



Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

С. Д. Захаров, В. Б. Федоров, В. В. Цветков, Оптоэлектронные интегральные схемы с применением полупроводниковых вертикально излучающих лазеров, *Квантовая электроника*, 1999, том 28, номер 3, 189–206

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.188.218.103

4 января 2025 г., 09:16:05



Оптоэлектронные интегральные схемы с применением полупроводниковых вертикально излучающих лазеров

С.М.Захаров, В.Б.Фёдоров, В.В.Цветков

Рассматриваются оптоэлектронные интегральные схемы с дополнительными оптическими входами/выходами, в которых в качестве передающих элементов информации используются вертикально излучающие лазеры (ВИЛ). Показана взаимосвязь и преемственность оптических средств обработки и передачи информации и традиционной электронной элементной базы при создании трехмерных межсвязей с высокой пропускной способностью. Отмечаются проблемы, возникающие при использовании в линиях связи полупроводниковых инжекционных лазеров, и показано, какое место в их решении занимают ВИЛ. Подробно анализируются вопросы, относящиеся к возможным структурным и технологическим решениям при создании как отдельных лазеров, так и их массивов, а также проблемы, стоящие на пути объединения лазеров в матрицы излучателей. Значительное место уделяется интегральным схемам с оптоэлектронными «смарт-пикселями». Обсуждаются различные технологические методы интеграции GaAs-ВИЛ с кремниевой подложкой микросхемы.

Ключевые слова: инжекционные полупроводниковые лазеры, оптические соединения, оптоэлектронные интегральные схемы, смарт-пиксели.

Содержание

Введение	189
1. Предпосылки разработки интегральных электронных схем с оптическими входами и выходами.	190
2. Конструктивные особенности поверхностно излучающих лазеров с вертикальным резонатором	192
3. Геометрия ВИЛ	193
4. Особенности технологии	194
5. Материалы	195
6. Матрицы ВИЛ и их основные параметры	196
7. Смарт-пиксели, использующие ВИЛ	199
8. Интеграция ВИЛ с кремниевыми интегральными схемами	201
Заключение	204
Литература	205

Введение

В настоящее время происходит бурное развитие средств сбора, обработки и хранения информации. Поскольку информация становится стратегическим ресурсом общества, увеличение ее объема требует постоянного совершенствования средств обработки, что в конечном счете сводится к требованию повышения производительности вычислительных машин. Увеличение их производительности может быть достигнуто двумя путями: увеличением быстродействия элементной базы, а также использованием новых архитектурных решений, связанных с распараллеливанием вычислительных процессов. Вплоть до сегодняшнего дня наибольший вклад в развитие вычислительных средств вносят технологические решения, основанные на элементной базе.

Выделим несколько основных направлений исследований, связанных с разработкой элементной базы. Прежде всего, это полупроводниковая микроэлектроника.

Традиционная элементная база уже в течение нескольких десятилетий опирается на технологию получения кремниевых интегральных схем (ИС) – от больших ИС до сверхбольших ИС, ультрабольших ИС и гигантских ИС (после 2000 г.). На протяжении этих лет преобладающей являлась технология, основанная на МОП (металл – окисел – полупроводник)-транзисторах. Для специальных применений были разработаны биполярные схемы, обладающие наибольшим быстродействием. В последнее время повысился интерес к так называемым биполярным КМОП-устройствам (комплементарным МОП-устройствам), в которых удачно сочетаются преимущества биполярных транзисторов и КМОП-схем. В таких ИС оказалось возможным достижение высокого быстродействия при незначительном потреблении мощности в статических режимах.

Однако биполярные КМОП-схемы, вероятнее всего, останутся схемами специального назначения из-за более высокой стоимости и существенного увеличения числа технологических операций по сравнению с КМОП-ИС. По этой причине, по-видимому, вплоть до 2010 г. технология КМОП останется доминирующей для цифровых схем. По данным экспертных групп, занимавшихся вопросами разработки и создания высокопроизводительных

вычислительных машин с петафлопной производительностью (10^{15} опер./с), использование КМОП-технологии в такого рода системах является наиболее вероятным [1].

Основным технологическим процессом при изготовлении ИС, определяющим, с одной стороны, минимальный размер элемента на кристалле, степень интеграции и быстродействие, а с другой стороны, стоимость всей ИС, остается процесс литографии. Так, предполагается, что минимальный топологический размер будет снижен до 0.1 мкм к 2007 г. (в настоящее время он составляет 0.3 мкм). При этом большинство ведущих специалистов в области литографии считает, что вплоть до размеров 0.1 мкм преобладающей останется оптическая литография. Ожидания же в целом таковы: общепринятая КМОП-технология будет доминировать по крайней мере до размеров 0.05 мкм и, возможно, даже до 0.025 мкм [1].

Громадный прогресс технологии сверхбольших ИС сделал возможным объединение в одном кремниевом чипе нескольких миллионов транзисторов, работающих с тактовой частотой до 400 МГц. Ожидается, что в 2001 г. ИС будут содержать до 13 млн. полевых транзисторов, а тактовая частота достигнет 600 МГц [2]. Оценки, сделанные Полупроводниковой промышленной ассоциацией (Semiconductor Industry Association), показывают, что число транзисторов в одном логическом чипе и одном чипе памяти будет соответственно удваиваться и учетверяться каждые три года.

Огромные возможности ИС требуют резкого увеличения полосы частот и числа каналов ввода/вывода для организации адекватного обмена данными между ИС в устройствах обработки и передачи информации. Используемые в настоящее время межсоединения на основе металлических проводников и полосковых линий имеют серьезные ограничения по степени параллелизма и скорости передачи информации. Кроме того, проводниковые линии связи имеют ограничения, обусловленные слабой помехозащищенностью, которая не позволяет осуществлять надежное «развязывание» информационных сигналов. Эффективное решение этой проблемы возможно лишь с привлечением новых физических принципов организации межсвязей.

Одно из перспективных возможных решений на этом пути – создание устройств обработки информации с трехмерными межсоединениями, в которых для организации обмена информацией между ИС, наряду с электрическими связями, используются оптические связи, реализуемые оптическими методами, в том числе с помощью оптических полосковых волноводов [3].

В настоящем обзоре мы рассмотрим одно из направлений, которое является основным с точки зрения накопленного практического опыта в применении достигшей элементной базы квантовой электроники при создании оптоэлектронных схем для устройств обработки информации с двумерными и трехмерными межсоединениями. Ключевым моментом здесь является использование так называемых полупроводниковых поверхностных вертикально излучающих лазеров (ВИЛ).

Настоящий обзор посвящен рассмотрению оптоэлектронных ИС, основанных на широком применении матриц ВИЛ. В начале обзора сформулированы предпосылки разработки ИС с оптическими входами и выходами и показана взаимосвязь и преемственность оптических средств обработки и передачи информации и традиционной электронной элементной базы при создании трех-

мерных межсвязей с высокой пропускной способностью. Далее подробно обсуждаются вопросы, относящиеся к возможным видам геометрии ВИЛ, способам технологических решений при создании массивов, а также особенности, возникающие на пути объединения ВИЛ в матрицы излучателей. Особое место в обзоре уделено рассмотрению кремниевых интегральных схем с оптоэлектронными «смарт-пикселями», в которых ВИЛ на основе арсенида галлия играют доминирующую роль. Рассматриваются технологические решения, обеспечивающие возможность создания таких оптоэлектронных ИС. В заключении отмечаются перспективы использования ВИЛ в оптоэлектронных ИС, выполняющих обработку и передачу информации.

1. Предпосылки разработки интегральных электронных схем с оптическими входами и выходами

Оптоэлектронная ИС представляет собой полупроводниковую структуру, в которой электронный чип, выполняющий логическую обработку информации, имеет, наряду с расположенными по его периферии электрическими выводами, также оптические входы/выходы с перпендикулярным поверхности чипа вводом/выводом информационных сигналов [4]. Применение такой ИС открывает возможность создания компактных устройств с трехмерными связями и, что не менее важно, позволяет в платах двумерной конструкции (за счет использования межсоединений на основе оптических световодов вместо полосковых электрических линий) резко повысить темп обмена информацией между размещенными на печатной плате ИС. Необходимость разработки ИС с оптическими связями обусловлена следующими факторами.

Во-первых, требования к производительности перспективных суперЭВМ в настоящее время возросли до $10^{12} - 10^{15}$ операций с плавающей запятой в секунду. Ясно, что разработка ЭВМ с такой производительностью осуществима лишь при использовании архитектуры массового параллелизма, в которой большое число быстродействующих ИС объединено той или иной системой взаимных связей. Поскольку в суперЭВМ с архитектурой массового параллелизма одновременно может работать с частотой переключения 1 – 10 ГГц очень большое число логических и передающих элементов, то основное значение приобретает их энергетический параметр – энергия, требуемая на одно логическое срабатывание и на передачу одного бита двоичной информации.

Во-вторых, достигнуто понимание разграничения областей применения электронных и оптических технологий в конструировании суперЭВМ: обработка информации должна осуществляться исключительно электронными методами и средствами, а ее передача – с применением оптики и элементной базы квантовой электроники.

Потенциальные преимущества передачи информации с использованием световых пучков, распространяющихся в свободном пространстве, вместо электрических связей хорошо известны. Трехмерные оптические системы могут обеспечить:

– пересылку данных в параллельном формате (например, в виде двумерного бинарного изображения многозначного двоичного числа) по пересекающимся пространственным связям со скоростью передачи информа-

ции по каждой из них до 10 Тбит/с;

- чрезвычайно малое различие времен передачи разрядов числа (~ 30 фс);
- независимую передачу информации на различных оптических частотах или двумя ортогональными поляризациями;
- бесконтактность соединений;
- неподверженность электромагнитным помехам.

Многими из этих преимуществ обладают системы передачи информации, использующие в качестве линий связи оптические волноводы.

Энергетические преимущества применения оптических соединений не столь очевидны и требуют пояснения. В современных устройствах обработки информации применяются соединения полупроводниковых приборов двух типов: резистивные (металлические проводники), используемые для большинства связей внутри ИС, когда длина соединения $l \ll ct$ (где c – скорость электромагнитной волны, τ – длительность передаваемого импульса), и не имеющие омических потерь (полосковая линия и высокочастотный кабель), когда $l \sim ct$ или $l > ct$. Соединение первого типа можно рассматривать как электрическую цепь с сосредоточенными параметрами. Для передачи импульсного сигнала с помощью такого соединения требуется энергия $W_r = CU_0^2$, где C – электрическая емкость цепи; U_0 – напряжение логического переключения, которое из-за тепловых флуктуаций и разброса порога срабатывания для полупроводниковых приборов при комнатной температуре должно быть не менее 1 В. Эта энергия выделяется в виде тепла в омическом сопротивлении межсоединения при его зарядке и разрядке.

В ИС влияние энергетического фактора резистивной линии начинает проявляться при длительностях импульса $\tau \leq 1$ нс. В соединениях, имеющих длину, сравнимую с размером кристалла (например, в схемах матричного типа, предназначенных для коммутации сигналов между N входами и N выходами), энергия W_r оказывается такой, что при одновременной пересылке данных через N каналов тока, возбуждающие резистивные линии, создают через индуктивные выводы драйверов помехи, которые могут приводить к ошибкам в передаваемой информации [5]. В коммерчески доступных схемах такого типа с 16 входами и 16 выходами при скорости передачи информации по одному каналу 500 Мбит/с вероятность ошибки при передаче одного бита составляет 10^{-11} [6]. Применительно к суперЭВМ такая надежность пересылки информации является недостаточной. Разработка коммутирующей высокопроизводительной полностью электронной ИС с большим числом входов и выходов не представляется возможной из-за резкого увеличения вероятности ошибок и требует нетрадиционных решений.

Для передачи импульсного сигнала с использованием электромагнитной полосковой или коаксиальной линии, нагруженной во избежание отраженных сигналов на сопротивление, равное ее волновому сопротивлению ρ , требуется энергия $W_{el} = U_0^2 \tau / \rho = 20$ пДж при возбуждающем линии токе $i_{in} = 20$ мА, если $\rho = 50$ Ом. В то же самое время в ИС передающие и принимающие информацию полупроводниковые элементы могут иметь энергию переключения, много меньшую 20 пДж при токе, много меньшем 20 мА. Однако применение таких энергетически эффективных элементов не представляется возможным, т. к. отсутствуют эффективные малогабаритные устройства для согласования большого входного

или выходного сопротивления элементов с низким волновым сопротивлением электромагнитной линии или коаксиального кабеля. Снижение W_{el} и i_{in} при использовании полосковых линий или коаксиального кабеля со значительно большим волновым сопротивлением представляется проблематичным из-за практических ограничений, налагаемых конструктивными особенностями подобных линий передачи.

Решение этой проблемы может заключаться в использовании оптических соединений и приборов квантовой электроники (полупроводникового инжекционного лазера в качестве передатчика информации и фотодетектора в качестве ее приемника). Волновая природа света позволяет хорошо известными средствами (путем просветления оптики, нанесения интерференционных антиотражающих и поглощающих покрытий) согласовать на частотах световых колебаний ($10^{14} - 10^{15}$ Гц) импедансы лазера и фотодетектора с импедансом оптического волновода ρ или свободного пространства ρ_0 (377 Ом). При таком согласовании напряжение U на нагрузочном сопротивлении R_{load} фотодетектора не зависит от ρ или ρ_0 , а определяется только током i_{in} , протекающим через полупроводниковый лазер, сопротивлением R_{load} , квантовыми эффективностями лазера (η_{las}) и фотодетектора (η_{ph}) и коэффициентом светопропускания α оптического соединения: $U = i_{in} R_{load} / \alpha \eta_{las} \eta_{ph}$. Коэффициент светопропускания оптической системы и волновода может быть близким к единице, для существующих и разрабатываемых полупроводниковых лазеров и фотоприемников $\eta_{las} \leq 0.5$ и $\eta_{ph} \approx 1$, сопротивление R_{load} определяется постоянной RC -цепи фотоприемника и может существенно превышать $\rho = 50$ Ом. Вследствие этого напряжение логического срабатывания $U_0 = 1$ В на выходе фотоприемника может достигаться при меньших токе i_{in} и энергии W_{el} , необходимых для передачи одного бита информации, чем в случае электромагнитной полосковой линии или высокочастотного кабеля.

