

# Влияние времени жизни фотонов в оптическом микрорезонаторе на характеристики вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 850 нм с легированными распределенными брэгговскими отражателями и оксидной токовой апертурой

© М.А. Бобров<sup>+</sup>, С.А. Блохин<sup>†</sup>, А.Г. Кузьменков<sup>\*+</sup>, Н.А. Малеев<sup>+</sup>, А.А. Блохин<sup>•</sup>,  
Ю.М. Задиранов<sup>+</sup>, Е.В. Никитина<sup>#</sup>, В.М. Устинов<sup>+</sup>

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

<sup>\*</sup> Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур  
Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>•</sup> Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

<sup>#</sup> Санкт-Петербургский Академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий  
Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 20 мая 2014 г. Принята к печати 30 мая 2014 г.)

Исследовано влияние времени жизни фотонов в оптическом микрорезонаторе на характеристики вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) спектрального диапазона 850 нм с легированными распределенными брэгговскими отражателями и оксидной токовой апертурой. Управление временем жизни фотонов в микрорезонаторе осуществлялось путем изменения коэффициента отражения верхнего брэгговского отражателя. Обнаружено, что быстродействие ВИЛ с диаметром токовой апертуры 10 мкм в основном лимитируется эффектом саморазогрева, несмотря на рост коэффициента затухания релаксационных колебаний при увеличении времени жизни фотонов в микрорезонаторе. В то же время более высокий уровень внутренних оптических потерь в лазерах с диаметром токовой апертуры 1.5 мкм приводит к доминированию эффекта демпфирования релаксационных колебаний независимо от уровня потерь на вывод излучения. В случае приборов с диаметром токовой апертуры 5.5 мкм действуют оба механизма, лимитирующих быстродействие, что позволило увеличить частоту эффективной модуляции ВИЛ с 21 до 24 ГГц при уменьшении времени жизни фотонов с 3.7 до 0.8 пс.

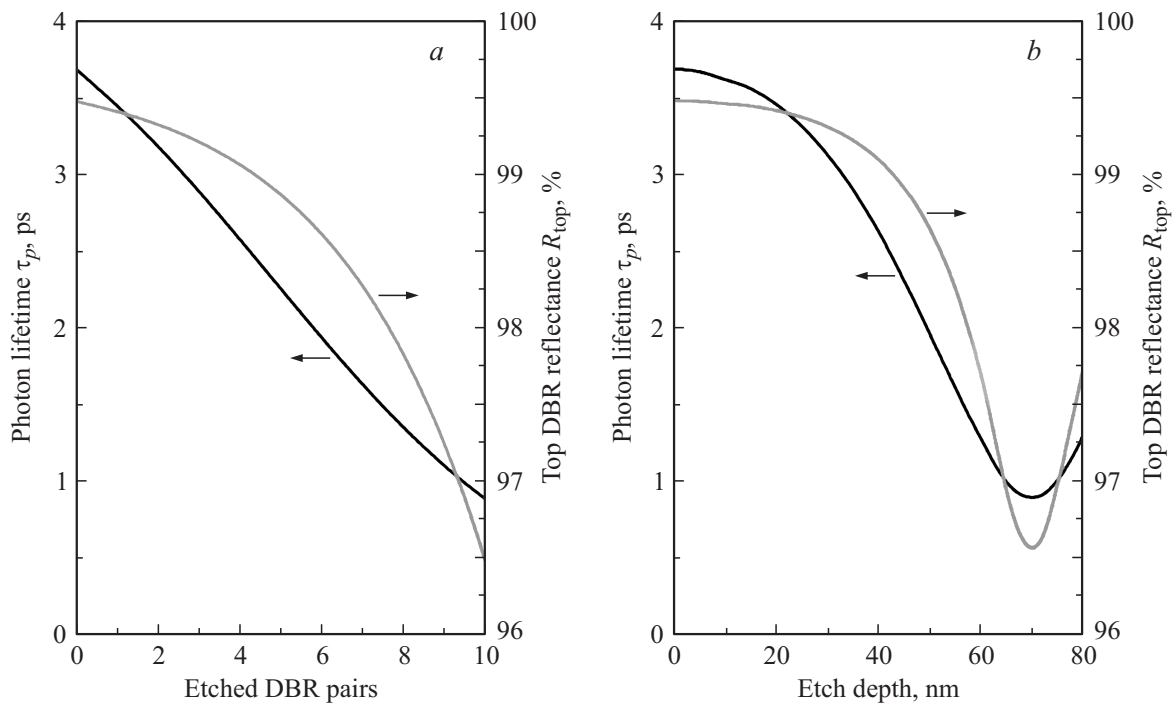
## 1. Введение

Полупроводниковые вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) спектрального диапазона 850 нм активно используются для оптической передачи данных на короткие расстояния (< 300 м) в режиме прямой токовой модуляции. Непрерывный рост объемов передаваемой информации требует повышения пропускной способности оптических каналов внутри- и межсистемного информационного обмена. Ограниченные возможности по увеличению плотности каналов при параллельной передаче данных стимулируют поиск путей повышения быстродействия ВИЛ ближнего инфракрасного (ИК) диапазона [1].

