

Низкопороговый поверхностно-излучающий лазер с вертикальным полуволновым резонатором и модовым фильтром, генерирующий одну поперечную моду на длине волны 940 нм*

Ц.Х.Жэнь, Ц.Ван, М.Ян, Х.Ц.Ван, Ц.Чэн, Ю.Ц.Хуан, С.М.Жэнь, Х.М.Цзи, С.Ло

Продемонстрирована структура поверхностно-излучающего лазера с вертикальным резонатором (VCSEL) с модовым фильтром и полуволновым ($\lambda/2$) резонатором. Изучено влияние резонаторов длиной $\lambda/2$ и λ на величину порогового тока. Оптимизированы толщина и диаметр области травления модового фильтра для получения единственной поперечной моды выходного излучения. Результаты показали, что при изменении длины резонатора с λ на $\lambda/2$ пороговый ток VCSEL снижается с 0.85 до 0.65 мА, т. е. на 30.8%. Кроме того, при толщине модового фильтра 80 нм и диаметре области травления 2.5 мкм коэффициент подавления боковых мод достигает 90 дБ, что удовлетворяет требованиям к выходному излучению с одной поперечной модой. Оптимизированные структуры VCSEL позволяют преодолеть многие трудности и перспективны для использования в 3D распознавании лиц.

Ключевые слова: VCSEL, модовый фильтр, режим одной поперечной моды, полуволновой резонатор, пороговый ток.

1. Введение

Поверхностно-излучающие лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL) широко применяются в оптической связи, оптических соединениях и оптической обработке информации по причине их низкого энергопотребления, эффективного согласования с оптическими волокнами, низкого порогового тока и высокого коэффициента преобразования мощности [1, 2]. В настоящее время подавляющее большинство VCSEL используется в потребительской электронике, в том числе при распознавании приближения объектов в мобильных телефонах, сканирование объектов в пределах нескольких метров и в лазерных системах локации для автоматического вождения, способных обнаруживать препятствия перед автомобилем более чем за 100 м [3–6].

На протяжении последних лет прогресс в исследованиях VCSEL сопровождался непрерывным увеличением их оптической мощности, ширины полосы модуляции и надежности. Однако применение VCSEL в оптической связи ограничивается наличием многих поперечных мод [7], поэтому получение режима генерации одной поперечной моды на выходе лазера является важной задачей. До настоящего момента предлагалось несколько методов достижения этой цели – с использованием структур фотонного кристалла, малой оксидной апертуры, модового фильтра [8–13]. В 2013 г. Тан и др. реализовали VCSEL,

излучающий единственную поперечную моду через фотонно-кристаллическую структуру, что позволило осуществить передачу сигнала без ошибок со скоростью 25 Гб/с по многомодовому оптическому кабелю OM4 длиной более 1 км при плотности тока 5.4 кА/см² [14]. Однако из-за сложности работы с фотонно-кристаллическими структурами экспериментальная реализация данного подхода затруднительна. В том же году Сафасини и др. осуществили режим генерации одной поперечной моды в VCSEL с оксидной апертурой диаметром 3 мкм [15]. К сожалению, с уменьшением диаметра апертуры, ограниченной оксидом, неизбежно растут дифференциальное сопротивление, плотность тока и внутренняя температура VCSEL. Для решения этих проблем в 2015 г. Ларссон с соавторами использовали структуру, обеспечивающую фильтрацию мод и генерацию единственной поперечной моды на выходе [16]. Предшествующие исследования фильтрации поперечных мод VCSEL были нацелены в основном на задачи волоконно-оптической связи. Лишь несколько исследований по поперечно-одномодовым VCSEL связаны с задачами потребительской электроники. В связи с растущим применением VCSEL с длиной волны 940 нм в мобильных устройствах, системах защиты зрения и устойчивого 3D распознавания объектов задача улучшения работы таких лазеров становится актуальной [17–19].

Отметим, что необходимость снижения потребляемой мощности в практических приложениях определяет потребность снижения порогового тока VCSEL. В настоящее время существует три основных метода снижения порогового тока, основанные на использовании оксидной апертуры малого диаметра, фотонно-кристаллической структуры и структуры из квантовых ям с компенсацией деформаций [20, 21]. В 2011 г. Лотт и др. сконструировали оксидную апертуру диаметром 3 мкм, позволившую получить генерацию в VCSEL на длине волны 850 нм при пороговом токе ниже 0.5 мА [22]. В 2012 г. с использованием фотонно-кристаллической структуры успешно создан VCSEL на $\lambda = 850$ нм с пороговым током 0.9 мА [23]. В 2019 г. реализован VCSEL на $\lambda = 940$ нм с пороговым

* Перевод с англ. В.Л.Дербова

Q.H.Ren, J.Wang, M.Yang, H.J.Wang, Z.Cheng, Y.Q.Huang, X.M.Ren. State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; e-mail: wangjun12@bupt.edu.cn
H.M.Ji, S.Luo. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Поступила в редакцию 25 февраля 2020 г., после доработки – 13 мая 2020 г.

