

Поляризационные характеристики вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 850 нм с внутрирезонаторными контактами и ромбовидной оксидной токовой апертурой

© М.А. Бобров⁺, Н.А. Малеев⁺, С.А. Блохин⁺, А.Г. Кузьменков⁺⁺, А.А. Блохин⁺, А.П. Васильев⁺⁺, Ю.А. Гусева⁺, М.М. Кулагина⁺, Ю.М. Задиранов⁺, С.И. Трошков⁺, В. Лисак^{+△}, В.М. Устинов⁺⁺

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

^{*} Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

[△] Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 197101 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: bobrov.mikh@gmail.com

(Получена 14 апреля 2016 г. Принята к печати 20 апреля 2016 г.)

Проведены исследования поляризационных характеристик вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 850 нм с внутрирезонаторными контактами (далее ВК-ВИЛ) и ромбовидной формой оксидной токовой апертуры. Обнаружено, что поляризация излучения всегда фиксируется вдоль малой диагонали ромбовидной апертуры (вдоль кристаллографического направления $[110]$) для всех однододовых ВК-ВИЛ. Численное моделирование транспорта носителей заряда не выявило существенной анизотропии инжекции носителей в активную область. Более того, анализ пространственного распределения фундаментальной моды для двух ортогональных поляризаций в рамках модели эффективного волновода показал близкие значения поперечного фактора оптического перекрытия. Анизотропия оптических потерь в асимметричном микрорезонаторе и/или анизотропия усиления напряженной активной области, по-видимому, ответственны за эффект фиксации поляризации.

1. Введение

Полупроводниковые вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ, англ. vertical-cavity surface-emitting lasers — VCSELs) в настоящее время являются ключевыми компонентами для высокоскоростных (десятки Гбит/с) оптических каналов передачи данных на сравнительно небольшие (сотни метров) расстояния и оптических датчиков различного типа [1]. В ряде перспективных областей использования ВИЛ (спектроскопия, компактные атомные датчики и др.) требуется стабильная работа лазерного излучателя в однододовом режиме с фиксированным направлением поляризации. Базовая конструкция ВИЛ в системе AlGaAs/GaAs не позволяет надежно зафиксировать направление поляризации выходного излучения из-за симметричной (как правило, круглой) формы оксидной токовой апертуры. В настоящий момент наиболее широко используемым на практике методом контроля поляризации излучения ВИЛ является создание анизотропии отражения выводного зеркала путем формирования субволновой дифракционной решетки на поверхности выводного полупроводникового брэгговского отражателя [2]. Недостатками данного подхода являются относительно сложная технология изготовления и существенные дополнительные оптические потери.

Недавно была показана возможность контроля поляризации выходного излучения ВИЛ с внутрирезонаторными контактами (ВК-ВИЛ) и оксидной токовой апертурой ромбовидной формы [3]. В настоящей работе

представлены результаты экспериментальных исследований поляризационных характеристик таких приборов и предложено объяснение механизма фиксации направления поляризации выходного излучения на основе результатов численного моделирования.

2. Детали эксперимента

Получение методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) легированных распределенных брэгговских отражателей (РБО) с низкими внутренними потерями и электрическим сопротивлением требует использования сложных и тщательно оптимизированных профилей состава и легирования. В настоящем исследовании в качестве базовой приборной конструкции использована геометрия ВИЛ с внутрирезонаторными контактами (далее ВК-ВИЛ). С целью уменьшения оптических потерь на свободных носителях в легированных контактных слоях (особенно в слоях p -типа) и формирования эффективного омического контакта к полупроводниковым слоям $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ было предложено добавить несколько пар четвертьволновых слоев $Al_{0.15}Ga_{0.85}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ соответствующего типа легирования (так называемые композитные решетки) между внутрирезонаторными контактными слоями из $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ и светоизлучающей областью. Такие композитные решетки уменьшают интенсивность электромагнитного поля стоячей волны в сильно легированных внутрирезонаторных контактных

