1} и n_{R2} – коэффициенты преломления внутри и вне активной области соответственно.

Электрические явления

Распределение носителей в структуре VCSEL может быть описано следующими уравнениями [50].

Уравнение Пуассона для потенциала электростатического поля

$$\nabla \cdot \varepsilon \nabla V = -e(p - n + N_D^+ - N_A^-), \quad (16)$$

где V – электростатический потенциал; p , n , N_D^+ и N_A^- – концентрация дырок, электронов, донорных и акцепторных примесей соответственно.

Уравнение непрерывности для электронов и дырок:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{e} \nabla \cdot j_n + (G - R), \quad (17)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{e} \nabla \cdot j_p + (G - R). \quad (18)$$

Здесь j_n и j_p – плотности электронного и дырочного тока [50, 51]:

$$j_n = -e\mu_n \nabla V + eD_n \nabla n + eD_n' \nabla T, \quad (19)$$

$$j_p = -e\mu_p \nabla V - eD_p \nabla p - eD_p' \nabla T. \quad (20)$$

Первое выражение в правой части уравнений (19) и (20) описывает процесс дрейфа с коэффициентами подвижности μ_n и μ_p , а второе и третье – учитывают диффузию за счет градиента концентрации и температуры с коэффициентами диффузии D_n , D_n' , D_p и D_p' соответственно.

Скорость генерации носителей без учета оптического возбуждения и лавинного процесса генерации носителей

$$G = \frac{|j_n|}{eL_z} = \frac{|j_p|}{eL_z}, \quad (21)$$

где L_z – толщина активной области.

Скорость рекомбинации носителей R , в свою очередь, представлена в виде суммы излучательной и неизлучательной рекомбинаций:

$$R = \underbrace{R_{sp} + R_{sr}}_{\text{излучательная}} + \underbrace{R_{SRH} + R_A}_{\text{неизлучательная}}. \quad (22)$$

Излучательная рекомбинация может быть спонтанной и стимулированной, а неизлучательная представлена двумя процессами – рекомбинацией Шокли – Рида – Холла и Оже-рекомбинацией [49, 52].

Температурные явления описываются уравнением тепловой проводимости:

$$\frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} k_r [r, z, T(r, z)] r \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z [r, z, T(r, z)] r \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} \right) = -g_l [r, z, T(r, z)], \quad (23)$$

где k_r и k_z – радиальная и пространственная составляющие параметра тепловой проводимости; g_l – объемная плотность тепловой генерации [52]:

$$g_l = H_l + H_A + H_R; \quad (24)$$

g_l представляет собой сумму тепловых источников таких, как источник Джоуля. описывает процесс выделения тепла за счет столкновения носителей с фононами решетки и определяет влияние плотности носителей на температуру в структуре:

$$H_l = j_n^2 / q\mu_n n + j_p^2 / q\mu_p p; \quad (25)$$

источник, который определяет количество тепла, выделяемого при поглощении материалом с коэффициентом α_0 оптического излучения с энергией $h\nu$ и плотностью потока Φ_{ph} и определяет влияние оптического поля на температуру:

$$H_A = \alpha_0 \Phi_{ph} h\nu; \quad (26)$$

источник, который определяет количество тепла, выделенного в процессе неизлучательной рекомбинации и пропорционален разности между квази-уровнями Ферми и определяет влияние плотности носителей на температуру в структуре:

$$H_R = (R_{\text{вн}} + R_s)(E_{I_n} - E_{I_p}). \quad (27)$$

Поскольку лазер представляет собой многослойную структуру, необходимо, кроме перечисленного, учитывать анизотропию температурной проводимости [53], а также зависимость параметра от температуры и состава материала [54].

Кроме того, материальное усиление в активной области – это еще один важный процесс, связывающий воедино все три явления. Детальная модель усиления (поглощения), позволяющая анализировать любую слоистую КРС, получена из анализа эффективных уравнений Блоха [55] и описана более подробно в [56, 58].

В последующем, на основе анализа влияния основных явлений друг на друга, а также учета особенности геометрии прибора будет сформулирована модель лазера вертикального излучения с оксидным ограничением и внутренними контактами, а также резонансного фотодиода как основных элементов сверхкоротких оптических соединений.

