

# ВИКСЕЛОНИКА – НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОСИГНАЛОВ

## ЧАСТЬ I. КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА

М. Белкин, д.т.н., МГТУ МИРЭА, Москва, РФ, belkin@mirea.ru,  
В. Яковлев, Ph. D. EPFL, Лозанна, Швейцария

Термин "викселоника", введенный в название статьи, образован от известной аббревиатуры VCSEL (Vertical-cavity surface-emitting laser – поверхностно излучающий лазер с вертикальным резонатором) и слова "фотоника". Устройства на базе VCSEL имеют ряд выигранных особенностей, благодаря чему это направление интенсивно развивается за рубежом. Какая компонентная база на основе VCSEL доступна сегодня, каковы ее характеристики и возможности? Ответы можно найти в предлагаемом обзоре двух известных специалистов, один из которых много лет разрабатывает приборы викселоники, а другой – оптоэлектронные и радиотехнические устройства на их базе.

**Ф**отоника в современном понимании [1] означает широкую область знаний, в которой изучаются разнообразные явления и системы, связанные с оптическим излучением (фотонами). Европейский союз признал фотонику одной из пяти самых эффективных и экологичных технологий, обеспечивающих значительное улучшение качества жизни [2]. Одним из наиболее значимых продуктов развития фотоники являются телекоммуникационные волоконно-оптические системы (ТВОС), которые в 21 веке заняли основное место в мировой инфраструктуре сетей связи. Общий принцип их функционирования состоит в электрооптическом преобразовании информационного сигнала, передаче модулированного оптического сигнала по волоконному световоду и обратном оптико-электрическом преобразовании в диапазон модулирующих частот.

Для электрооптического преобразования в ТВОС повсеместно используются полупроводниковые лазерные излучатели (ПЛИ), единственным представителем которых с самого начала развития ТВОС являлся ПЛИ с торцевым излучением и горизонтальным резонатором [3]. Однако в начале

1990-х годов в Японии был изобретен ПЛИ другой конструкции [4], которую отличало поверхностное излучение из вертикального микрорезонатора. Впоследствии данный тип лазера получил сокращенное название VCSEL (Vertical-cavity surface-emitting laser) – поверхностно излучающий лазер с вертикальным резонатором. Благодаря ряду достоинств VCSEL, сегодня в мире известно так много разработок различных фотонных устройств на базе лазеров этой конструкции [5], что можно говорить о формировании отдельного направления фотоники – "викселоники".

Проанализируем потенциал применения VCSEL в фотонике и, в особенности, в ее новом научно-техническом направлении "радиофотоника", которое считается весьма перспективным не только для гражданского, но и для военного применения [6]. Мы рассмотрим существующую компонентную базу викселоники и наиболее характерные примеры современных разработок радиотонных устройств на базе VCSEL, предназначенных для совершенствования технико-экономических показателей радиотонных и комбинированных систем телекоммуникационного и радиолокационного назначений.

## ПОТЕНЦИАЛ ПРИМЕНЕНИЯ VCSEL В УСТРОЙСТВАХ ФОТОНИКИ И РАДИОФОТОНИКИ

Во второй половине прошлого столетия на стыке фотоники и традиционной электроники возникло новое научно-техническое направление – оптоэлектроника, которое сегодня достигло стадии промышленной зрелости, но продолжает оставаться одним из наиболее актуальных. Это подтверждается ее непрерывным развитием с выделением самостоятельных междисциплинарных направлений, одним из которых является сверхвысокочастотная (СВЧ) оптоэлектроника (Microwave photonics), появившаяся в результате интеграции оптоэлектроники и СВЧ-радиоэлектроники [7]. В последние годы в российской научно-технической периодике термин "СВЧ-оптоэлектроника" заменен более общим эквивалентом "радиофотоника" [8].

Суть радиофотонного принципа построения [9] радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) такова (рис.1): входной сигнал СВЧ-диапазона посредством электрооптического преобразователя конвертируется в оптический диапазон. Модулированный оптический сигнал при помощи волоконно-оптических либо интегрально-оптических узлов и устройств обрабатывается либо просто передается в удаленную точку аппаратуры, где выполняется обратное оптико-электрическое преобразование в СВЧ-диапазон. По сравнению с ТВОС, в радиофотонной аппаратуре, помимо передачи в оптическом диапазоне, необходима непосредственная обработка оптического излучения, несущего радиосигнал. В традиционной РЭА аналогичная обработка выполняется с помощью функциональных элементов радиодиапазона. Перенос операции обработки в оптический диапазон упрощает общую схему РЭА и повышает ее ключевые технические показатели, такие как быстродействие, рабочая полоса частот, массогабаритные характеристики, динамический диапазон, электромагнитная совместимость, имитостойкость и др. [10]. В отличие от ТВОС, в радиофотонных устройствах, как правило, не требуется излучение лазера со значительной мощностью. А ведь именно меньшая мощность по сравнению с традиционным ПЛИ ограничивает применение VCSEL в телекоммуникационных системах волоконно-оптической связи, где они используются на относительно коротких распределительных линиях [11].

Напротив, в радиофотонных узлах обработки применение VCSEL дает преимущества, основанные на его достоинствах по сравнению с лазером с торцевым излучением [5, 12]:

- миниатюрность (длина резонатора почти на два порядка меньше);
- низкий пороговый ток генерации (0,5–2 мА против 10–15 мА);
- малая мощность потребления (в 5–10 раз меньше);
- лучшая эффективность ввода в волокно за счет пространственной симметричности и относительно малой расходимости выходного луча (10–12° против 30–40°);
- существенно меньшая температурная зависимость порогового тока и энергетической характеристики;
- простота обеспечения одночастотного режима;
- относительно широкая полоса непрерывной перестройки длины волны (5–7 нм);
- простота формирования двумерной лазерной решетки на одной подложке;
- экономичность за счет возможности тестирования в процессе производства на пластине.

Полупроводниковые технологии с использованием лазеров с поверхностным излучением предлагают уникальные возможности создания не только компактных, но также весьма эффективных устройств. Развитие VCSEL с самого начала происходило на базе двух материальных систем [4]. Первая – это лазеры на основе AlGaAs/GaAs, работающие в первом окне прозрачности кварцевого световода в районе 0,85 мкм – так называемые коротковолновые VCSEL. Устройства на основе таких лазеров уже нашли широкое применение в экономичных ТВОС для локальных сетей передачи данных, компьютерных оптических интерфейсах типа "активный кабель" и компьютерных оптических "мышах" [12].

В лазерах второго типа, так называемых "длинноволновых" VCSEL, используются материалы на основе InP, благодаря чему они могут функционировать в более перспективных для телекоммуникационных систем втором (длина волны в районе 1,3 мкм) и третьем (в районе 1,55 мкм)



Рис.1. Радиофотонный принцип построения РЭА

окнах прозрачности (спектральные диапазоны O, S (второе окно) и C, L (третье окно) в обозначениях Международного союза электросвязи). Однако данный тип лазеров внедряется сравнительно медленно, в основном из-за технологических трудностей. Кроме того, важной проблемой является обеспечение надежной работы VCSEL при требуемых для РЭА повышенных температурах окружающей среды. Анализ различных лазерных гетероструктур показывает, что при разработке длинноволновых VCSEL во втором окне прозрачности преимущественно используются системы с активной областью на основе InAlGaAs, а в третьем – на основе InGaAsP [11].

Современные лазерные структуры в длинноволновом диапазоне строятся по планарно-эпитаксиальной технологии с использованием двух конструкций: полностью эпитаксиальной, когда активная область и зеркала формируются посредством одних и тех же материалов, и сплавной с отдельно изготавливаемыми брэгговскими зеркалами на базе AlGaAs/GaAs и последующим сплавлением их при определенных температурах и давлении с гетероструктурой активной области [13]. Достоинством первого способа является сравнительная простота технологического процесса, важным недостатком – худший отвод тепла из активной области из-за относительно низкого коэффициента теплопроводности четверного твердого раствора, применяемого в этом случае для формирования многослойного отражателя. Этот

недостаток устраняется в сплавной конструкции за счет того, что зеркала так же, как в коротковолновых VCSEL, формируются посредством чередующихся слоев AlGaAs/GaAs. Однако данный технологический прием увеличивает число операций и, следовательно, стоимость изготовления.

Тем не менее именно длинноволновый VCSEL сплавной конструкции считается ключевым компонентом аппаратуры современных и перспективных локальных телекоммуникационных сетей [14] и узлов радиодифракционной обработки РЭА [15]. Современное состояние и потенциал применения VCSEL данной конструкции в радиодифракционных узлах РЭА СВЧ-диапазона подробно исследованы в [15], поэтому кратко рассмотрим его в качестве образующего элемента компонентной базы викселоники.

### КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА ВИКСЕЛОНИКИ Длинноволновый VCSEL сплавной конструкции

Основными элементами современной поперечной структуры длинноволнового VCSEL сплавной конструкции [14] являются (рис.2): гетероструктура, содержащая легированные p-слои на основе InP и многоквантоворазмерную активную область на основе InP/InAlGaAs, и два брэгговских отражателя на основе GaAs/AlGaAs. Данные элементы в процессе изготовления сплавляются между собой по двум плоскостям. Для оптического и токового ограничения используется туннельный переход. В отличие от лазера с торцевым излучением, канал излучения лазера типа VCSEL расположен вертикально (рис.3). Для обеспечения лазерной генерации активная область так же, как и в традиционном лазере, находится между двумя зеркалами,

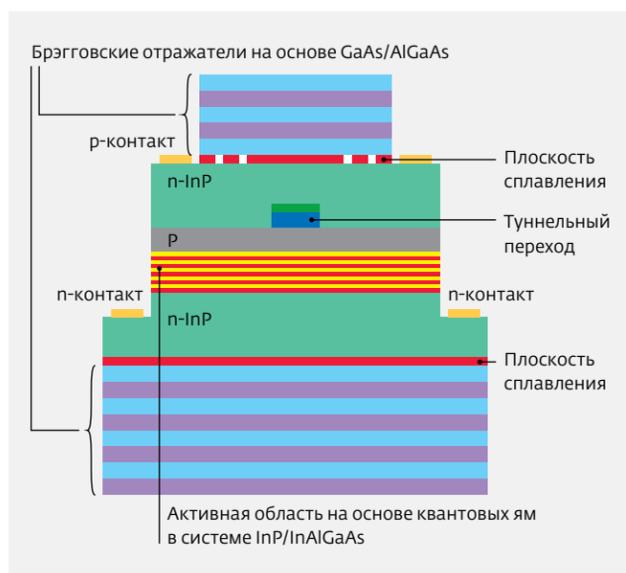


Рис.2. Поперечная структура VCSEL сплавной конструкции



Рис.3. Конструкция кристалла длинноволнового VCSEL

которые в данном случае выполняются в виде распределенных брэгговских отражателей (РБО). Однако длина резонатора VCSEL почти на два порядка меньше и примерно соответствует рабочей длине волны, поэтому для создания эффективной лазерной генерации требуется: максимально увеличить оптическое усиление в активной области; обеспечить высокий (близкий к 1) коэффициент отражения зеркал. Первое условие реализуется при помощи квантоворазмерной структуры активной области с использованием до 10 нанослоев толщиной несколько нанометров на основе квантовых ям либо квантовых точек. Для реализации второго условия применяется многослойная структура зеркал с числом слоев более 30. При этом общее число эпитаксиальных слоев в структуре превышает 100, что создает значительные трудности при ее физическом моделировании.