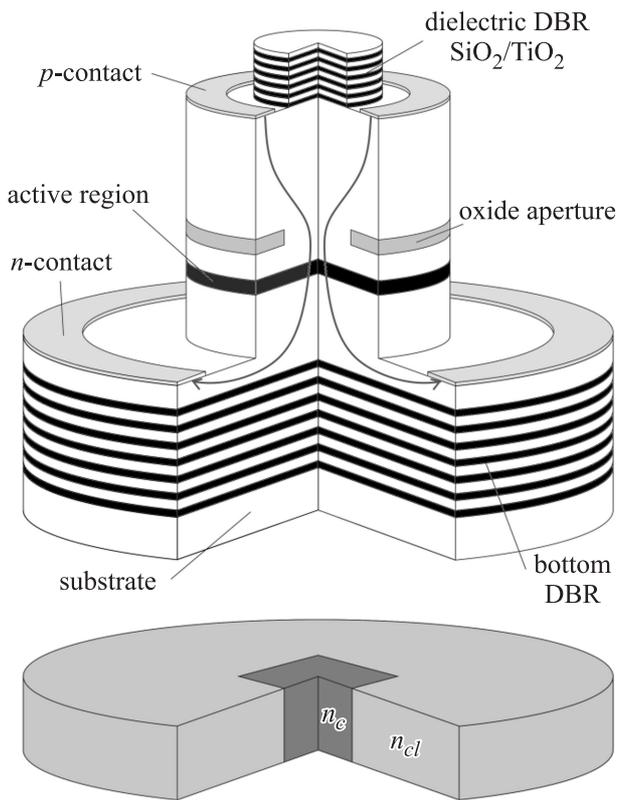


Рис. 1. Схематическое изображение ВК-ВИЛ с ромбовидной оксидной токовой апертурой. На вставке снизу приведено схематическое изображение эффективного волновода с ромбовидной сердцевиной.

слоях и обеспечивают эффективное растекание тока по площади токовой апертуры за счет наличия потенциальных барьеров (гетерограниц) для вертикального транспорта носителей заряда. На рис. 1 приведено схематическое изображение приборной конструкции исследуемых ВК-ВИЛ.

Эпитаксиальная структура ВК-ВИЛ спектрального диапазона 850 нм была выращена методом МПЭ на полуизолирующей подложке GaAs с ориентацией (001) и состоит из следующих частей: нижнего нелегированного $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ РБО, нижнего внутрирезонаторного контактного слоя $n\text{-Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$, нижней композитной решетки $n\text{-Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$, оптического микрорезонатора из AlGaAs с активной областью на основе пяти InGaAs квантовых ям (пик фотолюминесценции при комнатной температуре в диапазоне 830–835 нм), верхней композитной решетки $p\text{-Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$, верхнего внутрирезонаторного контактного слоя $p\text{-Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$. Верхняя композитная решетка содержит один апертурный слой $p\text{-AlAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$. Для предотвращения роста рабочего напряжения и последовательного сопротивления лазера вследствие наличия гетерограниц были использованы градиентные профили изменения состава в сочетании с модулированным легированием.

Планарная технология изготовления ВК-ВИЛ включает в себя следующие основные операции: формирование p -контакта, травление первой мезы, формирование оксидной токовой апертуры с помощью селективного окисления апертурного слоя, травление второй мезы, формирование n -контакта, формирование верхнего диэлектрического РБО на основе слоев $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ с помощью технологии магнетронного распыления, пассивация, планаризация и формирование контактных площадок. Особенности технологического процесса изготовления ВК-ВИЛ приведены в работе [4].

3. Результаты и обсуждение

Широкоапертурные ВК-ВИЛ демонстрируют эффективную лазерную генерацию в многомодовом режиме [4], однако при размерах токовой апертуры менее 2.5 мкм наблюдается переход в одномодовый режим генерации во всем диапазоне токов накачки и температур [5]. На рис. 2 представлены типичные спектры лазерной генерации ВК-ВИЛ с размером оксидной токовой апертуры около 2 мкм. Анализ картин ближнего поля в режиме спонтанного излучения (так называемый допороговый режим) выявил наличие ярко выраженной ромбовидной формы оксидной токовой апертуры с отношением диагоналей ~ 0.85 , что обусловлено анизотропией процесса селективного окисления слоев AlGaAs с высоким содержанием Al [6]. Более высокая скорость окисления апертурных слоев вдоль направления [100] по сравнению с направлением [110] жестко фиксирует ориентацию ромба: большая диагональ соответствует кристаллографическому направлению [110], тогда как малая диагональ — направлению $[\bar{1}10]$.

