

Высокочастотные электрические свойства вертикально-излучающего лазера с интегрированным электрооптическим модулятором

© А.М. Надточий^{*+¶}, W. Hofmann^{*}, T.D. Germann^{*}, С.А. Блохин^{*+^}, Л.Я. Карачинский^{*+^}, М.В. Максимов^{*+}, В.А. Щукин^{+≠}, А.Е. Жуков^{*}, D. Bimberg^{*}

* Санкт-Петербургский Академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий Российской академии наук, 195220 Санкт-Петербург, Россия

+ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

• Institut für Festkörperphysik, Technische Universität Berlin, 10623 Berlin, German

¶ VI Systems GmbH, 10623 Berlin, Germany

^ ООО „КоннекторОптикс“, 194292 Санкт-Петербург, Россия

Методом малосигнального анализа электрического отражения проведены исследования высокочастотных электрических свойств электрооптического модулятора, монолитно интегрированного в вертикально излучающий лазер. Полученные экспериментальные данные аппроксимированы с помощью предложенной эквивалентной электрической схемы, учитывающей формирование неравновесных пространственных зарядов в обедненной носителями заряда области модулятора. Полоса частот передачи высокочастотного электрического сигнала на электрооптически чувствительную область, определенная для предложенной электрической схемы замещения модулятора, составила 3 ГГц.

1. Введение

Значительные успехи достигнуты за последние годы в проектировании и технологии создания вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ, VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser)) — наиболее перспективных источников излучения для локальных высокоскоростных волоконно-оптических систем связи. С помощью ВИЛ были продемонстрированы рекордные скорости передачи данных (более 40 Гбит/с на канал) в волоконных линиях небольших дистанций [1,2]. В то же время дальнейшее повышение быстродействия ВИЛ возможно только при увеличении рабочего тока прибора [3,4], что значительно ускоряет процессы деградации и соответственно сокращает срок службы ВИЛ. На этом фоне оказывается актуальным поиск принципиально новых путей модернизации конструкции ВИЛ с целью повышения быстродействия. Перспективным подходом является использование внешнего модулятора, монолитно-интегрированного в конструкцию ВИЛ [5,6]. В этом случае задачи получения лазерного излучения и его высокочастотная модуляция могут быть разведены на отдельные приборные секции и решены более эффективно. Кроме того, благодаря поверхностному выводу излучения и интеграции приборных секций в направлении роста пространственные характеристики излучения, а также технологичность производства и тестирования такого прибора не ухудшаются по сравнению со стандартным ВИЛ. Недавно была предложена конструкция ВИЛ с интегрированным электрооптическим модулятором (далее ЭОМ-ВИЛ (EOM VCSEL)) [7], в которой

приложением внешнего электрического поля возможно изменять коэффициент отражения зеркала для лазерной моды и, следовательно, модулировать выходную мощность ЭОМ-ВИЛ. Использование не прямой модуляции излучения позволяет снять жесткую зависимость полосы частот модуляции ВИЛ от частоты релаксационных колебаний, а принцип работы электрооптического модулятора, основанный на чувствительности оптических свойств среды к электрическому полю, должен позволить превзойти электроабсорбционные модуляторы [8], в которых время включения-выключения прибора ограничено временем пролета носителей через область $p-n$ -перехода.

С другой стороны, быстродействие современных высокочастотных оптоэлектронных приборов во многих случаях ограничено паразитной фильтрующей RC-цепочкой [4,9]. Например, частота отсечки RC-цепи для ВИЛ традиционной геометрии не превышает 5–6 ГГц [9], однако интенсивные исследования этой проблемы позволили найти ряд конструкторских решений (увеличение толщины оксидных слоев, использование материалов с низкой диэлектрической проницаемостью и т.д.), позволяющих поднять частоту отсечки до 20 ГГц и более [4].

Несмотря на значительные успехи в реализации ВИЛ с интегрированным электрооптическим модулятором и демонстрацию возможности передачи данных на скоростях более 10 Гбит/с [10], исследования проблемы RC-цепи и анализ других ограничений, возникающих при использовании такого модулятора, до сих пор не проводились. В данной работе проведен анализ высокочастотных электрических свойств ЭОМ-ВИЛ и предложена эквивалентная электрическая схема прибора, учитывающая обнаруженные эффекты формирования

[¶] E-mail: al.nadtochy@mail.ioffe.ru

неравновесных пространственных зарядов в обедненной носителями заряда области модулятора.

