

# Непрерывные лазерные диоды на основе эпитаксиально-интегрированных гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs

М.А.Ладугин, Н.В.Гультиков, А.А.Мармалюк, В.П.Коняев, А.В.Соловьева

*Представлены результаты разработки и исследования основных характеристик интегрированных лазерных излучателей спектрального диапазона 1040–1080 нм. Указанные приборы были изготовлены на основе эпитаксиально-интегрированных гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs с одной или двумя излучающими областями, измерения проводились в импульсном, квазинепрерывном и непрерывном режимах накачки. Установлено, что наряду с очевидным преимуществом интегрированных излучателей – увеличением выходной оптической мощности, они обладают и существенным ограничением, заключающимся в увеличении количества выделяемого тепла. Несмотря на это, показано, что такие интегрированные двойные лазерные диоды эффективно работают в непрерывном режиме генерации ( $P_{\max} \sim 6 \text{ Вт}$ ), демонстрируя увеличение дифференциальной квантовой эффективности в 1.7 раза по сравнению с одиночными лазерными диодами.*

**Ключевые слова:** лазерный диод, эпитаксиально-интегрированная гетероструктура, непрерывный режим, тепловыделение.

## 1. Введение

На протяжении нескольких последних десятилетий повышение выходной оптической мощности полупроводниковых лазерных излучателей продолжает оставаться одним из центральных направлений развития современной оптоэлектроники. Продемонстрировано несколько различных путей улучшения излучательных параметров лазерных диодов (ЛД), характеризующихся своими особенностями. Увеличение выходной мощности, получаемой от одного кристалла, может быть достигнуто за счет оптимизации геометрии лазерных гетероструктур, совершенствования конструкции и технологии изготовления активного элемента, а также методики его монтажа. В общем случае каждый из способов предполагает снижение нежелательных потерь излучения внутри и вне лазерной структуры с целью уменьшения выделяемого тепла и увеличения дифференциальной квантовой эффективности и КПД прибора.

Одним из перспективных способов увеличения выходной оптической мощности, представленным и обсуждаемым в настоящей работе, является создание эпитаксиально-интегрированных ЛД с несколькими излучающими областями. Помимо высокой оптической мощности, определяемой количеством излучающих областей, данные ЛД имеют возможность осуществления лазерной генерации на нескольких длинах волн.

Ранее высокая эффективность подобных лазеров, изготовленных на основе эпитаксиально-интегрированных гетероструктур, излучающих в спектральном диапазоне 800–1600 нм, была успешно продемонстрирована при их

работе в импульсном режиме накачки [1–4]. При этом, несмотря на увеличение частоты следования импульсов до десятков килогерц или использование их в многоэлементных излучателях [5], заметного снижения выходных параметров интегрированных ЛД в процессе работы не наблюдалось. Это обусловлено тем, что в течение одного импульса, длительность которого обычно составляет 100 нс, температура активных областей не успевает увеличиться до уровня, когда заметно ее отрицательное воздействие на пороговую плотность тока и внешнюю дифференциальную квантовую эффективность.

Тем не менее по-прежнему вызывает трудности создание мощных интегрированных лазеров, работающих в квазинепрерывном и непрерывном режимах накачки, которые характеризуются увеличенным тепловыделением. Это происходит из-за значительного перегрева активных областей, что ведет к повышению пороговой плотности тока, увеличению оптических потерь и снижению внешней дифференциальной квантовой эффективности всего излучателя. Так, в работе [6] продемонстрирована возможность получения непрерывной генерации при комнатной температуре двойных лазерных диодов, но максимальная мощность таких излучателей достигала всего лишь около 10 мВт с одной грани (в пересчете на ширину полоскового контакта 10 мкм).

Настоящая работа посвящена изучению функционирования интегрированных ЛД с несколькими излучающими областями, работающих в различных режимах накачки, а также поиску возможности повышения их выходной оптической мощности.