Выводы

Современный волоконно-оптические линии связи доминируют в высокоскоростных системах длиной более 100 м. Однако для более коротких расстояний проводные соединения все еще являются основной технологией из-за ее простоты и дешевизны исполнения. В ближайшее время, скорость передачи информации по одному каналу достигнет 15 ГГц, при которых возможности проводных соединений уже не смогут удовлетворять современным требованиям увеличения скорости обработки данных из-за влияния паразитных емкостей и частотно зависимых потерь, таких как поверхностный эффект. Единственно приемлемым решением является использование оптических линий для соединения элементов электронных устройств обработки данных со скоростью передачи данных 15 Гбит/с по одному каналу.

Существующие оптоэлектронные приборы не удовлетворяют требованиям сверхкороткого оптического соединения (СКОС) ввиду таких как недостатков, как сложность интегрирования элементов на малой площади платы, пока еще высокого энергопотребления и существенного влияния температуры на изменение длины волны и величины порогового тока. Это определяет проблему создания активных и пассивных элементов СКОС с требуемым быстродействием, шириной спектра, энергопотреблением и адекватного теоретического описания физических процессов и наблюдаемых мощностных, модуляционных и спектральных характеристик данных систем.

Анализ элементов СКОС показал, что в качестве источника/приемника излучения лучше всего подходят полупроводниковые структуры с вертикальным излучением из-за их малых размеров и низкого энергопотребления. Однако эффекты нагромождения гока и сопротивления прибора еще достаточно сильно влияют на их динамические свойства. Эффективное подавление этого феномена приведет к более равномерному распределению носителей в активной области (основная часть носителей расположена над оксидным кольцом), что приведет к увеличению усиления и улучшению модуляционных свойств прибора.

Технологии СКОС будут актуальны для производителей суперкомпьютеров, в которых в цену конечного оборудования заложены значительные средства на внедрение новых разработок, но которые впоследствии подтолкнут развитие более дешевых систем серверного оборудования, и, в конечном счете, персональных компьютеров.

Автор выражает благодарность И.А. Сухоиванову за дискуссию и советы в ходе подготовки настоящей работы.

Литература 1. Tista J. The potential benefits of photonics in the computing platform // *Proc. SPIE*. Vol. 5729. 2005, P. 1-8. 2. Ily W. J. and Poulton J. W. Digital systems engineering // Cambridge University Press, 1998. P. 19-20. 3. Mohammed E., et al, "Optical Interconnect System Integration for Ultra-Short-Reach Applications // *Intel Technology Journal*. Vol. 8, No. 2, 2004. P. 115-127. 4. Alferov Zh. I. Double heterostructure concept and application in physics, electronics and technology. Nobel lectures // Dec. 8, 2000. Alba Madna, Stockholm University. 5. Kroemer H. Quasi-Electric Fields and Band Offsets: Teaching Electrons New Tricks. Nobel lectures // Dec. 8, 2000. Alba Madna, Stockholm University. <http://www.isp.kiev.ua>