2. Эксперимент

В работе был исследован ЭОМ-ВИЛ, состоящий из лазерной секции (ВИЛ) и секции модулятора (ЭОМ). ВИЛ-секция содержит в качестве активной области квантовые ямы с максимумом спектра излучения на длине волны 835 нм, оксидную токовую апертуру, а также AlGaAs распределенные брэгговские отражатели (РБО, distributed Bragg reflector (DBR)): нижний, легированный примесью *n*-типа (Si), и верхний, легированный примесью *p*-типа (Zn). ЭОМ-секция была выращена поверх этой структуры и включала *p*-легированный РБО, электрооптически чувствительную среду (квантовые ямы GaAs/Al_{0,2}Ga_{0,8}As с большей энергией перехода, чем у активной области ВИЛ-секции) и верхний *n*-легированный РБО с контактными слоями GaAs. Геометрия электрических контактов приборов была адаптирована для высокочастотных исследований: нижний сплошной контакт к подложке *n*-типа и два контакта в высокочастотной копланарной геометрии (контакты модулятора). Детали эпитаксиального роста и технологии изготовления этого прибора приведены в [10,11]. Тем не менее другие характеристики прибора не были специально оптимизированы для высокочастотной работы ЭОМ-ВИЛ: тонкая нелегированная область ЭОМ-секции (240 нм), большой диаметр мезы ЭОМ-секции (более 25 мкм) и отсутствие оксидных апертур в ЭОМ-секции не позволяют получить низкую паразитную емкость. В то же время такой дизайн удобен для исследования высокочастотного отклика и модулирования эквивалентной электрической схемы.

Исследования высокочастотных электрических свойств были проведены методом малосигнального частотного анализа электрического отражения (параметр S_{11} в модели четырехполюсника) от ЭОМ-секции. Для этого на ВИЛ-секцию прибора подавался постоянный ток для достижения лазерной генерации

(см. рис. 1), а на ЭОМ-секцию подавалась суперпозиция постоянного обратного смещения и высокочастотного гармонического сигнала малой амплитуды от векторного анализатора электрических сетей „HP Network Analyzer“ в диапазоне частот 50 МГц–50 ГГц. Анализ взаимодействия высокочастотного электрического сигнала с ЭОМ-ВИЛ был проведен путем аппроксимации экспериментальных данных расчетными кривыми S_{11} .

3. Результаты и обсуждение

Принцип работы ЭОМ-ВИЛ проиллюстрирован на рис. 2. Спектр отражения излучения ВИЛ-секции от зеркала и следующей за ним модуляторной секции схематично показан на рис. 2, *a*: резкий провал в спектре отражения соответствует длине волны моды резонатора ЭОМ-секции, а точка обозначает длину волны лазерной генерации. Пунктиром показана ситуация, когда электрическое поле не подано на электрооптически чувствительную среду и резонатор ЭОМ-секции не согласован с длиной волны лазерной генерации. В этом случае отражение для лазерной моды велико и доля излучения, проникающего в ЭОМ-секцию и соответственно выходящего наружу, мала (пунктирная линия, рис. 2, *c*). При приложении электрического поля показатель преломления электрооптически чувствительной среды изменяется, и длина волны резонатора ЭОМ-секции совмещается с длиной волны лазерной генерации (сплошная линия, рис. 2, *a*). В этом случае отражение лазерного излучения уменьшается, и доля излучения внутри резонатора ЭОМ-секции возрастает, увеличивая тем самым оптическую мощность на выходе прибора (сплошная линия, рис. 2, *c*). На рис. 2, *b* схематично показаны профиль показателя преломления и распределение интенсивности оптического поля для всего прибора, а на рис. 2, *c* более детально показано изменение интенсивности поля в резонаторе ЭОМ-ВИЛ под действием электрического поля на электрооптически чувствительную среду. Таким образом, относительно малым изменением электрического поля ЭОМ-секции можно добиться значительного изменения оптической выходной мощности прибора. Более детальное описание принципа работы ЭОМ-ВИЛ можно найти в работе [7].

На рис. 3 представлена зависимость выходной мощности прибора от приложенного к ЭОМ-секции обратного напряжения (ток ВИЛ-секции 6.2 мА). Можно видеть, что при величине обратного напряжения на ЭОМ-секции около 2.7 В происходит резкое возрастание выходной мощности прибора (около 3 дБ), обусловленное совмещением длин волн лазерной генерации и резонатора ЭОМ-секции. Этот вывод подтверждается схожим поведением зависимости фототока ЭОМ-секции (рис. 3), являющегося индикатором доли лазерного излучения в резонаторе ЭОМ-секции. Поглощение лазерного излучения в ЭОМ-секции объясняется тем, что для усиления электрооптического эффекта энергия перехода квантовых ям в секции модулятора была выбрана достаточно близкой к энергии фотона лазерной генерации [7].