## 2. Экспериментальные образцы

Формирование эпитаксиально-интегрированных гетероструктур осуществлялось методом МОС-гидридной эпитаксии в едином ростовом цикле. Тщательно подобранные режимы роста позволили добиться хорошего качества активных, волноводных и эмиттерных слоев, а

М.А.Ладугин, Н.В.Гультиков, А.А.Мармалюк, В.П.Коняев, А.В.Соловьева. АО «НИИ «Полнос» им. М.Ф. Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1; e-mail: maximladugin@mail.ru, m.ladugin@siplus.ru

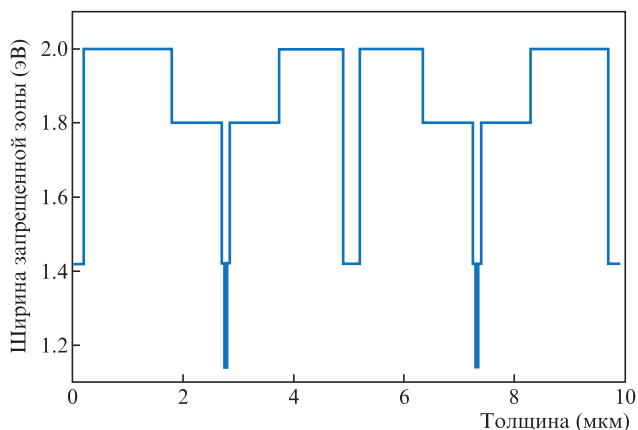


Рис.1. Схематическое изображение зонной диаграммы эпитаксиально-интегрированного двойного ЛД.

также туннельных переходов. Геометрия гетероструктуры InGaAs/AlGaAs/GaAs выбиралась с учетом обеспечения последующей генерации лазерного излучения на длине волны 1060 нм с узкой диаграммой направленности. Для контроля и сравнения лазерных параметров была выращена и одиночная структура (одиночный лазер). Зонная диаграмма интегрированного (двойного) лазера схематично изображена на рис. 1.

Активный элемент имел ширину электрического контакта  $W = 100 - 200$  мкм, длину резонатора  $L = 1.0 - 1.4$  мм и коэффициенты отражения зеркал  $R_1 = 0.04$ ,  $R_2 = 0.96$ . Лазерные элементы изготавливались по стандартной технологии, методика монтажа кристалла на теплоотвод р-контактом вниз была аналогична методике, описанной в работах [2, 4]. Измерения проводились в различных режимах токовой накачки с длительностью импульса от 100 нс до непрерывного.

### 3. Результаты и их обсуждение

Лазерные излучатели с одной и двумя активными областями (АО) предварительно тестировались в импульсном режиме накачки ( $\tau = 100$  нс,  $\nu = 1$  кГц), и их спектры излучения содержали лишь один максимум, что свидетельствовало об отсутствии заметного перегрева (рис.2,а). При этом для определения величины перегрева использовались экспериментально полученные значения  $\delta\lambda/\delta T$ , составившие  $\sim 0.32$  нм/К (рис.2,б). Стоит подчеркнуть, что оценка температуры таким способом отличалась от непосредственного измерения температуры АО не более чем на 10% [7].

Измеренные в импульсном режиме ватт-амперные (ВтАХ) и вольт-амперные (ВАХ) характеристики демонстрируют увеличение как выходной оптической мощности, так и напряжения отсечки двойного лазера (рис.3,а,б). На рис.3,в и г представлены ватт-амперные и спектральные характеристики двойного лазера, измеренные в квазинепрерывном режиме при фиксированной частоте следования, но различных длительностях импульсов накачки. Из рисунка следует, что с увеличением длительности импульсов мощность падает сильнее, что говорит о нагреве АО в течение одного импульса. Это хорошо видно на спектрах излучения ЛД (рис.3,з). Если при малой длительности в спектре наблюдался всего один максимум, то при ее увеличении спектр заметно смещался в длинноволновую область и имел уже два максимума, вызванных бо-

