

Вытекание излучения из волновода мощных полупроводниковых AlGaAs/InGaAs/GaAs-лазеров

Ю.К.Бобрецова, Д.А.Веселов, А.А.Климов, В.А.Крючков,
И.С.Шашкин, С.О.Слипченко, Н.А.Пихтин

Исследованы лазеры на основе гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs спектрального диапазона 1.0–1.1 мкм с целью оптимизации эмиттерных слоев. Проанализировано влияние толщины и состава эмиттерных слоев на вытекание излучения из волновода лазера. Показано, что при толщинах эмиттеров 0.86–1.24 мкм оно практически не влияет на мощность излучения лазера. Продемонстрировано влияние длины кристалла и коэффициентов отражения зеркал лазера на вытекание излучения.

Ключевые слова: лазерные диоды, спектральный диапазон 1.0–1.1 мкм, вытекание излучения.

1. Введение

Широкий спектр применений мощных полупроводниковых лазеров обусловлен их уникальными особенностями: большим диапазоном длин волн, компактностью, высоким КПД, возможностью модуляции оптической мощности. Оптимизация составов и толщин эпитаксиальных слоев лазерной гетероструктуры позволяет существенно улучшить характеристики излучателя. Так, торцевые лазеры на основе двойной гетероструктуры GaAs с отдельным ограничением (ДГС РО), которым посвящено настоящее исследование, продемонстрировали мощность излучения 30 Вт в непрерывном режиме работы на длине волны 976 нм [1].

Наибольшее внимание уделяется оптимизации волноводных слоев и активной области [2, 3], тогда как эмиттерные слои рассматриваются редко, поскольку они служат только для ограничения оптического излучения и транспорта носителей заряда к активной области. Однако очевидно, что минимизация толщины эмиттеров лазерной гетероструктуры должна приводить как к улучшению электрических и тепловых характеристик, так и к уменьшению продолжительности и увеличению эффективности процесса роста, что особенно актуально для крупного производства.

Оптимизация толщины эмиттеров необходима для источников излучения на основе эпитаксиально-интегрированных гетероструктур, таких как туннельно-связанные лазерные гетероструктуры, лазеры-тиристоры и т. п. [4, 5]. От общей толщины этих гетероструктур зависит оптимальность проведения постростовых операций по формированию мезаполосковой структуры активного элемента [6]. Такие лазеры имеют сложные конструкции, состоящие из нескольких отдельных излучателей и р–n-переходов, поэто-

му уменьшение толщины излучателя может существенно повлиять на общие характеристики гетероструктуры.

Настоящая работа посвящена исследованию и оптимизации толщин эмиттерных слоев в мощных полупроводниковых AlGaAs/InGaAs/GaAs-лазерах (длина волны $\lambda = 1060$ нм) на основе асимметричных ДГС РО с квантовой ямой (КЯ) и расширенным волноводом.

В планарных полупроводниковых лазерах естественным ограничением минимальной толщины эмиттера является вытекание оптической моды из волновода. При чрезмерном уменьшении толщины n-эмиттера он перестает удерживать оптическое излучение в волноводе, и часть излучения начинает распространяться в подложке. Этот эффект используется в лазерах, работающих на вытекающей моде, которые отличаются малой расходимостью излучения. К настоящему времени проведен ряд теоретических и экспериментальных работ, посвященных увеличению эффективности вывода вытекающей моды [7–10]. Чаще всего для этого используется очень тонкий (около 70 нм) слой n-эмиттера, что обеспечивает эффективное туннелирование излучения в подложку [7].

В работе [8] исследовались характеристики одномодовых InGaAs/GaAs-лазеров ($\lambda = 0.98$ мкм) с волноводом из $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ толщиной около 0.2 мкм, различающихся составом и толщинами эмиттеров. Было обнаружено, что при толщине эмиттеров менее 1.32 мкм наблюдается вытекание моды. При этом, по расчетам, изменение толщин эмиттерных слоев заметно не меняет угол выхода вытекающего излучения, тогда как составы волноводных и эмиттерных слоев существенно влияют на его величину.