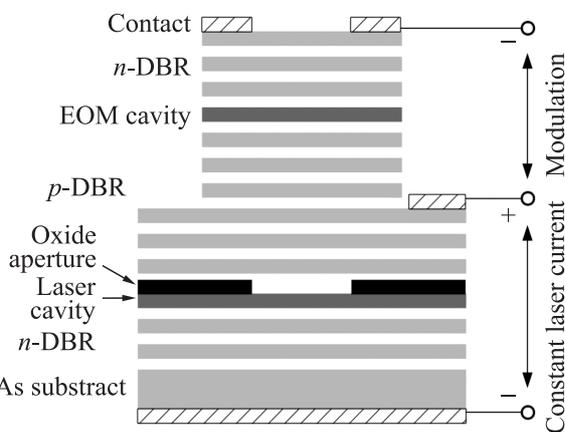


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции ЭОМ-ВИЛ.

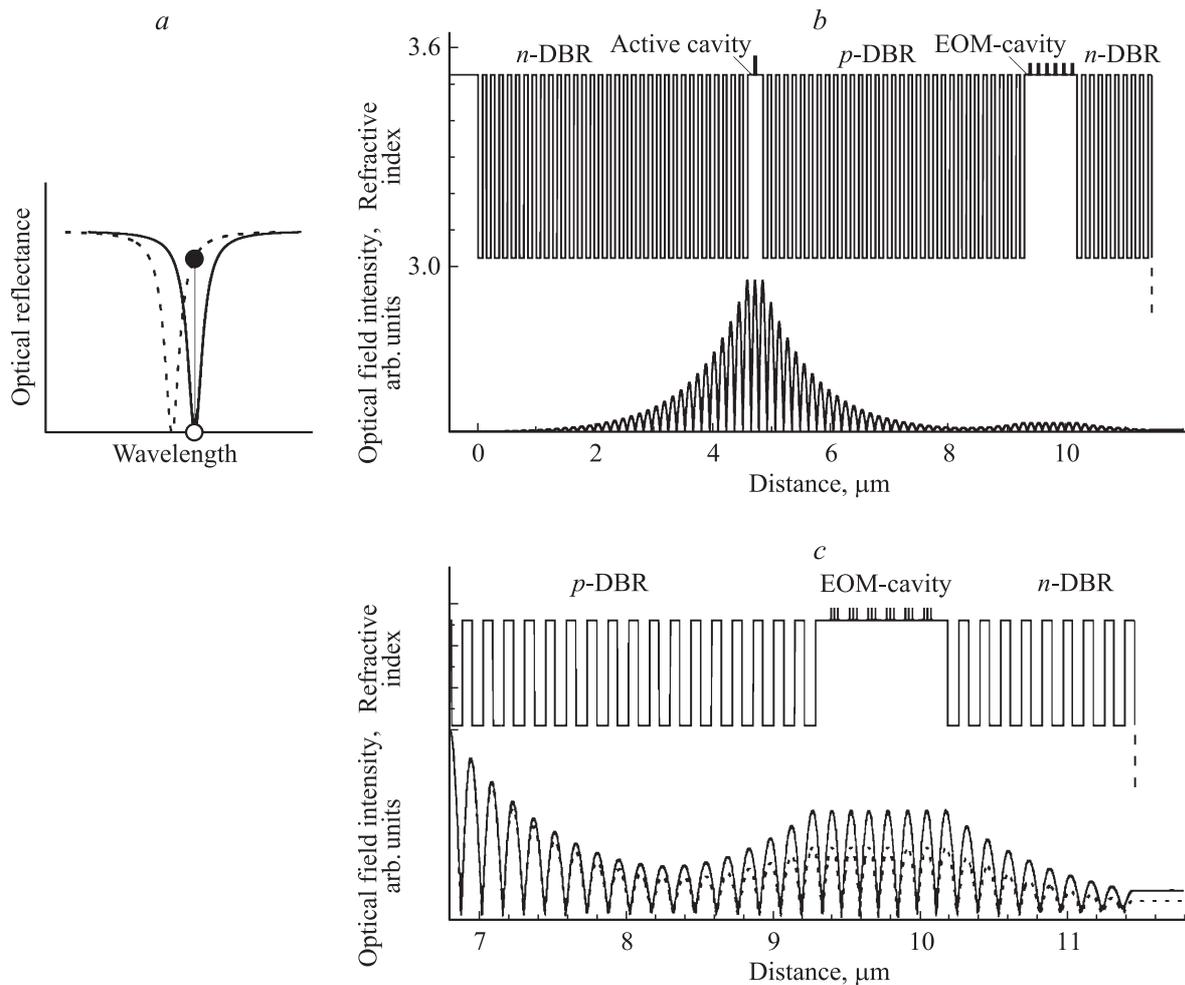


Рис. 2. Иллюстрация принципа работы ЭОМ-ВИЛ: *a* — схематичный спектр отражения лазерного излучения от зеркала и резонатора ЭОМ-секции. Пунктирная линия — без приложения электрического поля к ЭОМ-секции, сплошная линия — при подаче электрического поля; *b* — схема профиля показателя преломления и интенсивности оптического поля в ЭОМ-ВИЛ; *c* — схема профиля показателя преломления и интенсивность оптического поля ЭОМ-секции, пунктирная линия — без электрического поля на ЭОМ-секции, сплошная линия — при подаче электрического поля.

При этом одновременно с электрооптическим эффектом происходит некоторое поглощение лазерного излучения. Этот эффект является побочным, а основной вклад в модуляцию излучения обусловлен электрооптическим эффектом [7].

Для исследований высокочастотных свойств ЭОМ-ВИЛ при комнатной температуре был выбран рабочий режим, при котором длины волны лазерной и модуляторной секций близки к резонансному совмещению: ток ВИЛ-секции 6.2 мА, постоянное напряжение обратного смещения на ЭОМ-секции в диапазоне 2.6–3.2 В.

