

07:09

## Исследования диэлектрических распределенных брэгговских отражателей для вертикально-излучающих лазеров ближнего ИК-диапазона

© С.А. Блохин<sup>1</sup>, М.А. Бобров<sup>1</sup>, А.Г. Кузьменков<sup>1,2</sup>, А.А. Блохин<sup>1</sup>,  
А.П. Васильев<sup>1,2</sup>, Ю.А. Гусева<sup>1</sup>, М.М. Кулагина<sup>1</sup>,  
И.О. Карповский<sup>1,3</sup>, Ю.М. Задиранов<sup>1</sup>, С.И. Трошков<sup>1</sup>,  
Н.Д. Прасолов<sup>1,4</sup>, П.Н. Брунков<sup>1,4</sup>, В.С. Левицкий<sup>5</sup>,  
В. Лисак<sup>1,4</sup>, Н.А. Малеев<sup>1</sup>, В.М. Устинов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (ИТМО)

<sup>5</sup> НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике, Санкт-Петербург

E-mail: blokh@mail.ioffe.ru

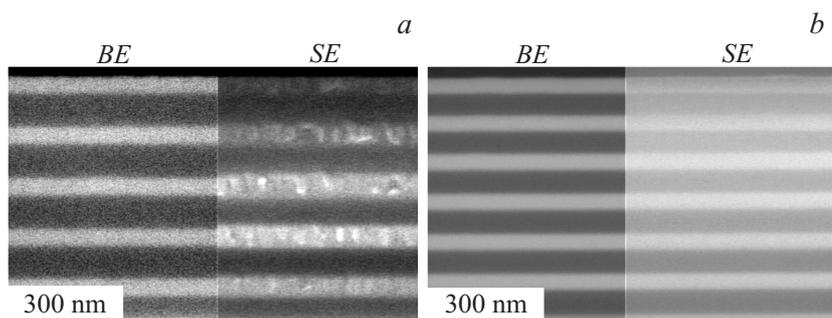
Поступило в Редакцию 7 июня 2016 г.

Выполнены исследования по оптимизации конструкции диэлектрического распределенного брэгговского отражателя (РБО), получаемого методом реактивного магнетронного распыления, для применения в вертикально-излучающих лазерах с внутривибраторными контактами (ВК-ВИЛ) ближнего ИК-диапазона. Показано, что снижение отражательной способности диэлектрических РБО на основе  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  связано с диффузионным рассеянием света из-за поликристалличности слоев  $\text{TiO}_2$ . Аморфные слои  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , напротив, обладают низкой шероховатостью поверхности и малой флуктуацией показателя преломления. Продемонстрированы одномодовые ВК-ВИЛ спектрального диапазона 980 нм с диэлектрическим РБО на основе  $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ , имеющие пороговый ток менее 0.27 мА, электрическим сопротивлением менее 200  $\Omega$  и дифференциальной эффективностью более 0.8 W/A.

Компактные источники лазерного излучения ближнего ИК-диапазона (750–1100 нм) на основе полупроводниковых вертикально-излу-

чающих лазеров (ВИЛ, англ. vertical-cavity surface-emitting lasers — VCSELs) находят широкое применение не только в сверхскоростной оптоволоконной передаче данных в информационно-вычислительных системах, но и в области спектроскопии и сенсоров различного типа (оптические манипуляторы, квантовые дискриминаторы, магнитометрические датчики и т.д.) [1–3]. В настоящее время для синтеза гетероструктур ВИЛ широко применяется газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений (МОГФЭ) и молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ). Однако рост легированных брэгговских отражателей, особенно при использовании МПЭ, требует применения сложных и тщательно оптимизированных профилей состава и легирования для одновременного обеспечения низких внутренних потерь и электрического сопротивления [4–5], а в ряде случаев (например, при создании длинноволновых или коротковолновых ВИЛ) применение легированных распределенных брэгговских отражателей (РБО) является малоперспективным решением. Частичное решение проблемы связано с применением геометрии ВИЛ с внутриврезонаторными контактами [6], однако проблема повышенного последовательного сопротивления (особенно при малых размерах токовой апертуры) до сих пор актуальна [7].

