

07

Способ уменьшения паразитной емкости вертикально-излучающего лазера с селективно-окисленной апертурой

© А.М. Надточий, С.А. Блохин, А.Г. Кузьменков, М.В. Максимов, Н.А. Малеев, С.И. Трошков, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, A. Mutig, D. Bimberg

Санкт-Петербургский академический университет —
научно-образовательный центр нанотехнологий РАН, Санкт-Петербург,
Россия

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,
Россия

ООО „Коннектор Оптик“, Санкт-Петербург, Россия

Institut for Festkorperphysik, Technische Universitat Berlin, Berlin Germany

E-mail: al.nadtochy@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 12 августа 2011 г.

Приведены результаты сравнительных исследований структурных параметров, статических и динамических характеристик вертикально-излучающих лазеров (VCSEL) с микрорезонаторами на основе $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ и $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$. Вследствие вертикального окисления слоев микрорезонатора $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ при формировании оксидной токовой апертуры происходит значительное увеличение толщины оксида, приводящее к существенному уменьшению паразитной емкости прибора и увеличению в 1.7–2 раза частоты отсечки низкочастотного фильтра, образованного паразитными элементами электрической эквивалентной схемы.

Значительный прогресс в проектировании и технологии создания вертикально-излучающих лазеров (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL — англ.) делает их наиболее перспективным источником излучения для локальных оптоволоконных систем передачи данных (LAN/SAN) [1]. К ключевым достоинствам VCSEL можно отнести малую стоимость чипов, малые пороговые и рабочие токи, возможность прямой токовой модуляции при сверхскоростной передаче данных (40 Gh/s [2]), симметричность выходного пучка и простоту ввода излучения в волокно, а также возможность контроля и тестирова-

ния чипов непосредственно на пластине [1]. В современных VCSEL частота релаксационных колебаний достигает 20 GHz [3], что приводит к необходимости соответствующего повышения частоты отсечки паразитного электрического фильтра низких частот, образованного элементами конструкции прибора [4]. В качестве основных источников паразитной емкости в VCSEL можно выделить следующие: емкость контактных площадок, образующаяся вследствие непланарных металлических контактов или при использовании верхнего металлического контакта и легированной подложки; дифференциальная емкость прямо смещенного $p-n$ -перехода; емкость, образующаяся на оксидных слоях, формирующих токовое и/или оптическое ограничение [5]. При этом для VCSEL, где токовое ограничение реализовано с помощью только оксидной апертуры, емкость последней вносит наибольший вклад.

В данной работе исследуются возможности уменьшения паразитной емкости VCSEL с помощью использования конструкции микрорезонатора на основе высокосоставных Al-содержащих слоев. В процессе окисления слоев AlGaAs для формирования токовой апертуры в такой конструкции VCSEL можно добиться увеличения толщины слоя оксида за счет окисления слоев микрорезонатора и, следовательно, уменьшения емкости оксидного слоя. Также отметим, что аналогичные конструкции VCSEL с высоким содержанием Al в слоях микрорезонатора находят применение для подавления высокодобротных латеральных мод [6], ухудшающих характеристики приборов.

Две структуры VCSEL были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках n^+ -GaAs (100): конструкция с высоким содержанием алюминия в слоях микрорезонатора (H-VCSEL) и стандартная конструкция с низким содержанием алюминия (L-VCSEL). В качестве активной области были использованы слои с субмонослойными квантовыми точками InGaAs/AlGaAs [7]. В λ -микрорезонаторе L-VCSEL активная область окружена слоями $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$, в то время как в H-VCSEL использован $3/2\lambda$ -микрорезонатор, содержащий слой $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ (вставка к рис. 1). Увеличение длины резонатора связано с инвертированием контраста показателя преломления на границе микрорезонаторов-DBR. Легированные верхний и нижний DBR состоят из 20 и 32 пар слоев $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ соответственно. Для уменьшения последовательного электрического сопротивления в DBR были использованы специальные профили состава и легирования на интерфейсах слоев. Клиновидная токовая оксидная апертура реализована с