Семейство кривых электрического отражения S_{11} , записанных при различных смещениях ЭОМ-секции, представлены на рис. 4. ЭОМ-секция в рабочем режиме фактически является фотодиодом при обратном смещении, поэтому в качестве стартовой точки для аппроксимации кривых электрического отражения была выбрана модель на основе эквивалентной электрической схемы фотодиода (рис. 5, *a*). Элементы электрической

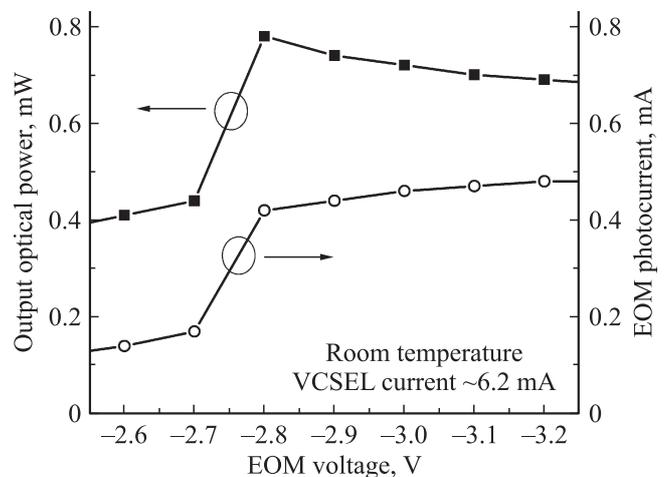


Рис. 3. Зависимости выходной оптической мощности ЭОМ-ВИЛ и фототока ЭОМ-секции от обратного напряжения на ЭОМ-секции. Ток ВИЛ-секции 6.2 мА, непрерывный режим, комнатная температура.

схемы отражают конструкцию прибора: R_a — эквивалентное сопротивление активной области (обратно смещенного фотодиода) ЭОМ-секции, C_a — емкость активной области ($p-n$ -перехода фотодиода), R_{DBR} — сопротивление РБО в ЭОМ-секции, C_p — емкость контактных площадок, R_c — сопротивление контактов. Однако было обнаружено, что такая модель недостаточ-