Опыт разработки радиофотонных устройств позволил выявить следующие дополнительные преимущества длинноволновых VCSEL: простая возможность существенного улучшения динамических характеристик за счет оптической инжекционной синхронизации [16]; совместимость с кремниевой интегрально-оптической технологией [17].

С целью конкретной оценки потенциала рассматриваемого VCSEL в качестве образующего элемента компонентной базы викселоники ниже

описываются основные статические и динамические параметры длинноволнового VCSEL сплавной конструкции, разработанного в лаборатории физики наноструктур (LPN) Лозаннского политехнического университета (EPFL) – www.epfl.ch.

**Электрические и энергетические характеристики** [18, 19] (рис.4). Как видно из рисунка, получены следующие результаты при комнатной температуре: пороговый ток составляет 2 мА в О-диапазоне и менее 1 мА – в С-диапазоне; максимальная мощность излучения в непрерывном режиме равна 5–6 мВт; потребляемая мощность в квазилинейном режиме преобразования – 20 мВт в О-диапазоне и 8 мВт в С-диапазоне. Кроме того, при рабочем токе 9 мА достигнута мощность непрерывного излучения 1,5 мВт при температуре 100°C в О-диапазоне и 80°C в С-диапазоне. Полученные результаты постоянно улучшаются, и сегодня достигнуто рекордное значение мощности излучения в непрерывном одночастотном режиме для любого типа VCSEL: 8 мВт при комнатной температуре [20].

**Малосигнальные частотно-модуляционные характеристики (ЧМХ)** (рис.5) [21]. Как следует из рисунка, полоса прямой модуляции по уровню -3 дБ превышает 7 ГГц при токе смещения 10 мА. Совершенствование лазерной структуры уже привело к увеличению полосы модуляции до 11 ГГц [22].

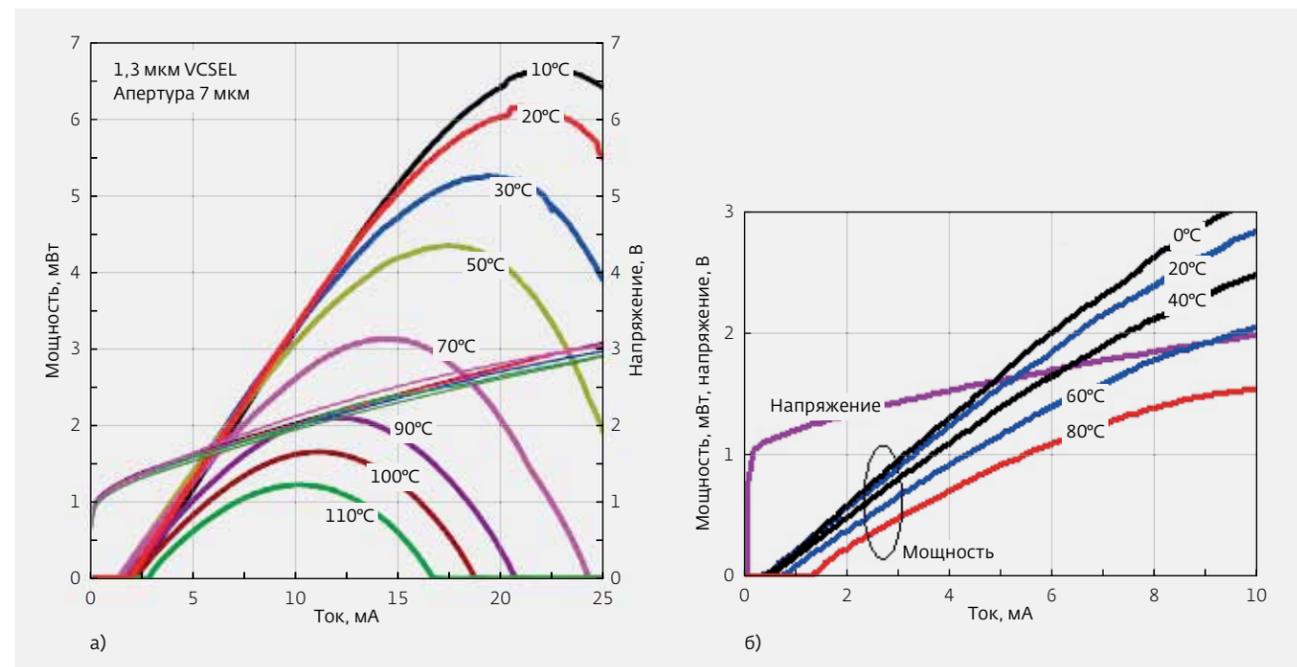


Рис.4. Типичные вольт-амперные и ватт-амперные характеристики одночастотного VCSEL: а) в О-диапазоне; б) в С-диапазоне

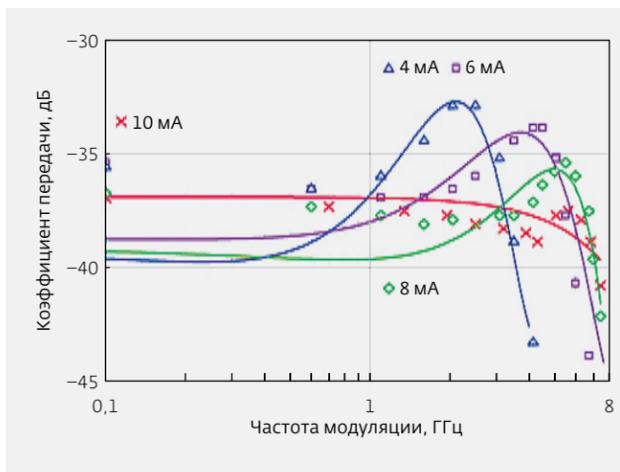


Рис.5. Типичные малосигнальные частотно-модуляционные характеристики при различных токах смещения

**Шумовые характеристики** (рис.6) [23]. Рисунок показывает, что значения относительного шума интенсивности (Related Intensity Noise, RIN) уменьшаются при увеличении тока смещения и возрастают при увеличении частоты модуляции, что соответствует известным данным. Конкретно при комнатной температуре величина RIN на частоте модуляции 1,5 ГГц составляет всего лишь -160 дБ/Гц (минимальный порог измерительной установки) уже при токе смещения 5 мА.

**Линейность в режиме большого сигнала.** Как известно, наиболее наглядный способ оценки линейных свойств активного прибора, в данном

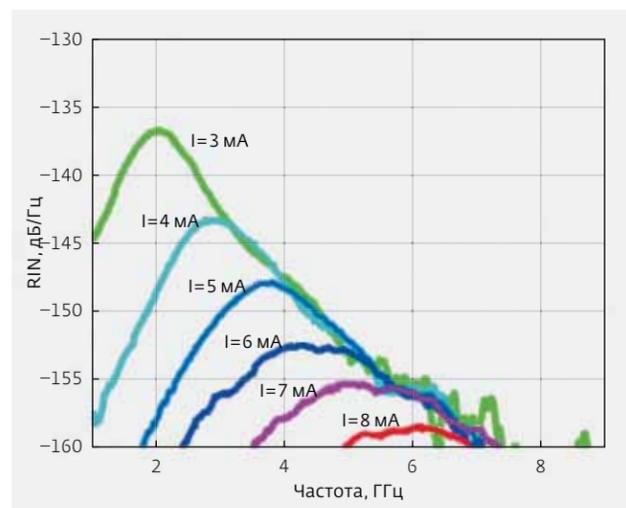


Рис.6. Типичные шумовые характеристики (RIN) лазера О-диапазона при различных токах смещения (температура окружающей среды 20°C)

Точки пересечения по входу для различных частот

Частотная область, ГГц	ИРЗ, дБ	ИР5, дБ
1	26	20
6	19	17

случае полупроводникового лазера, состоит в определении его так называемой точки пересечения по входу (ИР) [24]. Упрощенно оценить ИР третьего и пятого порядков (ИР3 и ИР5) можно с помощью следующих формул [25]:

$$ИР3 = P_i + IMD3/2,$$

$$ИР5 = P_i + IMD5/4.$$

Здесь IMD3 и IMD5 – соответственно интермодуляционные искажения третьего и пятого порядков, которые легко измеряются с помощью фотодетектора с полосой в СВЧ-диапазоне и радиочастотного анализатора спектра;  $P_i$  – мощность модулирующего сигнала.

На основе этих формул и данных измерений были получены значения ИР3 и ИР5 для VCSEL О-диапазона [26] в частотных областях модулирующих сигналов в районе 1 и 6 ГГц (см. таблицу).