Кроме того, важными факторами, стимулирующими использование оптических связей, являются большой прогресс в исследованиях и технологии изготовления матриц ВИЛ с низкими пороговыми токами лазера (до 10–30 мкА) и быстродействующих полупроводниковых фотоприемников с высокой чувствительностью, а также успехи, достигнутые в интеграции таких элементов с электронными схемами обработки сигналов, что привело в последние годы к созданию принципиально новой оптоэлектронной интегральной структуры, получившей название смарт-пиксел (smart pixel).

Термин «смарт-пиксел» в дословном переводе с английского означает «разумный» («интеллектуальный») элемент оптического двумерного массива. Отдельный смарт-пиксел представляет собой фрагмент ИС, в которой объединены устройства ввода/вывода оптической информации и электронная схема для обработки этой информации (рис. 1). Сложность электронной схемы может в значительной степени варьироваться – от одного или двух транзисторов в простых устройствах, обеспечивающих формирование и усиление сигналов, до нескольких тысяч транзисторов в устройствах, осуществляющих сложную обработку информации, например обработку в системах с асинхронной (пакетной) передачей данных.

В такой ИС входной оптический сигнал преобразуется в электрический, усиливается до необходимого уровня и поступает на электронную схему обработки. После

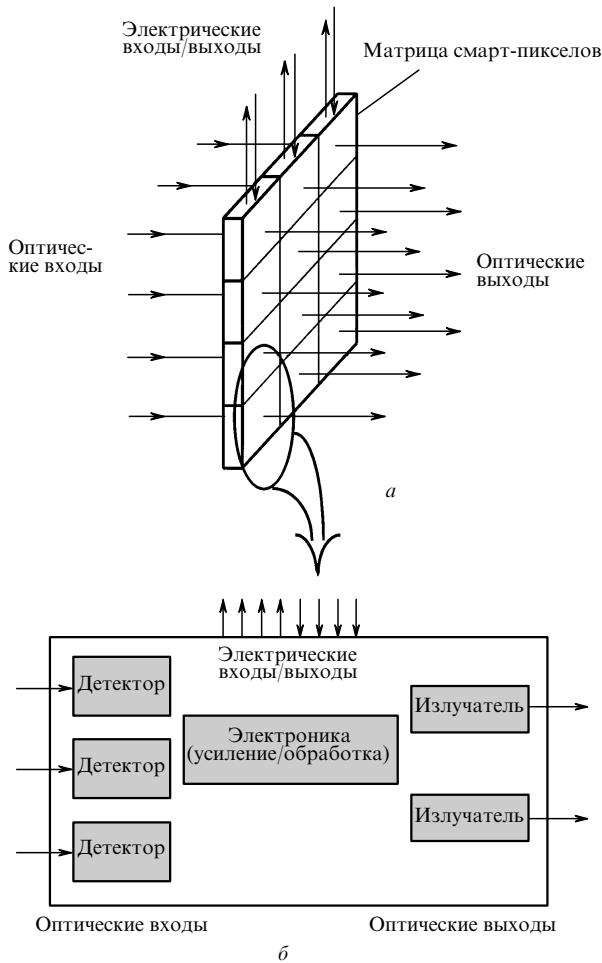


Рис.1. Интегральная схема с матрицей смарт-пикселей (а) и структура отдельного смарт-пикселя (б) [7].

обработки электрический сигнал преобразуется в оптический и поступает на выход схемы. В многоканальном исполнении отдельные элементы смарт-пикселей объединяются в матрицу, образуя оптоэлектронную ИС. Информация поступает на матрицу и после обработки выходит в виде двумерного оптического массива. Информация в оптическом виде может передаваться из одной матрицы в другую с использованием различных оптических межсоединений.

В простейшем случае матрица представляет собой однородную структуру эквидистантно размещенных однотипных смарт-пикселей. В общем случае возможен более сложный закон размещения элементов в матрице, который определяется архитектурой устройств, конструируемых на базе матриц смарт-пикселей, и типом используемых оптических систем [7].

Область применения матриц смарт-пикселей в значительной степени зависит от их основных характеристик: общего числа оптических входов/выходов; плотности размещения смарт-пикселей в матрице; функциональной сложности, определяемой как отношение общего числа транзисторов в матрице к общему числу входов/выходов; общей производительности, равной произведению общего числа входов/выходов на производительность отдельного канала.

Создание матриц смарт-пикселей в настоящее время идет по двум направлениям. Одно из них – изготовление матриц смарт-пикселей с большой общей производи-

тельностью (свыше 100 Мбит/с) и умеренным числом оптических входов/выходов ($10 - 10^4$) при достаточно высокой функциональной сложности отдельных смарт-пикселей (более 50 транзисторов на канал).

Другое направление, использующее технологию «жидкий кристалл на кремнии», состоит в изготовлении матриц с высокими коммутационными возможностями, т. е. с большим числом оптических входов/выходов (более 10^5), но с меньшими производительностью (менее 100 Мбит/с) и функциональной сложностью (менее 50 транзисторов на канал). В соответствии с этими двумя направлениями можно выделить и две области применения матриц смарт-пикселей. Так, областью применения матриц высокопроизводительных смарт-пикселей могут быть коммутационные системы, оптоэлектронные объединительные платы второго уровня или специализированные высокопроизводительные вычислительные устройства. Область применения матриц с большим числом входов/выходов – дисплеи, аналоговые оптические процессоры, оптические нейронные сети, оптические запоминающие устройства.

Достигнутым результатам и перспективам в области разработки оптоэлектронных ИС с использованием ВИЛ посвящены последующие разделы.

2. Конструктивные особенности поверхностно излучающих лазеров с вертикальным резонатором

Идея поверхностно излучающего полупроводникового лазера с вертикальным резонатором (vertical-cavity surface-emitting laser – VCSEL) впервые была высказана сотрудниками Физического института им. П.Н.Лебедева в 1964 г. и относилась к полупроводниковым лазерам, возбуждаемым электронным пучком [8]. Инжекционные полупроводниковые ВИЛ впервые были предложены в 1979 г. сотрудниками Токийского технологического института [9]. Первый такой лазер состоял из активной области GaInAsP толщиной 1.8 мкм и металлических зеркал с отражательной способностью $\sim 85\%$. Лазер работал при температуре 77 К в импульсном режиме с пороговой плотностью тока 44 кА/см². Пороговый ток был слишком велик из-за большого объема активной области. В дальнейшем там же были осуществлены импульсный [10], а затем и непрерывный [11] режимы работы при комнатной температуре.

Примерно с середины 80-х гг. благодаря достижениям в технологии роста сложных гетероструктур, а также конструктивным находкам наблюдается довольно устойчивая тенденция уменьшения пороговой плотности тока ВИЛ при комнатной температуре [12, 13] и увеличения их квантовой эффективности [14, 15].

В настоящее время во многих лабораториях освоено коммерческое производство матриц ВИЛ с числом элементов 8×8 и рассматриваются возможности их использования в практических разработках, что связано с определенными преимуществами ВИЛ перед стандартными инжекционными полупроводниковыми лазерами, излучающими с торцов.

В силу специфичности конструкции и расположения $p-n$ -перехода вдоль направления излучения интеграция торцевых инжекционных полупроводниковых лазеров в двумерные массивы излучателей связана со значительными трудностями. Наиболее распространены два спо-

соба изготовления матриц, при которых в обычном плосковом лазере либо вытравливается 45-градусное зеркало для поворота выходящего света в вертикальном направлении, либо специально создаются распределенные брэгговские отражатели с решетками для связи выходящего из волновода излучения в вертикальном направлении.

Проблемы, связанные с торцевым выводом излучения, в ВИЛ не возникают. В силу аксиальной симметрии резонатора в поверхностно излучающих лазерах возможно формирование светового пучка с круговой апертурой и небольшой угловой расходимостью. Сравнительно небольшие продольные размеры резонатора дают возможность работать в режиме одной продольной моды. И наконец, преимущества, связанные с реализацией технологического цикла в целом (эпитаксиальное выращивание полупроводниковой пластины, ионное травление и др.), значительно облегчают интеграцию ВИЛ в матрицы излучателей и уменьшают стоимость производства матриц ВИЛ по сравнению с матрицами полосковых лазеров.

Например, ВИЛ на основе GaAs [16–18] имеют тонко-слоистую активную область, ограниченную в вертикальном направлении двумя многослойными зеркалами. Активная область включает обычно от одной до трех квантовых ям в виде тонких (~ 10 нм) слоев GaAs или InGaAs, разделенных барьерными слоями AlGaAs. Поскольку усиление в такой тонкой активной области составляет всего 1 %, то коэффициенты отражения зеркал для обеспечения генерации должны быть очень высокими – не менее 99.5 %. Для достижения такого коэффициента отражения зеркал должны содержать от 20 до 30 пар слоев. Верхнее и нижнее зеркала резонатора создаются в легированных слоях соответственно *n*- и *p*-типа. Ток в активную область инжектируется вертикально через металлический электрод. Полупроводниковая структура выращивается на подложке GaAs методом МОС-гидридной газофазной технологии или молекулярно-лучевой эпитаксии.

3. Геометрия ВИЛ

Существуют несколько возможностей для выбора геометрии ВИЛ [18–20] (рис.2). Выбор той или иной геометрии в значительной степени зависит от материала активной области, от прозрачности материала подложки для лазерного излучения, от проводимости зеркал, а также от конкретных применений ВИЛ.

3.1. Мезаструктуры с излучением «вверх» и «вниз»

Один из простейших способов изготовления ВИЛ состоит в вытравливании так называемой мезаструктуры [21–23]. Размеры активной области лазера в горизонтальном направлении определяются травлением материала (рис.2,а,б). При диаметрах резонатора более 20 мкм применяется влажное химическое травление. Для изготовления лазеров с меньшим диаметром активной области используются различные методы ионного травления. С применением таких анизотропных технологий травления удалось уменьшить диаметр лазеров до 1.5 мкм [24]. Метод химически-активного ионного травления позволяет создавать в слоях AlAs/GaAs вытравленные структуры с глубинами, превышающими 10 мкм, при одновременном сохранении гладких вертикальных стенок [22,23].

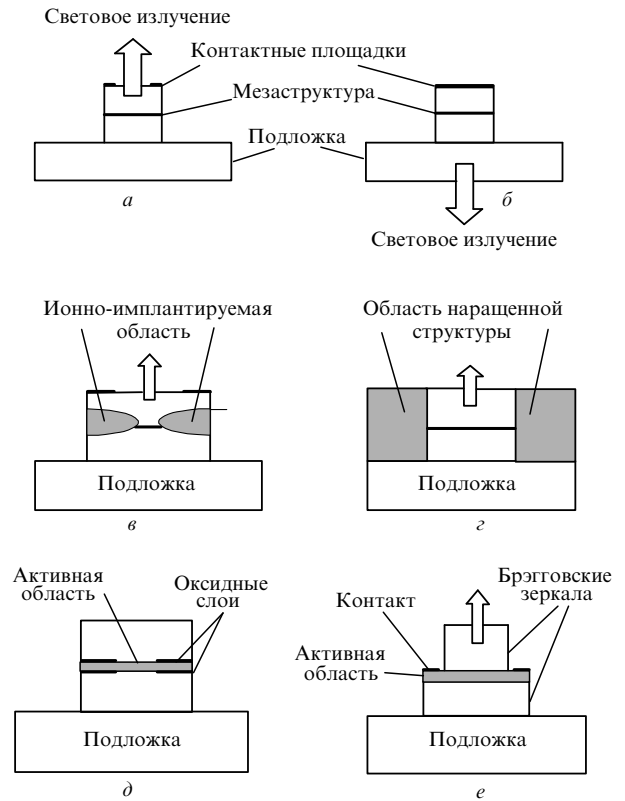


Рис.2. Возможные типы геометрии лазеров с вертикальным выводом излучения: лазеры с вытравленной мезаструктурой и выводом излучения «вверх» (а) и через подложку (б), лазеры с ионно-имплантируемыми ограничениями (имплантируемые области заштрихованы) (в), с наращенной структурой (г), с оксидированными слоями (д) и с внутррезонаторными контактами (е).

Однако наличие поверхностных дефектов на стенках мезаструктуры может приводить к существенному снижению квантовой эффективности ВИЛ.

Излучение может выводиться как через верхнее зеркало (рис.2,а), так и через нижнее (рис.2,б). Подложка из GaAs является непрозрачной для излучения лазера с квантоворазмерными GaAs-слоями в активной области ($\lambda \approx 0.85$ мкм), излучение выводится через верхнее зеркало. В таких устройствах ток должен инжектироваться либо через кольцевые, либо через прозрачные контакты. Геометрия с вертикальным верхним выводом излучения может оказаться более предпочтительной для матриц лазеров, которые необходимо смонтировать на соответствующих держателях – таких же, как и в случае сверхбольших ИС.

Если же активная область содержит слой InGaAs, то излучение сдвигается в более длинноволновую область и подложка из GaAs становится прозрачной для него. Это позволяет изготавливать лазеры с $\lambda = 0.98$ мкм и выводом излучения через нижнее зеркало и подложку [18–20]. В этом случае отражательная способность верхнего зеркала увеличивается путем нанесения контактного металла. Такие лазеры имеют определенные преимущества при конструировании оптоэлектронных устройств, т. к. в этом случае при изготовлении матриц смарт-пикселей возможно использование технологии «перевернутого» кристалла (см. разд.8), что в принципе позволяет достичь более широкой полосы модуляции. Геометрия с нижним выводом излучения также обеспечивает лучший тепловой контакт.

3.2. Пассивация лазеров с вытравленной мезаструктурой

На вытравленные лазерные мезаструктуры необходимо нанести изолирующий слой для предотвращения закорачивания тока на подложку, а также эрозии во влажной атмосфере. Пассивация может осуществляться различными способами: селективным наращиванием высокоомных полупроводниковых слоев вокруг лазерной структуры с последующим достижением планарности покрытия и созданием контактных площадок; нанесением полиимидов, обеспечивающих ровное полимерное покрытие и планарность поверхностного рельефа; нанесением оксидов и нитридов [18,23].