Недавно нами была предложена конструкция ВИЛ с внутриврезонаторными контактами (далее ВК-ВИЛ) и выводным диэлектрическим РБО на основе  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ , в которой между внутриврезонаторными контактными слоями и светоизлучающей областью вставлены легированные композиционные решетки на основе нескольких пар четвертьволновых слоев  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  [8]. Несмотря на полученную эффективную лазерную генерацию для одномодовых приборов, экспериментальные значения порогового тока лазеров были несколько выше теоретических оценок и заметно выше по сравнению с аналогичными ВК-ВИЛ с выводным полупроводниковым РБО [9]. Было сделано предположение, что данный факт обусловлен недостаточной точностью совмещения оптической оси верхнего диэлектрического РБО с центром токовой апертуры. Однако последующая локальная диагностика приборной конструкции ВК-ВИЛ методом растровой электронной микроскопии, совмещенной с травлением ионным пучком, не подтвердила данную гипотезу. В то же время вопрос структурного и оптического качества диэлектрического РБО остался открытым. Настоящая статья посвящена исследованию возможности оптимизации конструкции диэлектрического РБО для создания высо-



**Рис. 1.** РЭМ-микротографии поперечного скола диэлектрических РБО на основе 5 пар  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  (a) и 6 пар  $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$  (b), сформированных реактивным магнетронным распылением. *BE* — режим обратнотраженных электронов. *SE* — режим вторичных электронов. Светлый контраст соответствует слоям  $\text{TiO}_2$  или  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , а темный — слоям  $\text{SiO}_2$ .

коэффициентных компактных источников лазерного излучения ближнего ИК-диапазона.

Отличительной особенностью технологического процесса изготовления ВК-ВИЛ с выводным диэлектрическим РБО, описанного в работе [8], является применение „взрывной“ технологии для локального формирования диэлектрических отражателей в заданной области ВК-ВИЛ. В качестве маски использовалась двухслойная композиция на основе фоторезистов LOR10B и AZ1518, а для осаждения диэлектрических слоев — технология реактивного магнетронного распыления при температуре  $\sim 70^\circ\text{C}$ . С учетом выбранного спектрального диапазона и применяемой технологии можно использовать следующие диэлектрические слои: диоксид кремния  $\text{SiO}_2$  (кварцевая мишень, распыление на переменном токе в атмосфере  $\text{O}_2$ ), диоксид титана  $\text{TiO}_2$  (титановая мишень, распыление на постоянном токе в атмосфере  $\text{O}_2$ ), оксид тантала  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  (танталовая мишень, распыление на постоянном токе в атмосфере  $\text{O}_2$ ), нитрид кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (кремниевая мишень, распыление на переменном токе в атмосфере  $\text{N}_2$ ).

На рис. 1, a представлено типичное изображение диэлектрического РБО на основе пяти пар четвертьволновых слоев  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  в геометрии поперечного сечения (110), полученное с помощью растровой

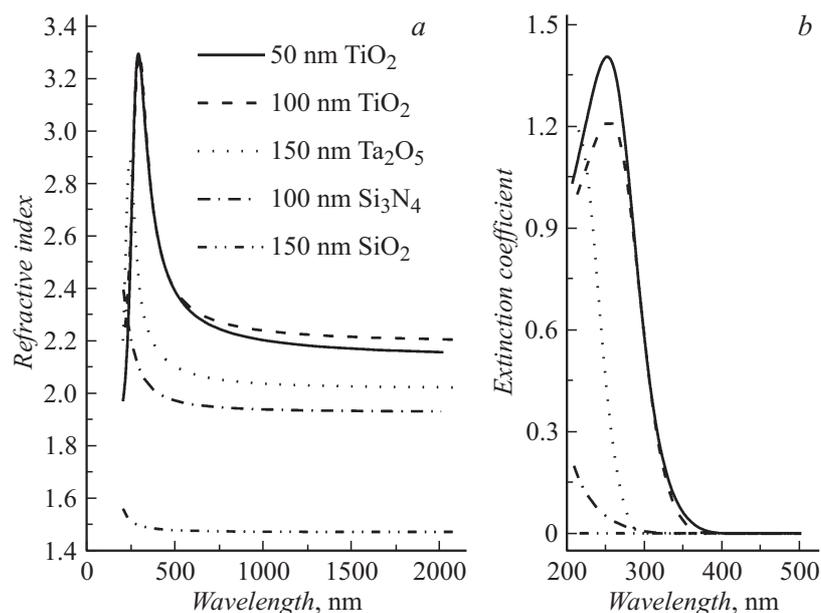
электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе CamScan S4-90FE. В режиме регистрации обратноотраженных электронов (композиционный контраст) исследуемая структура демонстрирует достаточно высокую однородность слоев по толщине и хорошую планарность интерфейсов, что свидетельствует о химической однородности диэлектрических слоев. Однако в режиме регистрации вторичных электронов (топографический контраст) слои  $\text{TiO}_2$  имеют выраженный рельеф поверхности, что, по-видимому, обусловлено наличием межфазных границ (поликристалличность или блочность), а не артефактами поперечного скола образца. Конкретный тип модификации поликристалла зависит от технологических режимов магнетронного распыления [10,11]. При этом в нашем частном случае формируется поликристаллический  $\text{TiO}_2$  анатазной модификации.