Как следует из таблицы, уровень ИР3, а следовательно, линейность исследуемого VCSEL

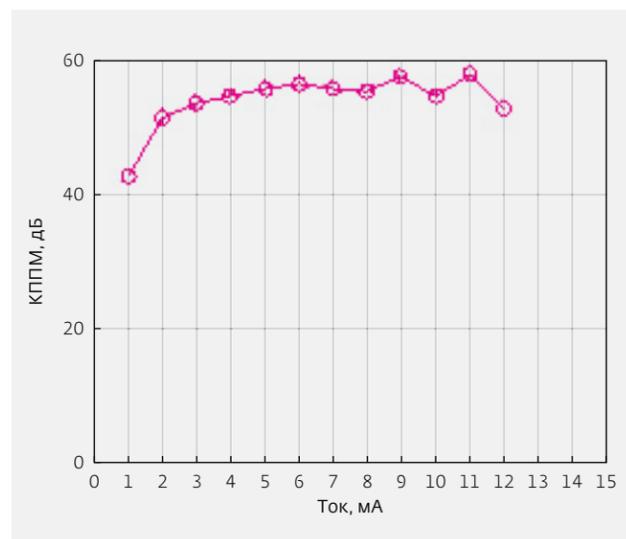


Рис.7. Зависимость коэффициента подавления побочных мод от тока смещения

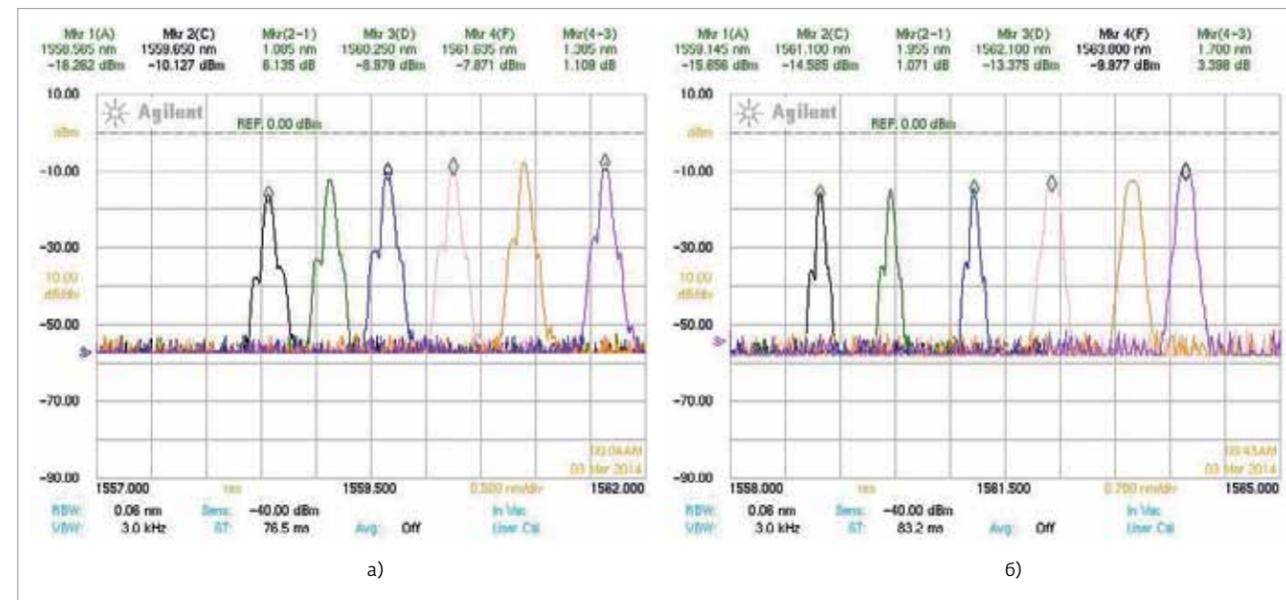


Рис.8. Характеристики перестройки длины волны излучения: а) током смещения; б) температурой

уменьшается по мере повышения частоты модуляции, что согласуется с известными экспериментальными данными [27]. Сравнение с аналогичными результатами, приведенными в других публикациях, показывает, что точка пересечения третьего порядка рассматриваемого в данной статье длинноволнового VCSEL сплавной конструкции с внутрирезонаторным расположением контактов примерно на 10 дБ выше, чем у длинноволнового VCSEL отличающейся конструкции [27] и находится на уровне лучших результатов для коротковолнового VCSEL с оксидной апертурой [28].

**Спектральные и перестроечные характеристики.** Для VCSEL С-диапазона были экспериментально определены коэффициент подавления побочных мод (КППМ) во всем диапазоне рабочих токов [20] (рис.7), спектральные характеристики при перестройке током смещения в диапазоне 3-13 мА с шагом 2 мА (рис.8а) и при перестройке температурой в диапазоне 25-50°C с шагом 5° (рис.8б) [15], а также ширина спектральной линии лазера [20] (рис.9). Как видно из рисунков, достигнуты следующие результаты: лазер работает в одночастотном режиме с минимальным подавлением побочных мод более 40 дБ; средняя крутизна перестройки длины волны излучения температурой равна 0,18 нм/°С, током смещения – 0,3 нм/мА; минимальная ширина линии генерации составляет около 4 МГц.

Описанные выше специфические свойства VCSEL позволили создать на его основе целый ряд

структурных модификаций, составляющих компонентную базу вискелоники. Ниже будут кратко рассмотрены ее основные представители: работающие в О-, S- и С-диапазонах VECSEL, MEMS-VCSEL, LICSEL, MIXSEL. При изложении принят единый подход, заключающийся в последовательном описании отличительных особенностей, принципов

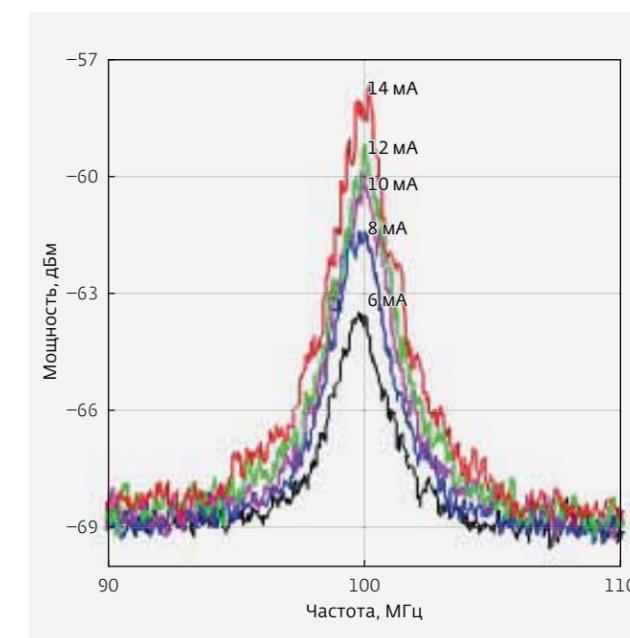


Рис.9. Ширина линии излучения в С-диапазоне при различных токах смещения

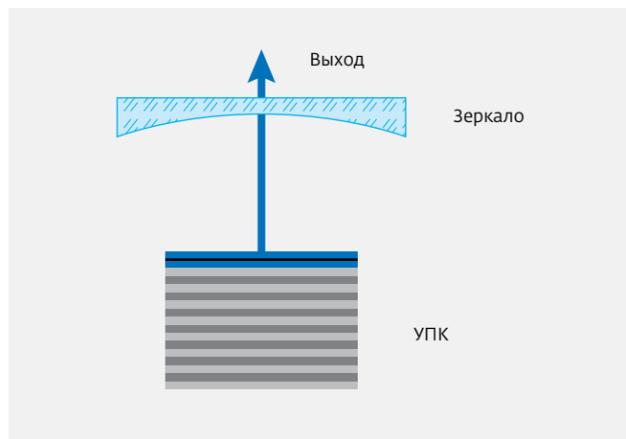


Рис.10. Обобщенная структура VECSEL

построения, схем и конструкций, основных параметров и характеристик, достигнутых на современном уровне научно-технического развития фотоники.

**Лазеры непрерывной генерации: VECSEL, MEMS-VCSEL, LICSEL**

Поверхностно-излучающий лазер с внешним резонатором, получивший название VECSEL (Vertical External Cavity Surface-Emitting Laser), представляет собой наиболее перспективный и развиваемый элемент компонентной базы викселоники, в котором удачно сочетаются функционирование в широком спектральном диапазоне полупроводниковых лазеров и уже отработанная техника внешней накачки и эффективного теплоотвода дисковых твердотельных лазеров. Его создание было предопределено дальнейшим развитием фотонных

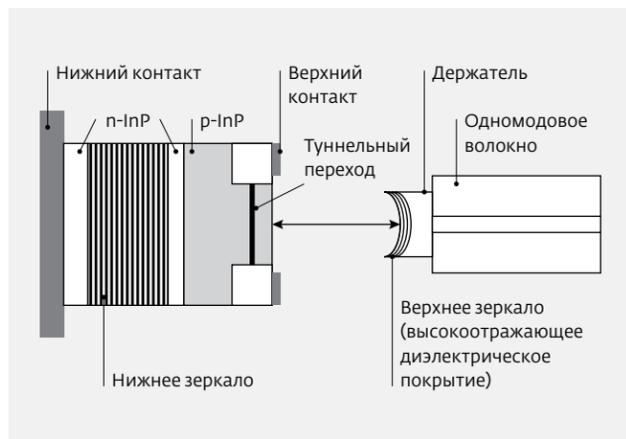


Рис.11. Схема EP-VECSEL в гибридном исполнении

технологий, в ходе которого обнаружили ограничения VCSEL, связанные, главным образом, с недостаточно высокой выходной мощностью (см. рис.4) и недостаточно узкой линией излучения (см. рис.9). Принципиальные элементы VECSEL (рис.10) – усилительный полупроводниковый кристалл (УПК), представляющий собой VCSEL с удаленным верхним зеркалом (ср. с рис.2), и внешний пространственный оптический резонатор, образованный с одной стороны брэгговским отражателем УПК, а с другой – полупрозрачным сферическим зеркалом [29]. Такое выходное зеркало обеспечивает фокусировку внутрирезонаторного луча на поверхность УПК и формирование дифракционно-ограниченного симметричного выходного пучка, не уступающего по качеству газовым и твердотельным лазерам. Необходимо отметить, что для работы реального лазера данного типа могут потребоваться

дополнительные, не показанные на рис.10 элементы, например, источник оптической накачки и устройство охлаждения усилительного кристалла, что приведет к усложнению его схемы.