В общем случае для увеличения частоты модуляции инжекционного лазера, работающего выше порога генерации в режиме прямой токовой модуляции, необходимо повысить резонансную частоту и скорость ее нарастания с ростом тока накачки, а также увеличить паразитную частоту отсечки фильтра низких частот, образованного паразитными элементами электрической эквивалентной схемы [2]. Для решения данной задачи были предло-

жены различные методы, включая: использование напряженных квантово-размерных InGaAlAs-гетероструктур [2,3] в качестве активной области ВИЛ, применение изоляционных материалов с низкой диэлектрической проницаемостью для размещения контактных площадок [4], эффективное увеличение толщины оксидной апертуры [5,6] для снижения внутренней паразитной емкости, уменьшение последовательного сопротивления при сохранении низкого уровня внутренних оптических потерь за счет оптимизации профилей состава и легирования распределенных брэгговских отражателей (РБО/DBR) [7]. Использование комбинации перечисленных методов позволило поднять частоту эффективной модуляции ВИЛ ближнего ИК диапазона до 20 ГГц [8,9]. В то же время предельная частота модуляции инжекционного лазера лимитируется эффектом демпфирования релаксационных колебаний и определяется соотношением  $f_{-3dB}^{max} \sim 9/K$ , где так называемый  $K$ -фактор представляет собой коэффициент пропорциональности в зависимости величины коэффициента затухания от квадрата резонансной частоты. В свою очередь  $K$ -фактор зависит от времени жизни фотонов в оптическом резонаторе  $\tau_p$ , дифференциального оптического усиления  $g_N$ , коэффициента компрессии усиления  $\varepsilon$  и групповой скорости фотонов  $v_g$  как  $K = 4\pi^2(\tau_p + \varepsilon/v_g g_N)$ . Сравнительно

<sup>†</sup> E-mail: blokh@mail.ioffe.ru



**Рис. 1.** Расчетные зависимости коэффициента отражения верхнего РБО и времени жизни фотонов в резонаторе от количества стравленных пар (а) и от глубины травления поверхности (б).

недавно была показана возможность существенного повышения быстродействия ВИЛ спектрального диапазона 850 нм с достаточно большим размером оксидной токовой апертуры за счет уменьшения времени жизни фотонов в оптическом микрорезонаторе [10].

В данной работе рассмотрено влияние времени жизни фотонов в оптическом микрорезонаторе с легированными РБО и двойной оксидной токовой апертурой на характеристики ВИЛ спектрального диапазона 850 нм в широком диапазоне размеров токовых апертур. Проведен анализ механизмов, лимитирующих быстродействие лазеров, и определены предельные частоты эффективной модуляции для данной конструкции ВИЛ.

## 2. Детали эксперимента

В качестве базовой конструкции ВИЛ спектрального диапазона 850 нм выбрана геометрия с выводом света вверх и двумя легированными полупроводниковыми РБО. Эпитаксиальная структура ВИЛ состоит из нелегированной подложки GaAs, скрытого контактного слоя *n*-GaAs, нижнего РБО, содержащего 35 пар четвертьволновых слоев  $Al_{0.15}Ga_{0.85}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$  *n*-типа проводимости, нелегированного оптического резонатора  $1.5\lambda$ -AlGaAs с активной областью на основе напряженных квантовых ям InGaAs, верхнего РБО, содержащего 22 пары четвертьволновых слоев  $Al_{0.15}Ga_{0.85}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$  *p*-типа и верхнего тонкого сильно легированного контактного слоя *p*-GaAs. Для снижения паразитной емкости ВИЛ использовались

селективно-окисленные апертурные слои AlGaAs со ступенчатым профилем состава (содержания Al), помещенных в слои верхнего РБО вблизи микрорезонатора, а для снижения последовательного сопротивления — оптимизированные профили изменения состава и легирования на границах четвертьволновых слоев в РБО. Была изготовлена серия приборов в высокочастотной планарной геометрии контактных площадок типа земля—источник (GS-геометрия) с различным размером токовой апертуры. Детали конструкции и процесса изготовления исследованных лазеров приведены в работах [11,12]. Чипы ВИЛ для исследований были переданы компанией Коннектор Оптикс (Санкт-Петербург).