В работе [7] была показана принципиальная возможность контроля поляризации излучения в ВИЛ с легированными зеркалами и эллиптической оксидной апертурой, однако для надежной фиксации поляризации излучения ВИЛ необходимо использовать асимметричную схему токовой инжекции [8]. Аналогичный эффект можно ожидать и для ВК-ВИЛ с ромбовидной оксидной токовой апертурой. Для проверки этого предположения была экспериментально исследована степень поляризации излучения одномодовых ВК-ВИЛ с различной геометрией анодного контакта к внутрирезонаторному слою p -типа. На рис. 3 представлены результаты для ВК-ВИЛ с большой диагональю ромбовидной апертуры около 2 мкм для двух крайних вариантов ориентации токоподводящего электрода анодного контакта относительно ромбовидной токовой апертуры. Независимо от положения токоподводящего электрода выше порога генерации наблюдается фиксация поляризации излучения вдоль малой диагонали ромба (кристаллографическое направление $[\bar{1}10]$) с фактором подавления ортогональной поляризации (OPSR) более 20 дБ. Более того, данная закономерность наблюдается для всех одномодовых ВК-ВИЛ независимо от конкретного размера токовой апертуры.

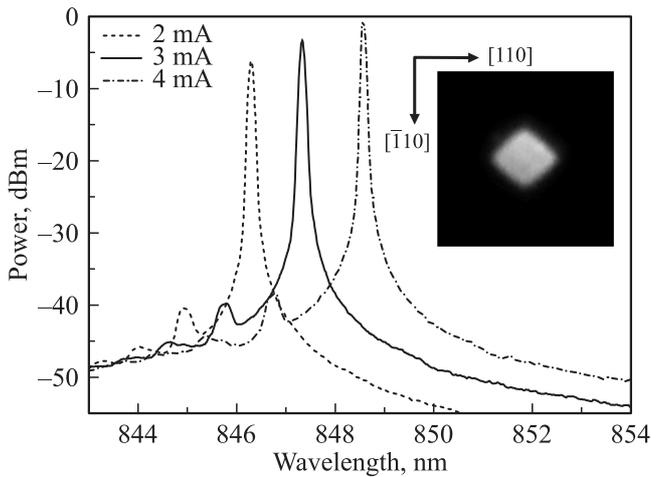


Рис. 2. Типичные спектры лазерной генерации одномодового ВК-ВИЛ с ромбовидной оксидной токовой апертурой при различных токах накачки. На вставке приведено изображение ближнего поля в допороговом режиме и указаны характерные кристаллографические направления. Размер большой диагонали апертуры около 2 мкм. Измерения проведены при температуре 20°C.

Обнаруженный эффект фиксации направления поляризации может быть обусловлен либо анизотропией усиления, обусловленной анизотропией свойств активной области [9,10] или анизотропией токовой инжекции [11,12], либо анизотропией оптических потерь за счет особенностей дифракции в поперечно-анизотропном микрорезонаторе [13–15] или анизотропии отражения выводного зеркала [16–18].

Поскольку исследуемые лазерные гетероструктуры были выращены на подложках (001) и содержат активную область на основе квантовых ям InGaAs, оптическое усиление активной области изотропно в плоскости квантовых ям [19]. Для исследуемой геометрии контактов можно предположить, что инжекция носителей заряда происходит ортогонально квантовым ямам, и вырождение усиления по поляризации не снимается. Однако наличие легированных композитных решеток между внутррезонаторными контактами и активной областью в совокупности с асимметричной формой токовой апертуры могут приводить к асимметричному распределению плотности носителей в активной области. Для проверки данной гипотезы были проведены численные расчеты распределения носителей в микрорезонаторе ВК-ВИЛ в рамках дрейфово-диффузионной 3D-модели в допороговом режиме (для исключения эффекта выжигания дырок, конкуренции мод и т.д.). Каждая легированная композитная решетка была аппроксимирована однородно легированным слоем соответствующего типа проводимости с анизотропией подвижности носителей заряда в рамках модели [20]. На рис. 4 представлены результаты моделирования пространственного распределения носителей для ВК-ВИЛ с разным размером ромбовидной оксидной токовой апертуры. Для относительно