В наиболее важном для радиофотоники С-диапазоне (полоса длин волн 1530–1565 нм) усилительный полупроводниковый кристалл так же, как и в VCSEL, строится на подложке фосфида индия с InGaAsP или InGaAlAs квантоворазмерной активной структурой. Однако при формировании на базе данных материальных структур брэгговского отражателя относительно

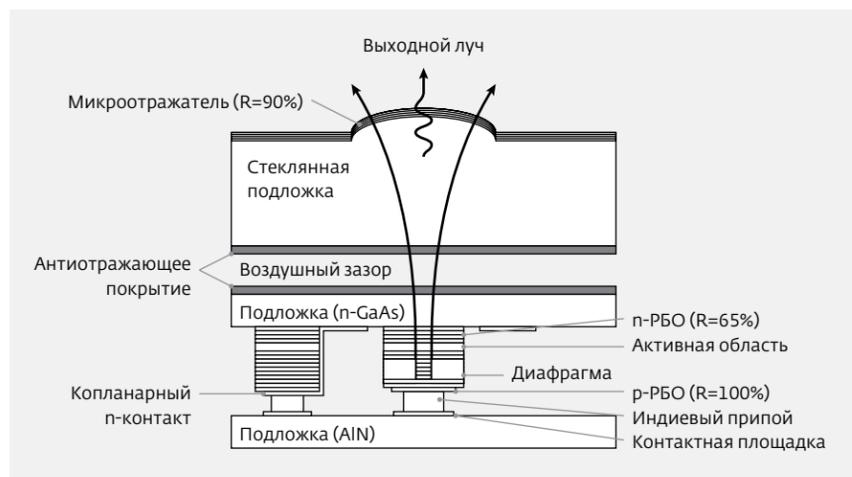


Рис.12. Схема EP-VECSEL в монокристаллическом исполнении

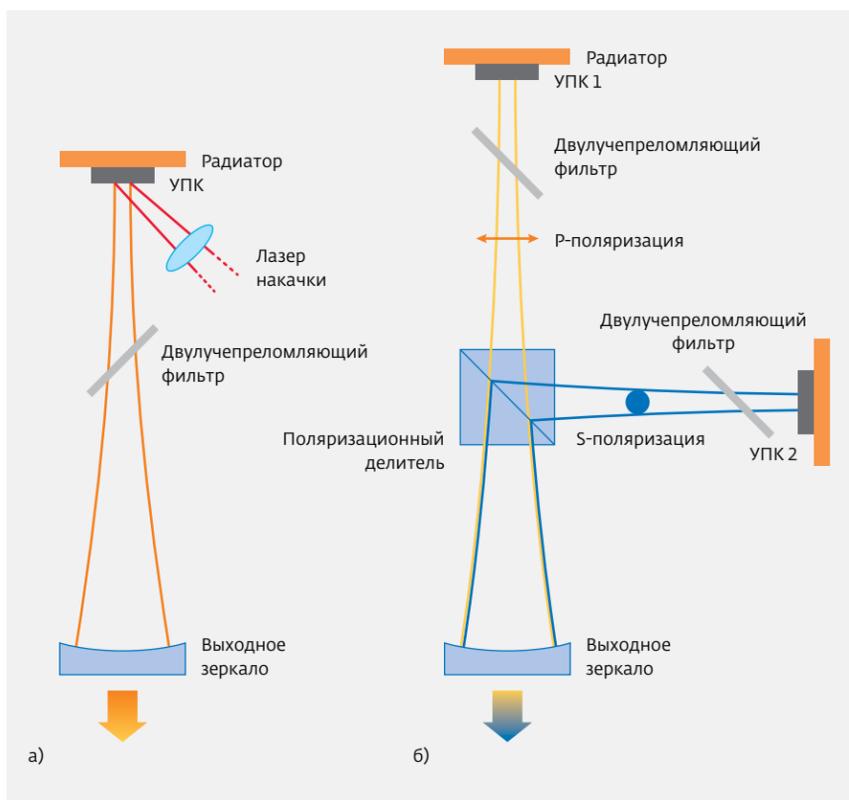


Рис.13. Гибридные схемы OP-VECSEL: а) линейная; б) Т-образная

слабый контраст показателя преломления приводит к необходимости увеличения числа слоев решетки с соответствующим увеличением потерь оптического сигнала. Лучшим вариантом является использование зеркала на основе чередования AlGaAs/GaAs либо диэлектрических слоев с последующим сплавлением с усилительной структурой [30, 31]. Кроме того, применение высокодобротного пространственного оптического резонатора, помимо очевидной возможности повышения мощности и значительного сужения линии генерации, позволяет вводить внутрь его различные оптические элементы, создающие дополнительные преимущества. В частности, введение фильтров Фабри-Перо обеспечивает реализацию одночастотного когерентного режима работы.

Сегодня известны два базовых варианта построения лазера данного типа: с электрической накачкой (EP-VECSEL) и с оптической накачкой (OP-VECSEL). В принципе, первый вариант является более экономичным, поскольку не требует наличия специального лазера накачки, и сохраняет присущую VCSEL миниатюрность. Есть схемы EP-VECSEL как в гибридном (с пространственным резонатором) [32] (рис.11), так и в монолитном [33] (рис.12)

деляющее долговечность всего прибора, состоит в наличии эффективного теплоотвода, исключающего перегрев полупроводниковой структуры при рассеиваемой мощности до десятков ватт. Это требование значительно ужесточается для работающих в устройствах радиофотоники длинноволновых VECSEL из-за худшей теплопроводности

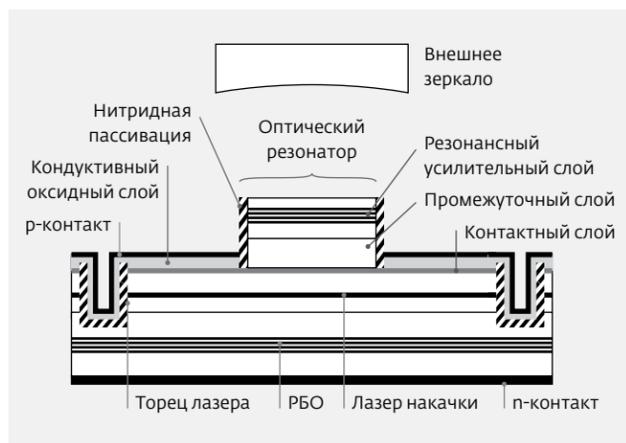


Рис.14. Схема OP-VECSEL со встроенным источником накачки

исполнениях. Обеспечивающий принципиально большую выходную мощность OP-VECSEL также может быть построен на базе гибридной (с отдельным источником накачки) [34] (рис.13) и монолитной (со встроенным источником накачки) [35] (рис.14) систем. Гибридное исполнение OP-VECSEL реализовано в виде двух схем [34]: линейной (рис.13а) с одночастотным выходным сигналом и Т-образной (рис.13б, цепи накачки УПК1 и УПК2 не показаны) с двумя выходными сигналами ортогональной поляризации.

Сопоставив схемы рис.11-14, можно сделать вывод, что принципиальной составной частью всех их является упомянутый выше УПК, который реализуется как отдельный структурный элемент в гибридной схеме VECSEL либо входит в состав монолитной конструкции. В обоих случаях необходимое условие его надежной работы в VECSEL, определяющее долговечность всего прибора, состоит в наличии эффективного теплоотвода, исключающего перегрев полупроводниковой структуры при рассеиваемой мощности до десятков ватт. Это требование значительно ужесточается для работающих в устройствах радиофотоники длинноволновых VECSEL из-за худшей теплопроводности

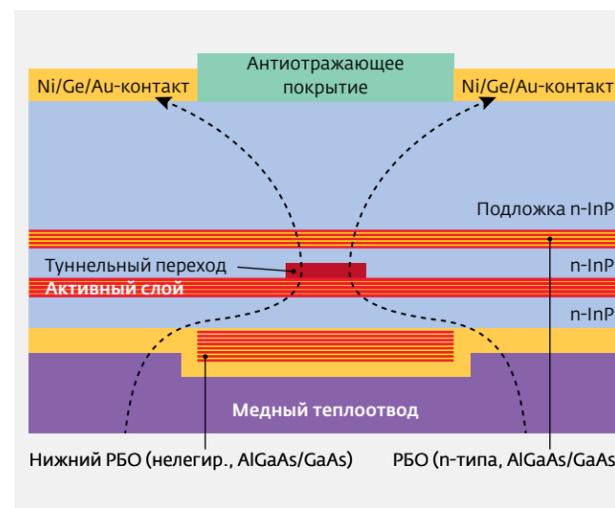


Рис.15. Поперечное сечение УПК сплавной конструкции EP-VECSEL

применяемых в С-диапазоне полупроводниковых соединений. В качестве перспективного решения данной проблемы здесь, как и в VCSEL, используются сплавная конструкция активной области и зеркала с интегральным алмазным радиатором, установленным на медном основании [36, 37]. Важное отличие сплавного УПК состоит во введении между квантоворазмерным усилительным слоем и верхним отражателем области, обеспечивающей расширение потока носителей к верхнему электроду кольцевой формы (рис.15) [38], что необходимо для повышения квантовой эффективности лазера. Для улучшения равномерности распределения тока по объему области здесь так же, как в VCSEL, используется туннельный переход,

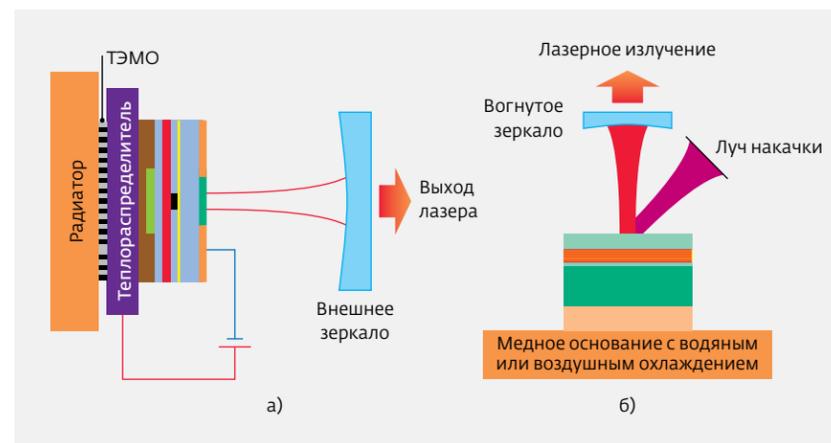
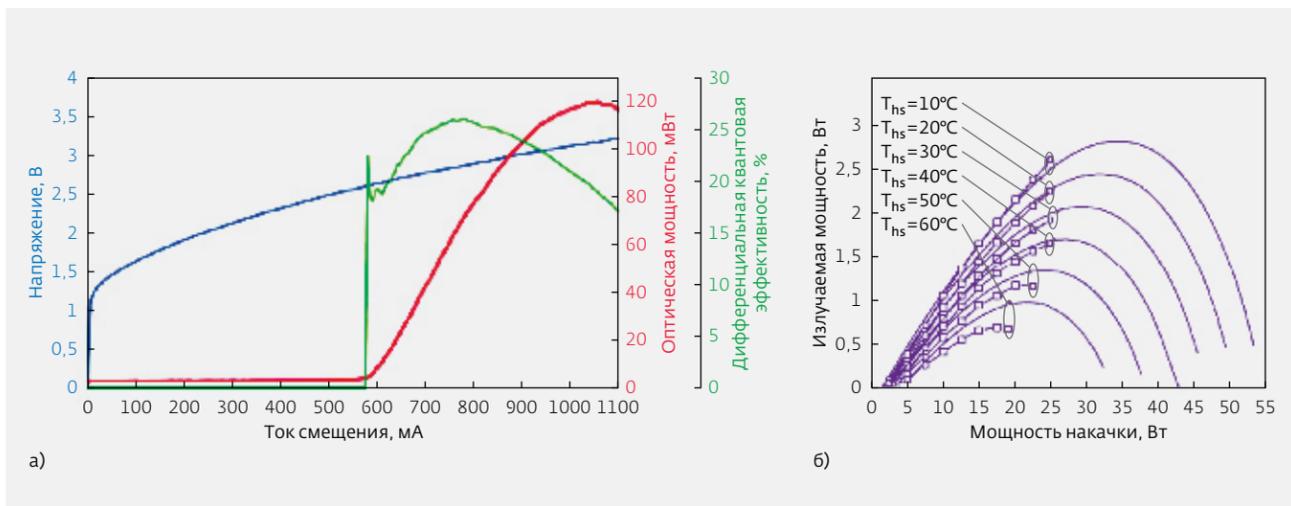