С целью анализа микрорельефа поверхности диэлектрических пленок были проведены исследования индивидуальных слоев методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе Veeco Dimension 3100. Сканирование осуществлялось в контактном режиме при комнатной температуре и влажности атмосферы  $\sim 20\%$  с использованием зондов RTESP с радиусом закругления 10 nm. Двумерное преобразование Фурье полученных изображений топографии поверхности позволяет определить функцию спектральной плотности, которая характеризует амплитуду поверхностной шероховатости в зависимости от пространственной частоты. Для статистического описания шероховатых поверхностей использовалось среднеквадратическое отклонение высот неровностей поверхности  $R_q$ , вычисленное путем интегрирования функции спектральной плотности мощности поверхности твердого тела [12,13]. Исследования показали, что шероховатость осажденных слоев аморфных  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  слабо зависит от толщины слоя (при толщинах исследуемых слоев до четверти длины волны в пределах рассматриваемого спектрального диапазона). Диэлектрические слои  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  имеют наименьшую шероховатость  $R_q \sim 0.2$  nm (на уровне атомных ступеней полупроводниковой подложки), тогда как шероховатость слоев  $\text{SiO}_2$  в 3–4 раза выше. Однако для поликристаллических слоев  $\text{TiO}_2$  наблюдается повышение шероховатости поверхности  $R_q$  с 0.4 до 1 nm при увеличении толщины слоя с 50 до 150 nm. При этом обнаружено, что шероховатость поверхности диэлектрических  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  РБО (5–7 пар) для спектрального диапазона 800 и 1300 nm лежит в пределах 3–4 nm, что в 3–4 раза выше

типичных значений шероховатости полупроводниковых легированных GaAs/AlGaAs РБО [14].

Для определения оптических и структурных параметров диэлектрических слоев использовался сканирующий спектральный фазово-модуляционный эллипсометр Horiba Uvisell 2. Измерения производились при комнатной температуре в диапазоне 0.6–6.5 eV при угле падения света 70°. Получаемые в ходе измерений эллипсометрические параметры характеризуют амплитуду ( $\Psi$ ) и фазу ( $\Delta$ ) отраженного светового луча. Для расчета характеристик исследуемых материалов использовалась модель дисперсии Таук–Лоренца [15]. Каждый образец был представлен в виде последовательности слоев: подложка, основной слой диэлектрика, поверхностный слой толщиной  $L_R$ , состоящий на 50% из никележащего диэлектрического слоя и на 50% из воздуха (т.н. трехслойная модель). Параметр  $L_R$  фактически описывает флуктуацию оптических параметров слоя на границе с воздухом и его шероховатость. При этом следует отметить, что значение величины шероховатости поверхности в эллипсометрии определяется на большей площади по сравнению с шероховатостью, определяемой с помощью метода АСМ (на микроуровне), однако для аморфных диэлектрических слоев наблюдается хорошая корреляция между данными оптической эллипсометрии и электромеханического профилирования методом АСМ. Для диэлектрических пленок SiO<sub>2</sub> и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> параметр  $L_R$  близок к нулю, в то время как для диэлектрических пленок TiO<sub>2</sub> его значение в 4–6 раз превышает значение параметра  $R_q$ . Учитывая поликристалличность диэлектрических пленок TiO<sub>2</sub>, параметр шероховатости  $L_R$  можно интерпретировать как индикатор флуктуации показателя преломления слоя TiO<sub>2</sub> по толщине слоя. Данный факт, по-видимому, ведет к диффузионному рассеянию света и некоторому снижению отражательной способности диэлектрических SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> РБО.