Время жизни фотонов в оптическом микрорезонаторе ВИЛ зависит от суммарных оптических потерь и может быть выражено следующим образом [2]:

$$\tau_p^{-1} = (A_{int}L_{pass} + T_{top} + T_{bottom}) v_g / L_{eff},$$

где  $v_g$  — средняя групповая скорость,  $L_{eff}$  — эффективная длина оптического микрорезонатора,  $A_{int}$  — усредненные внутренние оптические потери на один проход фотона в пассивной части микрорезонатора  $L_{pass}$  (т.е. без учета толщины активной области);  $T_{top} = -0.5 \ln R_{top}$  и  $T_{bottom} = -0.5 \ln R_{bottom}$  — потери на вывод излучения через верхнее и нижнее зеркала с коэффициентами отражения  $R_{top}$  и  $R_{bottom}$  соответственно. С одной стороны, внутренние оптические потери необходимо минимизировать, поскольку повышение их уровня ведет к падению квантовой эффективности и снижению быстродействия лазера [11]. С другой стороны, диапазон ва-

Основные характеристики исследованных ВИЛ с различным диаметром токовой апертуры при большом и малом времени жизни фотонов в оптическом микрорезонаторе

| Время жизни фотонов             | $\tau_{p \min}$ |         |        | $\tau_{p \max}$ |         |        |
|---------------------------------|-----------------|---------|--------|-----------------|---------|--------|
|                                 | 1.5 мкм         | 5.5 мкм | 10 мкм | 1.5 мкм         | 5.5 мкм | 10 мкм |
| Апертура                        |                 |         |        |                 |         |        |
| $I_{th}$ , мА                   | 0.8             | 0.4     | 1.23   | 0.54            | 0.31    | 0.93   |
| $I_{ro}$ , мА                   | 3.8             | 9.0     | 19.1   | 3.6             | 7.8     | 17     |
| $P_{\max}$ , мВт                | 0.9             | 5.2     | 12.1   | 0.4             | 2.7     | 6.8    |
| $\eta$ , Вт/А                   | 0.22            | 0.51    | 0.58   | 0.48            | 0.85    | 0.9    |
| $f_{-3dB}$ , ГГц                | 20.2            | 24.2    | 20.4   | 21              | 21.3    | 19.5   |
| K-фактор, нс                    | 0.20            | 0.12    | 0.11   | 0.23            | 0.20    | 0.21   |
| M-фактор, ГГц/мА <sup>1/2</sup> | 20.0            | 15.6    | 7.3    | 21.8            | 17.5    | 7.7    |

риации эффективной длины микрорезонатора ограничен снизу на уровне  $\sim 1$  мкм, тогда как увеличение длины микрорезонатора сопряжено с изменением модового состава и увеличением уровня внутренних оптических потерь [13]. Поскольку нижний РБО (т.е. зеркало со стороны подложки) в случае геометрии ВИЛ с выводом света вверх проектируется максимально глухим [1], изменение коэффициента отражения верхнего зеркала представляется наиболее простым способом управления временем жизни фотонов в резонаторе.

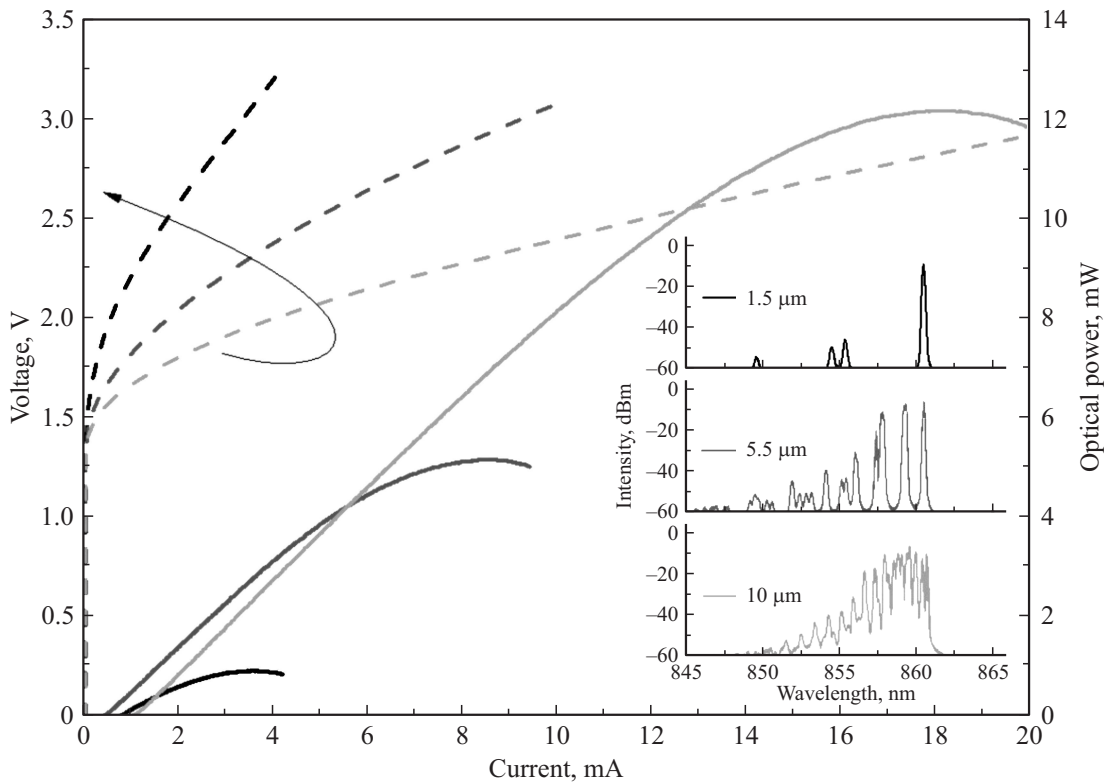
Изменение коэффициента отражения верхнего зеркала ВИЛ после завершения изготовления лазера возможно за счет изменения числа пар четвертьволновых слоев и изменения толщины приповерхностного слоя. Это позволяет проводить измерения характеристик для одного прибора с разными параметрами верхнего РБО и существенно повышает достоверность экспериментальных данных за счет устранения неконтролируемого разброса характеристики ВИЛ вследствие отклонения параметров эпитаксиальной (например, вариации оптических толщин слоев и уровня легирования) и/или приборной (например, вариации размера апертуры и контактного сопротивления) конструкции от проектных значений.