Исследование диаграмм направленности излучения в зависимости от толщины n-эмиттера лазеров на основе InGaAs/GaAs с GaAs-волноводом толщиной около 1 мкм, проведенное в работе [9], показало, что при толщине n-эмиттера 2 мкм вытекание моды не наблюдалось, тогда как при толщинах 0.66, 0.55 и 0.42 мкм на картинах дальнего поля присутствовали четко различимые пики, соответствующие вытекающему излучению. Максимальная мощность вытекающего излучения для образцов с наименьшей толщиной эмиттера составила 65 мВт (при апертуре излучающей области 100 мкм), а измеренная мини-

Ю.К.Бобрецова, Д.А.Веселов, А.А.Климов, В.А.Крючков, И.С.Шашкин, С.О.Слипченко, Н.А.Пихтин. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; e-mail: bobre-yulya@yandex.ru

Поступила в редакцию 10 марта 2020 г.

мальная ширина пика на полувысоте равнялась 0.45° . Поскольку в [9] исследовался небольшой диапазон толщин эмиттеров, трудно оценить минимальную толщину, при которой вытекание наблюдаться не будет. Исследования лазеров, работающих на вытекающей моде, не позволяют сделать однозначный вывод об оптимальных толщинах эмиттеров для современных мощных полупроводниковых лазеров с широким волноводом.

В настоящей работе экспериментально исследуется вытекание моды в пограничных условиях, когда оно уже наблюдается, но еще не оказывает значительного влияния на мощность излучения лазера. Основная задача состоит в исследовании параметров и факторов, влияющих на эффект вытекания.

2. Экспериментальные образцы и методики экспериментов

Лазеры изготавливались на основе выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии ДГС РО с квантово-размерными активными областями в системе твердых растворов AlGaAs/GaAs/InGaAs. Параметры всех выращенных гетероструктур приведены в табл.1. Все гетероструктуры имеют $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ -волновод толщиной 1.7 мкм с одной квантовой ямой InGaAs толщиной 90 Å, излучающей на $\lambda = 1060$ нм. Гетероструктуры 1, 2 и 3 имеют эмиттерные AlGaAs-слои с 27%-ным содержанием алюминия и отличаются друг от друга только толщиной p-эмиттера. Толщины эмиттеров всех гетероструктур были измерены на электронном сканирующем микроскопе и составили 0.86, 0.93 и 1.24 мкм для гетероструктур 1, 2 и 3 соответственно. Толщина p-эмиттера $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ гетероструктуры 4 равна 0.96 мкм.

Лазеры изготавливались по стандартной технологии «глубокая меза» с шириной апертуры 100 мкм, ограниченной протравленными сквозь гетероструктуру наклонными мезами. Для измерений были изготовлены лазеры с различными длинами резонаторов и коэффициентами отражения зеркал.

На первом этапе исследований измерялось распределение интенсивности излучения в дальней зоне по быстрой оси для выявления наличия вытекающей моды. Лазер устанавливался на поворотную платформу, мощность его излучения, проходящего через регулирующую щель, регистрировалась детектором в зависимости от угловой координаты.

На втором этапе проводились измерения как общей выходной оптической мощности P_{sum} , так и отдельно мощности излучения вытекающей моды P_{leak} . Лазеры работали в непрерывном режиме, мощность измерялась болометром. Для регистрации мощности вытекающей моды основное излучение отрезалось охлаждаемой шторкой.

На третьем этапе исследований регистрировались спектры генерации основного и вытекающего излучения. Усредненное интегрирующей сферой излучение вводилось в оптоволокно и регистрировалось спектронализатором.

Все измерения проводились в непрерывном режиме при нескольких значениях тока инжекции в диапазоне до 10 А при температуре 25°C , поддерживаемой на теплоотводе лазера.