3.3. Лазеры на основе ионной имплантации

Другой путь создания отдельных лазеров в базовой полупроводниковой пластине состоит в применении технологии ионно-лучевой имплантации (рис.2,в) [18–20, 25–33]. С помощью последней в нижних слоях верхнего зеркала создается кольцевидный слой материала с высоким сопротивлением, определяющий зону протекания тока, а следовательно, и границу активной области. В этом случае сохраняется исходная планарная структура пластины, что исключает влияние поверхностных эффектов на характеристики приборов и существенно улучшает условия отвода тепла по сравнению с вытравленной мезаструктурой.

Импантируемые ионы кислорода выбивают атомы из узлов кристаллической решетки и создают области с высоким сопротивлением и большим числом ловушек. Импантируемые с энергией 200 кэВ протоны позволяют создать высокоомный слой на глубине ~ 1.4 мкм в материалах типа AlGaAs. Таким образом, линиям плотности электрического тока может быть придана форма воронки, начинающейся от больших контактных площадок и сужающейся к малым неимпантированным областям (рис.2,в).

Как и в предыдущем случае, ионная имплантация наиболее подходит к лазерам с эпитаксиальными выращенными верхним и нижним зеркалами, выводящими излучение. Соседние ВИЛ могут быть изолированы друг от друга посредством травления мезаструктуры или имплантации.

3.4. Лазеры с наращенной гетероструктурой

Данный тип геометрии (рис.2,е) обеспечивает профилирование показателя преломления в планарной структуре и создание волноводной области [34–39]. Кроме того, наращенная структура обеспечивает пассивацию боковых поверхностей и улучшает условия теплоотвода.

3.5. Лазеры с ограничениями тока оксидированными слоями

Существенное улучшение физических характеристик ВИЛ достигнуто при использовании технологии селективного оксидирования, что связано с уменьшением физического объема активной области (рис.2,д) [40–50]. В этом случае на границе между активной областью и зеркалами выращивается слой AlGaAs с высоким содержанием алюминия и производится травление мезаструктуры, а затем осуществляется окисление алюминия в этих слоях, для чего проводится отжиг при температуре 350–500°C. При этом AlGaAs превращается в прочный спекшийся оксидный слой с изолирующими свойствами.

Оксидирование начинается на боковых поверхностях лазеров, а в дальнейшем затрагивает и центральные части. Окисление продолжается до тех пор, пока диаметр центральной (не окисленной) области слоя не достигнет нескольких микрометров. Образованная таким способом оксидная диафрагма является не только ограничителем тока, но и областью, в которую не проникает световое излучение в радиальном направлении из-за возникшего на границе оксидной области градиента показателя преломления.

Эта технология позволяет создавать лазеры с микронными размерами активной области и чрезвычайно низкими (до 8 мкА) пороговыми токами [50].

3.6. Устройства с внутррезонаторными контактами

Эпитаксиально выращенные зеркала могут обладать большим электрическим сопротивлением и поэтому ограничивать выходную световую мощность вследствие возрастания температуры активной области. Использование двухступенчатой вытравленной мезаструктуры (рис.2,е) дает возможность направить электрический ток мимо верхнего отражающего зеркала. Однако большой разброс тока на контактах данного типа может способствовать возникновению высших поперечных мод [20].

4. Особенности технологии

Необходимые для оптоэлектронных устройств сложные полупроводниковые гетероструктуры с низкой плотностью дефектов в кристаллической решетке требуют использования технологии эпитаксиального роста. В настоящее время существуют две основные разновидности технологий: металлоорганическая эпитаксия (ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого) из газовой фазы (metal-organic vapour phase epitaxy – MOVPE) [51, 52] и молекулярно-пучковая эпитаксия (molecular beam epitaxy – MBE) [53–55]. Их основные особенности описываются ниже.

4.1. Металлоорганическая эпитаксия

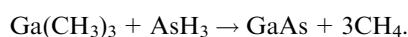
Данная технология также известна под названием «металлоорганическое химическое осаждение из газовой фазы» (metal-organic chemical vapour deposition – MOCVD). В качестве затравочного кристалла, на котором происходит осаждение эпитаксиальных слоев и выращивается полупроводниковая пластина, используется подложка. Обычно она располагается на графитовом основании, нагреваемомся индукционными токами высокой частоты до температур 500–700°C (температура определяется типом химических соединений). Рост осуществляется в атмосфере водорода при давлении 100–700 Тор. Исходные реагенты в процессе роста вследствие химической реакции при взаимодействии с горячей подложкой разлагаются. Элементы V группы обычно выбираются в качестве гидридов (например, арсин или соединение мышьяка и водорода), а элементы III группы – в качестве металлоорганических соединений (например, триметилгаллий). Кремний и цинк, играющие роль легирующих добавок, чаще всего вводятся в виде силана и соответственно диэтилцинка. В табл.1 перечислены все реагенты, используемые при получении ВИЛ. Существует довольно большое число и других реагентов, однако они менее употребительны.

Пары металлоорганических соединений получают

Табл.1. Металлоорганические и гидридные реагенты, используемые для роста InGaAs- и AlGaAs-соединений.

Элемент	Реагент
Ga	Триметилгаллий Ga(CH ₃) ₃
Al	Триметилалюминий Al(CH ₃) ₃
As	Арсин AsH ₃
In	Триметилиндий In(CH ₃) ₃
Si	Силан SiH ₄
Zn	Диэтилцинк Zn(C ₂ H ₅) ₂

ся в результате пропускания водорода через жидкофазные химические соединения реагентов. Для качественного роста и однородности важно использовать ламинарные потоки паров вдоль выращиваемой подложки. Перенос химических реагентов к поверхности осуществляется под действием диффузии, происходящей в поперечном к пограничному слою потока пара направлении. При образовании арсенида галлия основной является реакция



Это – обобщенная реакция, которая в действительности является более сложной и включает в себя несколько ветвлений [52].

Соединения AlGaAs выращиваются при температуре 700°C, тогда как InGaAs в виде квантовых ям – при более низких температурах (в интервале 500–600°C) для достижения оптимального качества кристалла. Скорость роста составляет 2.5 мкм/ч. При создании высококачественных брэгговских зеркал с успехом может использоваться большая скорость роста (вплоть до 4 мкм/ч).

4.2. Молекулярно-пучковая эпитаксия

При такой технологии выращиваемые материалы содержатся отдельно в эффузионных ячейках. В каждой ячейке имеется тигель с электрическим нагревателем, который расплавляет загружаемые порции материалов (Al, Ga, As и т. д.). Молекулы удаляются из зоны тиглей и образуют в реакторной камере поток, который при прохождении в область подложки регулируется изменением температуры ячеек и специальными затворами.

В камере роста поддерживается низкое (10^{-10} Тор) давление. Поскольку при этом средняя длина свободного пробега молекул в камере оказывается очень большой, то они испускаются из эффузионных ячеек и, не рассеиваясь, движутся в виде молекулярного пучка прямо к подложке. Попадая на нагретую подложку, молекулы III и V элементных групп адсорбируются в виде кристаллической решетки, в результате чего происходит эпитаксиальный рост. Для роста AlGaAs- и InGaAs-соединений используются ячейки с Al, Ga, In и As₂ или As₄. Расплавленный мышьяк совершает эффузию в виде молекул As₄, которые, попадая на горячую поверхность, «разваливаются» и образуют более химически-активные молекулы As₂. Ячейки с Be и Si обеспечивают легирующие добавки *p*- и *n*-типов. Для уменьшения влияния неоднородности пучка подложка в процессе роста вращается.

Как правило, соединения AlGaAs выращиваются при 600°C, в то время как квантовые ямы InGaAs – при меньшей температуре (540°C). Скорость роста при этом составляет ~1.0 мкм/ч.

5. Материалы

Для создания ВИЛ может быть использовано большое число полупроводниковых соединений A₃B₅ и A₂B₆. Наиболее изученными системами для изготовления активной области в виде квантовых ям ВИЛ являются тройные соединения InGaAs, отделенные друг от друга барьерными слоями GaAs. Подложка GaAs прозрачна для излучения квантовых ям InGaAs, поэтому возможны устройства с верхним или нижним выводом излучения. Квантоворазмерные структуры InGaAs/GaAs находятся в сжато-напряженных состояниях, что обеспечивает увеличение коэффициента усиления. Наименьшие пороговые плотности тока в таких системах имеют место для лазеров, содержащих одну квантовую яму. Большинство лазеров в настоящее время работает на длинах волн около 980 нм и содержит квантовые ямы In_{0.2}Ga_{0.8}As. Длины волн лазерной генерации такого рода устройств находятся в диапазоне 0.9–1.0 мкм.

В последнее время появились сообщения о создании лазеров с выводом излучения через подложку AlGaAs, работающих на длине волны 0.85 мкм [56]. О лазерах с излучением в ближней ИК области спектра (0.750 мкм) сообщается в работе [57]. Квантовые ямы GaAs/AlGaAs используются в активной области устройств, излучающих в диапазоне 0.78–0.88 мкм. Излучение в этой области представляет интерес для оптической накачки твердотельных лазеров, а также для систем связи небольшой протяженности. Для таких лазеров применяются зеркала из Al_{0.15}Ga_{0.85}As/AlAs, причем каждое зеркало содержит около 25 пар слоев.

Подложки GaAs непрозрачны к выходному излучению, поэтому используется верхний вывод излучения. Лазер с нижним выводом излучения был реализован на прозрачной подложке Al_{0.1}Ga_{0.9}As (к сожалению, эти подложки оказались дорогостоящими). Пороговые плотности тока в таких лазерах составляют ~800 А/см², т. е. несколько выше, чем в лазерах на основе InGaAs, главным образом благодаря ненапряженному состоянию активной области.

Большое внимание уделяется разработке ВИЛ для работы в длинноволновой (1.5 мкм) области спектра [58, 59], поскольку такие лазеры совместимы с современными средствами волоконно-оптической связи. Основные трудности, возникающие на пути создания данных лазеров, связаны с малостью коэффициента усиления активной области, а также с подбором материалов для многослойных зеркал, т. к. на этой длине волны коэффициенты преломления доступных материалов различаются незначительно.

Лазеры с квантовыми ямами InGaP/InAlGaP в активной области пригодны для работы в видимом диапазоне с $\lambda = 630–690$ нм [60]. Брэгговские зеркала могут изготавливаться на основе соединений Al_xGa_{1-x}As/AlAs ($x \sim 0.5$) и вследствие меньшего скачка показателя преломления содержат от 35 до 55 пар слоев. Толщина лазерной структуры превышает 10 мкм.

Ширина запрещенной зоны для прямозонных переходов в Al_xGa_{1-x}As для $x < 0.42$ меняется от 1.42 до 1.9 эВ, что соответствует длинам волн излучения от 870 до 650 нм. Существует небольшое число публикаций, в которых сообщается о работе лазеров с $\lambda < 800$ нм, что обусловлено химической активностью атомов алюминия. Источники, используемые в эпитаксии (металличес-

кий алюминий в молекулярно-пучковой технологии или триэтилалюминий в металлоорганическом осаждении из газовой фазы), легко загрязняются группами ОН или атомами кислорода. В связи с этим выращенные материалы часто содержат кислород или углерод, которые ухудшают параметры устройств. За счет использования сверхчистых исходных реагентов возможно создание коротковолновых лазеров с длинами волн от 680 до 800 нм и, может быть, даже короче. В целом необходимо отметить, что ВИЛ видимого диапазона длин волн все еще остаются несовершенными устройствами.

Более подробный анализ материалов для применения в ВИЛ-гетероструктурах можно найти в монографии [18].

6. Матрицы ВИЛ и их основные параметры

6.1. Схемы электрической адресации

Как уже отмечалось, ВИЛ обладают несомненными преимуществами при интеграции в одномерные и двумерные массивы или матрицы лазеров. Однако определенные трудности возникают на этапе изготовления токонесящих электрических соединений. Наиболее прямой способ их изготовления состоит в создании проводящих областей между контактными площадками на периферии чипа матрицы ВИЛ и непосредственно между лазерами.

Первые сообщения о разработке матриц ВИЛ появились в 1991 г. Так, в работе [61] для независимой адресации лазеров в массиве из 8×8 элементов использовались токоподводящие металлизированные линии (рис.3). Диаметр лазеров был равен 20 мкм, а расстояние между ними – 254 мкм. Размеры чипа, включая контактные площадки на периферии, составляли 3.5×3.5 мм, причем непосредственно лазеры занимали область 2×2 мм. Как отмечают авторы, при использовании металлизированных линий шириной ~ 10 мкм с расстоянием между ними 15 мкм возможно уменьшение характерных размеров чипа на порядок. По-видимому, размеры матриц в данном случае ограничены топологическими особенностями трассировки соединений. Частичное решение этой проблемы возможно, по-видимому, путем использования многослойной (многоуровневой) металлизации, как в сложной КМОП-технологии изготовления ИС.

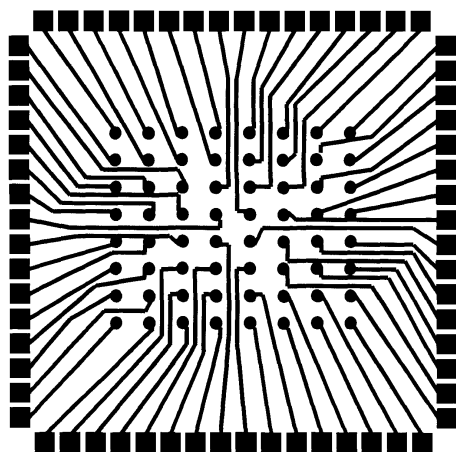


Рис.3. Электрическая схема матрицы из 8×8 ВИЛ с индивидуальной адресацией [61]:

● – лазеры; ■ – контактные площадки; линии – металлизированные токопроводящие полоски.

В работе [62] исследовалась линейка (одномерный массив 64×1) индивидуально адресуемых ВИЛ. Внутренний диаметр верхних кольцевых контактов составлял 10 мкм, диаметр, ограничивающий ионно-имплантируемую область в лазерах, – 9 мкм, интервал между элементами линейки – 84.6 мкм, а размеры внешних контактных площадок – 100×100 мкм.