На рис. 1 приведены результаты моделирования поведения коэффициента отражения РБО  $Al_{0.15}Ga_{0.85}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$  и времени жизни фотонов в заданном микрорезонаторе (при  $A_{int} = 0.16\%$ ,  $L_{eff} = 1.46$  мкм,  $L_{pass} = 1.43$  мкм,  $R_{bottom} = 99.87\%$ ) при изменении числа пар четвертьволновых слоев и изменении толщины приповерхностного слоя. С одной стороны, зависимость коэффициента отражения зеркала от количества удаленных пар носит монотонно убывающий характер, в результате время жизни фотонов падает более чем в 7.5 раза при уменьшении количества пар РБО на 10. Однако такой подход требует достаточно глубокого травления ( $\sim 1.2$  мкм в нашем случае) с высокой точностью, что, во-первых, сложно реализовать в случае градиентных интерфейсов в РБО и, во-вторых, негативно влияет на однородность инжекции носителей в активную область и последовательное сопротивление

лазера. С другой стороны, зависимость коэффициента отражения зеркала от глубины травления верхнего слоя РБО является периодической функцией и при глубине травления  $\sim 70$  нм (для верхнего четвертьволнового слоя с высоким показателем преломления) наблюдается отчетливый минимум, что соответствует изменению времени жизни фотонов в резонаторе в 4 раза. Поэтому выбор был сделан в пользу последнего подхода, когда „мелкое“ травление поверхностных слоев РБО практически не оказывает влияния на вольт-амперные характеристики лазеров. Далее обсуждаются результаты для двух противоположных случаев: большое время жизни фотонов в микрорезонаторе  $\tau_{p \max}$  (т.е. низкие потери на вывод излучения,  $\sim 0.3\%$ ) и малое время жизни фотонов в микрорезонаторе  $\tau_{p \min}$  (т.е. высокие потери на вывод излучения,  $\sim 1.8\%$ ).

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены статические и спектральные характеристики ВИЛ с большими потерями на вывод излучения и диаметром токовой апертуры 1.5, 5.5 и 10 мкм, измеренные в непрерывном режиме работы при комнатной температуре. Для лазеров с диаметром апертуры 1.5 мкм характерна лазерная генерация через фундаментальную моду во всем диапазоне токов с фактором подавления боковых мод  $> 30$  дБ (одномодовый режим). При увеличении токовой апертуры селекция фундаментальной моды становится неэффективной и наблюдается лазерная генерация через множество поперечных мод, где модовый состав излучения относительно слабо зависит от тока накачки (многомодовый режим). Максимальная выходная оптическая мощность лазеров  $P_{\max}$  нелинейно увеличивается с размером токовой апертуры от 0.9 до 12.1 мВт. В то же время дифференциальная эффективность  $\eta$  резко возрастает с увеличением размера токовой апертуры и насыщается при размерах апертур  $> 5.5$  мкм на уровне 0.9 Вт/А (см. таблицу). Такое поведение может свидетельствовать как об уменьшении эффективности токовой инжекции, так и об увеличении уровня внутренних оптических



**Рис. 2.** Вольт-амперные и ватт-амперные характеристики ВИЛ с диаметром токовой апертуры 1,5, 5,5, 10 мкм. На вставке — спектры лазерной генерации на половине тока насыщения.