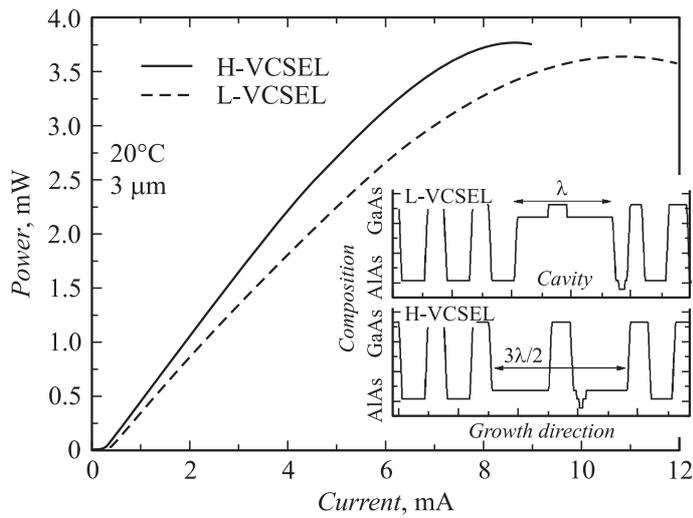


Рис. 1. Ватт-амперные статические характеристики приборов с диаметром токовой апертуры — $3\ \mu\text{m}$. На вставке — схема конструкций приборов, где показаны составы слоев AlGaAs в микрорезонаторе.

помощью селективного окисления слоев $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}/\text{AlAs}/\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}$ и помещена в точку минимума интенсивности оптической моды в верхней части резонатора. Толщины и состав слоев структуры рассчитывались для получения резонансной длины волны $980\ \text{nm}$. На обеих структурах с помощью стандартной литографии и сухого травления были сформированы чипы с различными диаметрами мез, после чего произведена планаризация контактных площадок в высокочастотной геометрии (земля—сигнал—земля) с помощью диэлектрика с высоким значением диэлектрической проницаемости (BCB).

Для исследования влияния предлагаемой конструкции VCSEL на базовые характеристики приборов были измерены ватт-амперные характеристики чипов с диаметром токовой апертуры $3\ \mu\text{m}$ в статическом режиме (рис. 1). Приборы демонстрируют схожее поведение: пороговые токи в обоих случаях менее $0,3\ \text{mA}$, дифференциальная эффективность и максимальная мощность составили: $0,62$ и $0,55\ \text{W/A}$ и $3,8$ и $3,6\ \text{mW}$ для H-VCSEL и L-VCSEL соответственно. В условиях лазерной

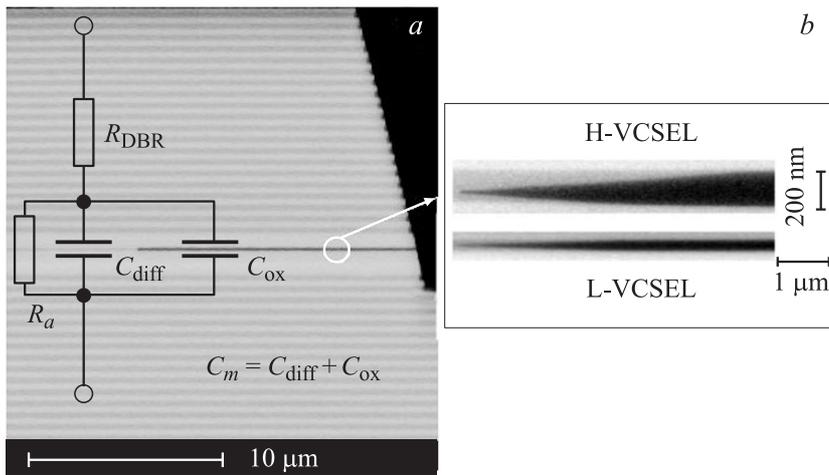


Рис. 2. *a* — эквивалентная электрическая схема VCSEL и микрофотография прибора, *b* — увеличенная микрофотография профиля окисленного апертурного слоя.