В работе [63] была описана матрица из 10×10 лазеров с независимой адресацией. Все 100 элементов массива связывались с 25 контактными площадками вдоль каждой из сторон чипа (размер чипа равнялся 5×5 мм) с помощью металлизированных токопроводящих линий шириной 30 мкм, которые помещались на слой SiO_2 во избежание токов утечки. Расстояние между лазерами в массиве составляло 250 мкм при диаметре лазеров 55 мкм, а размер контактных площадок был равен 120×120 мкм. Матрицы такого же типа с различным ВИЛ исследовались также в работах [56, 64, 65].

Для матриц с большим числом элементов представляет интерес способ матричной (по строкам и столбцам) адресации, аналогичный тому, который используется в жидкокристаллических дисплеях. В работе [66] все столбцы матрицы из 32×32 лазеров были объединены за счет проводящей n^+ -подложки GaAs, а элементы одной строки имели общий p -контакт. В итоге при подаче напряжения на i -ю строку и j -й столбец возбуждался ij -й элемент матрицы.

Аналогичная адресация использовалась в работе [67]. При этом размеры чипа матрично-адресуемого массива ВИЛ 10×10 составляли $2000 \times 2000 \times 500$ мкм при размерах контактных площадок 145×75 и 145×100 мкм, а характерный шаг в двумерном массиве был равен 140 мкм.

Отметим, что одним из преимуществ матричной адресации является меньшее число необходимых контактных площадок, а именно $K + N$ (где K и N – размеры массива), а не $K \times N$, как при индивидуальной независимой адресации. Тем не менее схема прямой адресации ВИЛ в матрице более предпочтительна, если последняя выполняется по методу «перевернутого» кристалла*. При этом каждый лазер матрицы непосредственно монтируется на контактной площадке управляющего драйвера. Изготовленная по такой технологии матрица из 8×2 лазеров [68] использовалась для монтажа на подложку из окиси бериллия с нанесенной на нее системой микрополосковых линий связи. При этом была реализована передача данных одним ВИЛ со скоростью 5 Гбит/с [68]. Поскольку перекрестные помехи составляли –30 дБ, то 16 лазерных источников, работающих на разных длинах волн, могли обеспечить суммарную скорость передачи данных по одному волоконному световоду 80 Гбит/с.

6.2. Параметры лазеров в матрицах

Важным вопросом для многих приложений ВИЛ является однородность различных физических параметров лазеров (управляющие напряжения и напряжения смещения, пороговые токи, квантовые эффективности, угловые расходимости, длины волн и др.) по всему массиву излучателей [61–87]. Разумеется, требования к однородности того или иного физического параметра должны определяться характером прикладных задач, в которых будут использоваться матрицы ВИЛ. Например, однородность длины волны излучения лазеров важна там, где

*Технология «перевернутого» кристалла рассматривается в разд.8.

массив лазеров используется в сочетании с оптическими модуляторами типа резонаторов Фабри–Перо. Для других приложений требования к однородности длины волны излучения не так важны. Наоборот, в системах, где реализуется частотное мультиплексирование информационных каналов, необходимо контролируемое изменение длин волн генерации лазеров в пределах массива ВИЛ.

Так, в работе [61] 90 % лазеров имели в импульсном режиме пороговый ток $I_{th} = 4-7$ мА. При переходе к непрерывному режиму I_{th} возрастало до 6–10 мА, а дифференциальная квантовая эффективность ВИЛ η менялась от 6 до 10 %. В [62] большинство лазеров имело ~5 %-ный разброс пороговых токов (от 2.0 до 2.2 мА). Средняя мощность излучения одного ВИЛ составляла ~0.5 мВт и имела 20 %-ый разброс по матрице. Длина волны генерации при токе накачки 2.5 мА менялась от 848.6 до 850.1 нм, что, как полагают авторы [62], связано с неоднородностями толщины выращенной полупроводниковой пластины.

В работе [66] исследовался массив из 32×32 ВИЛ. При этом импульсный пороговый ток менялся от 5.5 до 9 мА, а дифференциальная квантовая эффективность – от 0.05 до 0.1 с разбросом ~18 % по току и ~30 % по эффективности, хотя в современных камерах эпитаксиального роста вариации толщины структуры вдоль подложки диаметром 2 дюйма не превышают 0.5 %. Поскольку массивы с несколькими сотнями лазеров занимают площадь менее 1 мм², возможно достижение вариации длины волны излучения менее 0.1 нм.

В работе [67] были получены достаточно высокие основные характеристики отдельных элементов матрицы из 10×10 лазеров с матричной адресацией: ток $I_{th} = 3.72 \pm 0.22$ мА, напряжение $U_{th} = 3.26 \pm 0.11$ В, максимальная мощность излучения $P_{max} = 5 \pm 3$ мВт.

В [69] исследовалась масштабная неоднородность лазерных структур, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Наблюдалось плавное изменение длины волны излучения (по параболическому закону от 945 до 959 нм) вдоль двухдвоймовой полупроводниковой пластины, за исключением периодической кольцевой области шириной 2 мм. Разброс рабочих характеристик лазеров был довольно значительным: $I_{th} = 18 \pm 4$ мА, $P_{max} = 5 \pm 3$ мВт, что авторы связывают с низким качеством кристалла в области квантовых ям.

Матрица из 8×8 элементов с излучением через подложку на длине волны 0.85 мкм и максимальной рабочей температурой в непрерывном режиме 130°C была продемонстрирована в работе [56]. При температуре 25°C достигнута мощность $P_{max} = 4.2$ мВт для $I_{th} = 2.1$ мА.

При изготовлении матриц ВИЛ перспективным направлением является технология селективного окисления [75–78]. По этой технологии в [75] была создана матрица лазеров из 8×8 элементов с характерным размером 4 мкм, расположенных с шагом 12 мкм. Упрощенное выполнение электрических контактов с отдельными элементами матрицы позволило изготовить массив из 4×8 индивидуально адресуемых лазеров с низким и однородным в пределах матрицы пороговым током (1.00 ± 0.17 мА) и малым разбросом длин волн излучения (874.8 ± 1.4 нм) [77].

Лазерная структура выращивалась методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке n^+ -GaAs с шагом 250 мкм. Лазеры с верхним выходом излучения име-

ли активную область в виде одной квантовой ямы GaAs и два брэгговских зеркала. Слой AlAs помещался между верхним зеркалом и активной областью. Тот же самый слой использовался и для изоляции $p-n$ -перехода и контактных площадок.

Важными параметрами, характеризующими качество двумерного массива оксидированных ВИЛ, являются положение и размеры области окисления в лазерах. Из результатов измерений интенсивности спонтанного излучения, проведенных в работе [77], следовало, что сдвиги центров областей от номинальных положений были менее 0.5 мкм с характерным разбросом ~0.2 мкм. При этом диаметр лазеров составил 2.14 мкм, максимальная мощность излучения – примерно 0.5 мВт, а угловая расходимость излучения – примерно 14° (по уровню 0.5) или ~28° (по уровню ниже 0.2). Таким образом, параметры, получаемые при оксидировании, имеют высокую однородность.

ВИЛ, создаваемые методом селективного оксидирования, также характеризуются малым временным джиттером [78]. Так, при частотах модуляции от 1 до 10 ГГц были получены оптические импульсы с длительностями ~18 пс и временным джиттером ~1.2 пс [78].

Возможность использования матриц ВИЛ в устройствах с частотным мультиплексированием обусловлена генерацией отдельных лазеров на разных длинах волн [79–87]. Варьирование последних в матрице может быть реализовано изменением как длины резонатора, так и толщины слоев брэгговских зеркал. Например, 1 %-ное изменение толщины выращиваемых в пределах полупроводниковой пластины слоев приводит к изменению длины волны излучения $\Delta\lambda \sim 10$ нм при $\lambda = 1$ мкм.

Некоторые авторы намеренно создавали неоднородности в процессе роста кристалла. Так, в [79] длина резонатора изменялась остановкой вращения подложки. Таким способом был создан массив из 7×20 лазеров, рабочая длина волны излучения которых менялась от 940 до 983 нм с дискретным шагом 2.6 ± 0.3 нм [79]. Разброс порогового тока и дифференциальной квантовой эффективности оказался невелик: $I_{th} = 14.7 \pm 1.5$ мА, $\eta = 6-7$ %.

В работах [82, 83] был создан многоволновый массив лазеров путем роста кристалла на структурированной подложке. Было установлено, что скорость роста кристалла на основе металлоорганической гидридной технологии довольно мала на вершине вытравленной мезаструктуры. Осуществляя рост кристалла на структурированной подложке с мезаструктурами различного диаметра, можно контролировать скорость роста и, следовательно, длину резонатора. Созданный массив ВИЛ имел длины волн излучения в области 998–1028 нм и мезаструктуры с диаметрами от 25 до 200 мкм.

Наибольшее изменение длины волны излучения лазеров в пределах матрицы (62.7 нм) было получено в работе [86]. Предложенная технология основывалась на зависимости скорости роста кристаллов GaAs при молекулярно-лучевой эпитаксии от температуры поверхности кристалла. При этом средний пороговый ток составлял 2.16 ± 0.81 мА, а характерная мощность излучения – примерно 0.8 мВт.

Несколько меньший диапазон (30 нм), но при более однородных характеристиках отдельных лазеров в матрице получен в работе [87]. Все элементы матрицы имели примерно одинаковые пороговые токи (5.5 ± 0.5 мА) и мощность (~0.5 мВт).

Табл.2. Основные параметры лазерных матриц.

Литература	Число лазеров в матрице	Способ адресации	I_{th} (мА)	U_{th} (В)	P_{max} (мВт)	η (%)	λ (нм)	Технология
[61]	8 × 8	ИА	6 ± 2	–	~7	8 ± 2	3 КЯ In _{0.2} Ga _{0.8} As	МВЕ
[62]	64 × 1	ИА	2.1 ± 0.1	~12	0.5 ± 0.1	–	849.4 ± 0.8	МВЕ
[64]	8 × 18	ИА	4.2 ± 0.2	2.65 ± 0.1	~2.1	–	–	МВЕ
[63]	10 × 10	ИА	14.0 ± 2.3	–	~2.6	–	984.1 – 978.5	МВЕ
[65]	8 × 8	ИА	3.39 ± 0.11	~2.5	~1.1	~14	850.93 ± 0.28	МОСVD
[66]	32 × 32	МА	6.8 ± 1.2	4.4 ± 0.6	–	8.0 ± 2.4	3 КЯ In _{0.2} Ga _{0.8} As	МВЕ
[67]	10 × 10	МА	3.72 ± 0.22	3.26 ± 1.1	4.08 ± 0.17	–	~850	МВЕ
[74]	34 × 1	ИА	3.07 ± 0.03	1.59 ± 0.02	2.07 ± 0.03	–	858 – 824	МОСVD
[77]	4 × 8	ИА	1.00 ± 0.17	~3.8	~0.5	–	874.8 ± 1.4	МВЕ
[56]	8 × 8	ИА	1.6 ± 0.3	2.3	~4.2	~22	855	МОСVD

Примечания: ИА – индивидуальная адресация; МА – матричная адресация; КЯ – квантовые ямы; МВЕ – молекулярно-пучковая эпитаксия; МОСVD – металлоорганическое химическое осаждение из газовой фазы; I_{th} – средний пороговый ток; U_{th} – пороговое напряжение; P_{max} – максимальная мощность лазера; η – дифференциальная квантовая эффективность; λ – длина волны излучения.

Основные параметры лазерных массивов, полученные в некоторых экспериментальных работах, приведены в табл.2. Из нее следует, что наименьшие I_{th} имеют матрицы ВИЛ с селективным оксидированием. В настоящее время коммерчески доступными являются матрицы из 8 × 8 ВИЛ, расположенных с шагом 250 мкм, с мощностью излучения 1 мВт ($\lambda = 0.85$ мкм) и пороговыми токами 3–4 мА. Дальнейшее развитие технологии идет в направлении увеличения плотности размещения элементов в матрице, снижения пороговых токов, повышения эффективности лазеров, расширения температурного диапазона и улучшения однородности характеристик.

Остановимся теперь на других, не менее важных физических характеристиках ВИЛ: модовой структуре излучения и омическом сопротивлении.

Одномодовый режим генерации ВИЛ наблюдается при диаметрах резонатора менее 10 мкм. Ему соответствуют высокая (~80%) дифференциальная квантовая эффективность и эффективность преобразования мощности ~5% [89]. Расходимость излучения в одномодовом режиме составляет ~8°, что гораздо меньше, чем у лазеров с торцевым выходом излучения. Благодаря этому удается добиться эффективного (до 90%) ввода излучения в одномодовый световод [90]. Выходная мощность излучения в одномодовом режиме обычно равна 1 мВт. В многомодовом режиме при непрерывной накачке и комнатной температуре достигнута выходная мощность более 10 мВт [91].

Омическое сопротивление ВИЛ является еще одной важной характеристикой устройства, поскольку определяемые им тепловые потери приводят к повышению температуры активной области и, как следствие, к повышению пороговых токов и ограничению мощности выходного излучения [92]. Тепловые потери особенно важны для двумерных матриц лазеров, т. к. значительное выделение тепла отдельными лазерами может существенно ограничить максимально допустимую плотность размещения элементов в массиве [93]. Омическое сопротивле-

ние складывается из сопротивлений контактов и области резонатора, а также сопротивления в брэгговских зеркалах, причем последнее составляет основную часть. Связано это с тем, что для достижения значительного коэффициента отражения необходимо использовать большое число гетерослоев (до 30), при этом во время инжекции электрического тока половина их должна быть «включена» в «обратном направлении».

В последнее время удалось добиться существенного уменьшения сопротивления брэгговских зеркал за счет более плавного изменения концентрации примесей в слоях и других технологических решений [94–100]. По данной технологии были изготовлены лазеры с низким сопротивлением (22 Ом) и высокой эффективностью, что позволило снизить выделение тепла в отдельном лазере [89]. Рекордной эффективности (50%) удалось достичь, используя технологию селективного оксидирования [14].

Модуляция мощности излучения на выходе лазера при передаче информации осуществляется путем модуляции рабочего тока [101–105]. В принципе, одиночные ВИЛ позволяют работать на высоких частотах модуляции. Так, была продемонстрирована возможность передачи двоичной информации со скоростью до 10 Гбит/с для InGaAs-лазеров с имплантацией протонов [101] и достигнута частота модуляции излучения до 16.3 ГГц при модуляции тока выше порога генерации для оксидированных InGaAs-лазеров [102].