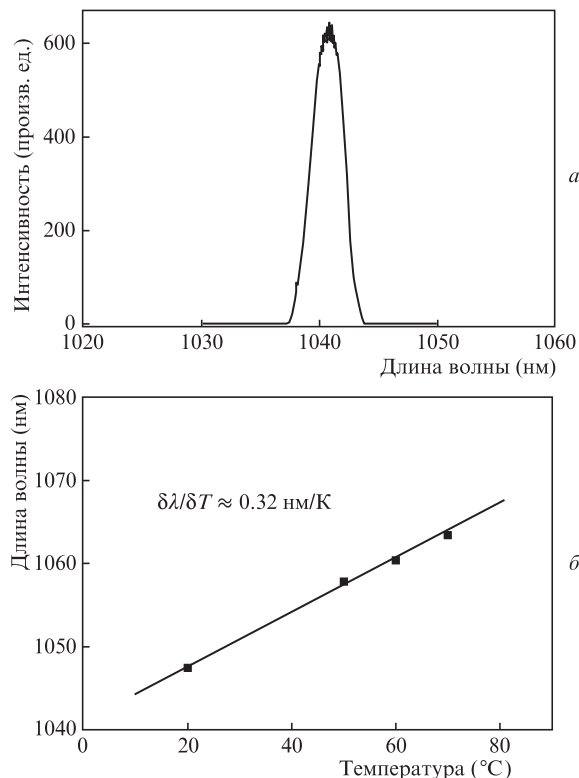


Рис.2. Спектр излучения ЛД с двумя активными областями, измеренный в импульсном режиме накачки (100 нс, 1 кГц) (а) и зависимость длины волны генерации лазерных диодов от температуры, измеренная в непрерывном режиме при токе  $I = 3$  А (б).

лее высокой температурой активной области, более удаленной от теплоотвода.

Была получена непрерывная генерация двойного лазера, причем линейность его ВтАХ сохранялась примерно до 4 Вт; наклон ВтАХ при этом составлял 1.64 Вт/А, что в 1.7 раза больше, чем у одиночного ЛД (рис.4,а). Однако при токе накачки более 3–4 А наблюдался значительный перегрев активных областей интегрированного ЛД, достигавший, по нашей оценке, 100–120°C. Это вызывало нелинейность ВтАХ и ограничивало уровень максимальной достижимой мощности излучения.

На рис.4,б показаны спектральные характеристики эпитаксиально-интегрированных ЛД при различных токах инжекции в непрерывном режиме. Видно, что с увеличением тока от порогового значения ( $I_{th} = 0.6$  А) спектр излучения не только смещается в длинноволновую область, но и разделяется на два отдельных максимума. Более того, при дальнейшем росте тока эти максимумы все больше отличаются друг от друга по длине волны.

Расчетная оценка температуры АО для двойных ЛД различной конструкции была выполнена путем решения нестационарного уравнения теплопроводности с внутренними источниками тепловыделения:

$$c_v \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \nabla(\kappa \nabla T(x, t)) + q_v(x, t),$$

$$x \in \Omega \subset \mathbb{R}^3, t > 0,$$

где  $x = (x, y, z)^T$  – радиус-вектор точки;  $t$  – время;  $T$  – температура;  $c_v$  – объемная теплоемкость материала ( $c_v = c\rho$ , где  $c$  – массовая теплоемкость, а  $\rho$  – плотность материала);  $\kappa$  – коэффициент теплопроводности;  $q_v$  – объемная