больших размеров токовой апертуры, соответствующих многомодовому режиму генерации ВК-ВИЛ, наблюдается увеличение концентрации носителей вблизи острых углов ромба, что потенциально может способствовать фиксации поляризации вдоль большой диагонали ромба (кристаллографическое направление [110]). Однако при уменьшении размера токовой апертуры данный эффект ослабевает, а при размерах апертуры, соответствующих одномодовому режиму генерации ВК-ВИЛ, профиль распределения носителей заряда по площади апертуры становится практически симметричным и близким к гауссовскому, и, как следствие, анизотропия токовой инжекции не может быть использована в качестве объяснения наблюдаемой фиксации поляризации излучения вдоль малой диагонали ромба (вдоль кристаллографического направления $\bar{1}10$).

Для расчета оптических полей и анализа модового состава микрорезонатора ВК-ВИЛ с ромбовидной оксидной токовой апертурой использовался метод эф-

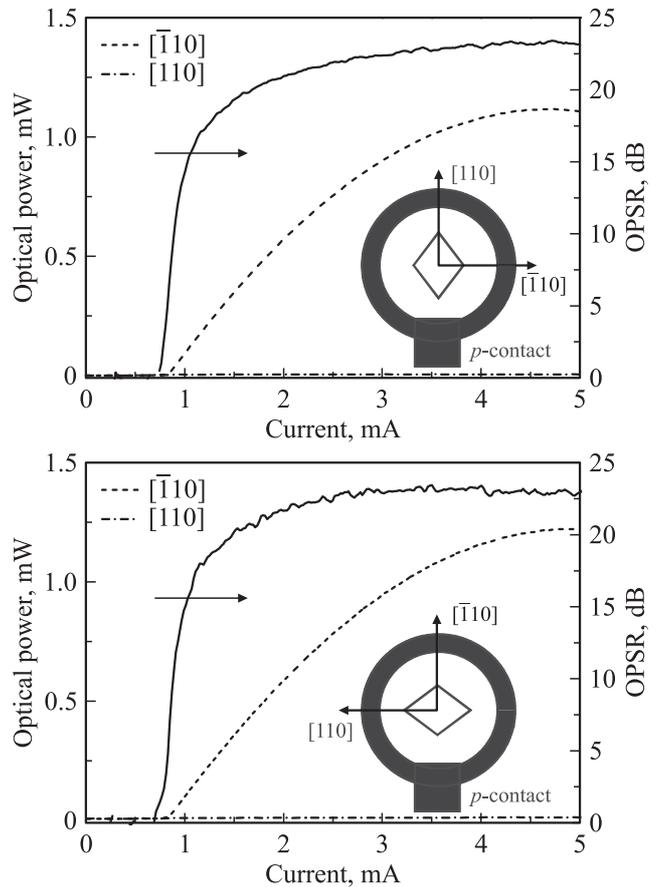


Рис. 3. Семейства ватт-амперных характеристик, измеренных для двух ортогональных направлений поляризации излучения, и зависимость коэффициента подавления ортогонально-поляризованной моды OPSR от тока накачки для ВК-ВИЛ с ромбовидной оксидной токовой апертурой. Приведены результаты для двух крайних вариантов топологии анодного контакта (схематическое изображение приведено на вставках). Размер большой диагонали апертуры около 2 мкм. Измерения проведены при температуре 20°C.