3. Описание экспериментов и обсуждение результатов

Диаграммы направленности излучения в дальней зоне по быстрой оси, полученные для образцов лазеров на основе гетероструктур 1–4 (далее лазеры 1–4) с длиной резонатора 3 мм и зеркалами, образованными естественными сколами ($R = 0.3$), представлены на рис.1. Лазеры

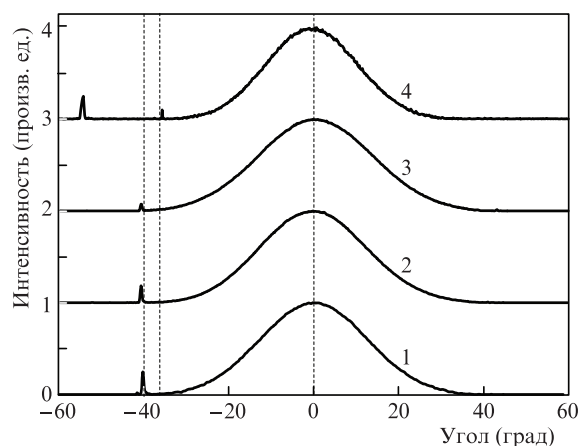


Рис.1. Диаграммы направленности излучения в дальней зоне по быстрой оси лазеров 1–4. Вертикальными пунктирными линиями обозначены рассчитанные углы выхода вытекающего излучения.

Табл.1. Конструкции, состав и толщины слоев исследуемых гетероструктур.

Слой	Гетероструктура			
	1	2	3	4
Подложка	GaAs	GaAs	GaAs	GaAs
Буферный слой	GaAs	GaAs	GaAs	GaAs
p-эмиттер	$\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{As}$, 0.86 мкм	$\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{As}$, 0.93 мкм	$\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{As}$, 1.24 мкм	$\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$, 0.96 мкм
Волновод	$\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, 1.05 мкм	$\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, 1.05 мкм	$\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, 1.05 мкм	$\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, 1.05 мкм
Активная область	КЯ InGaAs, 90 Å Спейсеры GaAs, 100 Å	КЯ InGaAs, 90 Å Спейсеры GaAs, 100 Å	КЯ InGaAs, 90 Å Спейсеры GaAs, 100 Å	КЯ InGaAs, 90 Å Спейсеры GaAs, 100 Å
Волновод	$\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, 0.65 мкм	$\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, 0.65 мкм	$\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, 0.65 мкм	$\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, 0.65 мкм
p-эмиттер	$\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{As}$, 1.1 мкм	$\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{As}$, 1.1 мкм	$\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{As}$, 1.1 мкм	$\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$, 1.1 мкм
Контактный слой	GaAs, 0.3 мкм	GaAs, 0.3 мкм	GaAs, 0.3 мкм	GaAs, 0.3 мкм

1–3 демонстрируют устойчивую генерацию на нулевой поперечной моде во всем диапазоне токов накачки (до 10 А) с расходимостью излучения около 30° на полувысоте. Расходимость излучения лазера 4 немного меньше (примерно 25°) из-за более слабого волновода.

У лазеров 1–3 на диаграмме направленности наблюдается отдельный узкий пик в области отрицательных углов расходимости (в сторону п-эмиттера), соответствующий излучению вытекающей моды, а у лазера 4 – несколько пиков. Положение первого пика у лазеров 1, 2 и 3 с п-эмиттером $\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{As}$ практически одинаковое (угол около 40°), у лазера 4 первый пик наблюдается под углом 36° , а второй – под углом 56° . Расходимость излучения вытекающей моды лазеров 1–3 составляет около 0.5° на полувысоте, что аналогично результатам [9].

