

09

Исследование статических и динамических характеристик сплавного VCSEL C-диапазона в режиме оптико-электрического преобразователя

© М.Е. Белкин

Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, Россия
E-mail: belkin@mirea.ru

Поступило в Редакцию 2 августа 2017 г.

Описываются результаты экспериментального исследования длинноволнового поверхностно-излучающего лазера с вертикальным резонатором сплавной конструкции как эффективного резонансного фотодетектора аналоговых оптических сигналов, что представляет интерес для ряда перспективных радиофотонных приложений, а также создания экономичного фотоприемного устройства высокоскоростной волоконно-оптической телекоммуникационной системы со спектральным разделением каналов. Приводятся схема измерительной установки, оригинальная методика, позволяющая рассчитать полосу пропускания встроенного оптического резонатора, и результаты измерения темнового тока, токовой чувствительности, амплитудно- и фазочастотных характеристик в процессе фотодетектирования.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.01.45433.16998

Хорошо известно, что благодаря таким своим достоинствам по сравнению с лазером с торцевым излучением, как экономичность, энергоэффективность, быстродействие и миниатюрность, поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) интенсивно используется в качестве эффективно-го электрооптического преобразователя в высокоскоростных цифровых трансиверах локальных волоконно-оптических телекоммуникационных сетей (ВОТС). В частности, в последние годы VCSEL диапазона 850 nm (так называемые „коротковолновые“ VCSEL) активно внедряются в аппаратуру ВОТС центров обработки данных для создания сверхскоростных цифровых соединительных линий (ЦСЛ) между серверами. Для таких ЦСЛ уже серийно производятся трансиверы на базе VCSEL со

скоростями до 100 и более Gbit/s [1]. Для цифровых ВОТС и одномодовых волоконно-оптических ЦСЛ значительно большей протяженности распространение также получили так называемые „длинноволновые“ VCSEL (LW-VCSEL) различных структур и конструкций, работающие в *O*- (1260–1360 nm) и *C*- (1530–1565 nm) спектральных диапазонах по спецификации ITU-T [2–4]. Другими современными областями преимущественного применения LW-VCSEL считаются передающие оптоэлектронные модули и трансиверы для локальных аналоговых ВОТС, построенных, как правило, на базе волоконно-эфирной архитектуры [5], а в последние годы — для волоконно-оптических распределительных сетей телекоммуникационных систем поколения 5G [6]. Еще одним перспективным направлением потенциального применения LW-VCSEL, имеющим исключительно важное значение не только для ВОТС, но и для радиолокационных систем следующих поколений, является радиофотоника (RF-photonics, microwave photonics) [7,8], где благодаря указанным выше преимуществам он используется в трактах и узлах формирования и обработки сигналов интегрального диаграммообразующего устройства фазированной антенной решетки (ФАР) СВЧ-диапазона [9], оптоэлектронных генераторов и преобразователей частоты радиосигналов [10, 11], в передающих оптоэлектронных модулях для распределения опорных радиосигналов по полотну многоэлементной ФАР [12]. Данные и указанные выше специфические особенности VCSEL позволили в настоящее время создать на его основе ряд структурных модификаций, работающих в непрерывном и импульсном режимах электрооптического преобразования [13].

В настоящей работе описываются результаты исследования нового практически не изученного применения LW-VCSEL в качестве оптико-электрического преобразователя аналоговых оптических сигналов — резонансного фотодетектора (РФД). Исследование выполнено на базе разработанного в Лозаннском политехническом университете (EPFL) [14] LW-VCSEL сплавной конструкции (wafer fused), хорошо зарекомендовавшего себя в практических разработках как надежный высокоэффективный компонент передающей аппаратуры волоконно-оптического и радиофотонного трактов [13,15,16].