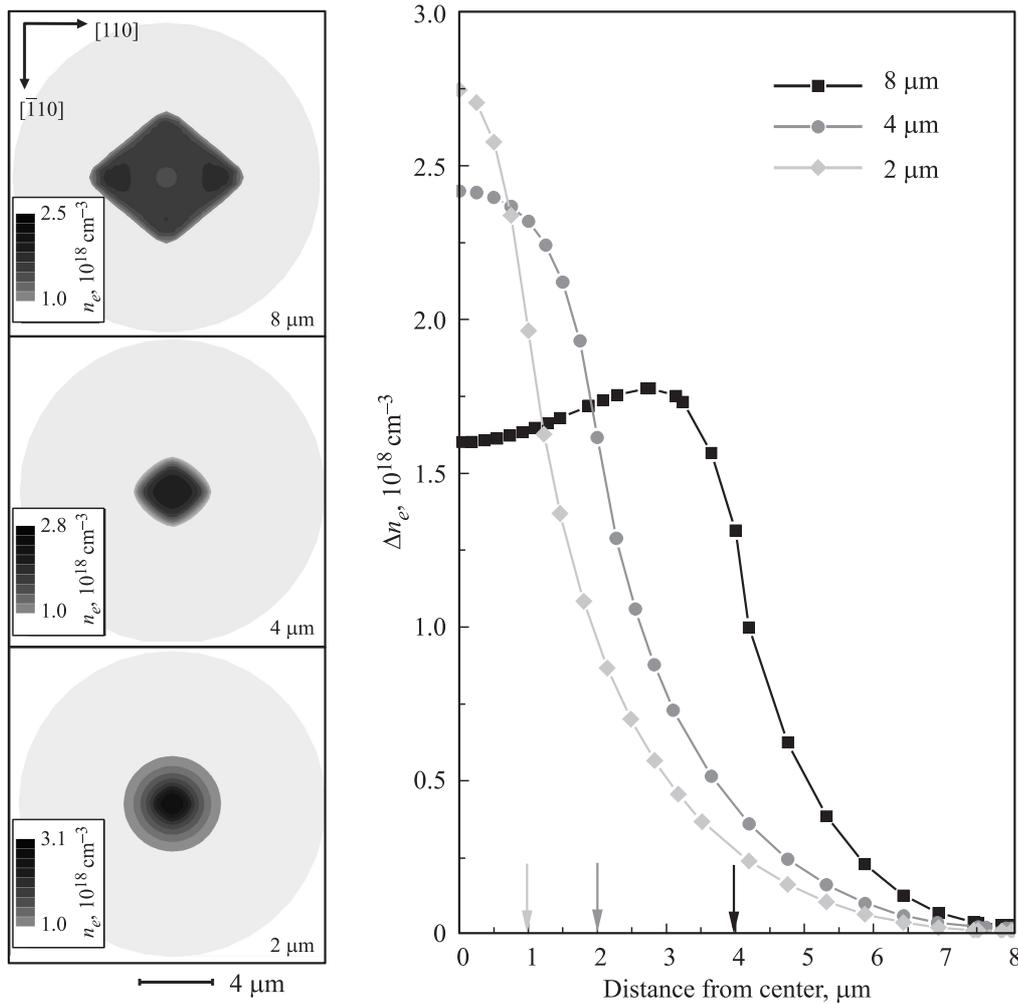


Рис. 4. Двумерные распределения концентрации электронов в плоскости квантовых ям (а) и соответствующие одномерные профили изменения концентрации электронов вдоль кристаллографического направления [110] (б) для ВК-ВИЛ с размером большой диагонали апертуры 8, 4 и 2 мкм соответственно, рассчитанные в рамках дрейфово-диффузионной 3D-модели в допороговом режиме. Стрелками обозначены границы токовых апертур.

фактивного волновода в рамках модели эффективного показателя преломления [21]. Схема профиля показателя преломления эффективного волновода (с показателями преломления сердцевин n_c и обкладки n_{cl} , равными 3.2434 и 3.1746 соответственно) приведена на рис. 1. Согласно результатам моделирования, в эффективном волноводе с ромбовидной сердцевиной существуют только гибридные моды. На рис. 5 показаны расчетные пространственные распределения интенсивности продольной компоненты электрического поля E_z (вдоль направления роста гетероструктуры) для возможных направлений поляризации фундаментальной моды. В отличие от случая эффективного волновода с круглой сердцевиной для фундаментальной моды возможно всего лишь два фиксированных направления поляризации, четко ориентированных вдоль диагоналей ромба. Однако анализ фактора оптического перекрытия расчетных профилей распределения поперечной компоненты электрического поля E_{xy} , лежащей в плоскости квантовых ям, с обла-

стью инжекции носителей заряда не выявил существенной разницы между двумя возможными направлениями поляризациями.