- <http://www.iop.kiev.ua> 6. ISA&EISA theory and operation/ Ed. By E. Solary. Poway: Annabooks, 1992. 496p. 7. PCI power management/ Ed. by G. Willse, E. Solary and J. Ewertz. – Poway: Annabooks, 2001. 192p. 8. *Berry S.* Advanced bus and interface market and trends // Electronic trend publication Inc., September 2003. 9. *PCI Express system architecture/* Ed. by D. Anderson. R. Burdick, T. Shanley. Boston: Addison-Wesley, 2003. 1056p. 10. *Engineering Electromagnetics. Seventh Edition /* Ed. by William H. H. New York: McGraw Hill 2006. 794p. 11. *High-Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic /* Ed. by Johnson H & Graham M. New York: Prentis Hall, 1993, 151p. 12. *Huang D. et al.* Optical interconnects: out of the box forever? // IEEE JSTQE, Vol. 9, No. 2, 2003, P. 614-623. 13. *Baccheta P. et al.* Low-Power State Assignment Techniques for Finite State Machines // ISCAS2000, Vol. 5, 2000, P. 641-644. 14. *Leonberger F. J., Kung S.-Y., Athale R. A.* Optical interconnection for VLSI systems // Proc. IEEE, Vol. 72, No. 7, 1984, P. 850-866. 15. *Танненбаум Д.* Компьютерные сети. (3-е издание). С. Пб: Питер. 2002. 848с. 16. *Физика полупроводниковых лазеров /* Под ред. Х. Такумы. М.: Мир, 1989. 310 с. 17. Vertical cavity surface emitting lasers / Ed. By Wilmsen C.W., Temkin H., Coldren L.A. Cambridge: Univ. Press, 1999. 453 p. 18. *Melngailis I.* "Longitudinal injection-plasma laser of InSh // Appl. Phys. Lett., Vol. 6, No. 2, 1965, P. 59-60. 19. *Soda H., et al.* GaInAsP/InP surface emitting injection lasers // Japan. J. Appl. Phys., Vol. 18, No. 12, 1979, P. 2329-2330. 20. *Okuda H. et al.* Ga-InAsP/InP surface emitting injection laser with buried heterostructures // Japan. J. Appl. Phys., Vol. 20, No. 8, 1981, P. L563-L566. 21. *Soda H., Motegi Y., and Iga K.* GaInAsP/InP surface emitting injection lasers with short cavity length // IEEE J. Quantum Electron., Vol. 19, No. 6, 1983, P. 1035-1041. 22. *Uchiyama S. and Iga K.* Consideration on threshold current density of GaInAsP/InP surface emitting junction lasers // IEEE J. Quantum Electron., Vol. 22, No. 2, 1986, P. 302-309. 23. *Kinoshita S. and Iga K.* Circular buried heterostructure (CBH) GaAlAs/GaAs surface emitting lasers // IEEE J. Quantum Electron., Vol. 23, No. 6, 1987, pp. 882-888. 24. *Iga K., Koyama F. and Kinoshita S.* Surface emitting semiconductor lasers // IEEE J. Quantum Electron., Vol. 24, 1988, P. 1845-1855. 25. *Thornton R. L., Burnham R. D., and Sreifer W.* High reflectivity GaAs-AlGaAs mirrors fabricated by MOCVD // Applied Physics Letters, vol. 45, 1984, P.1028-1030. 25. *Huilong Z., et al.* Near ultraviolet optically pumped vertical cavity laser // Electronics Letters, Vol. 36, № 21, 2000, P. 1777 – 1779. 26. *Zhao F. et al.* Above-room-temperature optically pumped 4.12 μm mid-infrared vertical-cavity surface-emitting lasers // Applied Physics Letters, Vol. 80, № 7, 2002, P. 1129-1131. 27. *Baba T., et al.* Near room temperature continuous wave lasing characteristics of GaInAsP/InP surface emitting laser // Electronics Letters, Vol. 29, № 5, 1993, P. 913-914. 28. *Dudley J. J., et al.* Low threshold, wafer fused long wavelength vertical cavity lasers// Applied Physics Letters. Vol. 64, № 12, 1994, P. 1463-1465. 29. *Jewell J. L., et al.* Low-threshold electrically pumped vertical-cavity surface-emitting microlasers // Electron. Lett., Vol. 25, 1989, P. 1123-1125. 30. *Lear K. L., et al.* Vertical cavity surface emitting lasers with 21% efficiency by metalorganic vapor phase epitaxy // IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 6, 1994, P. 1053-1055. 31. *Yang G. M.* Ultralow threshold current vertical-cavity surface-emitting lasers obtained with selective oxidation // Electron. Lett., Vol. 31, 1995, P. 886-888. 32. *Lear K. E., Choquette K. D., Schneider P. R.* Selective oxidized cavity surface emitting lasers with 50 % power conversion efficiency // Electronics Letters, Vol. 31, №3, 1995, P. 208-209. 33. *Katz J., et al.* The intrinsic electrical equivalent circuit of a laser diode // IEEE J. Quantum Electron., 17, 4-7, (1981). 34. *Scott J. W., et al.* High Efficiency submilliamp Vertical Cavity Lasers with Intracavity contacts // IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 6, 1994, P. 678-680. 35. *Scott J. W., et al.* Modeling temperature effects and spatial hole burning to optimize vertical-cavity surface-emitting laser performance // IEEE J. Quant. Electron., Vol. 29, 1993, P. 1295–308. 36. *Katz J., et al.* The intrinsic electrical equivalent circuit of a laser diode // IEEE J. Quantum Electron., Vol. 17, 1981, P. 4-7. 37. *Krishnamoorthy A. V., et al.* Small-Signal Characteristics of Bottom-Emitting Intracavity Contacted VCSEL's // IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 12, No. 6, 2000, P. 609-611. 38. *Фотоприемники видимого и ИК диапазона /* Под ред. Р.Дж. Кисса: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1985. 328 с. 39. *Соболева Н.А., Меламид А.Е.* Фотоэлектронные приборы. М.: "Высшая школа", 1974. 376 с. 40. *Справочник по волоконно-оптическим линиям связи /* Под ред. С.В. Свечникова и Л.М. Андрушко. К.: Техника, 1988. 239 с. 41. *Selim Unlu M., Strite S.* Resonant Cavity enhanced photonic devices // J. Appl. Phys., Vol. 78, No. 2, 1995, P. 230-234. 42. *Chung I.-S., Lee Y.-T.* A method to tune the cavity-mode wavelength of resonant cavity-enhanced photodetector for bidirectional optical interconnects // IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 18, 2006, P. 46-48. 43. *Lee Y. T., Chung I. S., Chang K.S., Lysak V. V.* Integrated Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers and Resonant Cavity Enhanced Photodetectors for Bi-Directional Chip-to-Chip Optical Interconnects // Proc. of 7th "Int. Conf. on Laser and Fiber Optical Network Modeling (LFNM 2005), Ukraine, 2005 p.11. 44. *Vertical-cavity surface-emitting laser devices /* Ed. by Li H E., Iga K. Heidelberg: Springer series in photonics, 2003, 385p. 45. *Lysak V.V., Kovbasa A.A., Sukhoivanov I.A., Kublik A.V.* Calculation of the electromagnetic field in vertical cavity semi-