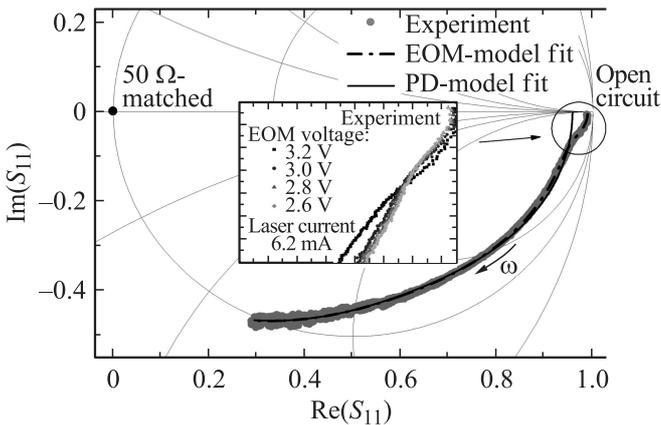


Рис. 4. На круговой диаграмме Смита–Вольперта (по горизонтальной оси отложены реальные значения кривых S_{11} , по вертикальной оси — мнимые значения S_{11}) показаны: аппроксимация экспериментальной кривой электрического отражения (серые точки) с использованием схемы замещения фотодиода (PD-model, сплошная кривая) и с помощью рассматриваемой в статье более сложной схемы замещения (EOM-model, пунктирная кривая с точкой). На вставке показан низкочастотный участок экспериментальных кривых, полученных при различных смещениях на ЭОМ-секции. Подгоночные параметры модели „PD-model“: $R_a = 1940$ Ом, $R_{DBR} = 326$ Ом, $R_c = 36.6$ Ом, $C_a = 43$ фФ, $C_p = 56$ фФ.

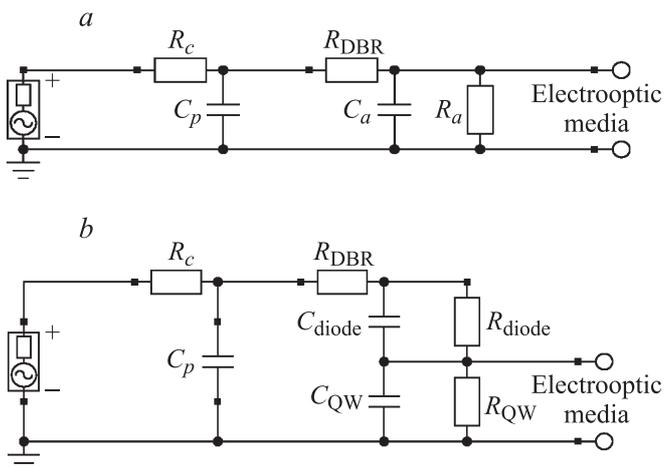


Рис. 5. Электрические схемы замещения: *a* — схема замещения (фото)диода; *b* — рассматриваемая в статье схема замещения ЭОМ-секции. Высокочастотный электрический сигнал подается векторным анализатором электрических сетей, с внутренним сопротивлением 50 Ом (левый элемент в схемах) и проходит до электрооптически чувствительной области (Electro-optic media).

Определенные значения элементов схемы замещения ЭОМ-секции

U_{com} (В)	Фототок (мА)	C_{QW} (фФ)	R_{QW} (Ом)	C_{diode} (фФ)	R_{diode} (Ом)	R_{DBR} (Ом)	C_p (фФ)	R_c (Ом)
2.6	0.14	54.8	1120	180	5890	308.6	55.3	36
2.8	0.42	55	1040	177	6500	309	55	35.9
3.0	0.46	56	940	176	8100	308	55	35.9
3.2	0.48	60	650	173	10000	302	55	35.9

но аппроксимирует поведение электрического отклика ЭОМ-секции (наилучшая аппроксимация представлена на рис. 4, PD-model): расхождения, в особенности на низкочастотном участке, требуют внесения поправок в эквивалентную схему.

Были рассмотрены различные варианты эквивалентных электрических схем. Наилучший результат (см. рис. 4, EOM-model) был получен в случае разделения сопротивления и конденсатора, характеризующих $p-n$ -переход в схеме фотодиода, на две составляющие: первая характеризует $p-n$ -переход (R_{diode} и C_{diode}), вторая отвечает за электрооптически чувствительную среду (R_{QW} и C_{QW} , см. рис. 5, *b*).