В то же время частотные характеристики параллельного передающего оптического канала на базе матриц ВИЛ в значительной степени зависят от конструктивно-технологических решений передающего узла, включающего матрицу лазеров и схему управления. Так, в матрицах лазеров, излучающих через верхнее зеркало, довольно высокая емкость коммутирующих контактных проводников для центральных элементов составляла ~9 пФ, что ограничивало полосу частот до 250 МГц. Гораздо лучшие результаты получены для матриц лазеров, излучающих через подложку. В этом случае матрица, пере-

вернутая подложкой вверх, монтируется на керамическом носителе, на котором выполнена разводка контактов к отдельным лазерам по технологии «перевернутого» кристалла. Это позволило снизить емкость монтажа до 0.5 пФ и достигнуть полосы частот более 2.6 ГГц [56]. В работе [105] использование такой технологии позволило получить полосу частот 7.0 ГГц при управляющих токах 5 мА.

6.3. Влияние разброса основных параметров лазеров в матрицах на пропускную способность каналов связи

При использовании матриц ВИЛ в оптоэлектронной ИС и при большом числе элементов в матрице, по-видимому, будет затруднительно реализовывать схемы управления с индивидуальной установкой тока смещения для каждого отдельного лазера. При одинаковом для всех лазеров токе смещения разброс порогового тока и дифференциальной эффективности ВИЛ приводит к появлению временных задержек между каналами и уменьшению отношения сигнал/шум. В связи с этим большое значение приобретает вопрос о влиянии разброса характеристик отдельных лазеров в матрице на пропускную способность выходных каналов оптоэлектронной ИС и максимально возможное число выходов.

Возможны два режима управления лазерами в матрице. Первый заключается в модуляции тока лазера при малом токе смещения, т.е. когда одинаковый для всех лазеров в матрице ток смещения меньше среднего порогового тока. Во втором режиме ток смещения превышает средний пороговый ток. Влияние неоднородности характеристик лазеров в матрице на пропускную способность канала в предположении одинакового для всех лазеров тока смещения проанализировано в работе [106].

Зависимости пропускной способности канала B от разброса порогового тока и квантовой эффективности приведены на рис.4 (предполагается, что средний пороговый ток в матрице равен 1 мА, а управляющий ток – 5 мА). В режиме малых токов смещения пропускная способность канала при нулевом разбросе параметров лазеров ограничивается максимальной временной задержкой оптического отклика лазера относительно импульса тока управления и составляет 1 Гбит/с. С увеличением разброса характеристик пропускная способность канала падает, т.к. возрастает время задержки для лазеров с более высоким пороговым током. В режиме высоких токов смещения B ограничено отношением сигнал/шум в приемно-передающем канале и при нулевом разбросе параметров в пределах матрицы составляет 1.6 Гбит/с при вероятности появления ошибки менее 10^{-10} . С увеличе-

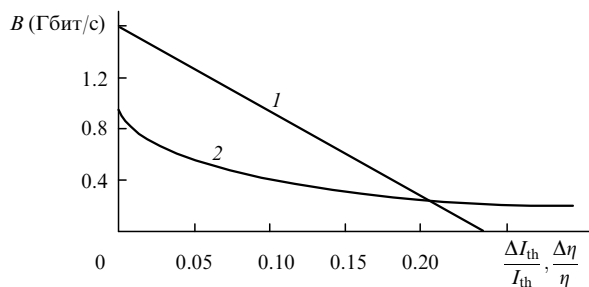


Рис.4. Зависимости максимальной пропускной способности B передающего оптического канала в параллельной линии связи от разброса порогового тока и дифференциальной квантовой эффективности отдельных лазеров в матрице ВИЛ для двух режимов управления – при больших (1) и малых (2) токах смещения [106].

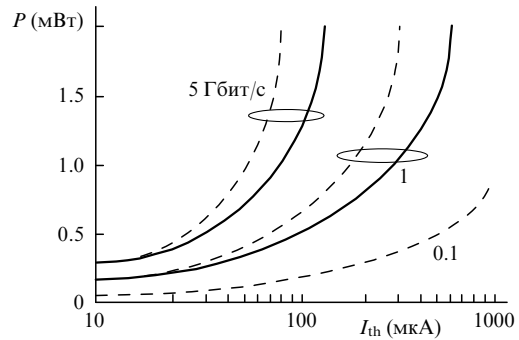


Рис.5. Электрическая мощность P , необходимая для управления лазером при передаче информации с вероятностью появления ошибки не более 10^{-9} , в зависимости от порогового тока при различных скоростях передачи данных, пороговом напряжении 1.5 В, последовательном сопротивлении 100 Ом, времени жизни носителей 2 нс (сплошная линия) и 4 нс (штриховая линия) [107].

нием разброса характеристик лазеров, особенно η , отношение сигнал/шум уменьшается, что приводит к снижению пропускной способности канала при сохранении той же вероятности ошибки.

Таким образом, неоднородность характеристик лазеров в матрице в большей степени влияет на пропускную способность в случае режима управления с большими токами смещения. Так, 20 %-ный разброс I_{th} и η снижает скорость передачи информации более чем в пять раз (при этом не учитывались неоднородности фотоприемных каналов, оптики, а также тепловые эффекты в матрице лазеров, которые могут сильно усложнить ситуацию).

Вторым недостатком режима управления с большими токами смещения является большее выделение тепла в передающем устройстве. Выделение тепла можно уменьшить, снизив пороговые токи. Так, использование для изготовления матрицы ВИЛ технологии селективного окисления позволило снизить пороговые токи до десятков микроампер и создало предпосылки для создания оптоэлектронных передающих устройств с весьма низким выделением тепла. Некоторые оценки возможностей использования лазеров с ультранизким порогом и малым тепловыделением в режиме нулевого тока смещения в системах оптических межсвязей приведены в работе [107].

На рис.5 показаны зависимости электрической мощности, требуемой для передачи по оптическому каналу двоичной информации, от порогового тока при скоростях передачи данных 0.1, 1 и 5 Гбит/с и вероятности ошибки 10^{-9} . Из приведенных кривых видно, что достижение порогового тока в десятки микроампер позволит существенно снизить электрическую мощность, требуемую для управления лазером, лишь при скоростях передачи более 1 Гбит/с.

7. Смарт-пикселы, использующие ВИЛ

Возможны два подхода к реализации смарт-пикселов. Первый заключается в использовании в качестве выходных элементов оптических модуляторов. В этом случае для формирования выходных оптических сигналов требуется наличие достаточно мощного, общего для всех выходов исходного немодулированного источника излучения. Другой подход подразумевает использование в качестве выходных элементов активных источников излучения, таких как лазерные диоды.

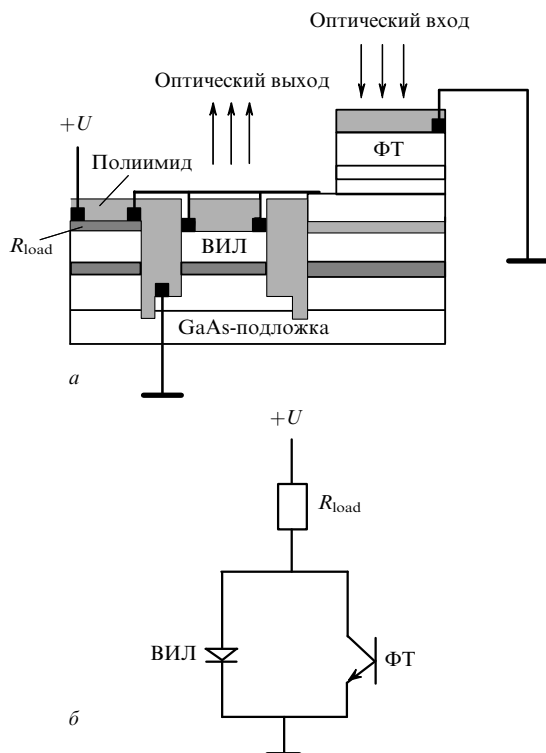


Рис.6. Структура смарт-пиксела на базе ВИЛ и фототранзистора (ФТ) (а), а также электрическая схема включения элементов (б) [110].

Успехи, достигнутые в 80-х гг. в создании оптических модуляторов на базе устройств с самоиндуцированным электрооптическим эффектом, стимулировали развитие первого подхода. Были получены важные результаты как в области создания элементной базы, так и в области проектирования и моделирования различных устройств. В частности, была показана практическая возможность создания на базе этой технологии оптоэлектронной ИС с числом оптических входов/выходов более 4000 [108], скоростью передачи данных по каждому каналу свыше 1 Гбит/с и вероятностью появления ошибки менее 10^{-10} [109]. Однако низкий коэффициент контрастности модуляторов, а также необходимость внешнего источника излучения являются существенным препятствием для применения этого подхода в оптоэлектронной ИС. В последние годы резко повысился интерес ко второму подходу – разработке смарт-пикселей с использованием активных источников излучения.

Одним из подходов к проектированию и изготовлению смарт-пикселей с ВИЛ является создание интегральных конструкций, объединяющих все структурные элементы смарт-пиксела на общей базовой подложке. В этом случае на исходной подложке в едином технологическом цикле последовательно наращиваются эпитаксиальные слои, необходимые для изготовления всех структурных элементов смарт-пиксела, а затем с использованием методов селективного травления и других методов микроэлектроники изготавливаются отдельные элементы и создаются между ними необходимые электрические связи. Предложены конструкции, в которых интегрально объединены ВИЛ и фототранзисторные [110] или фототиристорные [111] элементы. Для повышения быстродействия и функциональных возможностей смарт-пикселей были предложены интегральные схемы, объединяющие ВИЛ, фотоприемники типа металл–полупроводник–металл (МПМ) и МОП-транзисторы [112].

Структура смарт-пиксела, в котором интегрально объединены ВИЛ и фототранзистор, выполняющего логические функции НЕ и НЕ–ИЛИ, показана на рис.6 [110]. Эпитаксиальные слои фототранзистора в этой конструкции выращиваются на верхнем слое эпитаксиальной структуры ВИЛ. В общих чертах последовательность технологических операций при изготовлении смарт-пикселей состоит в формировании мезаструктуры фототранзистора с применением метода селективного травления, в вытравливании методом ионного травления глубокой кольцевой канавки для электрической изоляции отдельных ВИЛ, в планаризации поверхности с помощью полиимида и металлизации. Таким способом были изготовлены матрицы из 8×8 смарт-пикселей, расположенных с шагом 180 мкм, каждый из которых включает ВИЛ диаметром 18 мкм, фототранзистор с чувствительной областью 20×20 мкм и тонкопленочное сопротивление [110].

Электрическая схема соединения отдельных элементов в смарт-пикселе показана на рис.6.б. Каждый смарт-пиксел в матрице реализует логическую операцию инвертора. При одновременной засветке входного окна фототранзистора несколькими входными сигналами на схеме может быть реализована функция НЕ–ИЛИ. Схема переключалась при освещении фототранзистора излучением лазера с длиной волны 770 нм и мощностью 40 мкВт при сопротивлении резистора 1.3 кОм. Мощность выходного излучения составляла 60 мкВт на длине волны 780 нм.

Интегральные конструкции смарт-пикселей на базе ВИЛ и фототиристоров (рис.7) описаны в работе [111]. Фототиристор и ВИЛ последовательно соединены между собой электрически, что позволяет при падении на фототиристор света переключать ВИЛ в режим генерации. После выключения входного оптического сигнала ВИЛ во включенном состоянии может находиться сколь угодно долго, пока напряжение смещения на лазере превышает пороговое значение. Минимальная необходимая для переключения мощность входного сигнала составляет 15 нВт, при этом мощность выходного сигнала достигает 0.35 мВт, что соответствует коэффициенту оптического усиления $2.3 \cdot 10^4$. Потребляемая переключателем электрическая мощность равна 15 мВт.

Уменьшение коэффициента положительной обратной связи в тиристоре путем дополнительного имплантирования протонов в верхние слои тиристорной структуры (рис.7.а) позволяет реализовать бистабильную работу переключателя. Схема переключается при входной световой мощности 47 мкВт, мощность излучения ВИЛ при этом составляет 0.4 мВт, что соответствует коэффициенту оптического усиления около 8. Выключение схемы происходит при снижении световой мощности на входе до 16 мкВт. Время переключения таких структур ограничено постоянной времени RC -фототиристора, которая из-за достаточно большой емкости $p-n-p-n$ -структуры (~ 50 пФ) составляет более 10 мкс.