током 0.95 мА и наклоном ватт-амперной характеристики 0.96 Вт/А с использованием характеристик усиления квантовых ям InGaAs/GaAsP с компенсацией деформаций [24]. Кроме того, в 2011 г. Мутиг и др. рассчитали фактор оптического ограничения VCSEL с длиной резонатора $\lambda/2$, равный 5.1%, что на 70% больше, чем у VCSEL с длиной резонатора $3\lambda/2$ [25]. Из теории известно, что снижение порогового тока может быть достигнуто путем повышения фактора оптического ограничения, поэтому представляется разумным попытаться снизить пороговый ток путем сокращения длины резонатора.

Хотя многие характеристики VCSEL уже значительно улучшены, все еще есть проблемы с использованием таких лазеров в портативных устройствах (мобильных, ноутбуках и т. п.) [26, 27]. Для решения этих проблем предлагается VCSEL на $\lambda = 940$ нм с длиной резонатора $\lambda/2$ и модовым фильтром. Благодаря такому резонатору эффективно сокращается пороговый ток и энергопотребление, а также увеличивается срок службы. Модовый фильтр управляет модовым составом выходного излучения, мощность которого очень мала, поэтому потенциальный вред для зрения пренебрежимо мал. До настоящего времени существовало всего несколько сообщений о теоретической разработке и оптимизации VCSEL на 940 нм для задач 3D распознавания объектов, требующих низкого порога и поперечно-одномодового режима генерации.

В настоящей работе предложена оптимизированная конструкция VCSEL с длиной резонатора $\lambda/2$ и модовым фильтром, генерирующего одну поперечную моду на длине волны 940 нм. Исследованы пороговые токи VCSEL с длинами резонатора $\lambda/2$ и λ . Распределение оптического поля в VCSEL рассчитано с помощью трехмерной конечно-разностной схемы во временной области. Толщина и диаметр области модового фильтра оптимизированы для достижения поперечно-одномодового излучения на выходе. Кроме того, нами проанализированы причины уменьшения порогового тока за счет оптического ограничения. Результаты показали, что, по сравнению с обычным VCSEL, оптимизированный VCSEL обладает более низким пороговым током и большей выходной мощностью: пороговый ток снижается с 0.85 до 0.65 мА, т. е. на 30.7%,

а выходная мощность увеличивается с 1.25 до 1.4 мВт, т. е. на 10.7%. Толщина и диаметр области травления у оптимизированного модового фильтра составляют 80 нм и 1.5 мкм соответственно. Коэффициент подавления боковых мод достигает 90 дБ, что позволяет считать выходное излучение поперечно-одномодовым. Оптимизированный VCSEL лучше подходит для практического применения. Работа будет способствовать продвижению VCSEL на 940 нм в области потребительской электроники, использующей источники света ближнего ИК диапазона в задачах 3D распознавания объектов.

2. Структура устройства

Схема VCSEL показана на рис.1. В качестве нижнего распределенного брэгговского отражателя (РБО) используется многослойное зеркало, состоящее из 34 пар слоев $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ с концентрацией примеси n-типа $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Активная область образована тремя парами квантовых ям $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ (8 нм)/ $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ (8 нм), слои которых расположены между двумя слоями оболочки толщиной по 51 нм (из $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ и $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$). Верхнее РБО-зеркало с 22.5 парами слоев $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ p-типа (концентрация примеси $4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) выращено на активной области. Длина резонатора спроектирована равной $\lambda/2$ [28]. Для первой пары слоев верхнего РБО на активной области использован слой GaAs (66.4 нм) с высоким показателем преломления и оптической толщиной $\lambda/4$. За ними следуют слои $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ (47.8 нм) и $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ (30 нм) с низким показателем преломления и оптической толщиной $\lambda/4$. Отдельный слой $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ использован для образования апертуры диаметром 6 мкм для ограничения тока и оптического поля, а также для эффективного снижения дифракционных потерь. Для создания структуры модового фильтра на завершающем этапе на РБО был нанесен дополнительный слой GaAs p-типа с омическим контактным слоем. По сравнению с неокисленными областями, эффективный показатель преломления окисленной области понижен, что позволяет применить для описания всей структуры модель оптического волокна [29].