Резонансный (resonant cavity enhanced, RCE) фотодетектор на базе *p-i-n*-фотодиода или фотодиода с барьером Шоттки — это известный оптоэлектронный компонент, позволяющий преодолеть принципиальный недостаток стандартного фотодетектора, связанный с компромис-

сом между полосой пропускания и чувствительностью [17,18]. В ходе предварительного литературного поиска была обнаружена единственная публикация [19], описывающая результаты экспериментального исследования РФД на базе коротковолнового VCSEL с квантово-размерной активной областью, работающего в фотовольтаическом режиме либо в режиме обратного смещения. Данное технологическое исследование было проведено с целью определения условий обеспечения максимальной квантовой эффективности оптико-электрического преобразования, которая регулировалась путем последовательного стравливания слоев верхнего зеркала, а также условий обеспечения максимальной ширины амплитудно-частотной характеристики в режиме приема модулированного излучения, которая регулировалась путем подбора диаметра активной области. В результате были получены максимальная квантовая эффективность 73% (соответствует токовой чувствительности 0.487 A/W на рабочей длине волны 829.5 nm) при спектральной ширине резонатора по половинному уровню (FWHM) около 1.7 nm для РФД с оставшимися 15.5 слоями верхнего зеркала (добротность резонатора около 490) и максимальная ширина амплитудно-частотной характеристики по уровню -3 dB до 2.8 GHz при диаметре активного слоя 20 μ m. Мотивацией же настоящей работы было измерение статических и динамических характеристик конкретного образца LW-VCSEL без каких-либо структурных изменений (просто путем смены полярности постоянного смещения) с целью оценки эффективности его использования в составе оптрона на базе двух одинаковых кристаллов LW-VCSEL, один из которых работает как лазер, а другой — как фотодетектор. Такой компонент представляет интерес для ряда радиофотонных приложений, например в качестве быстродействующего оптоэлектронного переключателя интегрального диаграммообразующего устройства ФАР [20]. Дополнительная цель состояла в изучении возможности использования РФД на базе LW-VCSEL в экономичном (за счет отсутствия спектрального демультиплексора) фотоприемном устройстве широко применяемых в настоящее время цифровых и аналоговых ВОТС с плотным спектральным разделением оптических каналов (DWDM).

Как известно, ключевыми показателями качества фотодетектора в статическом режиме являются характеристика темнового тока и токовая чувствительность. Результаты измерения уровня темнового

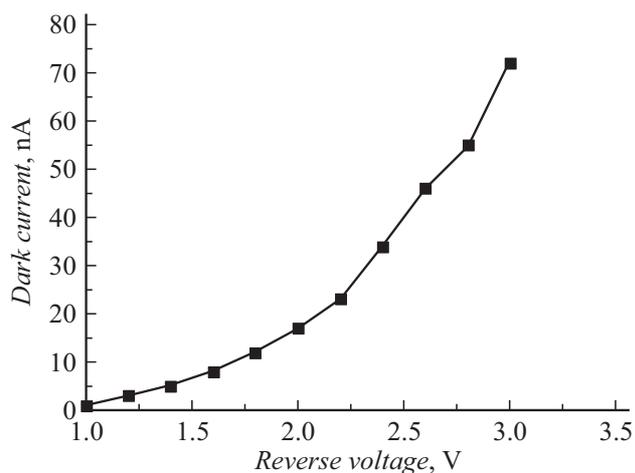


Рис. 1. Характеристика темнового тока исследуемого образца VCSEL-RCE.

тока в зависимости от величины постоянного обратного смещения исследуемого образца LW-VCSEL в режиме резонансного фотодетектора (VCSEL-RCE) представлены на рис. 1. Как следует из рисунка, темновой ток не превышает 75 nA при обратном смещении 3 V, что сравнимо с величиной аналогичного параметра стандартного $p-i-n$ -фотодиода C -диапазона. Также по стандартной методике была измерена токовая чувствительность образца VCSEL-RCE, составившая около 0.6 A/W при напряжении обратного смещения 2 V.

В ходе исследования динамических характеристик образца VCSEL-RCE измерялись его основные показатели качества в малосигнальном режиме модуляции: амплитудно- и фазочастотные характеристики (АЧХ и ФЧХ). Схема измерительной установки представлена на рис. 2, а. В схеме волоконно-оптический тракт (жирные стрелки) содержит перестраиваемый с шагом 1 GHz образцовый лазер (1). Его излучение поступает на вход оптического модулятора Маха–Цандера (2) с полосой модуляции до 20 GHz. Выходное модулированное по интенсивности тестовым радиосигналом излучение по одномодовому оптическому волокну вводится в испытуемый образец VCSEL-RCE. Электрический тракт (тонкие стрелки) содержит