генерации дифференциальная эффективность определяется эффективностью инжекции, внутренними потерями и потерями на выход [8]. Расчеты методом матриц переноса показывают 25%-ное увеличение потерь на выход излучения для H-VCSEL, что связано с изменением контраста коэффициента преломления на границе резонатор–DBR и вполне объясняет обнаруженное увеличение дифференциальной эффективности. Также отметим, что максимум мощности излучения H-VCSEL реализуется при меньшем токе, что означает более быстрый разогрев прибора с током накачки, так как насыщение мощности излучения в таких VCSEL обусловлено перегревом. Согласно анализу спектров лазерной генерации, L-VCSEL демонстрирует одномодовую генерацию, тогда как H-VCSEL является многомодовым прибором, что, по-видимому, обусловлено более сильным волноводным эффектом на оксидной апертуре.

На рис. 2, *a* показана микрофотография VCSEL, а также эквивалентная электрическая схема для моделирования высокочастотных свойств прибора (без учета контактных площадок) [5], а на рис. 2, *b* приведены

микрофотографии профиля оксидной апертуры для обоих образцов: толщины апертуры H-VCSEL оказалась в 4 раза больше, чем у L-VCSEL. Это можно объяснить только эффектом вертикального окисления толстого слоя AlGaAs в H-VCSEL, т.е. окислением слоев микрорезонатора через уже окисленные слои апертуры, так как скорость окисления $\text{Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$ почти на два порядка ниже скорости окисления AlAs, то наблюдаемый профиль оксида в H-VCSEL не может быть получен исключительно посредством латерального окисления слоев.

Для исследований высокочастотных свойств конструкции с высоким составом алюминия в микрорезонаторе мы провели малосигнальные исследования электрического отражения. В рамках модели четырехполосника высокочастотные свойства инжекционного вертикально-излучающего лазера могут быть описаны с помощью эквивалентной схемы на рис. 2, а [5]. Эффективное сопротивление R_a описывает свойства прямо смещенного $p-n$ -перехода в активной области, ограниченной токовой апертурой, где происходит взаимодействие излучения с носителями заряда. Сопротивление распределенных брэгговских отражателей R_{DBR} и емкость C_m (являющаяся суммой дифференциальной емкости $p-n$ -перехода C_{diff} и емкости оксидной апертуры C_{ox}) образуют электрический фильтр нижних частот, ограничивающий быстродействие прибора. После подгонки параметров модели были получены значения R_{DBR} , R_a и C_m , а также емкость контактных площадок — C_p (для обеих структур C_p составила 30 fF, не показана на схеме). Сопротивление R_{DBR} для чипов с диаметром апертуры $3\ \mu\text{m}$ составило $30\ \Omega$ для обеих конструкций. Однако сопротивление R_a оказалось в три раза больше для H-VCSEL — $200\ \Omega$ ($70\ \Omega$ — для L-VCSEL). Это наблюдение объясняет обнаруженный выше более быстрый разогрев H-VCSEL с током накачки — повышенное сопротивление приводит к дополнительному выделению джоулевого тепла. Мы связываем такое повышение сопротивления с влиянием толстых, недостаточно хорошо легированных слоев $\text{Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$ в H-VCSEL.

Для более глубокого анализа влияния конструкции микрорезонатора на паразитную емкость были получены значения емкости C_m в зависимости от размера апертуры приборов (рис. 3). Варьирование размера апертуры было реализовано с помощью фиксированного процесса окисления апертурного слоя для различных диаметров мез чипов (вставка к рис. 3), что означает линейную зависимость площади оксидного слоя от диаметра апертуры. Согласно рис. 3, емкость C_m в H-VCSEL имеет