Известно [8], что угол, под которым наблюдается пик излучения вытекающей моды, не должен значительно меняться при изменении толщины эмиттеров, что и имеет место для лазеров 1–3. Заметное изменение положения пика происходит вследствие изменения состава волноводных или эмиттерных слоев и соответствующего изменения эффективного волноводного показателя преломления моды [10]. Поскольку волноводы у всех лазеров одинаковые, то в нашем случае смещение пика лазера 4 обусловлено уменьшением содержания алюминия в эмиттере.

Угловые распределения интенсивности излучения в зависимости от тока накачки представлены на рис.2 для лазера 2. Видно, что величина тока практически не влияет на положение пика вытекающей моды. Аналогичные результаты были получены и для лазеров на основе гетероструктур 1, 3 и 4.

Угол выхода вытекающего излучения θ можно рассчитать по формуле [9]:

$$\theta = \arcsin \sqrt{n_s^2 - n_{\text{eff}}^2}, \quad (1)$$

где n_s – показатель преломления подложки; n_{eff} – эффективный показатель преломления гетероструктуры. Рассчитанный по данной формуле угол θ для лазеров 1–3 составляет 40.2° , а для лазера 4 – 36.1° , что отлично согласуется с полученными экспериментальными данными. Очевидно, что у лазера 4 для излучения, выходящего под углом 56° , эффективный показатель преломления меньше. Вероятно, он соответствует моде более высокого порядка, которая, по определению, характеризуется сильным

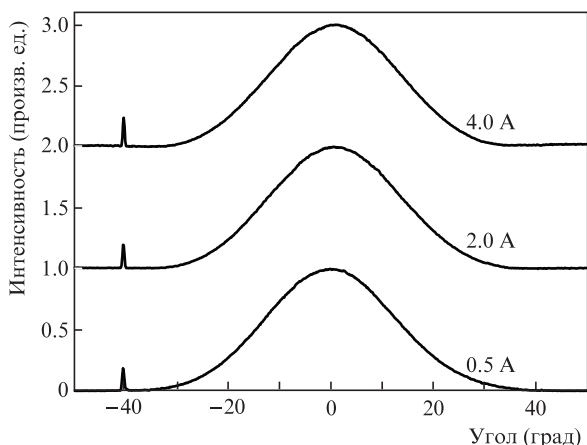


Рис.2. Диаграммы направленности излучения в дальней зоне по быстрой оси лазера 2 при различных токах накачки.

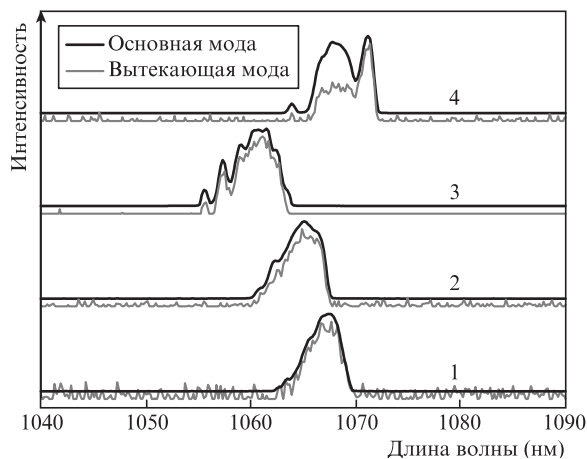


Рис.3. Спектры генерации лазеров 1–4, снятые при одинаковых токах накачки.

вытеканием. Излучение такой моды может слабо проявляться в основном лепестке диаграммы направленности вследствие ее малой мощности из-за высоких оптических потерь.

Косвенно это подтверждается спектрами лазерной генерации, измеренными отдельно для основного лепестка диаграммы направленности и вытекающего излучения (рис.3). Черной линией на рисунке обозначены спектры генерации основного излучения исследуемых лазеров, серой – спектры вытекающего излучения. Проведенные при нескольких уровнях тока накачки измерения показали, что с ростом тока спектры расширяются и сдвигаются в более длинноволновую область, однако качественных изменений при этом не наблюдается. Спектры основного и вытекающего излучения лазеров 1–3 полностью совпадают во всем диапазоне токов накачки, тогда как спектры лазера 4 заметно отличаются. Скорее всего, это обусловлено именно присутствием в спектре вытекающего излучения моды высшего порядка.