conductor lasers using vectorial weighting factor method. // Bulletin of V.N.Karazin Kharkov National University, Radiophysics. № 570, 2002. P.57-59. 46. *Stratton R.* Diffusion of hot and cold electrons in semiconductor barriers // Phys. Rev., vol. 126, 1982, pp. 65-87. 47. *Sukhoivanov I. A.* Influence of gain saturation and carrier dynamic models on the modulation response of quantum well lasers // Optical & Quantum Electron., vol. 31, 1999, P. 997-1007. 48. *Тсанг У.* Полупроводниковые инжекционные лазеры. Динамика, модуляция, спектры / Пер. с англ. под ред. Н. И. Гормакова. М.: Радио и связь. 1990. 320 с. 49. *Sukhoivanov I.A., Lysak V.V., Mashoshina O. V.* Study of the Auger recombination process in I-types strained quantum well structure InGaAsSb/GaSb // Optoelectronics and Semiconductor Techniques. Kiev, 2003, v.38, 2003, P.256-264. 50. *Wachutka G. R.* Rigorous thermodynamic treatment of heat generation and conduction in semiconductor device modeling // IEEE Trans. Computer-Aided Design, Vol. 9, 1999, P. 1141-1149. 51. *Osinski M., Nakwaski W.* Effective thermal conductivity analysis of 1.55 mm InGaAsP/InP vertical-cavity top-surface-emitting microlasers // Electronics Letters, Vol. 29, 1993, P. 1015-1016. 52. *Nakwaski W.* Thermal conductivity of binary, ternary, and quaternary III-V compounds // Journal Applied Physics. Vol. 64, 1988. P. 159 - 166. 53. *Ivanov P. S., Lysak V. V., Sukhoivanov I. A.* Advanced model for simulation of surface-emitting quantum-well lasers // Int. J. Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. Vol.14, 2001, P. 379-394. 54. *Lysak V. V., Kawaguchi H., Sukhoivanov I. A.* Gain Spectra and Saturation Power of Asymmetrical Multiple Quantum Well Semiconductor Optical Amplifiers // IEE Proc. Optoelectronics, Vol. 152, No 2, 2005, P. 131 – 139. 55. *Лысак В. В., Петров С. И., Кублик А. В.* Полупроводниковые оптические усилители на основе асимметричных многослойных квантово-размерных структур. Ч. 1. Постановка задачи // Радиотехника. 2007. Вып.148. С.299-311.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 27.08.2008