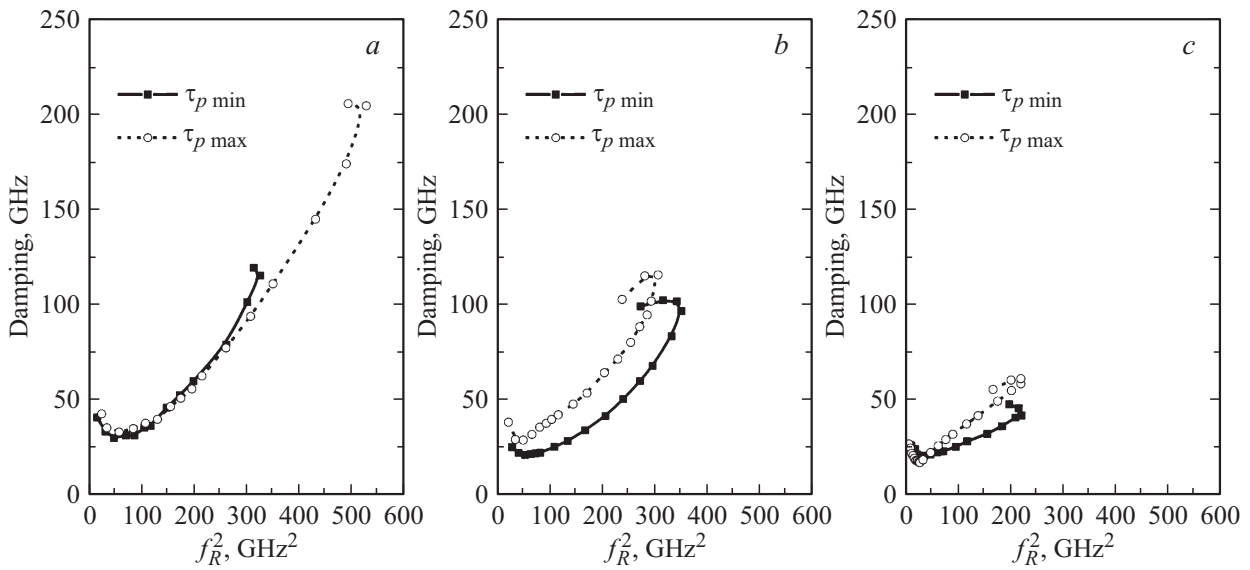
потерь при малых размерах токовых апертур. В то же время с уменьшением размера апертуры от 10 до 5,5 мкм наблюдается падение порогового тока  $I_{th}$  с 1,23 до 0,4 мА, т.е. пропорционально уменьшению площади светоизлучающей области. Однако дальнейшее уменьшение токовой апертуры ведет к резкому возрастанию порога генерации до 0,8 мА при размерах апертуры 1,5 мкм, что коррелирует с падением дифференциальной эффективности и может быть объяснено появлением дополнительных внутренних оптических потерь вследствие поглощения света в непрокачиваемых областях на периферии активной области [14] и дополнительными потерями из-за дифракции света на оксидной апертуре [15].

Уменьшение потерь на вывод излучения приводит к падению дифференциальной эффективности в 1,5–2 раза и снижению порогового тока на 25–30% (см. таблицу). Следует отметить, что резкое падение выходной оптической мощности ведет к росту рассеиваемой тепловой мощности и уменьшению величины тока насыщения  $I_{ro}$  (ток, при котором достигается значение  $P_{max}$ ), что особенно ярко проявляется в многомодовых лазерах. Тем не менее в целом характер зависимостей статических и спектральных характеристик ВИЛ от величины токовой апертуры аналогичен наблюдаемому в случае лазеров с большими потерями на вывод излучения.

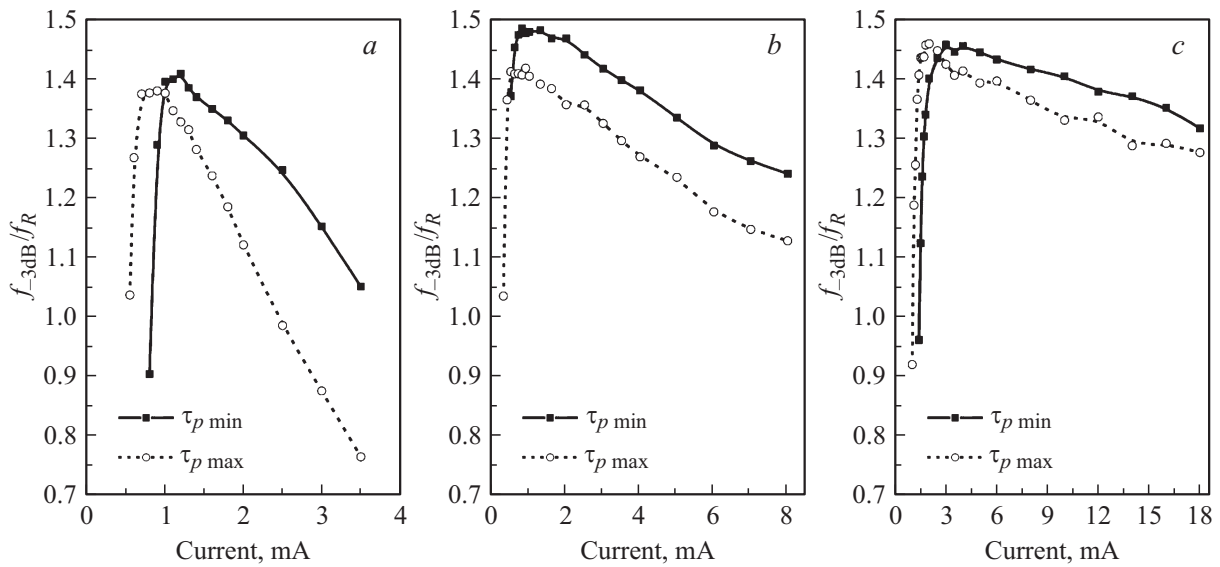
Согласно моделированию частотных зависимостей коэффициента отражения модулирующего СВЧ сигнала