Интерпретация такой эквивалентной схемы ЭОМ-секции может быть дана при рассмотрении формирования пространственного заряда в обедненной носителями заряда области $p-n$ -перехода (см. рис. 6) и учете эффектов экранирования. Как уже указывалось выше, через ЭОМ-секцию в рабочем режиме течет фототок (см. таблицу). Если скорость дрейфа фотогенерированных носителей окажется неодинаковой в разных точках обедненной носителями заряда области, это может привести к формированию пространственного заряда и искажению зонной диаграммы $p-n$ -перехода (см. рис. 6, пунктирная линия). После деформации зонной диаграммы $p-n$ -перехода скорость дрейфа носителей выравнивается и дальнейшего увеличения заряда не происходит. Зависимость скорости дрейфа носителей заряда от координаты в $p-n$ -переходе может быть связана, например, с гетеробарьерами, окружающими квантовые ямы, или наличием туннельного (быстрого) транспорта между квантовыми ямами. Кроме того, при учете динамически меняющегося фототока (коэффициент поглощения также варьируется при модулировании напряжения на ЭОМ-секции) образование пространственного заряда в $p-n$ -переходе может быть следствием различной скорости диффузии электронов и дырок [12]. В упрощенной иллюстрации на рис. 6 показана ситуация, когда вокруг активной области с квантовыми ямами образовались пространственные области с неравновесными электронами и дырками, что, в совокупности с пространственным зарядом, создающим поле $p-n$ -перехода, можно рассматривать как три последовательно включенных конденсатора (рис. 6). Средний конденсатор (C_{QW}) в этом случае создает поле в электрооптически чувствительных квантовых ямах, и напряжение на нем можно счи-

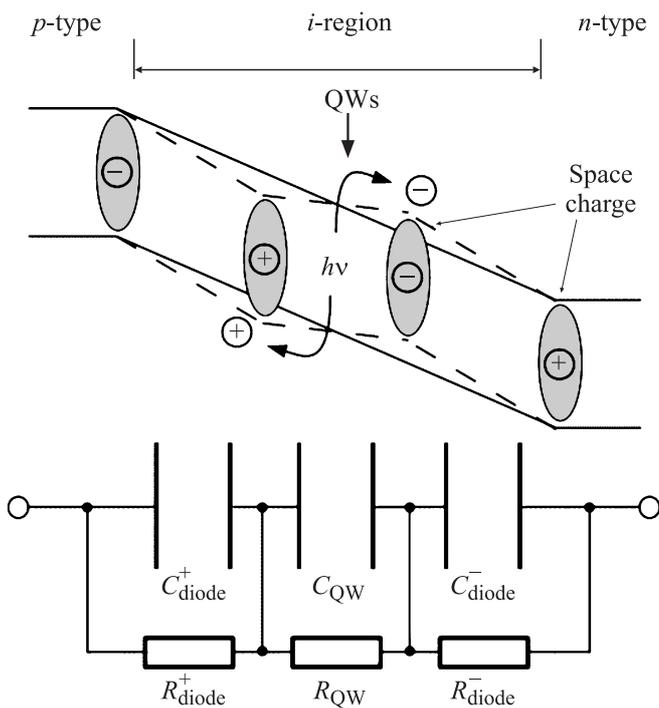


Рис. 6. Иллюстрация, поясняющая интерпретацию эквивалентной электрической схемы ЭОМ-секции на основе двух конденсаторов как следствие образования пространственного заряда в $p-n$ -переходе. Показаны зонная диаграмма до (сплошная кривая) и после (пунктирная кривая) образования пространственного заряда в обедненной носителями заряда области и соответствующие элементы эквивалентной электрической схемы ЭОМ-секции.

тать пропорциональным электрическому полю на входе идеального электрооптического элемента. В первом приближении можно считать ситуацию симметричной для электронов и дырок и объединить два крайних конденсатора (C_{diode}^+ и C_{diode}^-) в один (C_{diode}), отвечающий $p-n$ -переходу ЭОМ-секции. Также по аналогии с эквивалентной схемой фотодиода необходимо добавить шунтирующие резисторы, и в итоге получим схему ЭОМ-секции на рис. 5, *b*.

Важно отметить эффект экранирования квантовых ям в ЭОМ-секции от поля $p-n$ -перехода (и прикладываемого обратного смещения): образовавшиеся пространственные заряды создают поле, компенсирующее тянущее поле $p-n$ -перехода. Таким образом, можно заключить, что в приведенной выше интерпретации наличие фототока в ЭОМ-секции приводит к ослаблению чувствительности выходной оптической мощности ЭОМ-ВИЛ (глубины модуляции) к прикладываемому обратному смещению. Кроме того, если учесть, что величина самого фототока зависит от смещения на ЭОМ-секции, то можно ожидать появления сложных динамических особенностей в зависимости выходной оптической мощности ЭОМ-ВИЛ от времени при передаче данных.