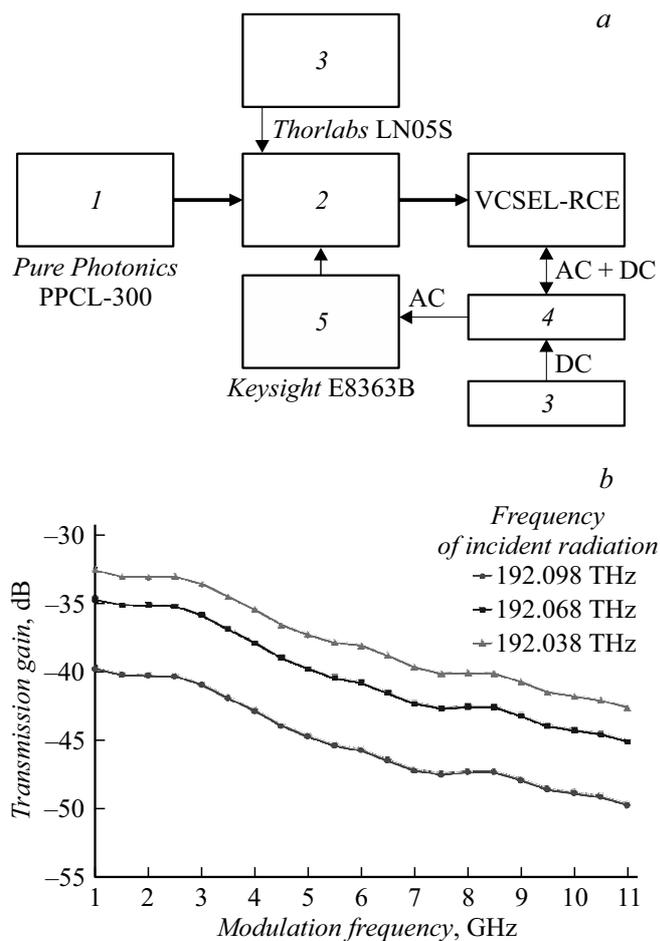


Рис. 2. Схема (а), результаты измерения АЧХ (b) и результаты расчета на основе измерений, приведенных на части b, характеристики пропускания оптического резонатора исследуемого образца (c).

источники постоянного тока (3) для постоянного смещения устройства 2, а также для подачи обратного смещения на исследуемый образец. Постоянное смещение подается через коаксиальный адаптер

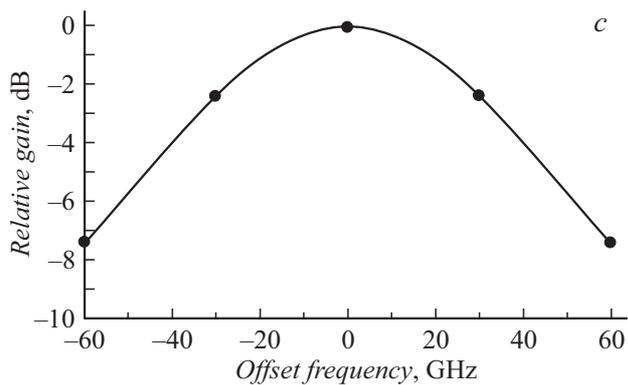


Рис. 2 (продолжение).

питания (4), с помощью которого осуществляется развязка между цепями постоянного тока и радиочастотного модулирующего сигнала. АЧХ и ФЧХ образца VCSEL-RCE измеряются по стандартной методике с помощью радиочастотного анализатора цепей (5). Измерения АЧХ проводились в следующем порядке. Первоначально определялась центральная частота оптического резонатора образца VCSEL-RCE. Для этого частота излучения устройства I регулировалась таким образом, чтобы обеспечить максимальный коэффициент передачи G_{\max} модулирующего радиосигнала, сканируемого в пределах 1–11 GHz. Затем частота устройства I расстраивалась с шагом 5 GHz в обе стороны от частоты G_{\max} с повторением в каждой точке измерения. Результаты измерений АЧХ по описанной методике приведены на рис. 2, *b*, где показаны примеры АЧХ образца VCSEL-RCE на центральной частоте встроенного оптического резонатора 192.038 THz и при отстройке в сторону увеличения частоты на 30 и 60 GHz. Как следует из рисунка, полоса пропускания практически не изменяется и составляет около 4.5 GHz по уровню -3 dB. Кроме того, величина $G \approx -35$ dB приблизительно того же порядка, что и для типичной радиодетонной линии с внешним модулятором.