Таким образом, устойчивую фиксацию направления поляризации излучения исследуемых ВК-ВИЛ нельзя объяснить анизотропией усиления, связанной с неоднородностью инжекции носителей заряда в активную область или неоднородностью распределения электромагнитного поля моды, рассчитанной в рамках метода эффективного волновода. Можно предположить, что обнаруженный эффект связан с анизотропией оптических потерь. Ввиду того, что используемые РБО не обладают специфической анизотропией отражения, анизотропия потерь может быть обусловлена дифракцией на несимметричной (ромбовидной) оксидной токовой апертуре. Для проверки этого предположения было выполнено численное моделирование процесса распространения электромагнитного излучения от источника с гауссовым распределением интенсивности, хорошо аппроксимиру-

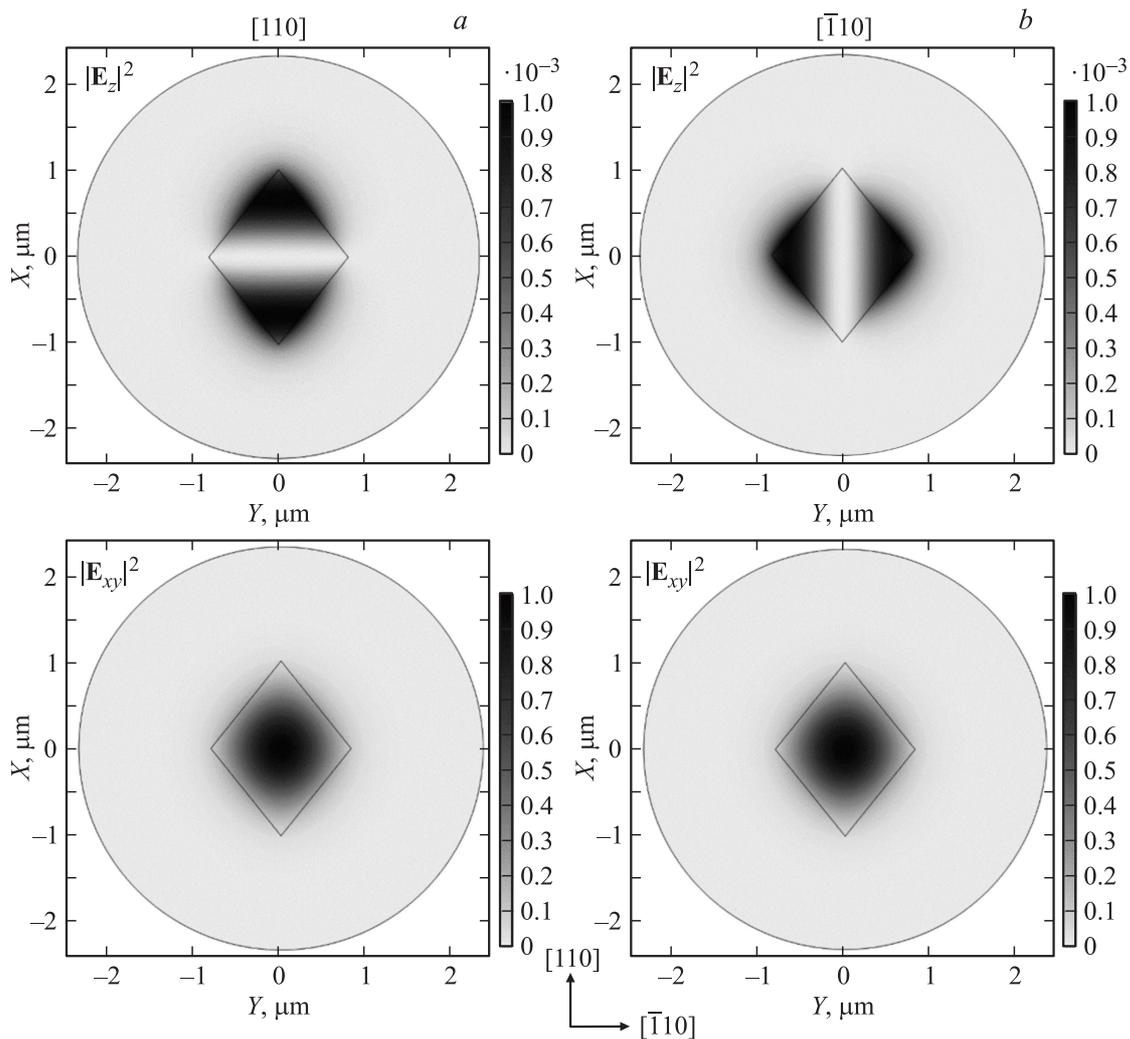


Рис. 5. Двумерные распределения интенсивности компонент электрического поля E_{xy} (в плоскости квантовых ям) и E_z (вдоль направления роста гетероструктуры) фундаментальной моды для поляризации излучения вдоль кристаллографического направления $[110]$ (a) и вдоль кристаллографического направления $[\bar{1}10]$ (b), рассчитанные в рамках метода эффективного волновода с ромбовидной сердцевиной. На вставке указаны характерные кристаллографические направления.

ющим расчетный профиль распределения инжектированных носителей по площади активной области для одномодовых приборов (см. рис. 4). Использовалась упрощенная модель, в рамках которой источник излучения располагался в объемном материале с однородным распределением показателя преломления, соответствующим $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$, напротив оксидной апертуры ромбовидной формы. Из результатов расчетов пространственных распределений компонент электрического поля для