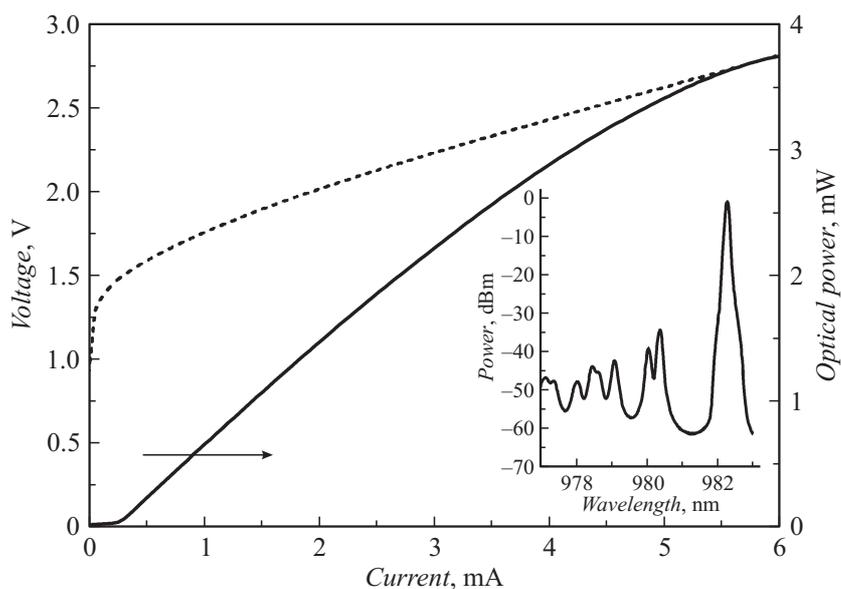
Для выбора альтернативной конструкции диэлектрического РБО для искомого спектрального диапазона были изучены оптические параметры диэлектрических пленок SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Измеренные зависимости показателя преломления и коэффициента экстинкции приведены на рис. 2. Поглощение в диэлектриках возможно лишь в ультрафиолетовой области, тогда как в диапазоне длин волн 500–2000 nm исследуемые материалы прозрачны. Следует отметить, что при малых толщинах диэлектрических пленок TiO<sub>2</sub>, когда блочная



**Рис. 2.** Зависимости показателя преломления (*a*) и коэффициента экстинкции (*b*) диэлектрических пленок, сформированных реактивным магнетронным распылением.

структура слоя неярко выражена, показатель преломления заметно меньше по сравнению с более толстыми слоями. Наименьшая разница в значениях показателей преломления по сравнению с аналогичным параметром для пары SiO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub> достигается для пары SiO<sub>2</sub>–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, в связи с чем ее использование менее перспективно.

Принимая во внимание результаты анализа шероховатости поверхности пленок и результаты измерений показателя преломления, выбор был сделан в пользу конструкции диэлектрического РБО на основе слоев SiO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. На рис. 1, *b* представлено типичное РЭМ-изображение такого диэлектрического РБО, содержащего шесть пар четвертьволновых слоев SiO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, в геометрии поперечного сечения (110). Можно отметить высокую воспроизводимость толщин слоев и планарность интерфейсов. Согласно исследованиям методом АСМ, шероховатость



**Рис. 3.** Типичные ватт- и вольт-амперные характеристики ВК-ВИЛ спектрального диапазона 980 nm с размером оксидной токовой апертуры  $3\ \mu\text{m}$ . На вставке приведен спектр лазерной генерации при токе накачки 4 mA. Измерения проведены при температуре  $20^\circ\text{C}$ .

поверхности диэлектрических  $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$  РБО (5–8 пар) спектрального диапазона 900–1000 nm не превышает 2 nm.

Приборная апробация оптимизированной конструкции диэлектрического РБО была проведена при изготовлении ВК-ВИЛ спектрального диапазона 980 nm. Эпитаксиальная структура ВК-ВИЛ состоит из верхнего внутрирезонаторного контактного слоя  $p\text{-GaAs}$ , композиционной решетки  $p\text{-GaAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  с одним апертурным слоем, микрорезонатора с активной областью на основе квантовых ям  $\text{InGaAs}$ , композиционной решетки  $n\text{-GaAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ , нижнего контактного слоя  $n\text{-GaAs}$  и нелегированного  $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  РБО. Особенности использованного технологического процесса изготовления ВК-ВИЛ приведены в [8]. На рис. 3 представлены типичные вольт- и ватт-амперные характеристики лазеров с характерным размером