Предложенная методика позволяет рассчитать по степени уменьшения коэффициента передачи в зависимости от частоты отстройки оптического излучения частотную характеристику пропускания встроенного

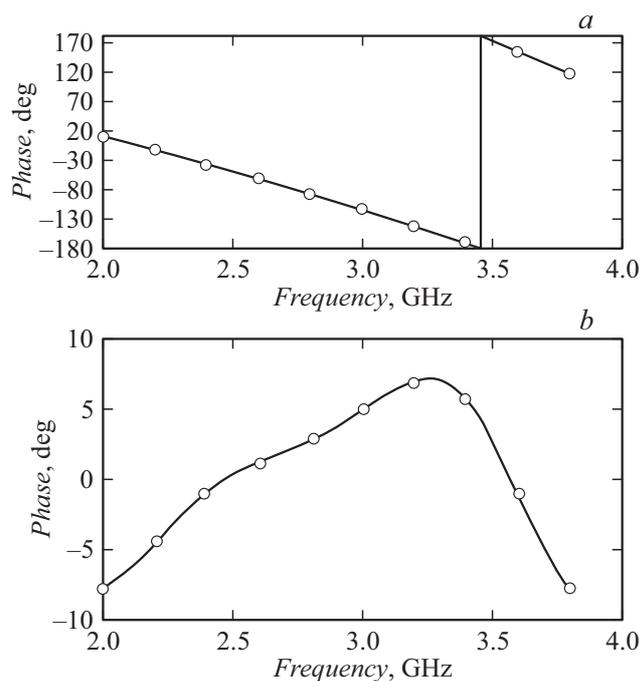


Рис. 3. Результаты измерения ФЧХ (а) и характеристики отклонения от линейной фазы (b) образца VCSEL-RCE.

оптического резонатора в рабочем режиме РФД. Результаты расчета представлены на рис. 2, с. Как видно, полная полоса пропускания по половинному уровню (-3 dB) составляет около 70 GHz, что соответствует величине нагруженной добротности порядка 2700.

Результаты измерения по схеме, показанной на рис. 2, а, ФЧХ образца VCSEL-RCE на центральной частоте встроенного оптического резонатора при сканировании частоты модуляции в полосе 2–3.8 GHz представлены на рис. 3. Как следует из рис. 3, а, ФЧХ исследуемого образца достаточно линейна в широкой полосе модулирующего радиосигнала (1.8 GHz), что подтверждается рис. 3, б, где показано, что величина нелинейности находится в пределах $\pm 7.5^\circ$. Данные измерения позволяют рассчитать по известной формуле групповое время задержки

образца VCSEL-RCE, являющееся еще одной важной характеристикой радиофотонного тракта. Согласно расчету, величина группового времени задержки примерно равна 400 ps с отклонением в полосе модуляции почти 2 GHz всего лишь ± 10 ps.

По результатам проведенного экспериментального исследования можно сделать следующие выводы.

1. Сравнение с известными результатами [19] исследования VCSEL как оптико-электрического преобразователя показало, что длинноволновый VCSEL сплавной конструкции даже без технологической оптимизации обладает лучшей токовой чувствительностью и более широкой полосой пропускания при фотодетектировании.

2. Исследуемый образец VCSEL в режиме резонансного фотодетектора показал конкурентоспособные статические и динамические характеристики по сравнению со стандартным фотодиодом, благодаря чему он имеет потенциал применения, например, в экономичных интегральных трансиверах и оптоэлектронных коммутационных матрицах аналоговых телекоммуникационных и радиофотонных систем.