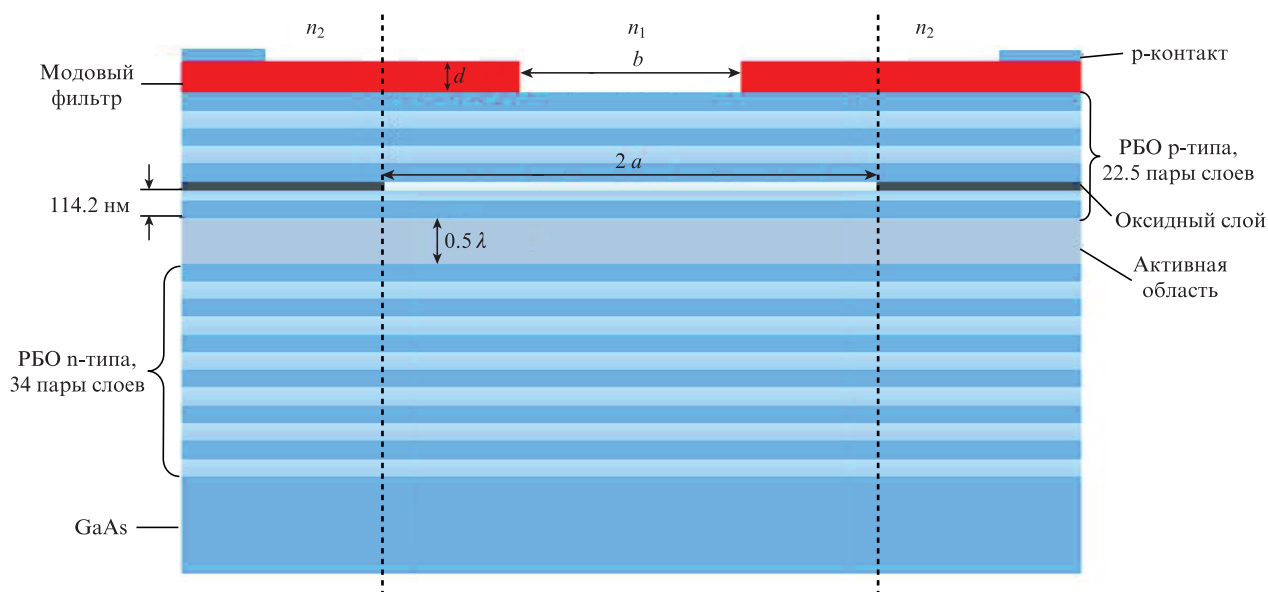


Рис.1. Структура VCSEL: d и b – толщина и диаметр области травления модового фильтра; n_1 и n_2 – эффективные показатели преломления сердцевин и оболочки.

Табл.1.

Материал	Показатель преломления	Ширина запрещенной зоны (эВ)	Подвижность электронов ($\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$)	Плотность состояний в зоне проводимости (10^{19}см^{-3})	Плотность состояний в валентной зоне (10^{19}см^{-3})
$\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$	3.56	1.210	10000	0.034	0.870
GaAs	3.54	1.424	8000	0.040	0.910
$\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	3.42	1.673	4000	0.056	1.048
$\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$	3.04	2.128	205	1.540	1.575
$\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$	3.02	2.160	190	1.504	1.640

В настоящей работе распределение оптического поля и отражательная способность VCSEL моделируются конечно-разностным методом во временной области. Граничные условия – идеально согласованный слой (perfectly matched layer). При анализе фотоэлектрических характеристик VCSEL учтены тепловые эффекты (в том числе джоулево тепло, генерируемое на дифференциальном сопротивлении вокруг оксидного слоя), нагрев за счет поглощения в легированном полупроводниковом материале РБО, а также за счет безызлучательной рекомбинации электронов и дырок в активной области. Заимствованные из работы [29] значения коэффициентов таковы: внутренние оптические потери – 10 см^{-1} , коэффициент спонтанного испускания – $2 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$, коэффициенты безызлучательной и оже-рекомбинации – $1 \times 10^8 \text{ с}^{-1}$ и $1.5 \times 10^{-29} \text{ см}^6/\text{с}$ соответственно. Другие параметры материалов, использованных при моделировании, даны в табл.1.

3. Результаты и их обсуждение

Для оптимизации работы VCSEL мы исследовали связь между его фотоэлектрическими свойствами и структурой материала. Сравнивались значения порогового тока при длинах резонатора VCSEL $\lambda/2$ и λ , а затем оптимизировались толщина и диаметр области травления слоя GaAs, образующего модовый фильтр.