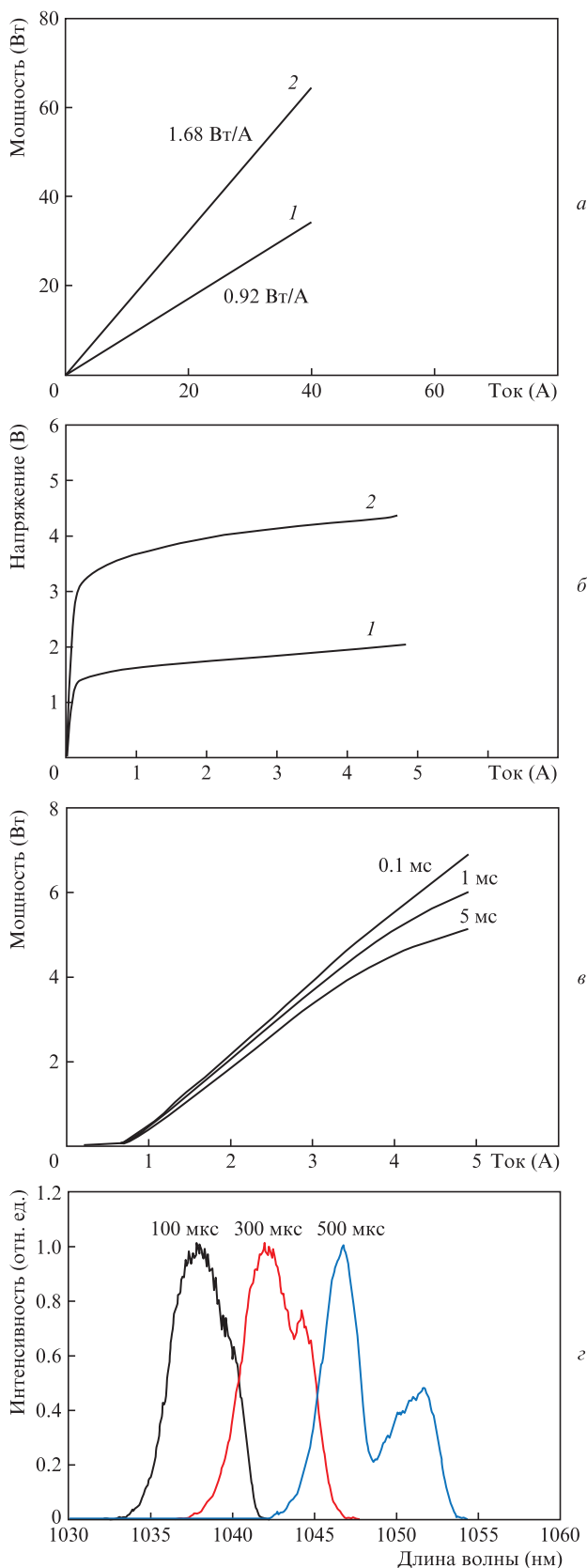


Рис.3. Ватт-амперные характеристики одиночного (1) и двойного (2) ЛД в импульсном режиме накачки ( $\tau = 100$  нс,  $\nu = 1$  кГц) (а); вольт-амперные характеристики одиночного (1) и двойного (2) ЛД (б); ватт-амперные характеристики двойного ЛД в квазипрерывном режиме накачки ( $\nu = 100$  Гц) при длительностях импульсов 0,1, 1 и 5 мс (в); спектры излучения двойного ЛД в квазипрерывном режиме накачки ( $\nu = 1,5$  кГц) при длительностях импульсов 100, 300 и 500 мкс (г).

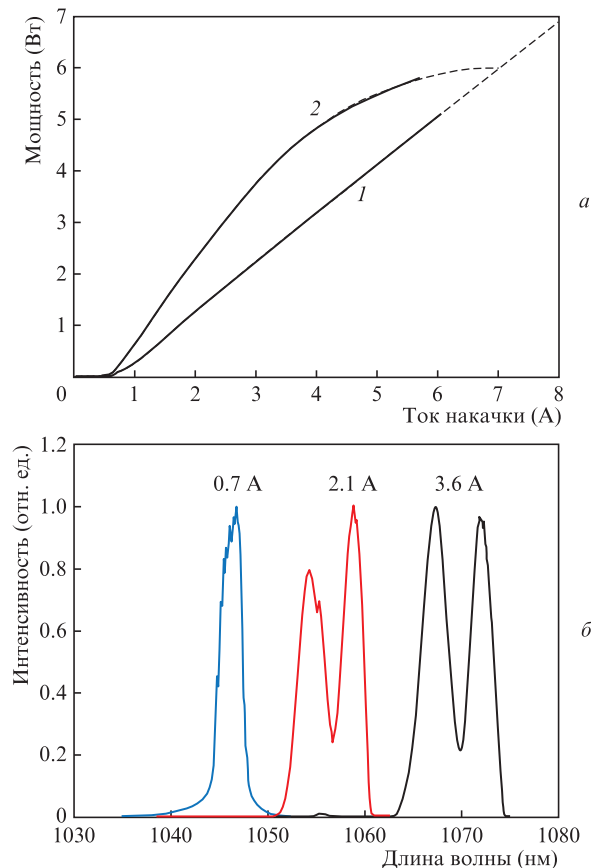


Рис.4. Ватт-амперные характеристики в непрерывном режиме генерации одиночного (1) и двойного (2) ЛД (а) и спектры интенсивности излучения двойного ЛД в непрерывном режиме генерации при токах накачки 0,7, 2,1 и 3,6 А (б).