Рис.16. Перспективные схемы мощного VECSEL: а) для EP-VECSEL; б) для OP-VECSEL

поперечные размеры которого согласуются с толщиной области расширения тока. Пунктирными линиями показаны траектории тока инжекции, протекающего между верхним и нижним дисковыми электродами. Промежуточный полупрозрачный (70%) брэгговский отражатель на базе слоев AlGaAs/GaAs n-типа предназначен для компенсации потерь на поглощение в легированных областях УПК. Осаждение на нижний электрод гальванического медного покрытия обеспечивает эффективный отвод тепла с тепловым сопротивлением в пределах 13-25 К/Вт во всем диапазоне рабочих температур прибора.

Сегодня сложились два перспективных подхода к построению мощных VECSEL, которые могут найти применение в качестве задающих генераторов многоэлементных радиофотонных антенных решеток СВЧ-диапазона, а также в качестве источника накачки (1450-1480 нм) волоконных эрбиевых и рамановских усилителей: использование термоэлектрического микроохладителя (ТЭМО) [38] для приборов с электрической накачкой (рис.16а) и водяного либо воздушного охлаждения [39] для приборов с оптической накачкой (рис.16б). При исследовании этих схем были получены электрические и энергетические характеристики (рис.17). Они позволяют сделать вывод, что при работе длинноволнового VECSEL с электрической накачкой в непрерывном одночастотном режиме может быть достигнута выходная мощность более 100 мВт, что в 40 раз превышает типичную выходную мощность VCSEL того же спектрального диапазона (см. рис.4). Применение же оптической накачки в лазерах S- и C-диапазонов дает возможность увеличить ее до 1-3 Вт при температуре теплоотвода до 50°C.

Как известно, качество работы генератора любого частотного диапазона, помимо выходной мощности, характеризуется шумовыми характеристиками, которые для лазеров обычно определяются [3] в виде относительного шума интенсивности (RIN) и ширины линии излучения по половинному уровню. Шум интенсивности OP-VECSEL C-диапазона составляет менее -160 дБ/Гц вблизи несущей и достигает порога измерительной установки (-170 дБ/Гц) уже на частотах более 500 МГц (рис.18) [40],

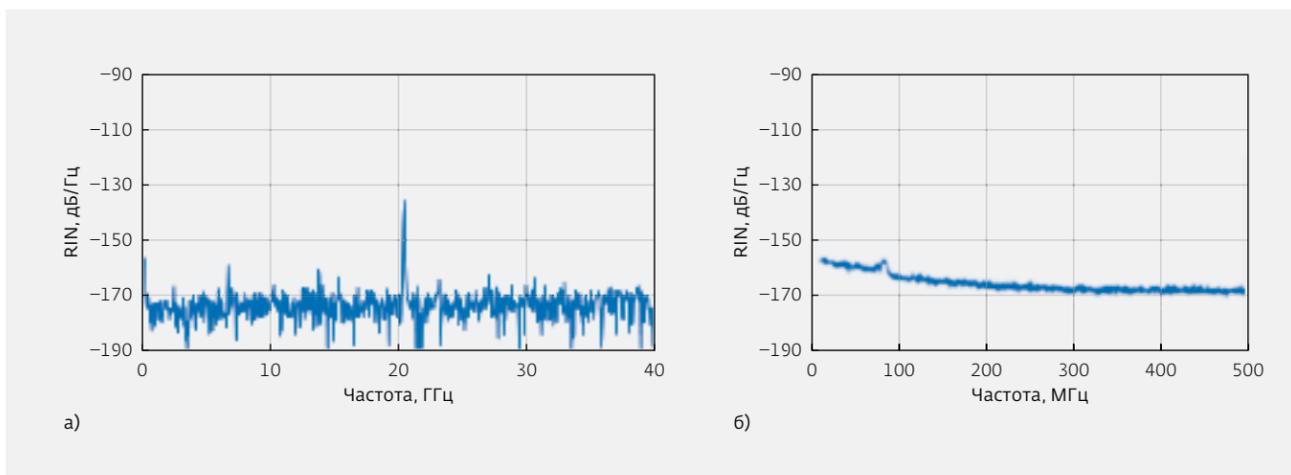


**Рис.17.** Электрические и энергетические характеристики мощных VCSEL: а) EP-VCSEL (температура теплоотвода 3°C); б) OP-VCSEL ( $T_{hs}$  – температура теплоотвода; сплошными линиями показаны результаты моделирования)

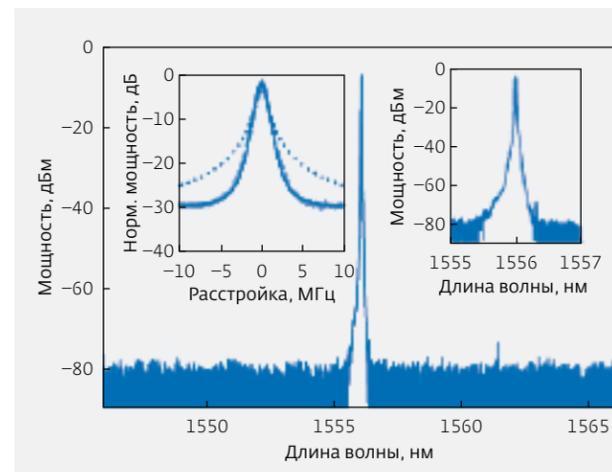
что значительно меньше аналогичного показателя как для VCSEL [15], так и для лазера с торцевым излучением [3]. Фундаментальная причина этого состоит в большем отношении времени жизни фотонов в резонаторе и носителей в УПК. Преимущество VCSEL заключается также в принципиальном сужении линии излучения, поскольку ее ширина обратно пропорциональна длине резонатора [3]. В длинноволновом OP-VCSEL можно обеспечить одномодовый режим работы с подавлением побочных мод более 60 дБ и линию излучения шириной десятки кГц (рис.19) [41], более

узкую, чем так называемая лоренцева линия (пунктирная кривая на левой вкладке). Отметим, что вышеприведенные данные значительно лучше результатов измерения спектральных характеристик VCSEL (см. рис.7 и 9).

Еще один существенный недостаток VCSEL непрерывного режима, обнаружившийся в процессе развития фотонной технологии, состоит в недостаточно широкой полосе перестройки линии генерации. Так, согласно рис.8 при наиболее простом управлении током смещения и температурой она не превышает нескольких нанометров,



**Рис.18.** Шумовые характеристики VCSEL мощностью 100 мВт (при комнатной температуре): а) в широкой полосе частот 0,1–40 ГГц (пик в районе 20 ГГц связан с влиянием внешнего оптического резонатора); б) в близкой к несущей полосе частот 10–500 МГц

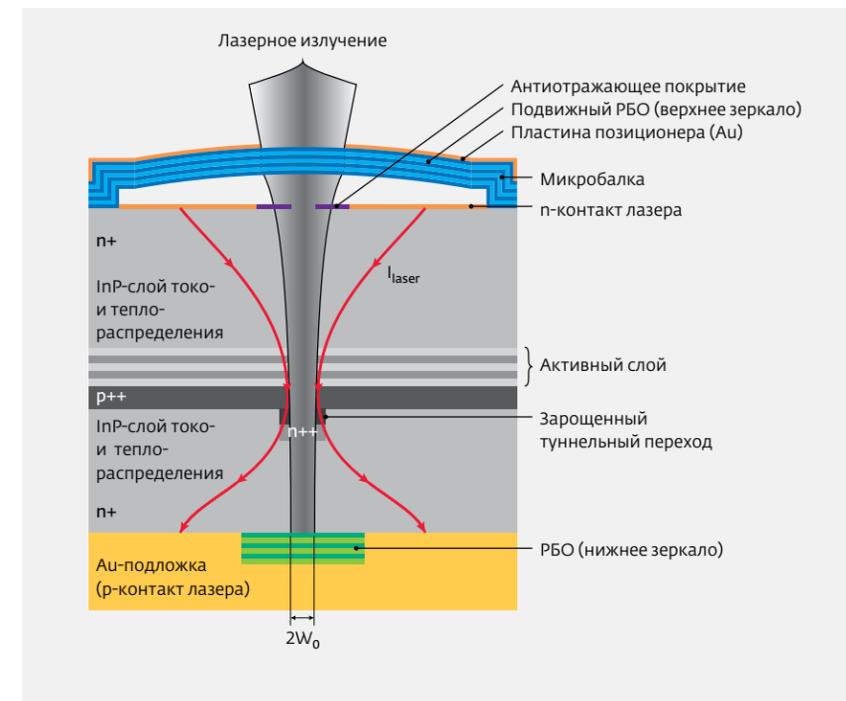


**Рис.19.** Измеренные спектральные характеристики OP-VCSEL С-диапазона мощностью 77 мВт (при комнатной температуре). Правая вкладка – измерения с помощью оптического анализатора спектра в узкой полосе вблизи несущей; левая вкладка – измерения автогетеродинным методом с помощью радиотехнического анализатора спектра