На рис.2 показана связь между выходной мощностью и пороговым током. При длине резонатора $\lambda/2$ пороговый ток равен 0.65 мА, а выходная мощность достигает максимального значения 1.4 мВт при 6 мА. При длине резонатора λ пороговый ток составляет 0.85 мА, а максимальная выходная мощность достигает 1.25 мВт при токе 5.5 мА. Таким образом, VCSEL с длиной резонатора $\lambda/2$

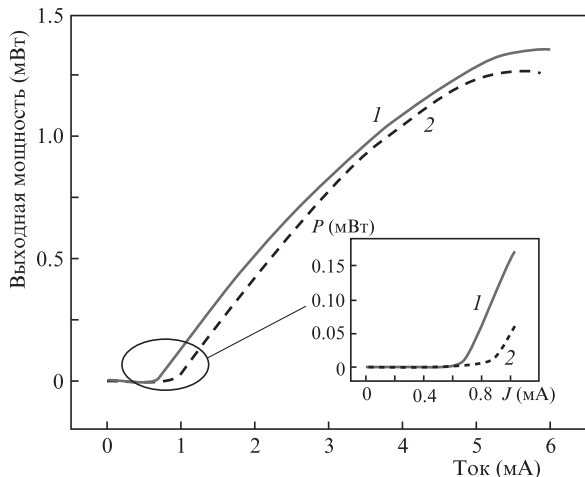


Рис.2. Зависимости выходной мощности от тока для VCSEL с резонаторами длиной $\lambda/2$ (1) и λ (2).

имеет пороговый ток на 30.8% ниже, чем при длине резонатора, равной λ .

Для лучшего понимания результатов [30, 31] проведено сравнение факторов оптического ограничения для обоих лазеров. На рис.3,а показано распределение показателя преломления и полученное в результате моделирования распределение интенсивности оптического поля в традиционном VCSEL с длиной резонатора λ . В активной области пик оптической интенсивности в центре ниже, чем с обеих сторон. На рис.3,б приведены те же распределения для VCSEL с полуволновым резонатором; видно, что пик оптической интенсивности в центре выше всех остальных. Следовательно, распределение интенсивности оптического поля более выгодно в случае резонатора длиной $\lambda/2$, поскольку центральный пик намного больше, чем у лазера с длиной резонатора λ . При этом перекрытие поля генерируемой моды с активной областью увеличивается, что приводит к существенному повышению фактора оптического ограничения. Для лазера с длиной резонатора $\lambda/2$ фактор оптического ограничения равен 3.44%, что на 12.5% больше, чем у VCSEL с длиной резонатора λ , где он составляет лишь 3%. Таким образом, результаты показывают, что у VCSEL с длиной резонатора $\lambda/2$ фактор оптического ограничения выше, а пороговый ток ниже, чем у лазера с длиной резонатора λ .

Для нахождения оптимального размера модового фильтра проводилось варьирование толщины d и диаметра области травления слоя GaAs b . С этой целью было опреде-

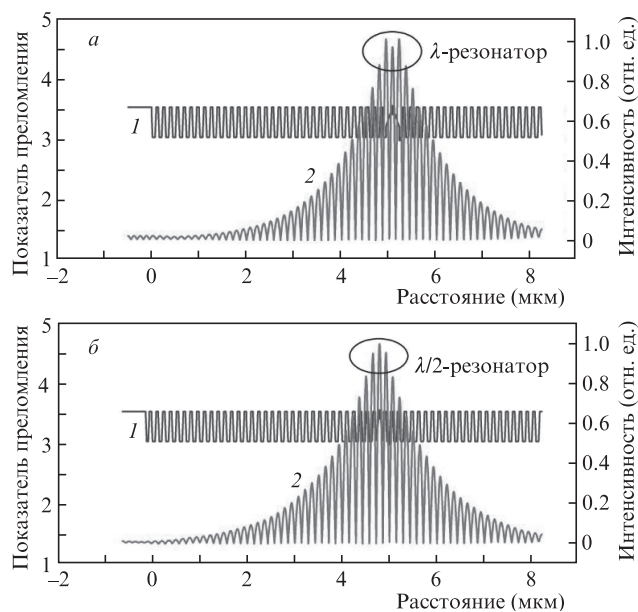


Рис.3. Показатель преломления (1) и распределение интенсивности оптического поля (2) в VCSEL с резонатором длиной λ (а) и $\lambda/2$ (б).