В [111] была также исследована конструкция смарт-пиксела, в которой ВИЛ интегрирован с фототранзистором; структура слоев последнего приведена на рис.7.б. В этом случае схема работает как пороговый инвертор с оптическим входом и выходом без сохранения включенного состояния после выключения входного оптического сигнала. Пороговая входная мощность составила 28 мкВт, а коэффициент усиления – 8. Коэффициент кон-

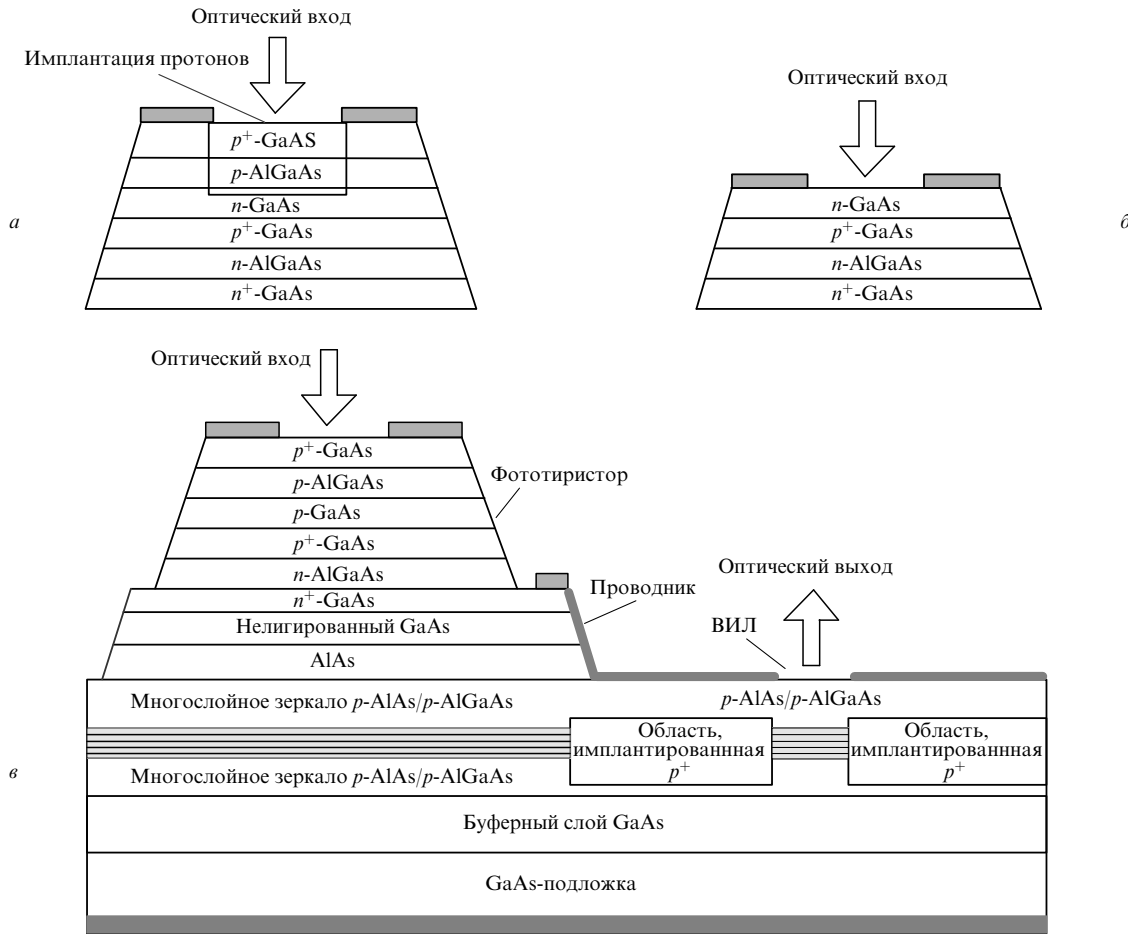


Рис.7. Структура смарт-пиксела на базе ВИЛ и фототиристора [111]: оптический переключатель с бистабильностью (а) и оптический переключатель без сохранения (б) и с сохранением состояния (в).

трастности, как и в других режимах переключения, был равен ~ 30 дБ. На базе этой технологии были изготовлены и протестированы схемы, выполняющие основные логические функции булевой алгебры, а также двухходовый коммутирующий элемент для оптических коммутационных сетей.

Вариант интегрального исполнения смарт-пиксела на базе ВИЛ, МПМ-фотоприемников и полевых транзисторов описан в работе [112] (рис.8). Вначале на подложке GaAs методами ионно-лучевой эпитаксии наращивались слои для изготовления фотоприемников и полевых транзисторов, а затем методом МОС-гидридной технологии наращивались слои для изготовления лазерной структуры. Далее с помощью фотолитографии и химического травления формировалась структура смарт-пиксела и ор-

ганизовывались необходимые электрические соединения между элементами. Смарт-пиксел размером 250 × 250 мкм включает в себя три полевых транзистора с затвором толщиной 1 мкм, МПМ-фотоприемник с размером чувствительной области 20 × 20 мкм и лазер с диаметром активной области 15 мкм. Полевые транзисторы в этой схеме выполняют пороговые функции, а также функции усиления. Функционально такой смарт пиксел позволяет реализовать как логическую функцию ИЛИ, так и функцию НЕ – ИЛИ при изменении полярности напряжения на фотоприемнике и резисторе. Мощность входного оптического сигнала, необходимого для переключения схемы, равна 300 мкВт. Ширина полосы рабочих частот на уровне 3 дБ составляет 220 МГц.

8. Интеграция ВИЛ с кремниевыми интегральными схемами

Дальнейшего улучшения характеристик смарт-пикселей, разрабатываемых на базе ВИЛ, особенно в направлении повышения их функциональных возможностей, можно добиться путем объединения GaAs-технологии получения массивов ВИЛ и кремниевой КМОП-технологии изготовления ИС [113 – 125]. В настоящее время нет прямых и простых способов выращивания разнородных материалов, т.е. выращивания какого-либо материала на затравочной подложке другого материала, поскольку из-за различий в кристаллической решетке переходная область всегда будет содержать дислокации. В связи с

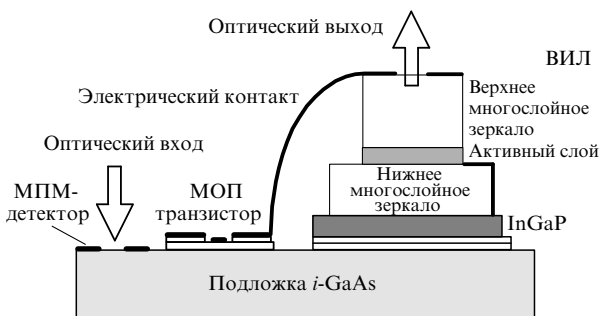


Рис.8. Структура смарт-пиксела на базе ВИЛ. Интеграция ВИЛ с МПМ-фотоприемником и МОП-транзистором [112].

этим единственным возможным методом объединения этих двух технологий является пока использование гибридных конструкций.

Первым шагом интеграции ВИЛ с кремниевыми ИС стала сборка дискретных компонентов в едином корпусе ИС [115]. Была продемонстрирована оптоэлектронная ИС, в которой в одном корпусе были смонтированы матрица из 4×4 ВИЛ, матрица с таким же числом МПМ-фотоприемников и специальная электронная микросхема, изготовленная по КМОП-технологии с минимальным топологическим размером 0.8 мкм. Однако в дальнейшем этот способ не получил развития из-за его высокой стоимости.

Более широкие возможности при создании оптоэлектронной ИС открывает использование гибридной технологии, когда оптоэлектронные узлы монтируются на кремниевой интегральной микросхеме. В этом случае удастся совместить достижения кремниевой электроники и возможности оптоэлектроники на базе полупроводников группы A_3B_5 . Известны несколько различных методов интеграции оптоэлектронных компонентов с кремниевыми ИС. Каждый метод имеет свои особенности, однако общими моментами для любого гибридного технологического процесса являются следующие этапы: изготовление оптоэлектронных компонентов, перенос их на кремниевую пластину, осуществление электрического контакта с элементами электронных схем в кремниевой пластине и удаление базовой подложки оптоэлектронных компонентов. В работе [116] приведен сравнительный обзор известных методов с точки зрения особенностей указанных этапов. Остановимся более подробно на тех методах, которые были использованы для интеграции ВИЛ с кремниевыми ИС.

8.1. Интеграция оптоэлектронных компонентов на кремнии с использованием технологии «перевернутого» кристалла

Суть метода заключается в соединении поверхностей кремниевой пластины и оптоэлектронной схемы индиевыми шариковыми контактами. Основные этапы процесса, который получил название технологии «flip-chip» (технологии «перевернутого» кристалла), показаны на рис.9 на примере интеграции кремниевых КМОП-схем и оптических модуляторов на базе квантоворазмерных GaAs-диодов [117]. На рис.9,а показаны две структуры, обращенные друг к другу покрытыми припоем контактными площадками, – модулятор, изготовленный на подложке из GaAs, и кремниевая интегральная схема, изготовленная по стандартной КМОП-технологии. Конструкция модулятора выполнена таким образом, что *n*- и *p*-контакты диода располагаются в одной плоскости. На следующем этапе эти две структуры юстируются относительно друг друга, соединяются и спаиваются, после чего GaAs-подложка сошлифовывается и стравливается. Предварительно зазор между пластинами заполняется защитным слоем резиста.

Пример реализации на базе этой технологии коммерчески доступных матриц смарт-пикселей можно найти в работе [108], где представлена первая оптоэлектронная высокоскоростная сверхбольшая ИС. Оптоэлектронная ИС состоит из 16 модулей, каждый из которых в свою очередь включает в себя 16 мультиплексоров с 16 оптическими входами и одним оптическим выходом, и содержит 4096 оптических детекторов, 256 оптических моду-

ляторов и более 140 000 транзисторов. Схема была испытана при скорости поступления данных в канал 400 Мбит/с, разброс временной задержки в пределах чипа не превышал 400 пс, размер чипа составлял 7×7 мм.

Технология «перевернутого» кристалла может быть использована и для монтажа матрицы ВИЛ на поверхности драйвера – кремниевой микросхемы, которая осуществляет управление отдельными лазерами. Такая технология сборки позволяет, как отмечалось выше, достичь более высокой частоты модуляции. Пример реализации данной конструкции можно найти в работе [118].

8.2. Интеграция оптоэлектронных элементов и кремниевых микросхем с использованием тонкопленочной «взрывной» технологии

Применение этой технологии с использованием методов селективного травления позволяет отделить от базовой подложки выращенные на ней тонкопленочные оптоэлектронные элементы и перенести их на кремниевую микросхему, не ухудшая при этом характеристики тонкопленочных элементов. С этой целью на GaAs-подложке перед выращиванием тонкопленочной структуры осаждается тонкий слой AlAs, скорость травления которого в кислоте HF в 10^7 раз больше скорости травления GaAs. Основные этапы процесса заключаются в следующем. Вначале на GaAs-подложке выращивается тонкий слой AlAs. Затем наращивается необходимый эпитаксиальный слой для дальнейшего формирования на нем тонкопленочной структуры с оптоэлектронными элементами.

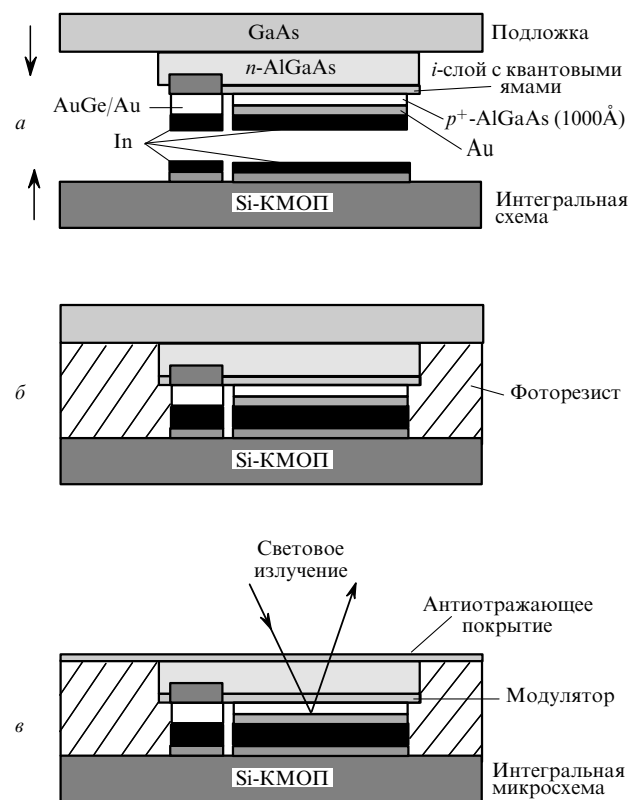


Рис.9. Основные этапы технологического процесса интеграции оптоэлектронных компонентов на кремнии с использованием метода «перевернутого» кристалла [117]: интегральная микросхема и перевернутая подложкой вверх полупроводниковая структура с оптическим модулятором (а), модулятор, смонтированный на интегральной микросхеме (б), и смарт-пиксел после удаления подложки (в).

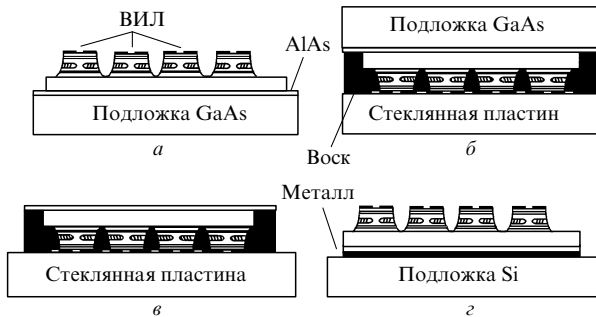


Рис. 10. Основные этапы аппликационного метода интеграции ВИЛ на кремниевой пластине [116]: исходная структура ВИЛ (а), крепление исходной структуры на стеклянную пластину (б), удаление подложки (в) и металлизация и монтаж на кремниевую подложку после растворения воска (г).

После формирования структуры поверхность ее закрывается тонкой защитной пленкой так, чтобы оставались незащищенными торцы. При погружении в травитель в результате интенсивного травления AlAs происходит отслоение тонкопленочных элементов от GaAs-подложки. Отделенная тонкопленочная структура, поддерживаемая защитной пленкой, может быть в дальнейшем перенесена на новую подложку. Обычно это выполняется с помощью тонкой прозрачной диафрагмы, выполняющей для тонкопленочной структуры функцию временного носителя. Эта технология с успехом была применена для интеграции тонкопленочных InGaAsP-светодиодов и фотоприемников на кремниевой подложке [119].

Применение этой технологии для интеграции массивов ВИЛ на кремнии сдерживается из-за происходящего в процессе селективного травления разрушения зеркал с высокой концентрацией Al. Проблема усугубляется при большом числе элементов в массиве, поскольку рост площади поверхности пленки требует увеличения времени пребывания тонкопленочной структуры в травителе. Дополнительными трудностями могут возникнуть также из-за слишком большой высоты ВИЛ, составляющей 6–7 мкм в отличие от 1–2 мкм для светодиодов или МПМ-фотодетекторов, и повышенных вследствие этого механических напряжений в структуре при отделении пленки, что может послужить причиной деградации характеристик лазеров. В определенной степени эти трудности удается обойти в аппликационном методе интеграции ВИЛ на кремниевой подложке.

