

# Поперечно-одномодовые суперлюминесцентные диоды ближнего ИК диапазона спектра с непрерывной выходной мощностью до 100 мВт

Е.В.Андреева, С.Н.Ильченко, Ю.О.Костин, С.Д.Якубович

*Разработана серия светоизлучающих модулей на основе одномодовых квантоворазмерных суперлюминесцентных диодов с центральными длинами волн излучения около 790, 840, 960, 1060 нм и непрерывной выходной мощностью в открытом пространстве до 100 мВт. Продемонстрирован достаточно большой срок службы этих приборов.*

**Ключевые слова:** наногетероструктура, квантоворазмерный суперлюминесцентный диод.

## 1. Введение

Для многих практических применений суперлюминесцентных диодов (СЛД) выходная оптическая мощность является ключевым параметром. При этом в большинстве случаев предпочтение отдается светоизлучающим модулям на основе пространственно-одномодовых СЛД, у которых расходимость излучения соответствует дифракционным пределам.

В настоящее время на оптоэлектронном рынке имеется огромный выбор поперечно-одномодовых лазерных диодов (ЛД) различных спектральных диапазонов с непрерывной выходной мощностью в сотни милливатт. Уровень мощности коммерчески доступных СЛД значительно скромнее. Это связано с более низкой внешней квантовой эффективностью СЛД, а также с тем, что из-за более высокой концентрации неравновесных носителей заряда в рабочих режимах они обладают меньшими порогами катастрофической оптической деградации (КОД), а процессы старения в них протекают быстрее, чем в ЛД. Количество публикаций, посвященных совершенствованию мощностных характеристик ЛД и СЛД, несоизмеримы. Тем не менее за последние 20 лет опубликовано немало результатов экспериментальных работ, в которых реализованы одномодовые СЛД ИК диапазона спектра с непрерывной выходной мощностью свыше 100 мВт (см., напр., [1–6]). Проблема надежности этих приборов обычно не рассматривалась. Указанный уровень мощности до настоящего времени был достигнут только для серийных СЛД-модулей с длиной волны излучения около 1300 нм (производство DenseLight). Что же касается СЛД «ближайшего» ИК диапазона спектра 750–1100 нм, то, несмотря на их более высокую эффективность, выходная мощность серийно выпускаемых СЛД-модулей не превышает

60 мВт (производители: ООО «Суперлюминесцентные диоды», EXALOS, InPhenix, DenseLight, Optoenergy Inc. и др.).

Очевидным путем повышения выходной мощности является использование СЛД с широким многомодовым активным каналом. Однако расходимость их излучения в плоскости  $p-n$ -перехода сильно превышает дифракционный предел [7], что во многих случаях представляет собой серьезное препятствие для их практического применения. То же относится и к наборам СЛД в интегральном исполнении [8]. Радикальное решение проблемы – это использование МОРА-систем, в которых задающими генераторами служат СЛД, а усилителями мощности – полупроводниковые оптические усилители (ПОУ) с клиновидным активным каналом, обладающие расходимостью излучения, близкой к дифракционной. Так, фирмы Tortica и Sacher Lasertechnik выпускают широкий ряд таких ПОУ для различных спектральных диапазонов. При мощности входного сигнала 5–50 мВт они обеспечивают непрерывную выходную мощность до 3 Вт. Указанные МОРА-системы, как правило, содержат фокусирующую и коллимирующую оптику, а также оптический изолятор между СЛД и ПОУ. Это отдельный класс приборов, относительно крупногабаритных и дорогостоящих. Эксперименты по реализации подобных систем в интегральном исполнении без использования оптической изоляции [9], насколько нам известно, не имели практических последствий.

Весьма интересна конструкция СЛД, в которой активный канал представляет собой многомодовый интерферометр [10, 11]. Такие СЛД обладают дифракционной расходимостью излучения и при этом позволяют значительно повысить выходную мощность и снизить токовую нагрузку за счет увеличения объема активного канала по сравнению с традиционными «узкими» СЛД. К сожалению, данная конструкция не решает проблемы КОД, связанной с разрушением торцевых граней.