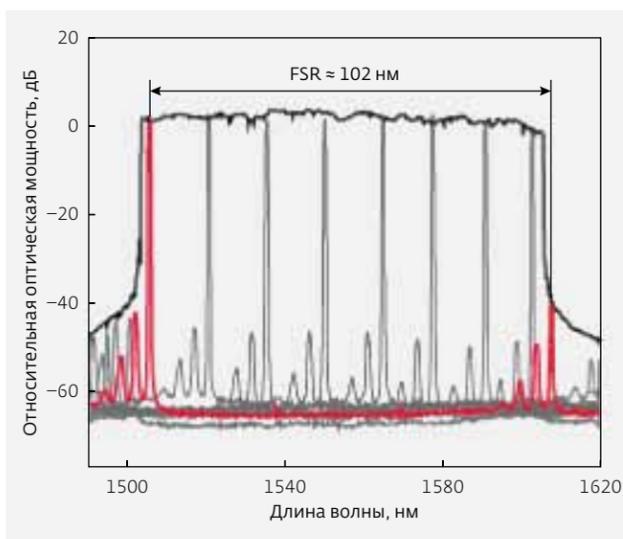
тогда как для эффективного функционирования некоторых радиофотонных устройств, например, диаграммообразующего устройства, требуется перестройка, по меньшей мере, во всем С-диапазоне (35 нм). Для решения этой проблемы предложены два подхода, использующих регулировку физической либо оптической длины резонатора VCSEL, которая, как уже упоминалось, сравнима с длиной волны излучения. Лазер, в котором реализован первый подход, получил название MEMS-VCSEL (Micro Electro-Mechanical System-VCSEL), наиболее распространенное наименование лазера на основе второго подхода – LICSEL (LIquid Crystal Surface Emitting Laser). Данные структуры широко исследуются различными университетскими научными группами в течение последних 10 лет. В ходе работ получен большой объем результатов, поэтому ниже рассматриваются только наиболее значимые.

Общий принцип построения современного MEMS-VCSEL

С-диапазона [42] состоит в формировании верхнего брэгговского зеркала (см. рис.2) в виде подвижной микроэлектромеханической мембраны (рис.20). Полоса непрерывной перестройки у него составляет 102 нм (рис.21), что в 25 раз превышает полосу перестройки стандартного VCSEL (см. рис.8). Очевидным недостатком рассмотренной структуры MEMS-VCSEL с точки зрения работы в практическом устройстве является зависимость мощности и особенно длины волны излучения от окружающей температуры, соответствующая стандартному VCSEL (см. рис.8). Для компенсации температурной чувствительности длины волны предложена специфичная структура MEMS-VCSEL [43], в которой верхнее зеркало установлено на микроконсоли длиной около 100 мкм (рис.22). Согласно проведенным экспериментальным исследованиям минимальная температурная чувствительность длины волны излучения в С-диапазоне получилась на уровне 0,0016 нм/°C. Данный результат соответствует примерно 100-кратному снижению чувствительности по сравнению со стандартным VCSEL и позволяет считать, что рассмотренная структура работает в атермальном режиме, то есть для нее не требуется наличие обычного для полупроводникового лазера узла термостатирования с мощностью энергопотребления на уровне нескольких ватт.

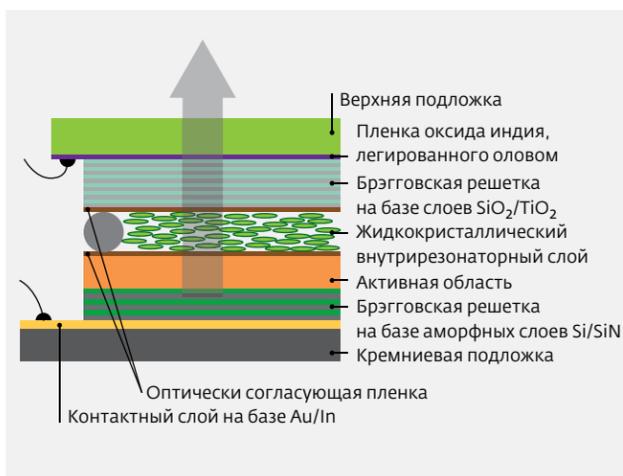


**Рис.20.** Поперечная структура MEMS-VCSEL.  $W_0$  – апертура лазерного пучка,  $I_{laser}$  – ток лазера

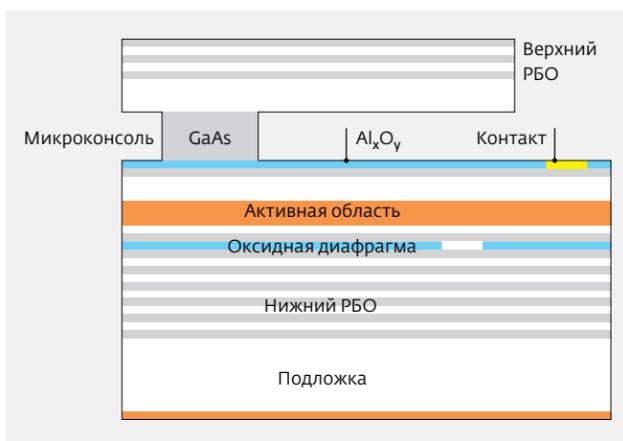


**Рис.21.** Характеристики перестройки частоты излучения MEMS-VCSEL (ток смещения фиксирован, температура кристалла 20°C). FSR (free spectral range) – область свободной дисперсии

Более экономичным решением проблемы увеличения полосы перестройки длины волны излучения VCSEL считается введение внутри резонатора прозрачного жидкокристаллического слоя, показатель преломления которого меняется под воздействием внешнего электрического напряжения  $V_{LC}$ , что обеспечивает возможность регулировки оптической длины резонатора лазера. Главное отличие такого лазера (LICSEL) от стандартного VCSEL (см. рис.2) – внутрирезонаторный слой на базе нематической жидкокристаллической



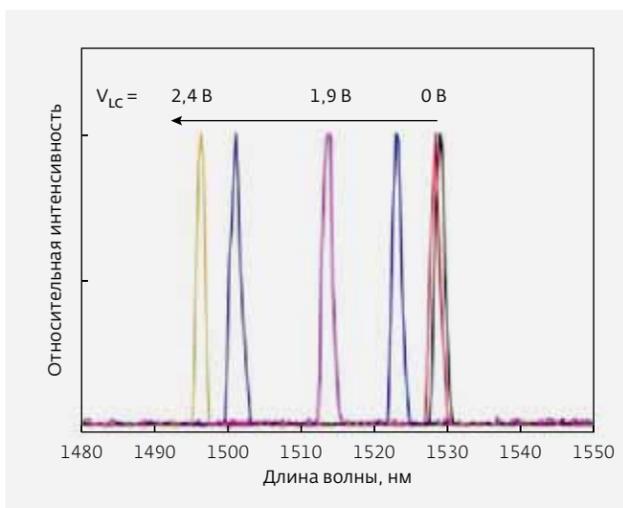
**Рис.23.** Поперечная структура длинноволнового LICSEL



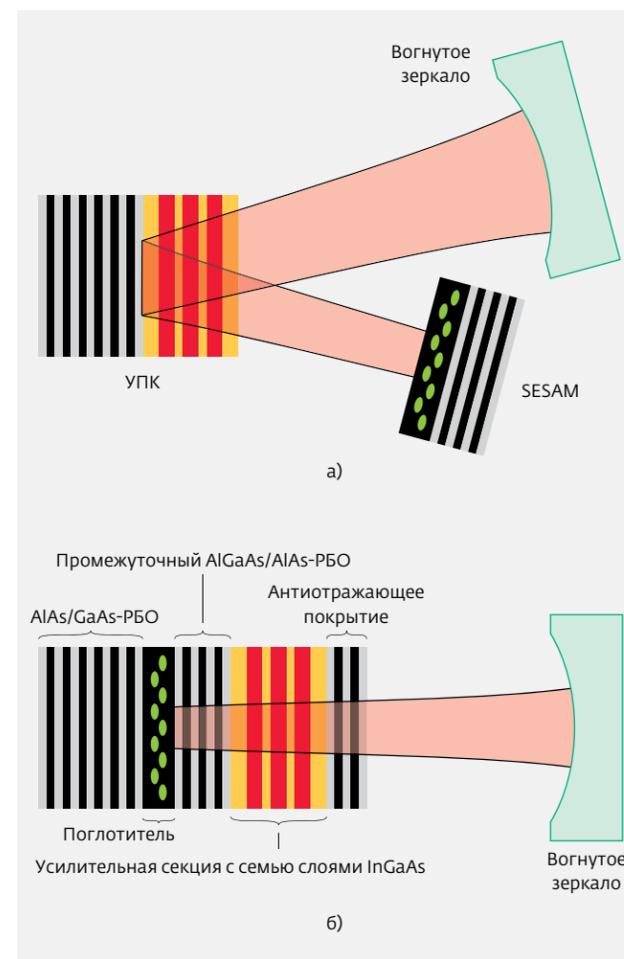
**Рис.22.** Структура атермального MEMS-VCSEL

структуры (рис.23) [44]. Типичная характеристика перестройки LICSEL при фиксированном токе смещения и стабилизированной на уровне 20°C температуре (рис.24) демонстрирует, что полоса непрерывной перестройки в диапазоне изменения  $V_{LC} = 0-2,4$  В составляет 34 нм. Это почти в 10 раз превышает полосу перестройки стандартного VCSEL (см. рис.8) и в большинстве практических случаев соответствует требованиям, предъявляемым к радиофотонным устройствам.

Необходимо отметить, что внедрение атермального MEMS-VCSEL либо более простого функционального аналога – LICSEL, открывает дорогу к эффективному использованию радиофотонных технологий в бортовой радиоаппаратуре с жесткими требованиями к энергопотреблению. В этом случае необходима при работе полупроводникового лазера



**Рис.24.** Характеристики перестройки LICSEL



**Рис.25.** Схемы VCSEL импульсного режима генерации с пассивной синхронизацией мод: а) VECSEL-SESAM; б) MIXSEL

любого типа температурная стабилизация спектра излучения с потреблением в несколько ватт может быть заменена на почти не потребляющую частотную стабилизацию, работающую аналогично радиотехнической схеме автоподстройки частоты.