3. Двукратное превышение числа слоев верхнего зеркала по сравнению с известным устройством привело к более чем пятикратному увеличению добротности встроенного в структуру оптического резонатора, что обеспечивает достаточную развязку между оптическими каналами при применении в экономичном фотоприемном устройстве цифровых и аналоговых BOTC с DWDM при шаге оптических каналов 200 GHz. Однако она не соответствует требованиям при уменьшении шага до 100 GHz. Данная задача, а также расширение полосы пропускания при фотодетектировании является темой наших дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (шифр проекта RFMEFI60715X0138). Автор благодарит В.П. Яковлева за предоставленные образцы лазера.

Список литературы

- [1] <https://www.finisar.com/optical-transceivers>
- [2] Caliman A., Sirbu A., Iakovlev V., Mereuta A., Wolf P., Bimberg D., Kapon E. // Optical Fiber Communication Conf. Anaheim, California, USA. 2016. P. Tu3D. 1.

- [3] Spiga S., Soenen W., Andrejew A., Schoke D.M., Yin X., Bauwelinck J., Boehm G., Amann M.-C. // IEEE J. Lightwave Technol. 2017. V. 35. Iss. 4. P. 727–733.
- [4] Babichev A. V., Karachinsky L. Ya., Novikov I.I., Gladyshev A. G., Mikhailov S., Iakovlev V., Sirbu A., Stepniak G., Chorchos L., Turkiewicz J.P., Agustin M., Ledentsov N.N., Voropaev K.O., Ionov A.S., Egorov A.Yu. // Proc. of SPIE. 2017. V. 10122. P. 1012208 (1–6).
- [5] Gamage P.A., Nirmalathas A., Lim C., Wong E., Novak D., Waterhouse R. // IEEE Photon. Technol. Lett. 2008. V. 20. Iss. 24. P. 2102–2104.
- [6] Altabas J.A., Izquierdo D., Lazaro J.A., Garces I. // IEEE Photon. Technol. Lett. 2016. V. 28. Iss. 10. P. 1111–1114.
- [7] Capmany J., Novak D. // Nature Photon. 2007. V. 1. Iss. 6. P. 319–330.
- [8] Williamson R., Esman R. // IEEE J. Lightwave Technol. 2008. V. 26. Iss. 9. P. 1145–1153.
- [9] Wörhoff K., Heideman R.G., Leinse A., Hoekman M. // Opt. Technol., 2015. V. 4. Iss. 2. P. 189–207.
- [10] Belkin M. E., Loparev A.V. // PIERS Proc. 2012. P. 1138–1142.
- [11] Belkin M.E., Belkin L., Loparev A., Sigov A., Suruceanu G., Sirbu A., Mereuta A., Caliman A., Ellafi D., Iakovlev V., Kapon E. // IEEE MWP/APMP Conf. Proc. Sapporo, Japan. 2014. P. 481–484.
- [12] Белкин М.Е., Клошник Д.А., Фофанов Д.А. // Нано- и микросистемная техника. 2017. № 9. С. 556–568.
- [13] Белкин М. Яковлев В. // Электроника: наука, технология, бизнес. 2015. № 3. С. 92–112.
- [14] Kapon E., Sirbu A. // Nature Photon. 2009. V. 3 Iss. 1. P. 27–29.
- [15] Belkin M.E., Belkin L., Loparev A., Sigov A.S., Iakovlev V. // Optoelectronics — advanced materials and devices / Eds S. Pyshkin, J. Ballato. InTech, 2015. P. 231–250.
- [16] Belkin M.E., Iakovlev V. // IEEE 25th Int. Semiconductor Laser Conf. (ISLC2016). Kobe, Japan, 2016. P. 1–2.
- [17] Kishino K., Unlu M., Chyi J., Arsenault L., Morkoc H. // IEEE J. Quantum Electron. 1991. V. 27. Iss. 8. P. 2025–2034.
- [18] Zhang L., Cao Q., Zuo Y., Xue C., Cheng B., Wang Q. // IEEE Photon. Technol. Lett. 2011. V. 23. Iss. 13. P. 881–883.
- [19] Knodl T., Choy H.K.H., Pan J.L., King R., Jager R., Lullo G., Ahadian J.F., Ram R.J., Fonstad C.G., Ebeling K.J. // IEEE Photon. Technol. Lett. 1999. V. 11. Iss. 10. P. 1289–1291.
- [20] Belkin M.E., Golovin V., Tyschuk Y., Sigov A.S. // PIERS Proc. 2017. In press.