Параметром, которым можно охарактеризовать лазер на вытекающей моде, является коэффициент K [11], равный отношению мощности вытекающего излучения к мощности излучения, распространяющегося в волноводе (внутри резонатора Фабри–Перо). В нашей работе удобнее оценивать лазер по доле вытекающего излучения – отношению мощности вытекающей моды к полной мощности выходного излучения. Были исследованы лазеры с различными длинами резонаторов и коэффициентами отражения зеркал для определения их влияния на долю вытекающего излучения. На рис.4 представлены типичные токовые зависимости обеих мощностей для лазера с длиной резонатора 3 мм и диэлектрическими покрытиями с $R = 0.05$ и 0.95 .

Для удобства сравнения доли вытекающего излучения исследуемых лазеров были проведены измерения мощностных характеристик образцов с длиной резонатора 3 мм и коэффициентами отражения зеркал $R = 30\%$. В табл.2 приведены средние значения лазерной мощности в обе стороны при токе накачки 5 А и рассчитанные доли вытекающего излучения. Значения внутренних оптических потерь вблизи порога генерации (табл.2), определенные стандартным методом, для лазеров 1–3 находятся практически на одном уровне, тогда как у лазера 4 потери выше. Это объясняется его более слабым волноводом, что

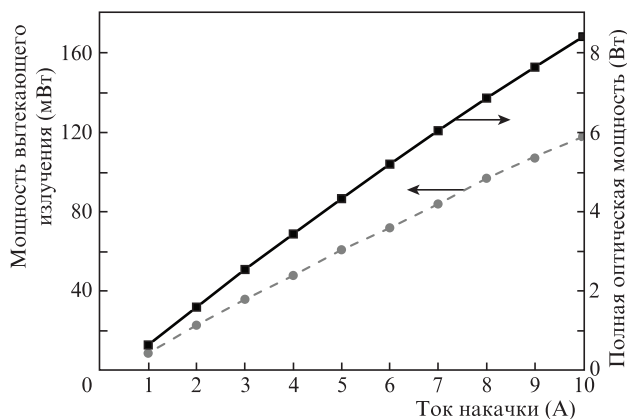


Рис.4. Ватт-амперные характеристики лазера 2, снятые в непрерывном режиме генерации при $T = 25^\circ\text{C}$; длина резонатора 3 мм, апертура 100 мкм, коэффициенты отражения зеркал $R = 0.05$ и 0.95 .

Табл.2. Мощностные характеристики лазеров 1–4; длина резонатора 3 мм, ток накачки 5 А.

Лазер	Толщина п-эмиттера (мкм)	Внутренние оптические потери (cm^{-1})	P_{sum} (Вт)	P_{leak} (мВт)	$P_{\text{leak}}/P_{\text{sum}}$ (%)
1	0.86	0.6	4.354	74	1.70
2	0.93	0.6	4.402	44	1.00
3	1.24	0.8	4.114	5.3	0.13
4	0.96	1.2	3.828	86	2.28

позволяет оптическому полю глубже проникать в сильно-легированные эмиттеры и, соответственно, поглощаться на свободных носителях.

Лазер на основе гетероструктуры 3 с толстым п-эмиттером (1.24 мкм) имеет наименьшую долю вытекающего излучения – 0.13%, а для лазера 4 с $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ -эмиттером толщиной 0.96 мкм эта доля составляет 2.28%. В целом, полученные результаты прекрасно коррелируют с особенностями конструкций гетероструктур. Ослабление оптического волновода (уменьшение содержания алюминия в эмиттере) приводит к увеличению вытекания моды; увеличение толщины п-эмиттера до 1.24 мкм позволяет минимизировать этот эффект.