двух взаимно ортогональных поляризаций падающей электромагнитной волны следует, что для волны, поляризованной в направлении малой диагонали ромба, уровень дифракционных потерь оказывается несколько выше, чем для волны, поляризованной вдоль большой диагонали. В тоже время, спонтанное излучение исследуемых ВК-ВИЛ оказалось частично поляризованным, что может быть обусловлено появлением анизотропии усиления активной области, вследствие механических

напряжений в лазере. Для более точных количественных оценок и прогноза поведения поляризационных характеристик ВК-ВИЛ с ромбовидной оксидной апертурой при изменении конструктивных параметров необходимо детальное моделирование с учетом реальной конструкции оптического микрорезонатора.

4. Заключение

В настоящей работе представлены результаты исследований поляризационных характеристик вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 850 нм с внутрирезонаторными контактами и ромбовидной формой оксидной токовой апертуры. Экспериментально обнаружена устойчивая фиксация поляризация излучения одномодовых ВК-ВИЛ вдоль малой диагонали ромбовидной апертуры. Моделирование транспорта но-

сителей заряда не выявило существенной анизотропии инжекции в активную область. Анализ оптических мод в рамках модели эффективного волновода не позволяет связать фиксацию поляризации излучения ВК-ВИЛ с неоднородностью пространственного распределения интенсивности оптических мод. Можно предположить, что фиксация направления поляризации обусловлена анизотропией усиления активной области и/или анизотропией оптических потерь в вертикальном оптическом микрорезонаторе с ромбовидной оксидной токовой апертурой.

Авторы выражают благодарность ООО „Коннектор Оптик“ за помощь в синтезе эпитаксиальных структур и ОАО „ОКБ Планета“ за помощь в изготовлении ВК-ВИЛ.