Номиналы элементов схемы замещения ЭОМ-секции для различных значений обратного смещения, полу-

ченные при аппроксимации кривых S_{11} , приведены в таблице. С увеличением напряжения на ЭОМ-секции емкость $p-n$ -перехода (C_{diode}) уменьшается, что обусловлено расширением обедненной носителями заряда области, а эффективное сопротивление (R_{diode}) растет. R_{QW} и C_{QW} демонстрируют обратное поведение, что также согласуется с эффектом увеличения фототока через ЭОМ-секцию в предложенной выше интерпретации. Остальные параметры не меняются при варьировании напряжения на ЭОМ-секции и вполне согласуются со значениями соответствующих элементов в ВИЛ традиционной геометрии, что свидетельствует о том, что аппроксимация адекватно учитывает основные физические процессы.

На основании полученных значений элементов эквивалентной электрической схемы ЭОМ-секции был рассчитан коэффициент передачи высокочастотного сигнала на модулятор (в модели четырехполюсника параметр S_{21}) и определена полоса пропускания электрических частот, которая составила 3 ГГц. Такое низкое значение частоты отсечки RC -цепи ЭОМ-ВИЛ объясняет обнаруженное ранее относительно невысокое быстродействие приборов данной конструкции [10]. Следует отметить, что для ЭОМ-ВИЛ с более толстой i -областью в ЭОМ секции ширина полосы пропускания составляла ~ 20 ГГц [13] или > 35 ГГц [5]. В то же время для приборов с толстой ЭОМ-секцией требуется приложение больших запорных напряжений для создания электрического поля, необходимого для электрооптического эффекта. Требование же совместимости ЭОМ-ВИЛ с быстродействующими энергосберегающими интегральными схемами накладывает ограничения на допустимые запорные напряжения рабочей точки и напряжение модуляции. Кроме того, в толстой i -области увеличивается характерное время пролета фотогенерированных носителей и, следовательно, возрастает нежелательное поглощение.

Можно заключить, что для повышения частоты отсечки в рассмотренных приборах следует оптимизировать ЭОМ-секцию с учетом обнаруженных эффектов экранирования, так как характерные времена пролета фотогенерированных носителей через $p-n$ -переход могут достигать наносекунд [14,15]. Уменьшение поглощения в ЭОМ-секции и (или) модификация обедненной области с целью сокращения времени пролета фотогенерированных носителей заряда позволит существенно улучшить быстродействие ЭОМ-ВИЛ. Отметим также, что ЭОМ-секция находится при обратном смещении, т. е. волновое сопротивление для высокочастотного сигнала составляет несколько кОм, в то время как стандартное высокочастотное оборудование, как правило, согласовано на нагрузку 50 Ом. Это рассогласование может приводить к разнообразным искажениям высокочастотного сигнала, его многочисленным переотражениям и прочим нежелательным эффектам. В этом случае использование трансимпедансных усилителей для работы с ЭОМ-секцией может также быть полезным для улучшения свойств ЭОМ-ВИЛ.

4. Заключение

В работе исследованы электрические высокочастотные свойства вертикально излучающих лазеров (ВИЛ) нового типа с монолитно-интегрированным электрооптическим модулятором. Обнаружено, что типовая модель для описания свойств ЭОМ-модулятора, основанная на эквивалентной электрической схеме фото диода, не достаточна для аппроксимации экспериментальных кривых электрического отражения. Предложена эквивалентная схема, позволяющая точно описать эксперимент, и дана интерпретация необходимости использования такой схемы как следствие образования неравно-весных пространственных зарядов в $p-n$ -переходе модуляторной секции. На основании предложенной схемы замещения рассчитана полоса частот передачи высокочастотного сигнала на электрооптический модулятор, которая составила 3 ГГц. Сделан вывод о необходимости уменьшения поглощения в ЭОМ-секции и (или) модификации обедненной области с целью сокращения времени пролета фотогенерированных носителей заряда для дальнейшего улучшения быстродействия ЭОМ-ВИЛ.

Авторы выражают благодарность Н. Леденцову за плодотворные дискуссии и ценные советы, способствовавшие написанию этой статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках гос. контракта 07.514.11.4148 и соглашения № 8642 в рамках Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“.