Исследования мощностных характеристик лазеров показали, что ток накачки практически не влияет на долю вытекающего излучения (рис.5). В принципе, рост тока накачки, а следовательно, температуры и концентрации носителей заряда, должен приводить к изменению показателя преломления слоев гетероструктуры. Однако на практике оказалось, что это изменение недостаточно велико для того, чтобы заметно повлиять на величину вытекающего излучения.

Влияние длины резонатора и коэффициентов отражения зеркал на долю вытекающей мощности продемонстрированы на рис.6 на примере нескольких образцов лазеров 2. С увеличением длины резонатора увеличивается и доля вытекающего излучения. Такие зависимости были теоретически предсказаны в работе [11]. Также было установлено, что у лазеров с диэлектрическими покрытиями зеркал ($R = 0.05$ и 0.95) доля вытекающего излучения несколько больше, чем у лазеров с зеркалами, полученными сколом. С одной стороны, увеличение доли вытекающей мощности можно объяснить изменением соотношения потерь на выход основного и вытекающего излу-

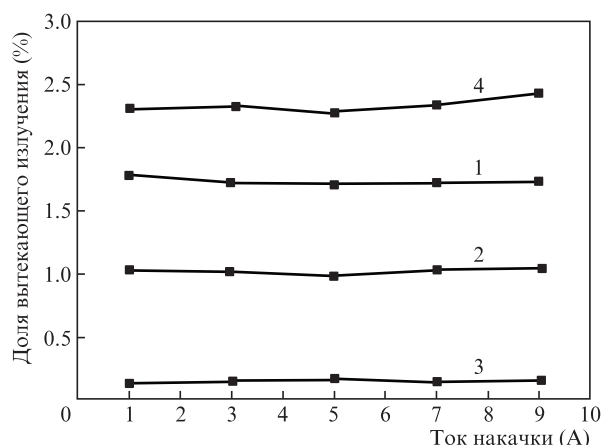


Рис.5. Зависимости доли вытекающего излучения от тока накачки для лазеров 1–4 с длиной резонатора 3 мм.

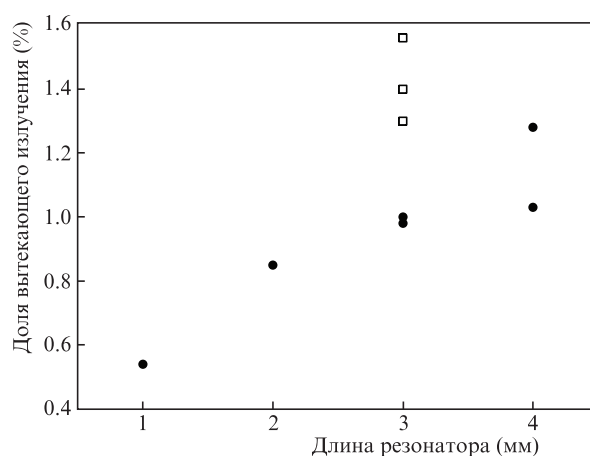


Рис.6. Зависимости доли вытекающего излучения от длины резонатора при коэффициентах отражения зеркал $R_1 = 0.05$, $R_2 = 0.95$ (□) и $R_{1,2} = 0.3$ (●) для нескольких лазеров на основе гетероструктуры 2.

чения. С другой стороны, важно помнить, что в лазерах с глухим и просветленным зеркалами изменяется распределение оптического поля вдоль оси резонатора – максимум его распределения практически приходится на выходное зеркало, что также может влиять на распределение оптических потерь вытекающей моды.