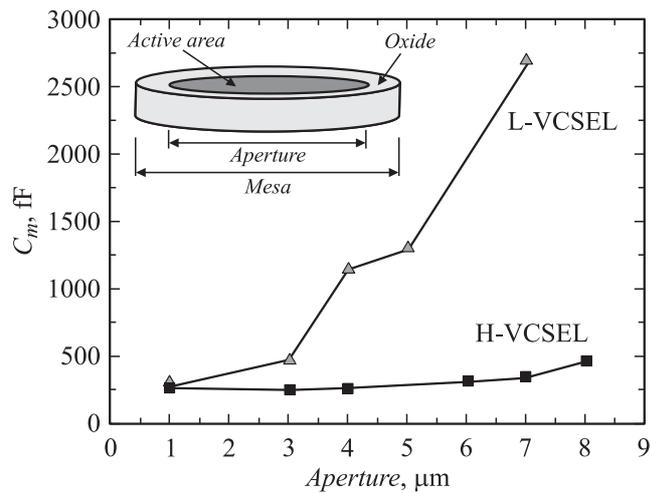


Рис. 3. Значение емкости C_m для приборов как функция размера токовой апертуры, на вставке — иллюстрация процесса формирования чипов с различным диаметром токовой апертуры.

значительно более слабую зависимость от размера апертуры, что может быть обусловлено только радикальным уменьшением емкости оксидного слоя C_{ox} , так как емкость $p-n$ -перехода (C_{diff}) в H-VCSEL выше, чем в L-VCSEL вследствие легирования высокосолевых слоев AlGaAs микрорезонатора и сокращения i -области $p-n$ -перехода. Увеличение толщины оксида ведет к пропорциональному уменьшению емкости C_{ox} и уменьшению ее вклада в суммарную паразитную емкость прибора C_m . Данный вывод подтверждают и вычисления частоты отсечки паразитного фильтра низких частот в модели на рис. 2, а для приборов с апертурой 3 μm : 6 GHz для L-VCSEL и 11 GHz для H-VCSEL. Благодаря эффекту обеднения легированных слоев вблизи оксида [9] применение многослойных оксидных структур [10] представляется логичным развитием предложенного подхода.

В работе было проведено экспериментальное сравнение VCSEL с оксидной токовой апертурой стандартной конструкции с $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ микрорезонатором и аналогичного VCSEL с $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ микрорезонатором. Прибор с высоким содержанием алюминия в микрорезонаторе

продемонстрировал более высокую дифференциальную эффективность и повышенную частоту отсечки паразитного фильтра низких частот. Эти факты связаны с увеличением потерь на выход в резонаторе $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ и значительным увеличением толщины оксидной токовой апертуры за счет вертикального окисления слоев резонатора.

Работа выполнялась при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ, программы № 27 президиума РАН, Российского фонда фундаментальных исследований и Госконтракта 14.740.11.0066.

Список литературы

- [1] *Kenichi Iga* // IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. 2000. V. 6. N 6. P. 1201.
- [2] *Blokin S.A., Lott J.A., Mutig A., Fiol G., Ledentsov N.N., Maximov M.V., Nadtochiy A.M., Shchukin V.A., Bimberg D.* // Electron. Lett. 2009. V. 45. N 10. P. 501.
- [3] *Mutig I.A., Blokhin S.A., Nadtochiy A.M., Fiol G., Lott J.A., Shchukin V.A., Ledentsov N.N., Bimberg D.* // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. P. 131101.
- [4] *Надточий А.М., Блохин С.А., Мутиг А., Лотт Дж., Леденцов Н.Н., Карачинский Л.Я., Максимов М.В., Устинов В.М., Бимберг Д.* // ФТП. 2011. Т. 45. С. 688.
- [5] *Larsson A., Westbergh P., Gustavsson J., Haglund A.* // Proc. of SPIE. 2010. V. 7615. P. 761505.
- [6] *Ledentsov N.N.* et al. // Proc. of SPIE. San Diego, CA, USA 64681O, 2007.
- [7] *Blokhin S.A.* et al. // J. Quant. Electron. 2006. V. 42. P. 851.
- [8] *Coldren L.A., Corzine S.W.* Diode lasers and photonic integrated circuits. Wiley, 1995.
- [9] *Hawkins B.M., Hawthorne III, R.A., Guenter J.K., Tatum J.A., Biard J.R.* Proceedings of IEEE 52nd Electronic Components and Technology Conference. San Diego, CA. May 2002. P. 540–550.
- [10] *Chang Y.-C., Coldren L.A.* // J. Sel. Topics Quant. Electron. 2009. V. 15. P. 704.