плотность внутренних источников;  $\nabla$  – дифференциальный оператор Гамильтона;  $\Omega$  – некоторая замкнутая область в трехмерном пространстве.

На одной из граней теплоотвода поддерживается постоянная температура ( $T_b$ ), для которой справедливо граничное условие первого рода:  $T_b = \text{const}$ . Для упрощения в этой модели не учитываются конвективный и кондуктивный способы теплообмена с окружающей средой. Все грани, как теплоотвода, так и ЛД, соприкасающиеся с окружающей средой, теплоизолированы (кроме грани с постоянной температурой). Для них справедливо граничное условие второго рода, которое в данном случае определяется как

$$\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_w = 0,$$

где  $n$  – внешняя нормаль к границе расчетной области, а индекс  $w$  означает границу расчетной области. Начальное условие теплообмена имеет вид

$$T(t = 0) = T_0.$$

На рис.5 схематично изображена трехмерная конструкция ЛД с двумя активными областями. Для упрощения источником тепловыделения является АО лазерного излучателя. В качестве теплоотвода для ЛД различных конструкций использовался медный кубик с размером ребра  $h = 2$  мм. Несмотря на ряд принятых упрощений, такие расчеты с достаточной точностью позволяют оце-

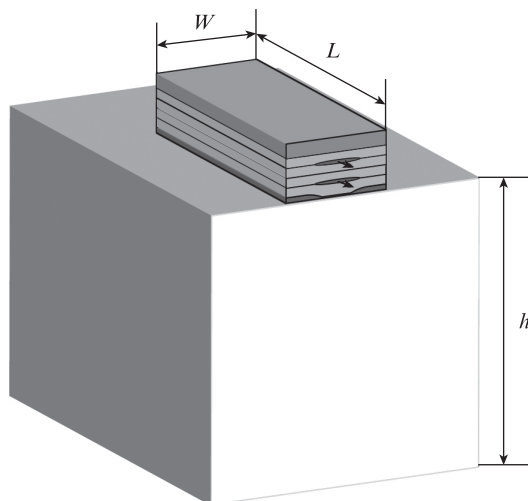


Рис.5. Геометрия лазерного диода с двумя активными областями на медном теплоотводе.

нить распределение температуры в кристалле одиночного лазера [7]. Здесь же подобный подход развит для оценки температуры АО двойных эпитаксиально-интегрированных ЛД.

На рис.6,а и б представлены результаты расчета перегрева АО для одиночного и двойного ЛД. Расчетные значения температуры очень близки к экспериментальным. Такая модель позволяет довольно точно предсказывать значения температуры как для одиночного, так и двойного ЛД, за исключением области больших перегревов.

Полученные результаты показали, что предельная мощность устройств ограничена не разрушением активного канала или оптической деградацией выходного зеркала, а тепловым насыщением ватт-амперной характеристики. В условиях эксперимента оно наступает при выходной оптической мощности около 6 Вт, когда разогрев обеих АО превышает 120°C. Для повышения мощности в непрерывном режиме интегрированных ЛД необходима более детальная оптимизация гетероструктуры, геометрии активного элемента, а также совершенствование методики его монтажа на теплоотвод. Так, например, расчетные оценки различных конструкций гетероструктуры и активного элемента показали, что за счет применения подходов, описанных в [8–10], КПД излучателя должно увеличиться на 10%–15%, а предельная мощность в непрерывном режиме может возрасти до 10–11 Вт.

Кроме того, оптимизированная конструкция теплоотвода с уменьшенным до 4–5 К/Вт тепловым сопротивлением позволит дополнительно улучшить выходные характеристики подобных ЛД в непрерывном режиме генерации.