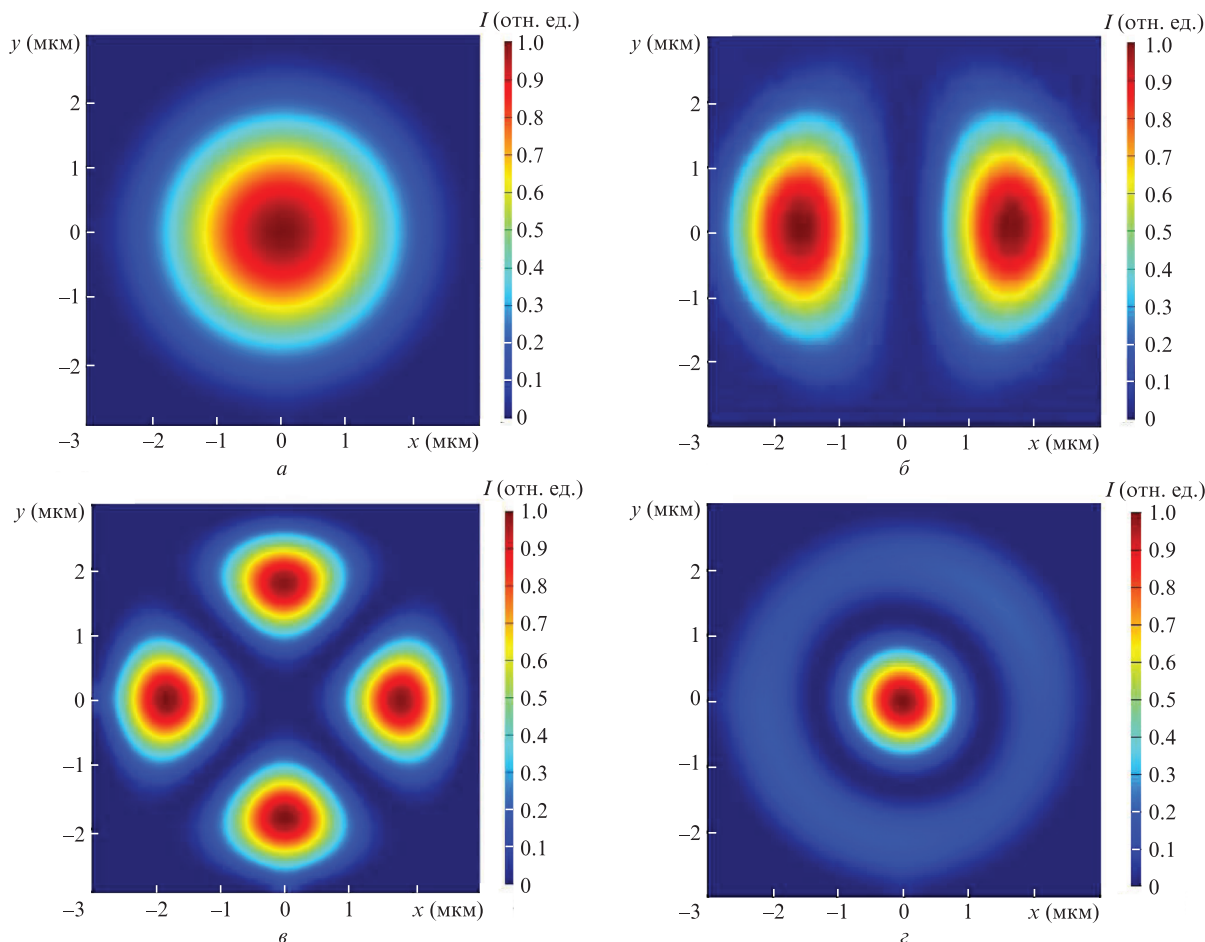


Рис.4. Распределения полей мод LP_{01} (а), LP_{11} (б), LP_{21} (в) и LP_{02} (г) при диаметре оксидной апертуры 6 мкм. Цветной вариант рис.4 помещен на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

лено число поперечных мод при диаметре оксидной апертуры $2a = 6$ мкм и получена зависимость отражательной способности для поперечной моды в РБО р-типа от параметров d и b слоя GaAs.

Согласно модели оптического волокна нормированная частота V для VCSEL может быть записана в виде

$$V = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (1)$$

где k_0 – волновой вектор в вакууме [29]. Нормированная частота является характеристической частотой моды LP_{mm} оптического волновода [29]. При $k_0 = 2\pi/\lambda$ ($\lambda = 940$ нм), $a = 3$ мкм, $n_1 = 3.310$ и $n_2 = 3.303$ рассчитанное значение V составляет 4.31. Из соотношения между характеристической частотой и числом LP_{mm} -мод следует, что в резонаторе VCSEL существует четыре поперечные моды: LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} и LP_{02} (рис.4,а–г).