В настоящей работе исследованы СЛД традиционной конструкции ближнего ИК диапазона спектра. При их изготовлении были использованы четыре высококачественные полупроводниковые наногетероструктуры, выращенные методом газотранспортной эпитаксии из металлоорганических соединений, и оптимизированная технология формирования активных каналов и ионной очистки торцевых граней перед нанесением антиотражающих покрытий [12]. Это позволило повысить внешнюю эффек-

Е.В.Андреева, С.Н.Ильченко, Ю.О.Костин. ООО «Суперлюминесцентные диоды», Россия, 117454 Москва, а/я 70;

e-mail: andreeva@superlumdiodes.com

С.Д.Якубович. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78;

e-mail: yakubovich@superlumdiodes.com

тивность СЛД и их пороги КОД. Миниатюрные светоизлучающие модули на основе разработанных СЛД продемонстрировали достаточно высокую надёжность при непрерывной выходной оптической мощности до 100 мВт.

## 2. Экспериментальные образцы и их характеристики

Полупроводниковые наногетероструктуры с квантоворазмерными активными слоями и отдельным ограничением, использованные при изготовлении исследованных СЛД, были специально выращены на установках МОС-гидридной эпитаксии СИГМОС и AIXTRON. Их основные структурные параметры представлены в табл. 1. Все экспериментальные образцы имели одинаковую конструкцию. Прямой активный канал СЛД представлял собой гребневидный световод длиной 1500 мкм и шириной 4 мкм, расположенный под углом  $7^\circ$  относительно нормали к торцевым граням кристалла, на которые были нанесены антиотражающие покрытия.

Как известно, в квантоворазмерных СЛД, у которых толщина активного слоя составляет единицы нанометров, при высоких концентрациях неравновесных носителей заряда заполняются не только основная, но и возбужденные подзоны энергетического спектра. В результате спектр усиленного спонтанного излучения приобретает характерную, обычно двугорбую, форму. У исследованных СЛД этого не наблюдалось. Вплоть до плотности тока инжекции  $\sim 10^4$  А/см<sup>2</sup> их спектры излучения имели колоколообразную квазигауссову форму [13], свидетельствующую о том, что вклад в суперлюминесценцию дают только квантовые переходы из основной подзоны. Заполнению возбужденных подзон в данном случае препятствуют высокая квантовая эффективность и большая длина актив-

ного канала (большое однопроходное оптическое усиление), приводящие к эффективному «сбросу» инверсии.

В табл. 1 представлены также основные спектральные параметры исследованных СЛД в рабочих режимах, соответствующих непрерывной выходной мощности 100 мВт. Порог КОД, связанный, как правило, с разрушением торцевых граней, у СЛД типов I–III составлял 200–220 мВт. У образцов типа IV КОД не наблюдалась: с ростом тока инжекции происходило тепловое насыщение выходной мощности.

Типичные ватт-амперные характеристики и спектры излучения исследованных СЛД представлены на рис. 1. Типичное дальнее поле излучения показано на рис. 2. Представлены сечение выходного пучка, а также угловые зависимости интенсивности излучения в перпендикулярной и параллельной гетерослоям плоскостях. Как уже отмечалось во Введении, реализованные мощности излучения не являются рекордными для СЛД ближнего ИК диапазона спектра. Главным достижением настоящей работы является демонстрация достаточно высокой надежности разработанных приборов в указанных рабочих режимах. На рис. 3 представлены хронограммы предварительных ресурсных испытаний СЛД типов II и III при токе инжекции 400 мА. Экстраполяция приведенных зависимостей позволяет получить для медианного срока службы (МСС) оценки около 15000 и 11000 ч соответственно. СЛД типов I и IV в настоящее время проходят аналогичные испытания. По предварительным оценкам их МСС также превышает 10000 ч.

## 3. Миниатюрные светоизлучающие модули

В результате проведенных исследований были разработаны светоизлучающие модули в стандартных корпу-

Табл. 1. Основные структурные параметры и типичные технические характеристики исследованных СЛД.