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] R. Michalzik. VCSELs: *Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers* (Berlin, Springer-Verlag, 2013).
- [2] J.M. Ostermann, P. Debernardi, R. Michalzik. *IEEE J. Quant. Electron.*, **42**, 690 (2006).
- [3] M.A. Bobrov, N.A. Maleev, S.A. Blokhin, A.G. Kuzmenkov, A.P. Vasil'ev, A.A. Blokhin, M.M. Kulagina, Yu.A. Guseva, S.I. Troshkov, V.M. Ustinov. *3rd Int. School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures „Saint-Petersburg OPEN 2016“* Saint-Petersburg, Russia, 2016. Book of Abstracts, p. 194.
- [4] Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, М.М. Кулагина, Ю.М. Задиранов, А.П. Васильев, С.А. Блохин, А.С. Шуленков, С.И. Трошков, А.Г. Гладышев, А.М. Надточий, М.М. Павлов, М.А. Бобров, Д.Е. Назарук, В.М. Устинов. *ФТП*, **47**, 985 (2013).
- [5] Н.А. Малеев, М.А. Бобров, С.А. Блохин, А.Г. Кузьменков, М.М. Кулагина, Ю.М. Задиранов, А.А. Блохин, А.П. Васильев, А.Г. Гладышев, А.Г. Фефелов, В.М. Устинов. *10-й Белорусско-Российский семинар „Полупроводниковые лазеры и системы на их основе“*, Минск, Беларусь, 2015. Сборник статей, с. 18.
- [6] K.D. Choquette, K.M. Geib, C.I.H. Ashby, R.D. Twisten, O. Blum, H.Q. Hou, D.M. Follstaedt, B.E. Hammons, D. Mathes, R. Hull. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **3**, 916 (1997).
- [7] C.L. Chua, R.L. Thornton, D.W. Treat, R.M. Donaldson. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 1631 (1998).
- [8] N. Ueki, H. Nakayama, J. Sakurai, A. Murakami, H. Otoma, Y. Miyamoto, M. Yamamoto, R. Ishii, M. Yoshikawa, T. Nakamura. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, L33 (2001).
- [9] N. Nishiyama, M. Arai, S. Shinada, M. Azuchi, T. Miyamoto, F. Koyama, K. Iga. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **7**, 242 (2001).
- [10] H. Uenohara, K. Tateno, T. Kagawa, Y. Ohiso, H. Tsuda, T. Kurokawa, C. Amano. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11**, 400 (1999).
- [11] G. Verschaffelt, W. van der Vleuten, M. Creusen, E. Smalbrugge, T.G. van de Roer, F. Karouta, R.C. Strijbos, J. Danckaert, I. Veretennicoff, B. Ryykin, H. Thienpont, G.A. Acket. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **12**, 945 (2000).
- [12] Y. Sato, K. Furuta, T. Katayama, H. Kawaguchi. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **20**, 1446 (2008).
- [13] K.-H. Ha, Y.-H. Lee, H.-K. Shin, K.-H. Lee, S.-M. Whang. *Electron. Lett.*, **34**, 1401 (1998).
- [14] S. Riyopoulos, E. Nhan. *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 3038 (2004).
- [15] D.F. Siriani, P.O. Leisher, K.D. Choquette. *IEEE J. Quant. Electron.*, **45**, 762 (2009).
- [16] P. Debernardi, H.J. Unold, J. Maehns, R. Michalzik, G.P. Bava, K.J. Ebeling. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **9**, 1394 (2003).
- [17] M.C.Y. Huang, Y. Zhou, C.J. Chang-Hasnain. *Nature Photonics*, **1**, 119 (2007).
- [18] J.M. Ostermann, P. Debernardi, C. Jalics, R. Michalzik. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **11**, 982 (2005).
- [19] T. Ohtoshi, T. Kuroda, A. Niwa, S. Tsuji. *Appl. Phys. Lett.*, **65**, 1886 (1994).
- [20] J. Piprek. *Phys. Status Solidi A* **188**, 905 (2001).
- [21] G.R. Hadley. *Optics Lett.*, **20**, 1483 (1995).

Редактор Г.А. Оганесян

Polarization characteristics of 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers with intra-cavity contacts and rhomboidal oxide current aperture

M.A. Bobrov⁺, N.A. Maleev⁺, S.A. Blokhin⁺, A.G. Kuzmenkov⁺, A.P. Vasil'ev⁺, A.A. Blokhin⁺, Yu.A. Guseva⁺, M.M. Kulagina⁺, Yu.M. Zadiranov⁺, S.I. Troshkov⁺, V. Lysak^{+△}, V.M. Ustinov⁺

⁺ Ioffe Institute,

194021 St. Petersburg, Russia

^{*} Submicron Heterostructures for Microelectronics, Research & Engineering Center of the Russian Academy of Sciences,

194021 St. Petersburg, Russia

[△] St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 197101 St. Petersburg, Russia

Abstract Polarization characteristics of 850 nm intracavity-contacted vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) with rhomboidal-shape oxide current aperture have been studied. The emission polarization is always along the minor diagonal of the rhomboidal-shape aperture (along the $[\bar{1}10]$ direction) for all single-mode VCSELs. Numerical modelling of carrier transport did not reveal any sufficient injection anisotropy in the laser active region. Moreover, the analysis of the spatial distribution of fundamental mode for two orthogonal polarizations by using an effective waveguide approach led to similar values of the transverse optical confinement factor. Optical loss anisotropy in the asymmetric microcavity and/or gain anisotropy in the strained active region are the most likely mechanisms responsible for fixing the polarization.