Список литературы

- [1] S.A. Blokhin, J.A. Lott, A. Mutig, G. Fiol, N.N. Ledentsov, M.V. Maximov, A.M. Nadtochiy, V.A. Shchukin, D. Bimberg, *Electron. Lett.*, **45** (10), 501 (2009).
- [2] P. Westbergh, J.S. Gustavsson, B. Kogel, A. Haglund, A. Larsson, A. Mutig, A. Nadtochiy, D. Bimberg, A. Joel. *Electron. Lett.*, **46** (14), 1014 (2010).
- [3] D. Tauber, G. Wang, R.S. Geels, J.E. Bowers, L.A. Coldren, *Appl. Phys. Lett.*, **62** (4), 325 (1993).
- [4] A. Larsson, P. Westbergh, J. Gustavsson, A. Haglund, *Proc. of SPIE*, **7615** (1), 761 505 (2010).
- [5] A. Paraskevopoulos, H.J. Hensel, W.D. Molzow, H. Klein, N. Grote, N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, C. Moller, A.R. Kovsh, D.A. Livshits, I.L. Krestnikov, S.S. Mikhlin, P. Matthijsse, G. Kuyt. *Proc. OFC*, **22** (2006).
- [6] J. van Eijsden, M. Yakimov, V. Tokranov, M. Varanasi, O. Rummyantsev, E.M. Mohammed, I.A. Youngm, S.R. Oktyabrsky. *Proc. of SPIE*, **6908** (1), 69080M(2008).
- [7] V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, J.A. Lott, H. Quast, F. Hopfer, L.Ya. Karachinsky, M. Kuntz, P. Moser, A. Mutig, A. Strittmatter, V. P. Kalosha, D. Bimberg, *Proc. of SPIE*, **6889** (1), 68890H (2008).
- [8] S. Lim, J. Hudgings, L. Chen, G. Li, W. Yuen, K. Lau, C. Chang-Hasnain, *Photon. Techn. Lett.*, **10** (3), 319 (1998).
- [9] А.М. Надточий, С.А. Блохин, А.Г. Кузьменков, М.В. Максимова, Н.А. Малесев, С.И. Трошков, Н.Н. Леденцов,

В.М. Устинов, А. Mutig, D. Bimberg, *Письма в ЖТФ*, **38** (3), 10 (2012).

- [10] T. Germann, A. Strittmatter, A. Mutig, A. Nadtochiy, J. Lott, S. Blokhin, L. Karachinsky, V. Shchukin, N. Ledentsov, U. Pohl, D. Bimberg, *Physica Status Solidi C*, **7** (10), 2552 (2010).
- [11] T. Germann, W. Hofmann, A. Nadtochiy, J. Schulze, A. Mutig, A. Strittmatter, D. Bimberg. *Opt. Express*, **20** (5), 5099 (2012).
- [12] J. Cavailles, D. Miller, J. Cunnigham, P. Wa, A. Miller. *IEEE J. Quant. Electron.*, **28** (10), 2486 (1992).
- [13] N. Ledentsov, J. Lott, V. Shchukin, D. Bimberg, A. Mutig, T. Germann, J. Kropp, L. Karachinsky, S. Blokhin, A. Nadtochiy. *Proc. of SPIE*, **7597** (1), 75971F (2010).
- [14] A. Miller, C. Park, P. Likamwa. *Appl. Phys. Lett.*, **60** (1), 97 (1992).
- [15] D. Moss, T. Ido, H. Sano. *IEEE J. Quant. Electron.*, **30** (4), 1015 (1994).

Редактор Т.А. Полянская

High-frequency electrical properties of the Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser with monolithically integrated electrooptical modulator

A.M. Nadtochiy^{*,+}, W. Hofmann^{*}, T.D. Germann^{*}, S.A. Blokhin^{*,^}, L.Ya. Karachinsky^{*,+^}, M.V. Maximov^{*,+}, V.A. Shchukin^{+,≠}, A.E. Zhukov^{*}, D. Bimberg^{*}

* St. Petersburg Academic University — Nanotechnology Research and Education Centre of the Russian Academy of Sciences (the Academic University), 195220 St. Petersburg, Russia
 + Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia
 • Institut für Festkörperphysik, Technische Universität Berlin, 10623 Berlin, Germany
 ≠ VI Systems GmbH, 10623 Berlin, Germany
 ^ Connector Optics LLC, 194292 St. Petersburg, Russia

Abstract High-frequency electrical properties of Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser with monolithically integrated electrooptical modulator were investigated using small signal modulation analysis of scattering parameter. Experimental curves were fitted with response of electrical equivalent circuit taking into account non-equilibrium spatial carrier formation inside of depleted region of modulator. Modulation bandwidth of transfer function of proposed equivalent scheme was determined as high as 3 GHz.