Тип СЛД	Состав и толщина активного слоя (нм)	Состав и толщина волноводного слоя (мкм)	$I_{\text{SLD}}$ (мА)	$\lambda_m$ (нм)	$\Delta\lambda$ (нм)	$R_{\text{IFP}}$ (%)	Порог КОД (мВт/мА)
I	GaAs, 3,5	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ( $x = 0.25-0.5$ ), 0,3	300	795	16	2–3	200/700
II	GaAs, 9,0	$\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ , 0,25	360	840	25	3–4	220/700
III	$\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ , 6,0	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ( $x = 0-0.5$ ), 0,4	370	960	50	4–6	220/800
IV	$\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As}$ , 2 слоя по 7,0 нм	$\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$ , 0,5	425	1060	40	5–7	Перегрев без КОД

Примечание:  $I_{\text{SLD}}$  – ток инжекции, обеспечивающий выходную мощность 100 мВт при  $25^\circ\text{C}$  и указанные спектральные характеристики;  $\lambda_m$  – медианная длина волны;  $\Delta\lambda$  – полуширина спектра;  $R_{\text{IFP}}$  – глубина остаточной модуляции спектра модами Фабри–Перо.

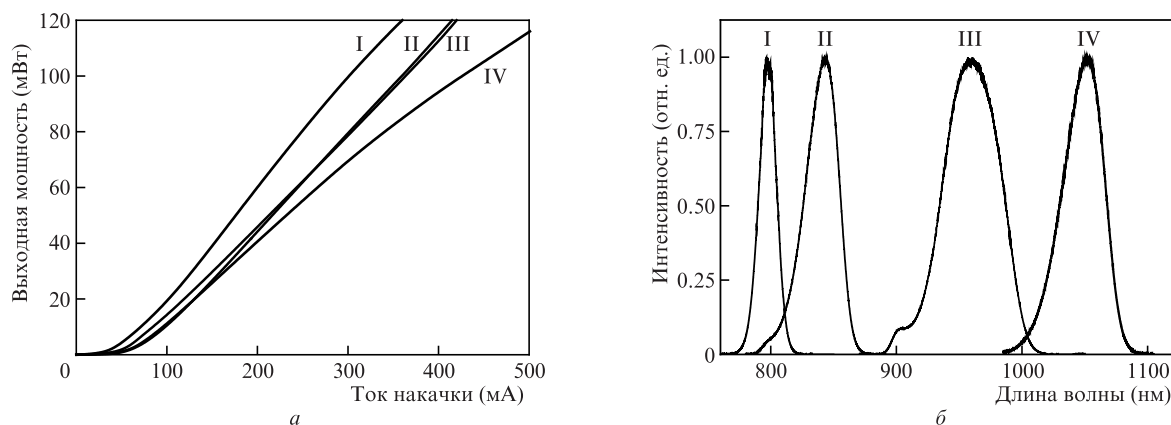


Рис. 1. Ватт-амперные характеристики при  $25^\circ\text{C}$  (а) и спектры излучения при выходной мощности 100 мВт (б) исследованных СЛД.