Принцип действия модового фильтра заключается в увеличении разности отражательных способностей РБО р-типа основной поперечной моды и поперечных мод высших порядков для достижения селекции мод. Таким образом, нужно оптимизировать толщину слоя GaAs так, чтобы минимизировать отражение всех четырех поперечных мод, а затем подвергнуть слой GaAs травлению в области распределения интенсивности моды LP_{01} для формирования модового фильтра [17]. В этом случае условие генерации будет достигнуто для моды LP_{01} вследствие ее более высокого коэффициента отражения, тогда как остальные три высшие поперечные моды не смогут излу-

чаться из-за их низкой отражательной способности (и, соответственно, из-за более высокого порогового тока для их генерации) при тех же условиях.

На рис.5,а показана связь между отражательными способностями для четырех поперечных мод и толщиной слоя GaAs. С ростом толщины слоя от 10 до 160 нм отражательная способность для каждой поперечной моды снижается и достигает минимума примерно при 80 нм, после чего быстро растет. Поэтому толщина d модового фильтра была выбрана равной 80 нм.

На рис.5,б приведена зависимость отражательной способности для каждой из четырех поперечных мод от диаметра области травления слоя GaAs. С увеличением диаметра от 0.5 до 5.5 мкм отражение всех четырех мод постепенно растет, однако ход кривых различается, поскольку моды по-разному распределены в резонаторе VCSEL и действие модового фильтра на отражательные способности для этих поперечных мод различно при одном и том же диаметре области травления.

Для того чтобы фильтр подавлял только поперечные моды высшего порядка, необходимо подвергнуть травлению область перекрытия слоя GaAs с наименьшей поперечной модой (центральную область), оставив остальную часть слоя без изменений. Это позволяет получить оптимальный диаметр области травления модового фильтра, обеспечивающий максимальную разность отражательных способностей основной моды и трех остальных поперечных мод. В этом случае мода LP_{01} первой достигает условия возбуждения, тогда как остальные моды не будут ге-

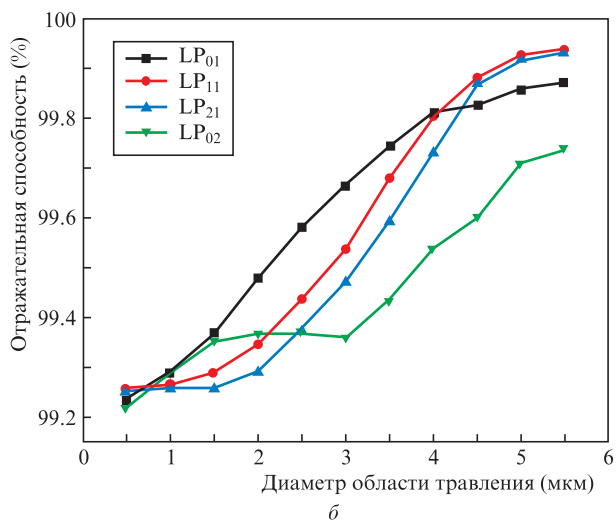
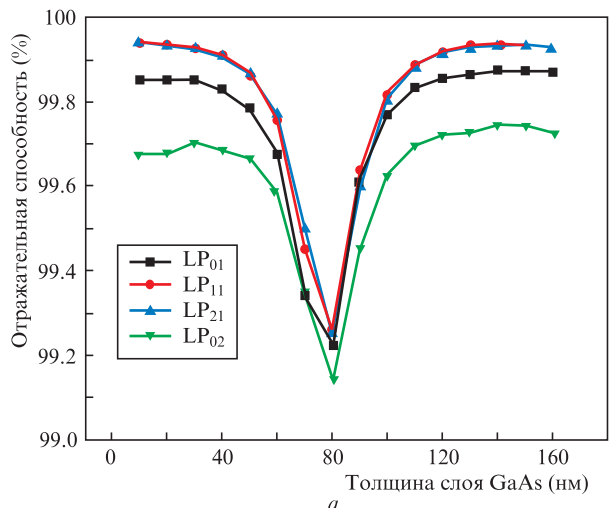


Рис.5. Зависимости отражательной способности поперечных мод от толщины слоя GaAs (а) и диаметра области травления (б).

нерироваться в силу их недостаточной отражательной способности [32].