(частотных зависимостей параметра  $S_{11}$ ), измеренных при комнатной температуре, основной вклад в величину паразитной частоты отсечки  $f_p$  ВИЛ с ультрамалым размером токовой апертуры дает последовательное сопротивление, тогда как в случае широкоапертурных ВИЛ — паразитная емкость лазера. Тем не менее паразитная частота отсечки всех исследованных лазеров превышает 24 ГГц и не оказывает существенного влияния на их высокочастотные свойства, поскольку оценка величины предельной частоты модуляции при наличии только паразитной RC-цепи  $f_{-3dB,parasitics} = (2 + \sqrt{3})f_p$  дает значение, существенно превосходящее экспериментальные значения для всех исследуемых ВИЛ.

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента затухания от квадрата резонансной частоты ( $f_R$ ) для исследуемых лазеров. Следует отметить, что при высоких плотностях фотонов ( $f_R > 14$  ГГц) наблюдается сублинейный рост коэффициента затухания, обусловленный эффектами саморазогрева лазера и насыщения усиления, тогда как при малой плотности фотонов в микрорезонаторе ( $f_R < 5$  ГГц) вклад спонтанного излучения в лазерную моду приводит к дополнительному увеличению коэффициента затухания эффекта при токах накачки вблизи порога генерации. В таблице приведена оценка K-фактора при умеренных плотностях фотонов (т.е. токах накачки) для каждого лазера, когда наблюдается классический (линейный) характер зависимостей коэффициента затухания от квадрата резонансной частоты.



**Рис. 3.** Зависимости коэффициента затухания от квадрата резонансной частоты для ВИЛ с диаметром токовой апертуры 1.5 (a), 5.5 (b) и 10 мкм (c) при большом ( $\tau_{p \max}$ ) и малом ( $\tau_{p \min}$ ) времени жизни фотонов в резонаторе. Температура измерений  $T = 20^\circ\text{C}$ .

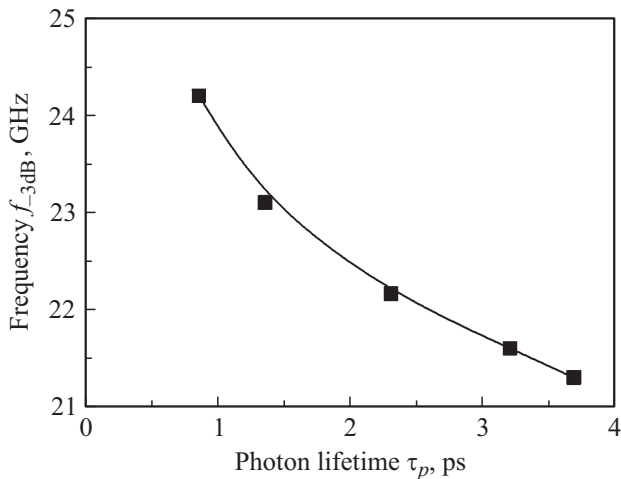


**Рис. 4.** Зависимости отношения частоты эффективной модуляции  $f_{-3\text{dB}}$  к резонансной частоте  $f_R$  для ВИЛ с диаметром токовой апертуры 1.5 мкм (a), 5.5 (b) и 10 мкм (c) при большом ( $\tau_{p \max}$ ) и малом ( $\tau_{p \min}$ ) времени жизни фотонов в оптическом микрорезонаторе.

ты. В случае малых потерь на вывод излучения величина  $K$ -фактора не зависит от размера токовой апертуры и коэффициент затухания определяется временем жизни фотонов в резонаторе. Для случая высокого уровня потерь на вывод излучения, несмотря на изменение времени жизни фотонов в резонаторе более чем в 4 раза, наблюдается 2-кратное падение  $K$ -фактора для многомодовых лазеров, что свидетельствует о преобладающем влиянии уровня дифференциального оптического усиления  $g_N$  на величину  $K$ -фактора в данном случае. Так, более высокие внутренние оптические потери в одномодовых лазе-

рах приводят к падению дифференциального усиления на пороге генерации и незначительному уменьшению  $K$ -фактора с ростом потерь на вывод.