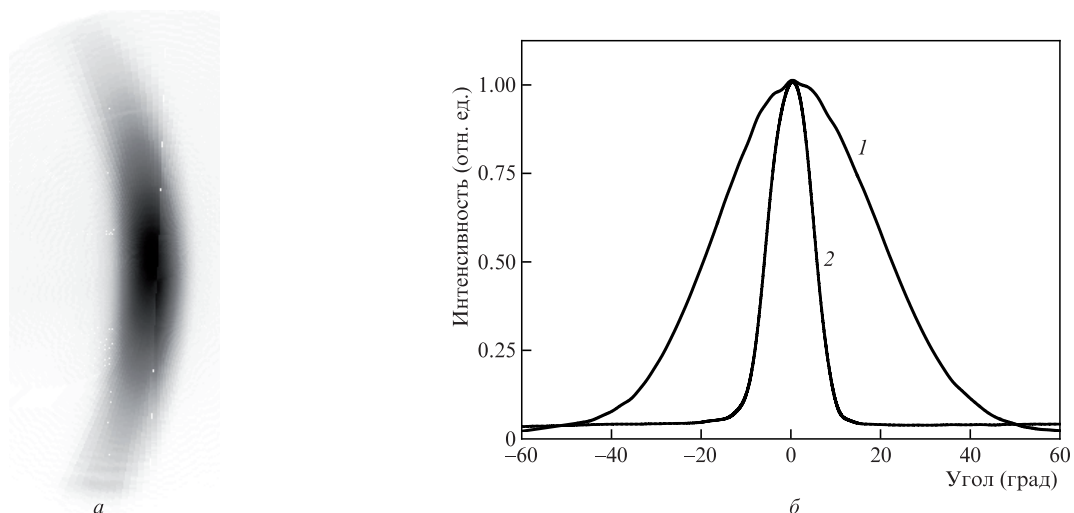


Рис.2. Типичное дальнее поле излучения: сечение пучка (а) и распределения интенсивности в плоскостях, перпендикулярной (1) и параллельной (2) гетерограницам (б).

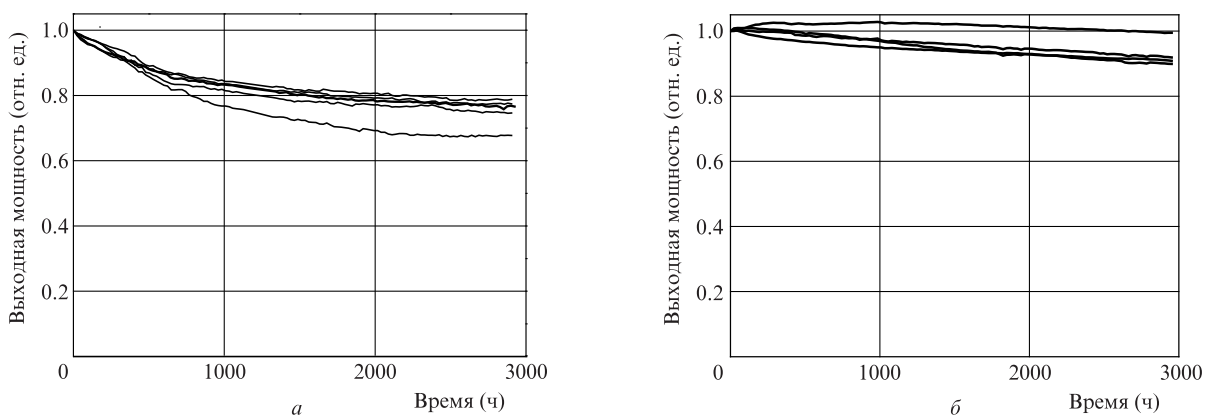


Рис.3. Хронограммы предварительных ресурсных испытаний СЛД типов II (а) и III (б) при рабочем токе 400 мА.

сах TOW и TO-9. В модулях 1-го типа кроме СЛД размещены термоэлектрический микроохладитель (ТЭМО), термистор и фотодиод-монитор, что позволяет использовать стандартные электронные контроллеры, обеспечивающие термостабилизацию и автоматический контроль выходной мощности (АКМ). Хронограммы на рис.4 иллюстрируют выход ТЭМО на стационарный режим термостабилизации на уровне 25°C при рабочих токах СЛД

300 и 400 мА для различных температур окружающей среды. Приведенные зависимости показывают, что, по крайней мере, до температуры 55°C эти модули могут обеспечить выходные характеристики СЛД, представленные на рис.1. Очевидно, что использование более крупногабаритного корпуса и более производительного ТЭМО позволит значительно расширить диапазон допустимых рабочих температур.