8.3. Аппликационный метод

В отличие от предыдущего метода освобождение эпитаксиальных слоев от подложки в аппликационном методе осуществляется путем механической шлифовки подложки до толщины ~100 мкм с последующим химическим травлением оставшегося тонкого слоя. Подробное описание процесса дано в работе [116]. Основные этапы аппликационного метода показаны на рис. 10. Оптоэлектронная структура эпитаксиально выращивается на подложке из GaAs, на которой предварительно осаждается тонкий слой AlAs, защищающий структуру при травлении подложки в растворе азотной кислоты. После вытравливания канавок между отдельными лазерами образовавшаяся мезаструктура приклеивается с помощью воска наружной поверхностью к стеклянной пластине, после чего GaAs-подложка стравливается. На освобожденную тыльную поверхность тонкопленочной струк-

туры наносится контактный металлический слой Pd–Ge–In–Sn, и затем с помощью растворителя структура отклеивается от стеклянной пластины. Освобожденная таким способом тонкопленочная структура переносится механическим пробником-манипулятором на кремниевую подложку. Этим методом на нее могут быть перенесены как массивы лазеров, так и отдельные лазеры.

В первых экспериментах с помощью такой технологии с GaAs-подложки на медную пластину переносился отдельный лазер [120]. В результате существенного улучшения условий теплоотвода было получено двукратное снижение порогового тока. Следующим шагом было использование этого метода для интеграции отдельных лазеров на поверхности кристалла коммерческого инвертора [121]. В демонстрационных экспериментах работа лазера на частоте модуляции 1 МГц ограничивалась параметрами схемы и способом обеспечения контакта.

В дальнейшем отдельный лазер монтировался на поверхности специально изготовленной для управления кремниевой микросхемы [122], выполненной по 0.8-мкм-технологии и состоящей из двух *n*-МОП-транзисторов, параллельно подключенных к *p*-области лазера. Один из транзисторов задает ток смещения, а другой – ток модуляции лазера. Тестирование полученной гибридной схемы показало ее работоспособность при частоте модуляции выходного излучения 250 МГц. Максимальная частота ограничивалась источником модулирующего напряжения, в то время как компьютерное моделирование показало, что схема может работать на частотах до 2 ГГц.

8.4. Интеграция оптоэлектронных элементов на кремнии с использованием жидкой среды в качестве промежуточного носителя

Этот метод интеграции во многом напоминает предыдущий и отличается, в основном, способом переноса оптоэлектронных элементов на кремниевую пластину. Первоначально он был использован для интеграции на поверхности кремниевой микросхемы GaAs-светодиодов [123], а в дальнейшем распространен и на ВИЛ [124]. Отличие от предыдущего метода заключается в том, что после растворения воска за счет большей глубины вытравленных канавок структура распадается на отдельные лазеры, которые затем помещаются в нейтральную жидкую среду, играющую роль промежуточного носителя.

Приготовленная таким образом взвесь разливалась над поверхностью кремниевой пластины, на которой предварительно были вытравлены прямоугольные трапециевидные лунки глубиной 10 мкм. Взвешенные в жидкости микролазеры, оседая, автоматически распределяются по отдельным лункам. Для осуществления контакта с лазером стенки лунки легируются, а на ее дно осаждается проводящий слой CrAu. После заполнения лунок на поверхности кремниевой пластины методами микроэлектронной технологии формируется система контактов для подведения к лазерам управляющих напряжений (рис. 11).

Интегрированные этим методом на кремниевую подложку ВИЛ размером $40 \times 40 \times 10$ мкм имели пороговые токи в импульсном режиме 75 мА и выходную мощность 150 мкВт при токе 250 мА. По сравнению с предыдущими этот метод требует гораздо меньше времени для интеграции на кремниевой подложке с высокой точностью большого числа ВИЛ без дополнительной ручной юсти-

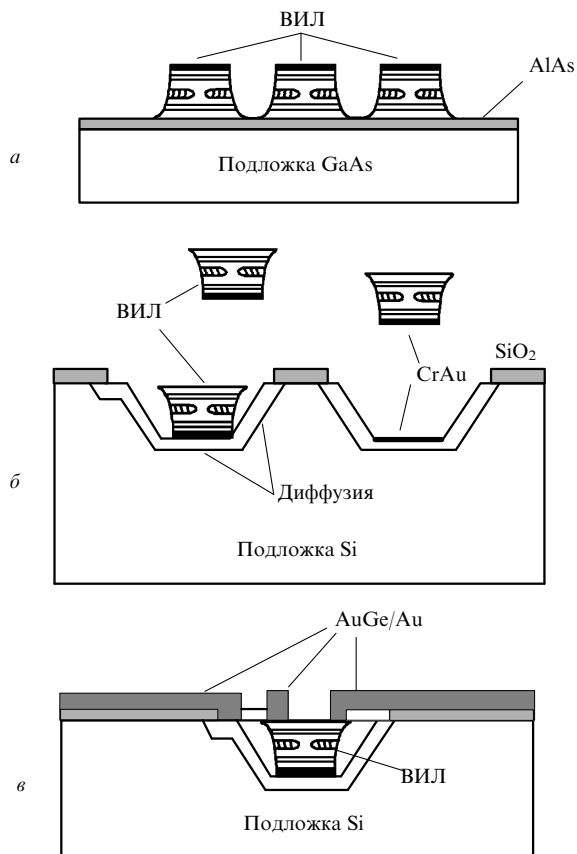


Рис.11. Интеграция ВИЛ на кремниевой подложке с использованием жидких промежуточных носителей [124]: изготовление ВИЛ (а), осаждение ВИЛ на кремниевую подложку из жидкой среды (б) и изготовление контактов (в).

ровки и, кроме того, позволяет более эффективно использовать исходную эпитаксиальную структуру, поскольку отдельные лазеры, плотно заполняющие эту структуру, можно размещать на поверхности кремниевой подложки с меньшей плотностью. Предложенный метод дает высокий выход годных ИС (более 90 %) и, по мнению авторов работы [124], результаты его применения могут быть существенно улучшены при использовании в ВИЛ технологии селективного окисления.

8.5. Метод интеграции, использующий крепление оптоэлектронной структуры на кремниевой пластине посредством полиимидной пленки

Этот метод, предложенный в работе [125], поясняется на рис.12. Исходная многослойная эпитаксиальная структура, на которой впоследствии изготавливаются лазеры и фотодетекторы, крепится с помощью полиимиды на кремниевую КМОП-пластину, содержащую необходимые схемы усиления и обработки сигналов. Затем GaAs-подложка сошлифовывается и стравливается. После этого с использованием методов фотолитографии и селективного травления изготавливаются отдельные лазеры и фотодетекторы, а затем между ними организовываются необходимые электрические связи. При изготовлении оптоэлектронных компонентов на кремниевой пластине фотолитографическими методами используются реперные знаки, что позволяет достичь необходимой высокой точности при совмещении оптоэлектронных компонентов и элементов схемы в КМОП-пластине. Тестирование изготовленного по этой технологии смарт-пиксела показало,

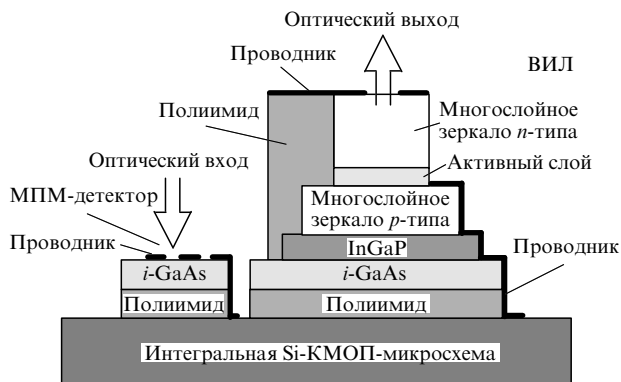


Рис.12. Структура смарт-пиксела на базе ВИЛ. Метод крепления эпитаксиальной структуры на полиимидной пленке [125].

что чувствительность МПМ-фотоприемника составляет 0.3 А/Вт, пороговый ток лазера – 3.1 мА, а максимальная мощность излучения – 2,5 мВт.

В работе [106], исходя из энергетических ограничений, в чипе такой конструкции были оценены максимально возможное число смарт-пикселей и производительность оптических каналов ввода/вывода. Оценки выполнены в предположении, что электронная схема смарт-пикселей представляет собой процессор с тактовой частотой 150 МГц, содержит 200 вентиляей и изготовлена по 0.25-мкм-технологии. Пропускная способность оптических каналов ввода/вывода предполагалась равной 300 Мбит/с. Оценки показали, что при допустимой тепловой мощности рассеивания в чипе 30 Вт и разбросе пороговых токов лазеров 10 % общее число процессоров может быть равно 10³. При этом общая производительность чипа достигнет 600 Гбит/с.

Заключение

Ключевым элементом оптоэлектронных ИС с оптическими входами/выходами является полупроводниковый лазер, обеспечивающий возможность достижения чрезвычайно высокой пропускной способности оптических соединений. В наибольшей степени этой цели удовлетворяют поверхностно излучающие лазеры с вертикальным расположением резонатора. Созданные конструкции таких лазеров позволяют работать с малыми управляющими токами (менее 1 мА), обеспечивают эффективный ввод светового излучения в оптическое соединение и допускают возможность размещения этих лазеров на кремниевой ИС.

К наиболее перспективной технологии изготовления ВИЛ можно отнести технологию селективного окислирования объема активной области, которая позволяет изготавливать лазеры с микронными размерами активной области и чрезвычайно низкими пороговыми токами. В ряде стран (США, Япония, Швейцария) освоено производство таких лазеров. Коммерчески доступными являются как отдельные лазеры, так и матрицы лазеров с числом элементов 8 × 8 при шаге расположения 250 мкм, пороговым током в несколько миллиампер и мощностью излучения 1–2 мВт. Ожидается, что в перспективе стоимость матриц ВИЛ будет сравнима со стоимостью интегральных микросхем [88].

Значительный прогресс наблюдается в отработке технологии, обеспечивающей эффективную интеграцию ВИЛ на GaAs с кремниевой подложкой микросхемы. Предло-

жены и осуществлены на практике различные методы такой гибридной конструкции. Однако выбрать один из них в качестве наилучшего применительно к коммерческим оптоэлектронным схемам в настоящее время затруднительно. Нам представляется, что в этом направлении должны быть проведены дальнейшие исследования и разработки как по совершенствованию гибридной технологии, так и по конкретным применениям оптоэлектронных ИС.

Следует отметить, что достаточно большой круг затронутых в настоящем обзоре вопросов не позволил нам включить в него результаты важных для практических приложений исследований, связанных с разработкой ВИЛ. В частности, за рамками обзора остались исследования по стабилизации плоскости поляризации светового излучения и оптически управляемому переключению ее в двух ортогональных направлениях. Не рассмотрены достижения по созданию ВИЛ на основе GaN и ZnSe, генерирующих в синей области спектра.

В целом, по нашему мнению, не вызывает сомнений перспективность в ближайшее десятилетие широкого использования ВИЛ в оптоэлектронных ИС, обусловленная потребностями информационных технологий и базирующаяся на достижениях в разработке таких лазеров.