Итак, разработаны и изучены интегрированные ЛД в непрерывном режиме генерации с выходной мощностью 5–6 Вт. Проанализировано влияние режима токовой накачки на эффективность ЛД на основе эпитаксиально-интегрированных гетероструктур InGaAs/AlGaAs с двумя излучающими областями в спектральном диапазоне 1040–1080 нм. Приведено сравнение расчетных и экспериментальных результатов для одиночных и двойных ЛД. Показано, что в непрерывном режиме при токах накачки выше 5 А разогрев активных областей может превышать 100–120°C. Одним из путей повышения мощности по-

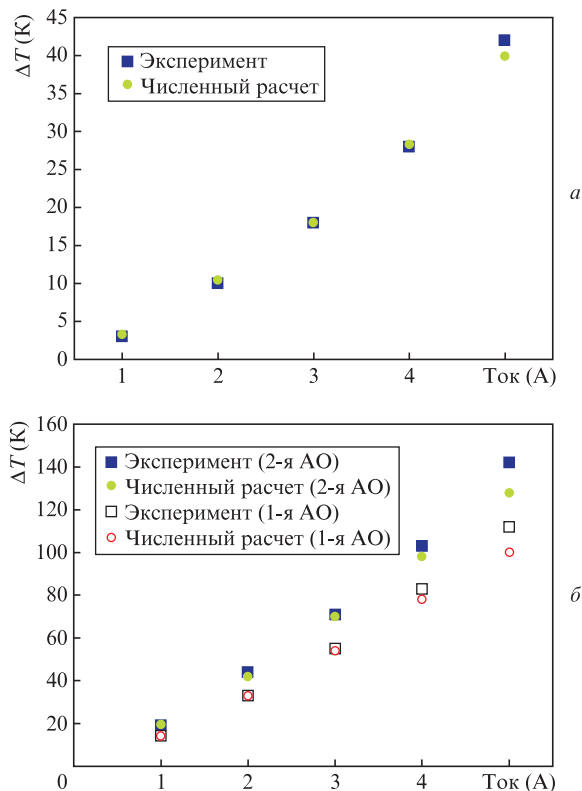


Рис.6. Перегрев  $\Delta T$  активной области одиночного ЛД в непрерывном режиме накачки (эксперимент и численный расчет) (а) и перегрев активных областей двойного ЛД в непрерывном режиме накачки (эксперимент и численный расчет, 1-я активная область ближе к теплоотводу) (б).

добных ЛД в непрерывном режиме генерации является оптимизация конструкции эпитаксиальной гетероструктуры, активного элемента и теплоотвода.

- Guo W., Shen G., Li J., Wang T., Gao G., Zou D. *Proc. SPIE*, **5623**, 217 (2005).
- Давыдова Е.И., Зверков М.В., Коняев В.П., Кричевский В.В., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Симаков В.А., Сухарев А.В., Успенский М.Б. *Квантовая электроника*, **39** (8), 723 (2009) [*Quantum Electron.*, **39** (8), 723 (2009)].
- Boucher J.-F., Vilokinen V., Rainbow P., Uusimaa P., Lyytikainen J., Ranta S. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7480**, 74800K (2009).
- Мармалюк А.А., Давыдова Е.И., Зверков М.В., Коняев В.П., Кричевский В.В., Ладугин М.А., Лебедева Е.И., Петров С.В., Сапожников С.М., Симаков В.А., Успенский М.Б., Яроцкая И.В., Пихтин Н.А., Тарасов И.С. *ФТП*, **45** (4), 528 (2011).
- Коняев В.П., Мармалюк А.А., Ладугин М.А., Багаев Т.А., Зверков М.В., Кричевский В.В., Падалица А.А., Сапожников С.М., Симаков В.А. *ФТП*, **48** (1), 104 (2014).
- Patterson S.G., Petrich G.S., Ram R.J., Kolodziejski L.A. *Electron. Lett.*, **35** (5), 395 (1999).
- Diehl R. *High-power Diode Lasers. Fundamentals, Technology, Applications* (Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2000).
- Coldren L.A., Corzine S., Mashanovitch M. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2012).
- Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Багаев Т.А., Андреев А.Ю., Телегин К.Ю., Лобинцов А.В., Давыдова Е.И., Сапожников С.М., Данилов А.И., Подкопаев А.В., Иванова Е.Б., Симаков В.А. *Квантовая электроника*, **47**, 291 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 291 (2017)].
- Ладугин М.А., Мармалюк А.А. *Квантовая электроника*, **49**, 529 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 529 (2019)].