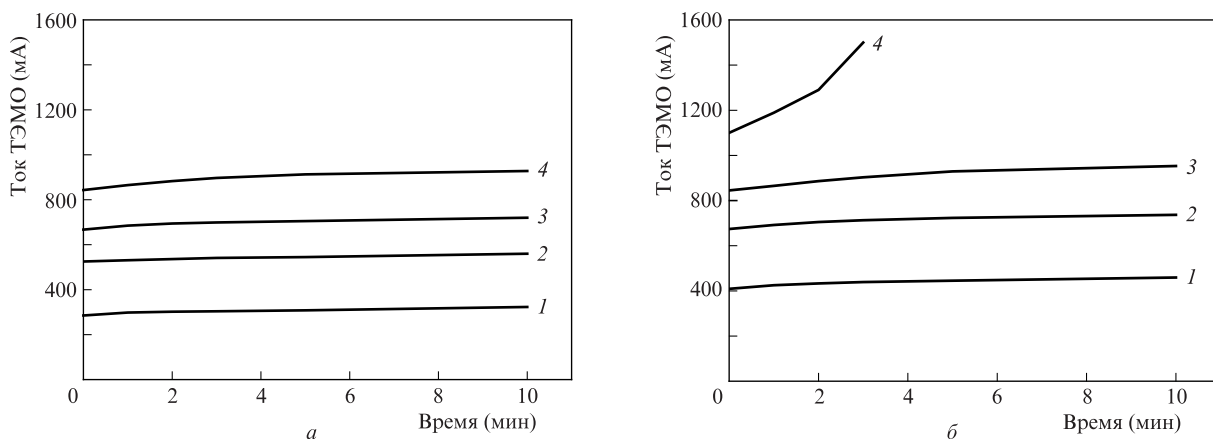


Рис.4. Переходные процессы при включении ТЭМО. Рабочие токи инжекции 300 (а) и 400 мА (б), термостабилизация на уровне 25°C при температуре окружающей среды 25 (1), 45 (2), 55(3) и 65°C (4).