Разность отражательных способностей между основной поперечной модой и тремя высшими поперечными модами как функция диаметра области травления слоя

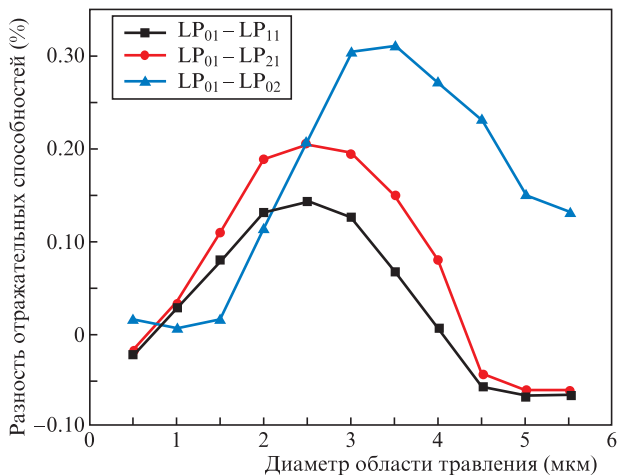


Рис.6. Зависимости разности отражательных способностей мод от диаметра области травления.

GaAs показана на рис.6. Пока диаметр меньше 2.5 мкм разность отражательных способностей между модами LP₀₁ и LP₁₁, LP₂₁ увеличивается. По достижении диаметра 2.5 мкм разность отражательных способностей этих пар мод начинает снижаться, и максимальная разность, соответствующая 2.5 мкм, составляет 0.14% и 0.21% соответственно. Разность отражательных способностей между модами LP₀₁ и LP₀₂ достигает максимума (0.31%) при диаметре области травления 3.5 мкм. Моделирование спектра излучения VCSEL дало коэффициент подавления боковых мод, равный 90 дБ, что соответствует требованиям к поперечно-одномодовому выходному излучению. После обстоятельного рассмотрения оптимальный диаметр области травления модового фильтра был выбран равным 2.5 мкм [32].

4. Заключение

Предложен и исследован VCSEL на длине волны 940 нм с резонатором длиной $\lambda/2$ и модовым фильтром. Длина резонатора была выбрана $\lambda/2$, поскольку она обеспечивала увеличение фактора оптического ограничения на 12.5% (с 3.01% до 3.44%) и снижение порогового тока на 30.8% (с 0.85 мА до 0.65 мА). Затем для создания фильтра поперечных мод и достижения поперечно-одномодового режима генерации на РБО наращивался слой GaAs р-типа. Оптимальные толщина и диаметр области травления этого слоя составили 80 нм и 2.5 мкм соответственно. При этом коэффициент подавления боковых мод достигал 90 дБ, что соответствует требованиям к поперечно-одномодовой генерации выходного излучения. Мы полагаем, что наше теоретическое исследование и оптимизация структуры VCSEL с длиной волны 940 нм послужат основой для технических решений по повышению качества лазеров с целью их применения в системах 3D распознавания объектов и потребительской электроники в целом.

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (NSFC) (гранты №61874148, 61974141 и 61674020), Фондом естественных наук Пекина (грант №4192043), Национальной программой ключевых исследований и разработок (грант №2018YFB2200104), Муниципальной комиссией Пекина по науке и технологии (грант №Z191100004819012), Государственной ведущей лабораторией информационной фотоники и оптической связи Пекинского университета почт и телекоммуникаций (грант №IPOC2018ZT01); Проектом 111 Китая (грант №B07005).

1. Shi J.-W., Wei C.-C., Chen J., Ledentsov N.N., Yang Y.-J. *Proc. SPIE*, **10122**, 101220F (2017).
2. Ledentsov N. Jr., Chorchos L., Turkiewicz J.P. *Proc. SPIE*, **10325**, 103250M (2017).
3. Moench H., Carpaj M., Gerlach P., Gronenborn S., Gudde R., Hellmig J., Kolb J., Lee A. *Proc. SPIE*, **9766**, 97660A (2016).
4. Warren M.E., Podva D., Dacha P., Block M.K., Helms C.J., Maynard J., Carson R.F. *Proc. SPIE*, **10552**, 105520E (2018).
5. Kondo T., Takeda K., Otama H., Murakami A., Sakurai J., Nakayama H., Gu X.-D., Koyama F. *Proc. SPIE*, **9766**, 97660C (2016).
6. Kondo T., Hayakawa J., Jogan N., Murakami A., Sakurai J., Gu X.-D., Koyama F. *Proc. SPIE*, **10122**, 1012203 (2017).
7. Liu A.-J., Wolf P., Lott J.A., Bimberg D. *Photon. Res.*, **7**, 121 (2019).
8. Yen J.-L., Chi K.-L., Jiang J.-W., Yang Y.-J., Shi J.-W. *IEEE J. Quantum Electron.*, **50**, 787 (2014).
9. Shchukin V., Ledentsov N.N., Kropp J., Steinle G., Ledentsov N. Jr., Burger S., Schmidt F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **50**, 990 (2014).