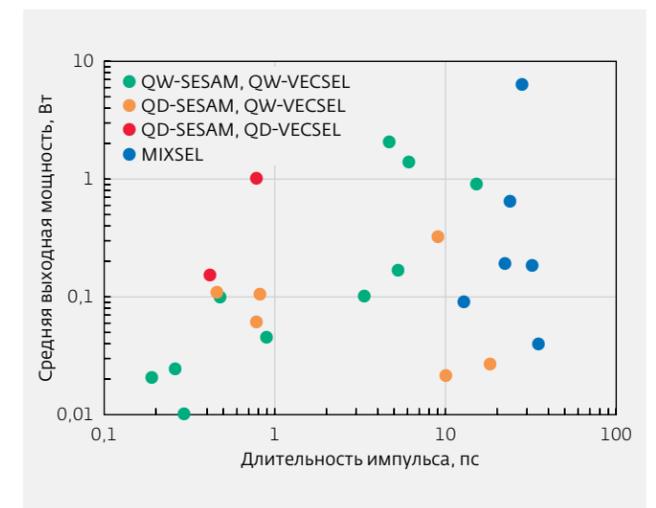
**Лазеры импульсной генерации: VECSEL-SESAM, MIXSEL**

Развитие компонентной базы викселоники связано не только с описанными выше лазерами непрерывной генерации, но и с импульсными лазерами. В этом направлении важной отличительной чертой фотонных технологий является возможность простой генерации последовательности когерентных ультракоротких оптических импульсов с помощью так называемых лазеров с пассивной синхронизацией мод (ПСМ). Такие лазеры нашли широкое применение в ТВОС, спектроскопии,

материаловедении и т.д. Перспектива их использования в устройствах радиофотоники заключается, например, в создании многоволновых прецизионных генераторов оптических импульсов для диаграммообразующих устройств и радиофотонных аналого-цифровых преобразователей.

Техника ПСМ уже несколько десятков лет развивается на базе твердотельных и полупроводниковых лазеров в основном в коротковолновом (в районе 1 мкм) спектральном диапазоне. Направление получило новый импульс с появлением VECSEL, сочетающего, как уже упоминалось, достоинства твердотельных и полупроводниковых лазеров. Традиционная схема ПСМ содержит два принципиальных элемента: активную лазерную структуру и насыщающийся поглотитель, в котором выполняется модуляция потерь в резонаторе. В практических устройствах эта операция обычно реализуется при помощи зеркала на основе полупроводникового насыщающегося поглотителя, получившего название SESAM (SEmiconductor Saturable Absorber Mirror). Структура SESAM содержит полупроводниковый РБО, в который введены квантоворазмерные слои поглотителя.

Сегодня известны две схемы построения VECSEL импульсной генерации [45, 46]: с отдельными УПК и SESAM (рис.25а), получившая наименование VECSEL-SESAM, и с интегрированными УПК и SESAM (рис.25б), названная MIXSEL (Mode-locked Integrated eXternal-cavity Surface Emitting Laser). Для работы обеих схем используется оптическая накачка, которая вводится согласно рис.16б. Монолитная структура лазера MIXSEL, как правило,



**Рис.26.** Результаты экспериментального исследования коротковолновых VECSEL-SESAM и MIXSEL

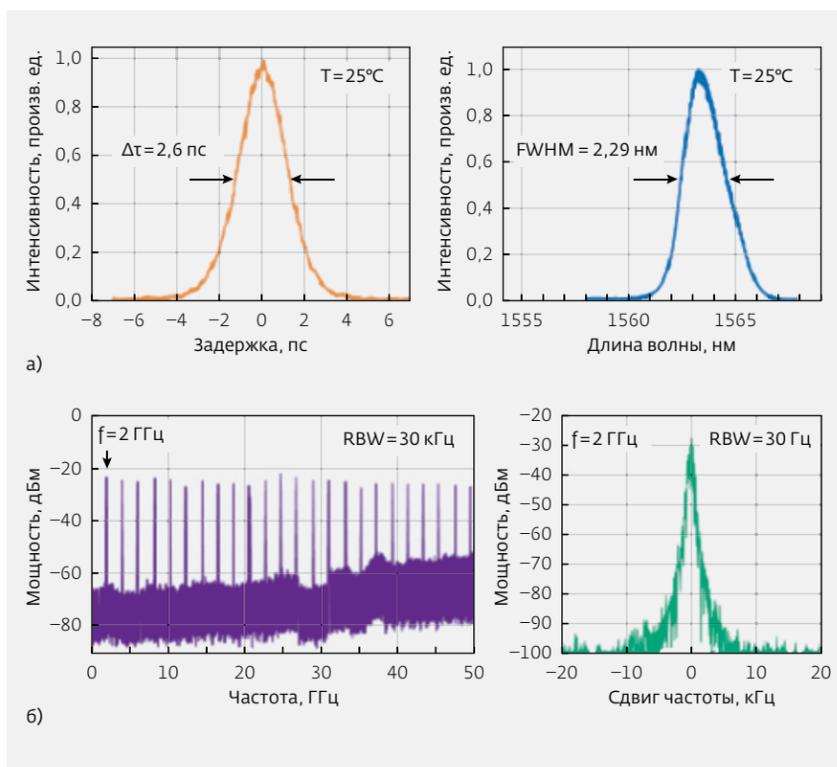


**Рис.27.** Длинноволновый VECSEL-SESAM: а) схема Z-образной конфигурации с использованием оптической накачки; б) конструкция УПК

выращивается посредством молекулярно-лучевой эпитаксии и содержит пять секций (см. рис.25б): высокоотражающий AlAs/GaAs-РБО; поглотитель на базе слоя самоорганизующихся InAs квантовых точек, внедренного в низкотемпературные слои GaAs; промежуточный AlGaAs/AlAs-РБО, предотвращающий поглощение сигнала накачки в секции поглотителя; усиительная секция с семью квантоворазмерными слоями InGaAs; антиотражающее покрытие, обеспечивающее оптимальное распределение полей секций усиления и поглощения.

Исследования и разработки VECSEL-SESAM и MIXSEL последних лет в основном проводились в направлениях поиска путей увеличения средней мощности излучения, уменьшения длительности оптического импульса при одновременном продвижении частот повторения в СВЧ-диапазон, что является необходимым условием использования этих лазеров в устройствах радиопотоники. При этом в схеме рис.25а изучался эффект применения в структурах VECSEL (точнее, в УПК) и в SESAM эпитаксиальных слоев на базе квантовых ям (QW) и квантовых точек (QD). Результаты измерений при частотах повторения от 2 до 50 ГГц [45, 47] (рис.26)

позволяют сделать следующие выводы. В схеме MIXSEL получена самая высокая средняя мощность излучения (до 6,4 Вт), но при этом длительность импульса превышает 20 пс, что не подходит для большинства радиопотонных устройств. Импульсы



**Рис.28.** Результаты экспериментального исследования MIXSEL C-диапазона: а) автокорреляционная функция (слева), Фурье-спектрограмма (справа); б) радиочастотный спектр импульсной последовательности (слева), спектр первой гармоники (справа). FWHM – ширина спектра по половинному уровню; RBW – разрешение по полосе пропускания

длительностью менее 200 фс при средней мощности около 20 мВт обеспечиваются при использовании в обоих элементах лазера с ПСМ QW-слоев. Оптимальные для применения в радиофотонике показатели (длительность импульсов менее 1 пс, средняя мощность от 100 мВт до 1 Вт) достигаются при реализации обоих элементов на базе QD-слоев. Тем не менее дальнейшее усовершенствование работы схемы MIXSEL позволило получить еще более перспективные результаты [48]: длительность импульсов 570 фс в диапазоне частот повторения 5–101 ГГц при средней мощности 127 мВт.

Все вышеперечисленные экспериментальные данные получены для коротковолновых лазеров, исследования которых проводятся наиболее широко. Публикаций, посвященных длинноволновым MIXSEL, пока гораздо меньше и описанные в них результаты значительно скромнее. В технологическом плане здесь так же, как в VCSEL (см. рис.2, 3) и в УПК мощного VCSEL непрерывной генерации (см. рис.15), перспективной считается сплавная конструкция [49]. Пример такого лазера – длинноволновый VCSEL-SESAM Z-образной конфигурации с использованием оптической накачки [49] (рис.27а). Для этого VCSEL-SESAM был специально разработан УПК (рис.27б), в котором сплавляются активная область, выращенная на InP-подложке с помощью установки металло-органической паровозной эпитаксии, и РБО, выращенный на GaAs-подложке с помощью установки молекулярно-лучевой эпитаксии. В ходе экспериментального исследования температура УПК поддерживалась на уровне 15°C посредством водяного охлаждения, а температура SESAM – на уровне 21°C посредством ТЭМО. При измерениях получены следующие результаты: длительность импульсов 6,4 пс при средней мощности излучения около 100 мВт и мощности накачки около 9 Вт. Определяемая общей длиной резонатора (см. рис.27а) частота повторения составила 950 МГц. Более высокая частота повторения получена в ходе экспериментов с MIXSEL C-диапазона [50] (рис.28). В схеме использован УПК с гибридным метаморфным зеркалом, оптимизированный для высокой мощности излучения при комнатной температуре, и быстродействующее SESAM на базе InGaAsN/GaAsN, что позволило избежать необходимости применения водяного охлаждения. Как следует из экспериментальных данных, длительность импульса получилась на уровне 1,7 пс, что соответствует общей ширине спектра сигнала MIXSEL 2,29 нм (около 300 ГГц), частота следования импульсов составляет 2 ГГц, ширина линии генерации, характеризующая шумовые свойства прибора, не превышает 1 кГц.