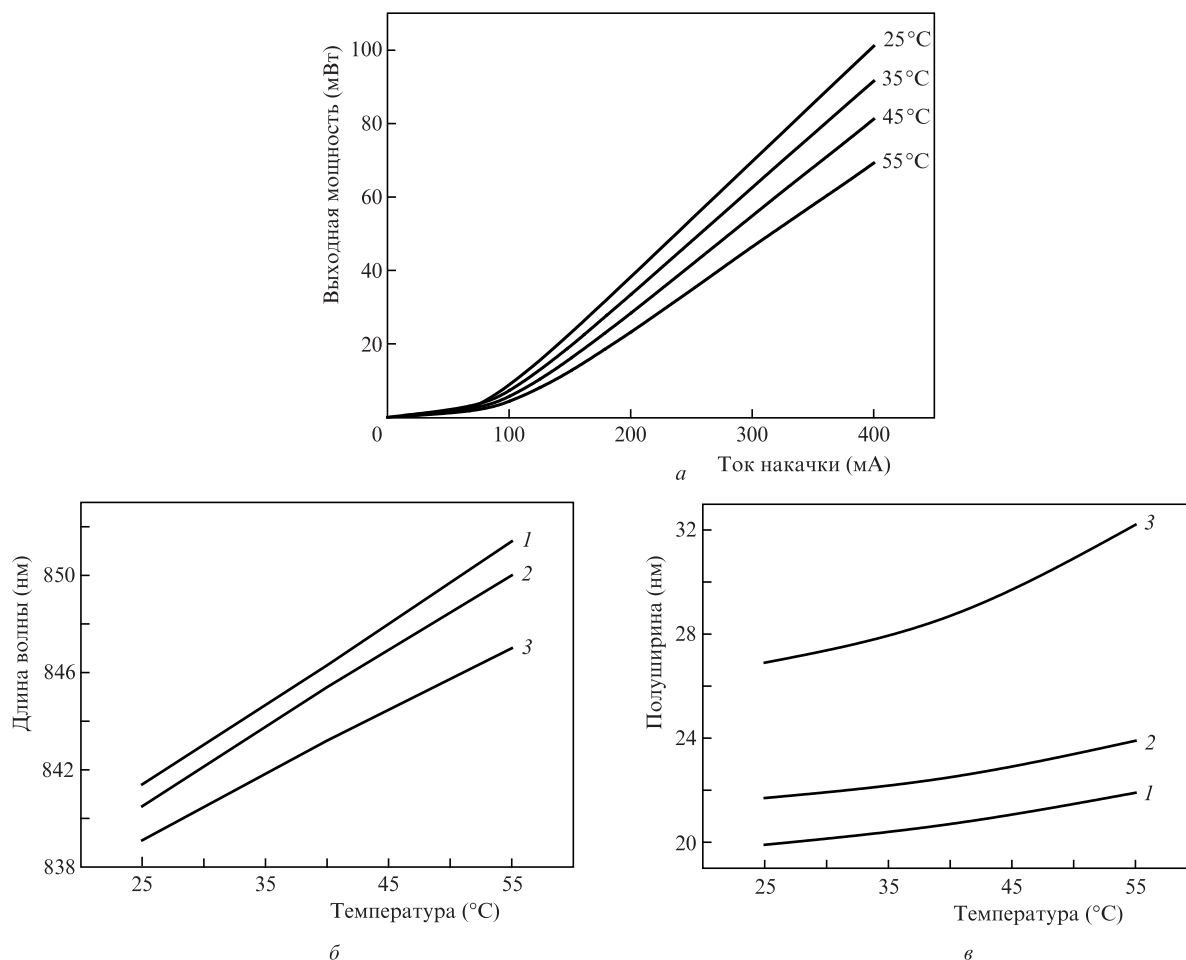


Рис.5. Ватт-амперные характеристики при различных температурах (а) и зависимости центральной длины волны (б) и ширины спектра (в) от температуры при выходной мощности 5 (1), 10 (2) и 50 мВт (3) для СЛД типа II в корпусе ТО-9 (радиатор без термостабилизации).

Модули 2-го типа содержат только СЛД и фотодиод-монитор. При использовании внешней системы термостабилизации они также обеспечивают вышеуказанные выходные характеристики. Если же они эксплуатируются смонтированными на достаточно массивном радиаторе, то выходные оптические характеристики изменяются с температурой окружающей среды – в режиме АКМ с ростом температуры центральная длина волны излучения и ширина спектра увеличиваются. Эти изменения иллюстрируются на примере модулей в корпусах ТО-9 на основе СЛД типа II (рис.5). В качестве «первой ласточки» начат серийный выпуск именно этих приборов (модель SLD 340-UHP).

Таким образом, нами исследованы прототипы миниатюрных пространственно-одномодовых СЛД-модулей с центральными длинами волн 790, 840, 960 и 1060 нм. Показано, что при непрерывной выходной оптической мощности 100 мВт их срок службы превышает 10000 ч. По уровню выходной мощности эти модули превосходят коммерчески доступные аналоги приблизительно в два раза.

Авторы выражают признательность А.Т.Семёнову за инициирование проведённых исследований, а также А.А.Мармалюку и А.В.Лобинцову с сотрудниками за выращивание наногетероструктур и проведение постро- стовых технологических операций.

- Goldberg L., Mehuys D. *Electron. Lett.*, **30** (20), 1682 (1994).
- Takayama T., Imafuji O., Kouchi Y., Yuri M., Yoshikava A., Itoh K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **32** (11), 1981 (1996).
- Konoplev O.A., Park S., Saini S.S., Merrit S.A., Hu Y., Luciani V., Heim P.J.S., Enk R., Bowler D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5739**, 66 (2005).
- Sugo M., Yoshimura R., Shibata Y. *Electron. Lett.*, **42** (21), 1245 (2006).
- Yamatoya T., Mori S., Koyama F., Iga K. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (Part 1, 9A), 5121 (1999).
- Zhang Z.Y., Hogg R.A., Jin P., Choi T.L., Xu B., Wang Z.G. *IEEE Phot. Tech. Lett.*, **20** (10), 782 (2008).
- Андреева Е.В., Батрак Д.В., Богатов А.П., Лапин П.И., Прохоров В.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **37** (11), 996 (2007).
- Causa F., Burrow L. *IEEE J. Quantum Electron.*, **43** (11), 1055 (2007).
- Du G., Xu C., Liu Y., Zhao Y., Wang H. *IEEE J. Quantum Electron.*, **39** (1), 149 (2003).
- Zang Z., Minato T., Navaretti P., Hinokuma Y., Duell M., Velez C., Hamamoto K. *IEEE Phot. Tech. Lett.*, **22** (10), 721 (2010).
- Soldano L.B., Penning E.C.M. *J. Lightwave Technol.*, **13** (4), 615 (1995).
- Лобинцов А.А., Успенский М.Б., Шишкин В.А., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **40** (4), 305 (2010).
- Андреева Е.В., Ильченко С.Н., Костин Ю.О., Ладугин М.А., Лапин П.И., Мармалюк А.А., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **43** (8), 751 (2013).