4. Заключение

Показано, что полные мощности излучения лазеров на основе гетероструктур со стандартным сильным волноводом практически одинаковы, а доли вытекающей мощности у них составляют единицы процентов. Мощность вытекающего излучения лазерной структуры с наименьшей толщиной эмиттера не превысила 150 мВт при токе накачки 10 А и полной мощности 8 Вт. Таким образом, наличие вытекающего излучения у этих лазеров не отразилось на полной выходной оптической мощности и не вызвало значительных оптических потерь. При необходимости в лазерах можно использовать эмиттеры толщиной до 1 мкм и при этом иметь высокие выходные мощности излучения, однако при проектировании лазера нужно будет учитывать наличие вытекания. Установлено, что параметры лазерного резонатора сильно влияют на долю вытекающей мощности, что особенно важно для

длинных (до 6 мм) кристаллов с сильным просветлением выходных зеркал, используемых для достижения рекордных мощностей излучения [1].

Для лазеров с малым скачком показателя преломления на границе волновод – эмиттер эффект вытекания усиливается и может привести как к снижению мощности, так и к появлению особенностей модовой структуры излучения. Для таких лазеров эмиттер необходимо изготавливать более толстым или использовать другие средства для локализации оптического поля в волноводе. Если побочный пик в диаграмме направленности излучения необходимо подавить, то следует использовать либо более сильный волновод, либо более толстый p-эмиттер.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 19-79-30072.

1. Gapontsev V., Moshegov N., Berezin I., Komissarov A., Trubenko P., Miftakhutdinov D., Berishev I., Chuyanov V., Raisky O., Ovtchinnikov A. *Proc. SPIE*, **10086**, 1008604 (2017).
2. Pietrzak A., Crump P., Wenzel H., Staske R., Erbert G., Tränkle G. *Semicond. Sci. Technol.*, **24** (3), 035020 (2009).
3. Hasler K.H., Wenzel H., Crump P., Knigge S., Maasdorf A., Platz R., Staske R., Erbert G. *Semicond. Sci. Technol.*, **29** (4), 045010 (2014).
4. Тарасов И.С. *Квантовая электроника*, **40** (8), 661 (2010) [*Quantum Electron.*, **40** (8), 661 (2010)].
5. Багаев Т.А., Ладугин М.А., Падалица А.А., Мармалюк А.А., Курнявко Ю.В., Лобинцов А.В., Данилов А.И., Сапожников С.М., Кричевский В.В., Зверков М.В., Коняев В.П., Симаков В.А., Слипченко С.О., Подоскин А.А., Пихтин Н.А. *Квантовая электроника*, **49** (11), 1011 (2019) [*Quantum Electron.*, **49** (11), 1011 (2019)].
6. Винокуров Д.А., Коняев В.П., Ладугин М.А., Лютецкий А.В., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Петрунов А.Н., Пихтин Н.А., Симаков В.А. и др. *Физика и техника полупроводников*, **44** (2), 251 (2010).
7. Некоркин С.М., Звонков Б.Н., Колесников М.Н., Дикарёва Н.В., Алёшкин В.Я., Дубинов А.А. *Вестник Нижегород. ун-та им. Н.И.Лобачевского*, **1** (1), 30 (2012).
8. Аржанов Э.В., Богатов А.П., Коняев В.П., Никитина О.М., Швейкин В.И. *Квантовая электроника*, **21** (7), 633 (1994) [*Quantum Electron.*, **24** (7), 581 (1994)].
9. Швейкин В.И., Богатов А.П., Дракин А.Е., Курнявко Ю.В. *Квантовая электроника*, **26** (1), 33 (1999) [*Quantum Electron.*, **26** (1), 33 (1999)].
10. Богатов А.П., Дракин А.Е., Лях А.А., Стратонников А.А. *Квантовая электроника*, **31** (10), 847 (2001) [*Quantum Electron.*, **31** (10), 847 (2001)].
11. Богатов А.П., Дракин А.Е., Швейкин В.И. *Квантовая электроника*, **26** (1), 28 (1999) [*Quantum Electron.*, **26** (1), 28 (1999)].