10. Shi J.-W., Chen C.-C., Wu Y.-S., Goul S.-H., Kuo C., Yang Y.-J. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **20**, 1121 (2008).
11. Kao H.-Y., Tsai C.-T., Leong S.-F., Peng C.-Y., Chi Y.-C., Wang H.-Y., Kuo H.-C., Wu C.-H., Cheng W.-H., Lin G.-R. *Photon. Res.*, **6**, 666 (2018).
12. Kao H.-Y., Tsai C.-T., Leong S.-F., Peng C.-Y., Chi Y.-C., Huang J.-J., Kuo H.-C., Shih T.-T., Jou J.-J., Cheng W.-H., Wu C.-H., Lin G.-R. *Opt. Express*, **25**, 16347 (2017).
13. Shi J.-W., Yan J.-C., Wun J.-M., Chen J., Yang Y.-J. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **19**, 7900208 (2013).
14. Tan M.P., Kasten A.M., Sulkin J.D., Choquette K.D. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **19**, 4900107 (2013).
15. Safaisini R., Szczerba K., Westbergh P., Haglund E., Kogel B., Gustavsson J.S., Karlsson M., Andrekson P., Larsson A. *J. Opt. Commun. Netw.*, **5**, 686 (2013).
16. Larsson A., Westbergh P., Gustavsson J.S., Haglund E., Haglund E.P. *Proc. SPIE*, **9381**, 93810D (2015).
17. Safaisini R., Haglund E., Westbergh P., Gustavsson J.S., Larsson A. *Electron. Lett.*, **50**, 40 (2014).
18. Haglund E., Jahed M., Gustavsson J.S., Larsson A., Goyvaerts J., Baets R., Roelkens G., Rensing M., O'Brien P. *Opt. Express*, **27**, 18892 (2019).
19. Haglund A., Gustavsson J.S., Vukusic J., Modh P., Larsson A. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **16**, 368 (2004).
20. Shi J.-W., Yan J.-C., Wun J.-M., Chen J., Yang Y.-J. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **19**, 7900208 (2013).
21. Feng M., Wu C.-H., Holonyak N., Jr. *IEEE J. Quantum Electron.*, **54**, 2400115 (2018).
22. Lott J.A., Payusov A.S., Blokhin S.A., Moser P., Ledentsov N.N., Bimberg D. *Phys. Status Solidi C*, **9**, 290 (2011).
23. Xie Y.-Y., Xu C., Kan Q., Wang C.-X., Chen H.-D., Shen G.-D. *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf.* (Los Angeles, CA, 2012, p. 1).
24. Yu H.-Y., Yao S., Zhang H.-M., Wang Q., Zhang Y., Zhou G.-Z., Lü Z.-C., Cheng L.-W., Lang L.-G., Xia Y., Zhou T.-B., Kang L.-H., Wang Z.-Y., Dong G.-L. *Acta Phys. Sin.*, **68**, 064207 (2019).
25. Mutig A., Bimberg D. *Adv. Opt. Technol.*, **2011**, 1 (2011).
26. Cheng C.-H., Shen C.-C., Kao H.-Y., Hsieh D.-H., Wang H.-Y., Yeh Y.-W., Lu Y.-T., Huang Chen S.-W., Tsai C.-T., Chi Y.-C., Kao T.-S., Wu C.-H., Kuo H.-C., Lee P.-T., Lin G.-R. *Opto-Electron. Adv.*, **1**, 180005 (2018).
27. Park B., Keh Y., Lee D., Kim Y., Kim S., Sung K., Lee J. *IEEE Int. Conf. Computer Vision Workshop* (OSA, 2017, pp 2392 – 2398).
28. Hofmann W., Wolf P., Moser P., Larisch G., Unrau W., Mutig A., Kroh M., Bimberg D. *Proc. 23rd IEEE Int. Semiconductor Laser Conf.* (San Diego, CA, USA, 2012, pp 161 – 162).
29. Michalzik R. (Ed.) *VCSELs Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers* (New York: Springer, 2013).
30. Corzine S.W., Geels R.S., Scott J.W., Yan R.-H., Coldren L.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **25**, 1513 (1989).
31. Kao H.-Y., Chi Y.-C., Tsai C.-T., Leong S.-F., Peng C.-Y., Wang H.-Y., Huang J.J., Jou J.-J., Shih T.-T., Kuo H.-C., Cheng W.-H., Wu C.-H., Lin G.-R. *Photon. Res.*, **5**, 507 (2017).
32. Wang X., Hao Y.-Q., Wang Z.-W., Xie J.-L., Zou Y.-G., Feng Y., Ma X.-H. *Proc. SPIE*, **10457**, 104571C (2017).