Таким образом, сегодня существует большое количество приборов на базе VCSEL. Они находят широкое применение в волоконно-оптической и радиоэлектронной аппаратуре. Об этом – в следующей части статьи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Википедия: <http://ru.wikipedia.org/wiki>.
2. **Svanberg K.** President's Letter. Solutions are green. – SPIE Professional, 2011, v. 6, № 3, p. 3.
3. Физика полупроводниковых лазеров: Пер. с японск. / Под ред. Х.Такумы. – М.: Мир, 1989. – 310 с.
4. **Iga K.** Surface-Emitting Laser – Its Birth and Generation of New Optoelectronics Field. – IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, v. 6, № 6, p. 1201-1215.
5. **Koyama F.** VCSEL photonics – advances and new challenges. – IEICE Electronics Express, 2009, v. 6, № 11, p. 651-672.
6. **Ridgway R.W., Dohrman C.L., Conway J.A.** Microwave Photonics Programs at DARPA. – IEEE Journal of Lightwave Technology, 2014, v. 32, № 20, p. 3428-3439.
7. **Белкин М.Е., Сигов А.С.** Новое направление фотоники – сверхвысокочастотная оптоэлектроника. – Радиотехника и электроника, 2009, т. 54, № 8, с. 901-914.
8. **Шулунов А.Н.** Применение радиофотоники в радиолокации. – 24-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2014), 7-13 сентября 2014 года, Севастополь, Крым, Россия. т. 1, с. 2-5.
9. Microwave Photonics: Devices and Applications / Ed. by S.Iezekiel. – Wiley, 2009, 342 p.
10. **Herczfeld P.R.** The Past, Present and Future of Microwave Photonics. – International Topical Meeting on Microwave Photonics Technical Digest, 3-5 Dec. 1996, TU2-1, p. 25-28.
11. **Gamage P.A., Nirmalathas A., Lim C., et al.** Multi-Services Distribution using Power-Efficient Low-Cost VCSELs. – International Topical Meeting on Microwave Photonics Technical Digest, MPW'2008, p. 169-172.
12. **Koyama F.** Recent advances of VCSEL photonics. – IEEE Journal of Lightwave Technology, 2006, v. 24, № 12, p. 4502-4513.
13. **Black A., Hawkins A.R., Margalit N.M., et al.** Wafer Fusion: Materials Issues and Device Results. – IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 1997, v. 3, № 3, p. 943-951.
14. **Kapon E., Sirbu A.** Long-wavelength VCSELs: Power-efficient answer. – Nature Photonics, 2009, v. 3, № 1, p. 27-29.

15. **Белкин М.Е., Яковлев В.П.** Наноструктурный поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором О и С спектральных диапазонов в качестве ключевого элемента компонентной базы радиофотоники. – Наноматериалы и наноструктуры, 2014, т. 5, № 3, с. 37-49.
16. **Chrostowski L., Chang C-H., Chang-Hasnain C.J.** Enhancement of dynamic range in 1.55-um VCSELs using injection locking. – IEEE Photonics Technology Letters, 2003, v. 15, № 4, p. 498-500.
17. **Белкин М.Е., Сигов А.С.** Исследование проблем создания оптических межсоединений. – Наноиндустрия, 2012, № 2 (32), с. 18-28.
18. **Mircea A., Caliman A., Iakovlev V., et al.** Cavity Mode – Gain Peak Tradeoff for 1320-nm Wafer-Fused VCSELs With 3-mW Single-Mode Emission Power and 10-Gb/s Modulation Speed Up to 70°C. – IEEE Photonics Technology Letters, 2007, v. 19, p. 121-123.
19. **Mereuta A., Sirbu A., Iakovlev V., et al.** 1.5 μm VCSEL Structure Optimization for High-Power and High Temperature Operation. – Journal of Crystal growth, 2004, v. 27, p. 520-525.
20. **Caliman A., Iakovlev V., Mereuta A., et al.** 8 mW fundamental mode output of wafer-fused VCSELs emitting in the 1550-nm band. – Optics Express, 2011, v. 19, p. 16996-17001.

21. **Belkin M., Belkin L., Sigov A., et al.** Performances of Microwave-Band Analog Signal Transmission using Wafer-Fused Long Wavelength VCSELs. – IEEE Photonics Technology Letters, 2011, v. 23, № 20, p. 1463-1465.
22. **Belkin M., Sigov A., Ellafi D., Iakovlev V., Kapon E.** Nano-Engineering in Long Wavelength Wafer-Fused VCSEL Fabrication for Microwave Photonics. – Наноматериалы и наноструктуры, 2014, т. 5, № 2, с. 33-47.
23. **Civiš S., Zelinger Z., Nevrlý V., et al.** Near-infrared wafer-fused vertical-cavity surface-emitting lasers for HF detection. – Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2014, № 147, p. 53-59.
24. **Белкин М.Е.** Метод расчета числа передаваемых каналов в многоканальной волоконно-оптической системе с ВЧ и СВЧ поднесущими. – Радиотехника, 2006, № 12, с. 88-91.
25. **Белкин М.Е., Белкин Л.М.** Исследование эффективности применения полупроводникового лазерного излучателя для передачи многоканального аналогового сигнала СВЧ диапазона. – Нано- и микросистемная техника, 2009, № 11, с. 32-37.
26. **Белкин Л.М., Белкин М.Е.** Бесструктурная модель поверхностно излучающего лазера с полосой модуляции в СВЧ диапазоне. – Нано- и микросистемная техника, 2011, № 10, с. 9-17.

27. **Qian X., Hartmann P., Ingham J.D., Penty R.V., White I.H.** Directly-modulated photonic devices for microwave applications. – IEEE MTTs International Microwave Symposium Digest, 2005, v. 44, p. 909–912.
28. **Carlsson C., Larsson A., Alping A.** RF Transmission over Multimode Fibers Using VCSELs – Comparing Standard and High-Bandwidth Multimode Fibers. – IEEE Journal of Lightwave Technology, 2004, v. 22, № 7, p.1694–1700.
29. [http://www.rp-photonics.com/vertical\\_external\\_cavity\\_surface\\_emitting\\_lasers.html](http://www.rp-photonics.com/vertical_external_cavity_surface_emitting_lasers.html).
30. **Sirbu A., Okhotnikov O., Kapon E.** Wafer-fused 1300 and 1550 nm-waveband vertical external cavity lasers. – In SPIE Newsroom, 2013, № 10.1117/2.1201307.004905.
31. **Rantamäki A., Sirbu A., Saarinen E.J., Lyytikäinen J., Mereuta A., et al.** High-power flip-chip semiconductor disk laser in the 1.3 $\mu\text{m}$  wavelength band. – Optics Letters, 2014, v. 39, № 16, p. 4855.
32. **Bousseksou A., Kurdi M.E., Bouchoule S., Salik M.D., and Sagnes I.** Tunable InP-based EP-VECSEL operating at Room Temperature and in CW for 1.55  $\mu\text{m}$  wavelength. – The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, LEOS, 2004, v. 1, p. 408–409.
33. **Keeler G.A., Serkland D.K., Geib K.M., Peake G.M., and Mar A.** Single Transverse Mode Operation of Electrically Pumped Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Lasers With Micromirrors. – IEEE Photonics Technology Letters, 2005, v. 17, № 3, p. 522–524.
34. **M. Lukowski, C.Hessenius, and M.Fallahi.** Widely Tunable High-Power Two-Color VCSELs for New Wavelength Generation. – IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, v. 21, № 1.
35. **Illek S., Brick P., Diehl W., Furitsch M., Lindberg H., Pietzonka I.** Monolithic Integration of Pump Lasers and a Vertical External Cavity Surface Emitting Laser (VECSEL). – CLEO/QELS Conference Proceedings, 2008, CWD2.
36. **Rantamäki A., Rautiainen J., Sirbu A., Mereuta A., Kapon E., and Okhotnikov O.G.** 1.56  $\mu\text{m}$  1 watt single frequency semiconductor disk laser. – Optics Express, 2013, v. 21, № 2, p. 2355–2360.
37. **Iakovlev V., Walczak J., GebSKI M., et al.** Double-diamond high-contrast-gratings vertical external cavity surface emitting laser. – Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, v. 47, 065104, p. 1–8.
38. **Caliman A., Sirbu A., Mereuta A., Pierściński K., Iakovlev V., et al.** 14XX nm-wavelength electrically-pumped VCSELs fabricated by wafer fusion. – Optics Express, 2013, v. 21, № 11, p. 13668–13674.
39. **Zhao Z., Bouchoule S., Ferlazzo L., Sirbu A., et al.** Cost-Effective Thermally-Managed 1.55- $\mu\text{m}$  VECSEL With Hybrid Mirror on Copper Substrate. – IEEE Journal of Quantum Electronics, 2012, v. 48, № 5, p. 643–650.
40. **Baili Gh., Morvan L., Pillet G., et al.** Ultralow Noise and High-Power VECSEL for High Dynamic Range and Broadband RF/Optical Links. – IEEE Journal of Lightwave Technology, 2014, v. 32, № 20, p.3489–3494.
41. **Tourennc J.P., Bouchoule S., Khadour A., et al.** High-Power Single-Longitudinal-Mode VECSEL at 1.55 $\mu\text{m}$  with a Hybrid Metal-Metamorphic Bragg Mirror. – The 20th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, LEOS, 2007, p. 256–257.
42. **Gierl C., Gruendl T., Debernardi P., et al.** Surface micromachined tunable 1.55  $\mu\text{m}$ -VECSEL with 102 nm continuous single-mode tuning. – Optics Express, 2011, v. 19, № 18, p. 17336–17343.
43. **Koyama F.** New functions of VCSEL-based optical devices. – Chinese Optics Letters, 2008, v. 6, № 10, p. 755–762.
44. **Castany O., Paranthoen C., Levallois C., et al.** Demonstration of a 34 nm monolithic continuously tunable VCSEL at 1.55  $\mu\text{m}$  combined with liquid crystal. – 23rd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials – IPRM 2011, 2011, p. 1–4.
45. **Südmeyer T., Wittwer V.J., Hoffmann M., et al.** Ultrafast VCSELs and MIXSELs: gigahertz semiconductor lasers with multiwatt average power. – IEEE Photonics Conference (PHO), 2011, p. 209–210.
46. **Maas D.J. H. C., Bellancourt A.-R., Rudin B., et al.** MIXSELs – a new class of ultrafast semiconductor lasers. – European Conference on Lasers and Electro-Optics, and the International Quantum Electronics Conference. CLEOE-IQEC 2007. – CWI1, 1 p.
47. **Wittwer V.J., Sieber O.D., Mangold M., et al.** First MIXSEL with a quantum well saturable absorber: Shorter pulse durations and higher repetition rates. – Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2012. – CW1N.2, 2 p.
48. **Mangold M., Zaugg C.A., Link S.M., et al.** Recent advances in ultrafast MIXSELs. – Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2014. – SF2G.3, 2 p.
49. **Rautiainen J., Lyytikäinen J., Toikkanen L., Nikkinen J., Sirbu A., et al.** 1.3- $\mu\text{m}$  Mode-Locked Disk Laser With Wafer Fused Gain and SESAM Structures. – IEEE Photonics Technology Letters, 2010, v. 22, № 11, p. 748–750.
50. **Khadour A., Zhao Z., Bouchoule S., et al.** Generation 1.7-ps mode-locked pulse with low RF linewidth from a 1.55  $\mu\text{m}$  VECSEL operating at 25°C. – 23rd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society, 2010. p. 295–296.