На рис. 4 приведены отношения частоты эффективной модуляции  $f_{-3\text{dB}}$  (по уровню спада амплитудно-частотной характеристики на  $-3$  дБ) к резонансной частоте  $f_R$  в зависимости от тока накачки для исследованных лазеров. В случае высоких потерь на вывод излучения отношение  $f_{-3\text{dB}}/f_R$  для широкоапертурных ВИЛ при умеренных токах накачки близко к теоретическому пределу 1.55, когда максимальная частота



**Рис. 5.** Зависимость максимальной частоты эффективной модуляции  $f_{-3dB}$  от времени жизни фотонов в оптическом микрорезонаторе для ВИЛ с диаметром токовой апертуры 5.5 мкм.

эффективной модуляции ограничена лишь резонансной частотой, а при больших токах насыщение усиления ведет к небольшому уменьшению величины  $f_{-3dB}/f_R$  до  $\sim 1.35$ , что свидетельствует о доминировании эффекта саморазогрева лазера (см. рис. 4, *c*). Однако для лазеров с ультрамалыми размерами токовой апертуры уже при превышении величины порогового тока в 2 раза наблюдается резкое падение отношения  $f_{-3dB}/f_R$  с ростом тока накачки до  $\sim 1.05$ , что коррелирует с высокими значениями коэффициента затухания и свидетельствует о преобладании эффекта демпфирования релаксационных колебаний (см. рис. 4, *a*). В случае низких потерь на вывод излучения увеличение времени жизни фотонов в микрорезонаторе ведет к усилению эффекта демпфирования релаксационных колебаний для лазеров с ультрамалыми размерами токовой апертуры (падение  $f_{-3dB}/f_R$  до  $\sim 0.75$ ), тогда как влияние этого эффекта на быстродействие широкоапертурных лазеров не существенно. В результате максимальная частота эффективной модуляции лазеров с малыми потерями на вывод излучения и минимальным размером токовой апертуры не превышает 21 ГГц (см. таблицу), несмотря на трехкратное увеличение скорости нарастания частоты  $f_{-3dB}$  с током накачки (так называемый МСЭФ-фактор) относительно широкоапертурных лазеров. Повышение уровня потерь на вывод излучения ведет к увеличению максимальной частоты эффективной модуляции широкоапертурных лазеров, тогда как для лазеров с ультрамалым размером токовой апертуры наблюдается падение максимальной частоты эффективной модуляции, что обусловлено более высокими внутренними оптическими потерями.

Ситуация меняется в случае лазеров с промежуточным размером токовой апертуры (см. рис. 4, *b*), для которых существенное влияние оказывают оба эффекта: саморазогрева и демпфирования релаксационных колебаний. Так, при малых потерях на вывод излучения

поведение приведенной частоты эффективной модуляции  $f_{-3dB}/f_R$  с током для лазеров с апертурой 5.5 мкм аналогично случаю лазеров с ультрамалыми размерами токовой апертуры, однако при больших потерях на вывод излучения характер токовой зависимости  $f_{-3dB}/f_R$  при умеренных токах аналогичен случаю широкоапертурных ВИЛ. Последнее обстоятельство позволило достичь более высоких ( $\sim 24$  ГГц) частот эффективной модуляции при уменьшении времени жизни фотонов в резонаторе (см. рис. 5). Дальнейшее повышение быстродействия лазеров исследуемой конструкции связано с уменьшением рассеиваемой тепловой мощности за счет снижения последовательного сопротивления и более эффективным отводом тепла от активной области за счет уменьшения теплового сопротивления.

#### 4. Заключение

В работе проведен анализ факторов, ограничивающих быстродействие вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 850 нм в геометрии с легированными РБО и двумя оксидными апертурами. При малых потерях на вывод излучения коэффициент затухания не зависит от размера токовой апертуры и определяется временем жизни фотонов в резонаторе. Однако в случае высокого уровня потерь на вывод излучения существенное влияние оказывает уровень дифференциального усиления на пороге генерации и вопрос малых внутренних оптических потерь становится актуальным (особенно в случае лазеров с ультрамалыми апертурами). В результате частота эффективной модуляции лазеров с ультрамалыми размерами токовой апертуры лимитирована эффектом демпфирования релаксационных колебаний на уровне 20–21 ГГц, тогда как эффект саморазогрева лазера ограничивает быстродействие лазеров с большой токовой апертурой на уровне 19.5–20.5 ГГц. В случае лазеров с промежуточным размером токовой апертуры удалось достичь предельной частоты эффективной модуляции  $\sim 24$  ГГц, необходимой для создания нового поколения сверхскоростных оптических передатчиков на основе ВИЛ ближнего ИК диапазона.

Авторы выражают признательность М.М. Кулагиной и С.И. Трошковой за исследования приборных структур методом растровой электронной микроскопии.