оксидной токовой апертуры  $3 \mu\text{m}$ . Благодаря оригинальной конструкции ВК-ВИЛ, дифференциальное сопротивление реализованных приборов не превышает  $200 \Omega$ , что существенно ниже сопротивления приборов спектрального диапазона  $980 \text{ nm}$  с аналогичным размером токовой апертуры не только для геометрии ВИЛ с внутриврезонаторными контактами [7], но и для классической геометрии ВИЛ с легированными РБО [16], выращенных методом МПЭ. Более того, полученное сопротивление сравнимо с лучшими значениями для ВИЛ с полностью легированными РБО [17], выращенных методом МОГФЭ. Исследуемые ВК-ВИЛ демонстрируют лазерную генерацию с пороговым током менее  $0.27 \text{ mA}$  и дифференциальной эффективностью более  $0.8 \text{ W/A}$ . Анализ спектров лазерной генерации показал, что одномодовый режим генерации во всем диапазоне токов накачки с фактором подавления боковых мод более  $30 \text{ dB}$  сохраняется до токов  $\sim 4 \text{ mA}$  (см. вставку к рис. 3), что соответствует одномодовой мощности  $\sim 2.8 \text{ mW}$ . Одновременное достижение низких порогового тока и электрического сопротивления при высокой дифференциальной эффективности свидетельствует о низких внутренних потерях, связанных как с поглощением на свободных носителях в легированных слоях, так и с рассеянием света на оптических неоднородностях диэлектрического РБО.

Таким образом, проведенные исследования показали, что диэлектрические РБО на основе аморфных слоев  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , сформированных реактивным магнетронным распылением, одновременно обеспечивают малые шероховатость интерфейсов и флуктуацию показателя преломления и перспективны для применения в ВК-ВИЛ ближнего ИК-диапазона.

Авторы выражают благодарность ООО „Коннектор Оптик“ за помощь в синтезе эпитаксиальных структур и ОАО „ОКБ Планета“ за помощь в изготовлении ВИЛ. АСМ-измерения выполнены с использованием оборудования федерального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“.

Работа выполнялась при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной целевой программы „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы“, шифр 2014-14-579-0002, соглашение № 14.607.21.0001, уникальный идентификатор RFMEFI60714X0001.

## Список литературы

- [1] *Michalzik R.* VCSELs: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. Berlin: Springer-Verlag, 2013. P. 560.
- [2] *Knappe S., Shah V., Schwindt P.D.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2004. V. 85 (9). P. 1460.
- [3] *Schwindt P.D.D., Lindseth B., Knappe S.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 90 (8). P. 081 102.
- [4] *Lear K.L., Schneider R.P.* // *Appl. Phys. Lett.* 1996. V. 68 (5). P. 29.
- [5] *Newman P.G., Pamulapati J., Shen H.* et al. // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2000. V. 18 (3). P. 1619.
- [6] *Wilmsen C., Temkin H., Coldren L.A.* Vertical-cavity surface-emitting lasers. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. P. 474.
- [7] *Lin C.-H., Thibeault B.J., Zheng Y.* et al. // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2012. V. 31 (1). P. 011 205.
- [8] *Малеев Н.А., Кузьменков А.Г., Кулагина М.М.* и др. // *ФТП.* 2013. Т. 47. В. 7. С. 985–989.
- [9] *Малеев Н.А., Устинов В.М.* // Сборник статей 9-го Белорусско-Российского семинара „Полупроводниковые лазеры и системы на их основе“. 2013. С. 56–59.
- [10] *Zhang Y., Ma X., Chen P., Yang D.* // *J. Cryst. Growth.* 2005. V. 300 (2). P. 551.
- [11] *Meng L.-J., Teixeira V., Cui H.N.* et al. // *Appl. Surf. Sci.* 2006. V. 252 (22). P. 7970.
- [12] *Jakobs S., Duparre A., Truckenbrodt H.* // *Appl. Opt.* 1998. V. 37 (7). P. 1180.
- [13] *Вальковский Г.А., Байдакова М.В., Брунков П.Н.* и др. // *ФТТ.* 2013. Т. 55. В. 3. С. 591–601.
- [14] *Zhang Z., von Würtemberg R.M., Berggren J., Hammar M.* // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 91 (10). P. 101 101.
- [15] *Jellison G.E., Modine F.A.* // *Appl. Phys. Lett.* 1996. V. 69 (3). P. 371.
- [16] *Mutig A., Fiol G., Potschke K.* et al. // *J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2009. V. 15 (3). P. 679.
- [17] *Li H., Wolf P., Moser P.* et al. // *J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2015. V. 21 (6). P. 1 700 409.