1. Sterling T., Messina P., Smith P.H. *Enabling technology for petaflops computing* (Washington, Massachusetts Institute of Technology, 1995).
2. Krishnamoorthy A.V., Miller D.A.B. *IEEE J. Select.Top.Quantum Electron.*, **2**, 55 (1996).
3. Tooley F.A.P. *IEEE J. Select.Top.Quantum Electron.*, **2**, 3 (1996).
4. Бурцев В.С., Федоров В.Б., Цветков В.В. В кн. *Вычислительные машины с нетрадиционной архитектурой. Супер ВМ*. Под ред. В.С.Бурцева (М., ИВВС РАН, 1998, вып. 7, с. 3).
5. Ghosh J., Varma A. *IEEE Trans.Circuit Systems*, **38**, 86 (1991).
6. Kilcoyne M.K., Beccue S.M., Bra B. et al. *Proc. SPIE*, **1215**, 174 (1990).
7. Hinton S. *IEEE J. Select.Top.Quantum Electron.*, **2**, 14 (1996).
8. Басов Н.Г., Богданкевич О.В., Девятков А.Г. *ДАН СССР*, **155**, 78 (1964).
9. Soda H., Iga K., Kitahara C., Suematsu Y. *Jpn.J.Appl.Phys.*, **18**, 2329 (1979).
10. Iga K., Ishikawa S., Ohkouchi S., Nishimura T. *Appl.Phys.Letts*, **45**, 348 (1984).
11. Koyama F., Kinoshita S., Iga K. *Appl.Phys.Letts*, **55**, 221 (1989).
12. MacDougal M.H., Dapkus P.D., Pudikov V. et al. *IEEE Photon. Technol. Letts*, **7**, 229 (1995).
13. Hayashi Y., Mukaiharu T., Hatori N. et al. *Electron.Letts*, **31**, 560 (1995).
14. Lear K.L., Choquette K.D., Schneider R.P., Jr. et al. *Electron.Letts*, **31**, 208 (1995).
15. Weigl B., Grabherr M., Reiner G. et al. *Electron.Letts*, **32**, 557 (1996).
16. Agrawal G.P., Dutta N.K. *Long-wavelength semiconductor lasers* (N.Y., Van Nostrand-Reinhold, 1986).
17. Zory P.S., Jr. (Ed.). *Quantum well lasers* (N.Y., Academic Press Inc., 1993).
18. Sale T.E. *Vertical cavity surface emitting lasers* (N.Y., J.Wiley & Son Inc., 1995).
19. Jewell J.L., Harbison J.P., Scherer A. et al. *IEEE J.Quantum Electron.*, **27**, 1332 (1991).
20. Chow W.W., Choquette K.D., Crawford M.H. et al. *IEEE J.Quantum Electron.*, **33**, 1810 (1997).
21. Jewell J.L., Scherer A., McCall S.L. et al. *Electron.Letts*, **25**, 1123 (1989).
22. Scherer A., Jewell J.L., Lee Y.H. et al. *Appl.Phys.Letts*, **55**, 2724 (1989).
23. Geels R.S., Corzine S.W., Scott J.W. et al. *IEEE Photon.Technol. Letts*, **2**, 234 (1990).
24. Jewell J.L., Lee Y.H., Scherer A. et al. *Opt.Engng.*, **29**, 210 (1990).
25. D'Avanzo D.C. *IEEE Trans.Electron.Dev.*, **29**, 1051 (1982).
26. Lee Y.H., Tell B., Brown-Goebeler K.F. et al. *Electron.Letts*, **26**, 710 (1990).
27. Orenstein M., Von Lehmen A.C., Chang-Hasnain C. et al. *Appl.Phys. Letts*, **56**, 2384 (1990).
28. Lee Y.H., Tell B., Brown-Goebeler K.F. et al. *Electron.Letts*, **26**, 1308 (1990).
29. Lee Y.H., Tell B., Brown-Goebeler K.F. et al. *IEEE Photon.Technol. Letts*, **2**, 686 (1990).
30. Tell B., Lee Y.H., Brown-Goebeler K.F. et al. *Appl.Phys.Letts*, **57**, 1855 (1990).
31. Tai K., Fischer R.J., Wang K.W. et al. *Electron.Letts*, **25**, 1644 (1989).
32. Lee Y.H., Jewell J.L., Tell B. et al. *Electron.Letts*, **26**, 225 (1990).
33. Guenter J.K., Hawthorne R.A., Granville D.N. *Proc SPIE*, **2683**, 102 (1996).
34. Kinoshita S., Iga K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **23**, 882 (1987).
35. Ogura M., Mukai S., Shimada M. et al. *Electron.Letts*, **26**, 18 (1990).
36. Choquette K.D., Hong M., Freund R.S. et al. *IEEE Photon.Technol. Letts*, **5**, 284 (1993).
37. Hong M., Vakhshoori D., Grober L.H. et al. *J.Vac.Sci.Technol. B*, **12**, 1258 (1994).
38. Chang-Hasnain C.J., Wu Y.A., Li G.S. et al. *Appl.Phys.Letts*, **63**, 1307 (1993).
39. Mori K., Asaka T., Iwano H. et al. *Appl.Phys.Letts*, **60**, 21 (1992).
40. Dallesasse J.M., Holonyak N., Jr. *Appl.Phys.Letts*, **58**, 394 (1991).
41. Dallesasse J.M., Holonyak N., Jr., Sugg A.R. et al. *Appl.Phys.Letts*, **57**, 2844 (1990).
42. Kish F.A., Caracci S.J., Holonyak N., Jr. et al. *Appl. Phys.Letts*, **59**, 1755 (1991).
43. Maranovski S.A., Sugg A.R., Chen E.I. et al. *Appl.Phys.Letts*, **63**, 1660 (1993).
44. Choquette K.D., Schneider R.P., Jr., Lear K.L. et al. *Electron.Letts*, **30**, 2043 (1994).
45. Choquette K.D., Lear K.L., Schneider R.P., Jr. et al. *IEEE Photon. Technol.Letts*, **7**, 1237 (1995).
46. Choquette K.D., Geib K.M., Chui H.C. et al. *Appl.Phys.Letts*, **69**, 1385 (1996).
47. Lear K.L., Schneider R.P., Jr., Choquette K.D. et al. *IEEE Photon. Technol.Letts*, **8**, 740 (1996).
48. Choquette K.D., Lear K.L., Schneider R.P., Jr. et al. *Appl.Phys.Letts*, **66**, 3413 (1995).
49. MacDougal M.H., Yang G.M., Bond A.E. et al. *IEEE Photon.Technol.Letts*, **8**, 310 (1996).
50. Yang G.M., MacDonald M.H., Dapkus P.D. *Electron.Letts*, **31**, 886 (1995).
51. Roberts J.S., Sale T.E., Button C.C. et al. *J. Crystal Growth*, **124**, 792 (1992).
52. Leys M.R. In: *Low dimensional structures in semiconductor* (NATO ASI series B: Physics; N.Y., Ldn, Plenum, 1991, v.281).
53. Sze S.M. *Semiconductor devices, physics and technology* (N.Y., Wiley, 1985).
54. Ploog K. In: *Low dimensional structures in semiconductor* (NATO ASI series B: Physics; N.Y., Ldn, Plenum, 1991, v.281).
55. Bacher K., Pezeshki B., Lord S.M. et al. *Appl.Phys.Letts*, **61**, 1387 (1992).
56. Ohiso Y., Tateno K., Kohama Y. et al. *IEEE Photon.Technol.Letts*, **8**, 1115 (1996).
57. Gulden K.H., Moser M., Luscher S., Schweizer H.P. *Electron.Letts*, **31**, 2176 (1995).
58. Babic D.I., Streubel K., Mirin R.P. et al. *IEEE Photon.Technol.Letts*, **7**, 1225 (1995).
59. Dudley J.J., Babic D.I., Mirin R. et al. *Appl.Phys.Letts*, **64**, 1463 (1994).
60. Schneider R.P., Jr., Lott J.A. *Appl.Phys.Letts*, **63**, 917 (1993).
61. Von Lehmen A., Chang-Hasnain C., Wullert J. et al. *Electron.Letts*, **27**, 583 (1991).
62. Morgan R.A., Robinson K.C., Chirovsky L.M.F. et al. *Electron. Letts*, **27**, 1400 (1991).
63. Moller B., Zeeb E., Hackbarth T., Ebeling K. *IEEE Photon.Technol. Letts*, **6**, 1056 (1994).
64. Vakhshoori D., Wynn J.D., Zydzik G.J., Leibenguth R.E. *Appl.Phys. Letts*, **62**, 1718 (1993).
65. Kohama Y., Ohiso Y., Fukushima S., Kurokawa T. *IEEE Photon. Technol.Letts*, **6**, 918 (1994).
66. Orenstein M., Von Lehmen A., Chang-Hasnain C. et al. *Electron.*

- Letts*, **27**, 437 (1991).
67. Morgan R.A., Guth G.D., Zimmer C. et al. *IEEE Photon.Technol. Letts*, **6**, 913 (1994).
 68. Maeda M.W., Chang-Hasnain C., Von Lehmen A. et al. *IEEE Photon.Technol.Letts*, **3**, 863 (1991).
 69. Walker J.D., Kuchita D.M., Smith J.S. *Electron.Letts*, **29**, 239 (1993).
 70. Morgan R.A., Kojima K., Mullaly T. et al. *Appl.Phys.Letts*, **61**, 1160 (1992).
 71. Orenstein M., Kapon E., Harbison J.P. et al. *Appl.Phys.Letts*, **60**, 1353 (1992).
 72. Morgan R.A., Hibbs-Brenner M.K. *Proc.SPIE*, **2398**, 65 (1995).
 73. Ohiso Y.K., Fukushima S., Kurokawa T. *IEEE Photon.Technol. Letts*, **6**, 918 (1994).
 74. Hibbs-Brenner M.K., Morgan R.A., Walterson R.A. et al. *IEEE Photon.Technol.Letts*, **8**, 7 (1996).
 75. Huffaker D.L., Graham L.A., Deppe D.G. *IEEE Phot.Technol.Letts*, **8**, 596 (1996).
 76. Huffaker D.L., Deppe D.G. *IEEE Phot.Technol.Letts*, **8**, 858 (1996).
 77. Giaretta G., Li M.Y., Li G.S. et al. *IEEE Phot.Technol.Letts*, **9**, 1196 (1997).
 78. Zhu B., White I.H., Williams K.A. et al. *IEEE Phot.Technol.Letts*, **9**, 1307 (1997).
 79. Chang-Hasnain C.J., Harbison J.P., Zah C.-E. et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **27**, 1368 (1991).
 80. Chang-Hasnain C.J., Maeda M.W., Harbison J.P. et al. *J. Lightwave Technology*, **9**, 1665 (1991).
 81. Chang-Hasnain C.J., Wullart J.P., Harbison J.P. et al. *Appl.Phys. Letts*, **58**, 31 (1991).
 82. Koyama F., Mukaiyama T., Hayashi Y. et al. *IEEE Photon.Technol. Letts*, **7**, 10 (1991).
 83. Koyama F., Mukaiyama T., Hayashi Y. et al. *Electron.Letts*, **30**, 1947 (1994).
 84. Eng L.E., Bacher K., Juen W. et al. *IEEE J.Select.Top.Quantum Electron.*, **1**, 624 (1995).
 85. Sadra K. *J. Cryst.Growth*, **169**, 175 (1996).
 86. Yuen W., Li G.S., Chang-Hasnain C.J. *IEEE Phot.Technol.Letts*, **8**, 4 (1996).
 87. Ortiz G.G., Luong S.Q., Sun S.Z. et al. *IEEE Phot.Technol.Letts*, **9**, 1069 (1997).
 88. Li Y., Wang T., Linke R.A. *Appl. Optics*, **35**, 1282 (1996).
 89. Zhou P., Cheng J., Schaus C.F. et al. *IEEE Photon.Technol.Letts*, **3**, 591 (1991).
 90. Tai K., Hasnain G., Wynn J.D. et al. *Electron. Letts*, **26**, 1628 (1990).
 91. Geels R.S., Coldren L.A. *Electron. Letts*, **27**, 1984 (1991).
 92. Zhao Y.-G., McInerney J.G. *IEEE J. Quantum Electron.*, **31**, 1668 (1995).
 93. Osinski M., Nakwaski W. *IEEE J. Select.Top.Quantum Electron.*, **1**, 681 (1995).
 94. Sugimoto M., Kosaka H., Kurihara K. et al. *Electron.Letts*, **28**, 385 (1992).
 95. Kojima K., Morgan R.A., Mullaly T. et al. *Electron.Letts*, **29**, 1771 (1992).
 96. Peters M.G., Thibeault B.J., Yiung D.B. et al. *Appl.Phys.Letts*, **63**, 3411 (1993).
 97. Tai K., Yang L., Wang Y.H. et al. *Appl.Phys.Letts*, **56**, 2496 (1990).
 98. Hong M., Mannaerts J.P., Hong J.M. et al. *J. Cryst.Growth*, **111**, 1071 (1991).
 99. Chalmers S.A., Lear K.L., Killeen K.P. *Appl.Phys.Letts*, **62**, 1585 (1993).
 100. Lear K.L., Schneider R.P., Jr. *Appl.Phys.Letts*, **68**, 605 (1996).
 101. Fiedler U., Reiner G., Schnitzer P., Ebeling K.J. *IEEE Phot.Technol.Letts*, **8**, 746 (1996).
 102. Lear K.L., Mar A., Choquette K.D. et al. *Electron.Letts*, **32**, 457 (1996).
 103. Kosaka H., Kajita M., Li Y. et al. *IEEE Photon.Technol.Letts*, **9**, 253 (1997).
 104. Kajita M., Kosaka H., Yamada M. et al. *IEEE Photon.Technol.Letts*, **9**, 146 (1997).
 105. Kosaka H., Kajita M., Yamada M. et al. *IEEE Photon.Technol.Letts*, **9**, 244 (1997).
 106. Kurokawa T., Matso S., Nakahara T. et al. *Appl.Optics*, **37**, 194 (1998).
 107. Cuter D.M., Lau Y. *IEEE Photon.Technol.Letts*, **7**, 4 (1995).
 108. Lentine A.L., Goossen K.W., Walker J.A. et al. *IEEE J.Sel.Top. Quantum Electron.*, **2**, 77 (1996).
 109. Woodward T.K., Krishnamoorthy A.V., Lentine A.L. et al. *IEEE Photon.Technol.Letts*, **8**, 422 (1996).
 110. Song J.I., Lee Y.H., Yoo J.Y. et al. *IEEE Photon.Technol.Letts*, **5**, 902 (1993).
 111. Cheng J., Zhou P., Sun S.Z. et al. *IEEE J.Quantum Electron.*, **29**, 741 (1993).
 112. Matsuo S., Nakahara T., Kohana Y. et al. *IEEE Photon.Technol. Letts*, **7**, 1165 (1995).
 113. Fathollahnejad H., Mathine D.L., Droopad R. et al. *Electron.Letts*, **30**, 1235 (1994).
 114. Wada H., Takamori T., Kamijoh T. *IEEE Photon.Technol.Letts*, **8**, 1426 (1996).
 115. Plant D.V., Robertson B., Hinton H.S. et al. *Tech.Digest of LEOS Annual Meeting* (1995, pap.PD5).
 116. Mathine D.L. *IEEE J. Select.Top.Quantum Electron.*, **3**, 952 (1997).
 117. Goossen K.W., Walker J.A., D'Asaro L.A. et al. *IEEE Photon.Technol.Letts*, **7**, 360 (1995).
 118. Banwell T.C., Von Lehmen A.C., Cordell R.R. *IEEE J.Quantum Electron.*, **29**, 635 (1993).
 119. Jokerst N.M., Camperi-Ginestet C., Buchanan B. et al. *IEEE Photon. Technol.Letts*, **7**, 1028 (1995).
 120. Mathine D.L., Nejad H., Alee D.R. et al. *Appl.Phys.Letts*, **69**, 463 (1996).
 121. Daryanani S., Fathollahnejad H., Mathine D.L. et al. *Electron. Letts*, **31**, 833 (1995).
 122. Mathine D.L., Dropad R., Maracas G.N. *IEEE Photon.Technol. Letts*, **9**, 869 (1997).
 123. Talghader J.J., Tu J.K., Smith J.S. *IEEE Photon.Tecnol.Letts*, **7**, 1321 (1995).
 124. Tu J.K., Talghader J.J., Hadley M.A. et al. *Electron. Letts*, **31**, 1448 (1995).
 125. Matsuo S., Tateno K., Nakahara T. et al. *Electron.Letts*, **33**, 1148 (1997).
- S.M.Zakharov, V.B.Fyodorov, V.V.Tsvetkov. Optoelectronic integrated circuits utilising vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers.**
- Optoelectronic integrated circuits with additional optical inputs/ outputs, in which vertical-cavity surface-emitting (VCSE) lasers perform the data transfer functions, are considered. The mutual relationship and the 'affinity' between optical means for data transfer and processing, on the one hand, and the traditional electronic component base, on the other, are demonstrated in the case of implementation of three-dimensional interconnects with a high transmission capacity. Attention is drawn to the problems encountered when semiconductor injection lasers are used in communication lines. It is shown what role can be played by VCSE lasers in solving these problems. A detailed analysis is made of the topics relating to possible structural and technological solutions in the fabrication of single lasers and of their arrays, and also of the problems hindering integrating of lasers into emitter arrays. Considerable attention is given to integrated circuits with optoelectronic smart pixels. Various technological methods for vertical integration of GaAs VCSE lasers with the silicon substrate of a microcircuit (chip) are discussed.