Работа выполнялась при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-02-00962) и Программы фундаментальных исследований ОФН РАН Ш-7.

#### Список литературы

- [1] *VCSELs: fundamentals, technology and applications of vertical-cavity surface-emitting lasers*, ed. by R. Michalzik (Springer, 2013).
- [2] L.A. Coldren, S.W. Corzine. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* (N.Y., Wiley, 1995).

- [3] S.B. Healy, E.P. O'Reilly, J.S. Gustavsson, P. Westbergh, Å. Haglund, A. Larsson, A. Joel. *IEEE J. Quant. Electron.*, **46**, 504 (2010).
- [4] A.N. AL-Omari, K.L. Lear. *Trans. Dielectrics and Electrical Insulation*, **12**, 1151 (2005).
- [5] Y.C. Chang, C.S. Wang, L.A. Johansson, L.A. Coldren. *Electron. Lett.*, **42**, 1281 (2006).
- [6] А.М. Надточий, С.А. Блохин, А.Г. Кузьменков, М.В. Максимов, Н.А. Малеев, С.И. Трошков, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, А. Mutig, D. Bimberg. *Письма ЖТФ*, **38** (3), 10 (2012).
- [7] Y.-C. Chang, L.A. Coldren. *J. Selected Topics in Quant. Electron.*, **15**, 704 (2009).
- [8] P. Westbergh, J.S. Gustavsson, B. Kögel, E. Haglund, A. Larsson, A. Mutig, A. Nadtochiy, D. Bimberg, A. Joel. *Electron. Lett.*, **46**, 1014 (2010).
- [9] A. Mutig, S.A. Blokhin, A.M. Nadtochiy, G. Fiol, J.A. Lott, V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 131 101 (2009).
- [10] P. Westbergh, R. Safaisini, E. Haglund, B. Kögel, J.S. Gustavsson, A. Larsson, M. Geen, R. Lawrence, A. Joel. *Electron. Lett.*, **48**, 1145 (2012).
- [11] С.А. Блохин, М.А. Бобров, Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, В.В. Стеценко, М.М. Павлов, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Ю.М. Задиранов, А.Ю. Егоров, В.М. Устинов. *ФТП*, **47**, 833 (2013).
- [12] L. Ya. Karachinsky, S.A. Blokhin, I.I. Novikov, N.A. Maleev, A.G. Kuzmenkov, M.A. Bobrov, J.A. Lott, N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, J.-R. Kropp, D. Bimberg. *Semicond. Sci. Technol.*, **28**, 065 010 (2013).
- [13] H.J. Unold, M.C. Riedl, S.W.Z. Mahmoud, R. Jäger, K.J. Ebeling. *Electron. Lett.*, **37**, 178 (2001).
- [14] S.A. Blokhin, N.A. Maleev, A.G. Kuzmenkov, A.V. Sakharov, M.M. Kulagina, Y.M. Shernyakov, I.I. Novikov, M.V. Maximov, V.M. Ustinov, A.R. Kovsh, S.S. Mikhrin, N.N. Ledentsov, G. Lin, J.Y. Chi. *J. Quant. Electron.*, **42**, 851 (2006).
- [15] E.R. Hegblom, D.I. Babic, B.J. Thibeault, L.A. Coldren. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 1757 (1996).

Редактор Л.В. Шаронова

## Impact of photon lifetime on performance of 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers with fully doped distributed Bragg reflectors and oxide current aperture

M.A. Bobrov<sup>+</sup>, S.A. Blokhin<sup>+</sup>, A.G. Kuzmenkov<sup>++</sup>, N.A. Maleev<sup>+</sup>, A.A. Blokhin<sup>•</sup>, Yu.M. Zadiranov<sup>+</sup>, E.V. Nikitina<sup>#</sup>, V.M. Ustinov<sup>+</sup>

<sup>+</sup> IoffePhysicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

<sup>\*</sup> Submicron Heterostructures for Microelectronics Research & Engineering Center, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

<sup>•</sup> Saint-Petersburg State Polytechnical University, 195251 St. Petersburg, Russia

<sup>#</sup> St. Petersburg Academic University and Nanotechnology Research and Education Centre, Russian Academy of Sciences, 195220 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The influence of photon lifetime in the optical microcavity on the performance of 850 nm vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) with fully doped distributed Bragg reflectors (DBR) and oxide aperture was investigated. The photon lifetime was controlled by changing the top DBR reflectivity. It was found that the high-speed performance of the 10 μm-aperture VCSELs is mainly limited by thermal effects in spite of increase in the damping factor with the photon lifetime. At the same time the damping effect on the relaxation oscillations is dominating in the modulation response of the 1.5 μm aperture VCSELs due to higher internal optical losses. In case of the 5.5 μm aperture lasers, both limiting factors have an effect on modulation bandwidth, which enabled to increase the modulation bandwidth with decreasing photon lifetime from 21 GHz at 3.7 ps to 24 GHz at 0.8 ps.