

07:08

## Влияние асимметричных барьерных слоев в волноводной области на мощностные характеристики лазеров на квантовой яме

© Ф.И. Зубов<sup>1,2</sup>, А.Е. Жуков<sup>1,2</sup>, Ю.М. Шерняков<sup>3,1</sup>,  
М.В. Максимов<sup>3,1</sup>, Н.В. Крыжановская<sup>1,3</sup>, К. Yvind<sup>4</sup>,  
Е.С. Семенова<sup>4</sup>, Л.В. Асрян<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский Академический университет —  
научно-образовательный центр нанотехнологий РАН, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
Россия

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,  
Россия

<sup>4</sup> DTU Fotonik, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, DK-2800,  
Denmark

<sup>5</sup> Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg,  
Virginia 24061, USA

E-mail: fedyazu@mail.ru

Поступило в Редакцию 4 ноября 2014 г.

Исследованы вольт- и ватт-амперные характеристики лазеров на квантовой яме при высоких токах накачки. Внедрение асимметричных барьерных слоев, прилегающих к активной области, привело к значительному подавлению нелинейности ватт-амперной характеристики и росту внешней дифференциальной эффективности, в результате чего на 9% вырос максимальный КПД и на 29% увеличилась выходная оптическая мощность.

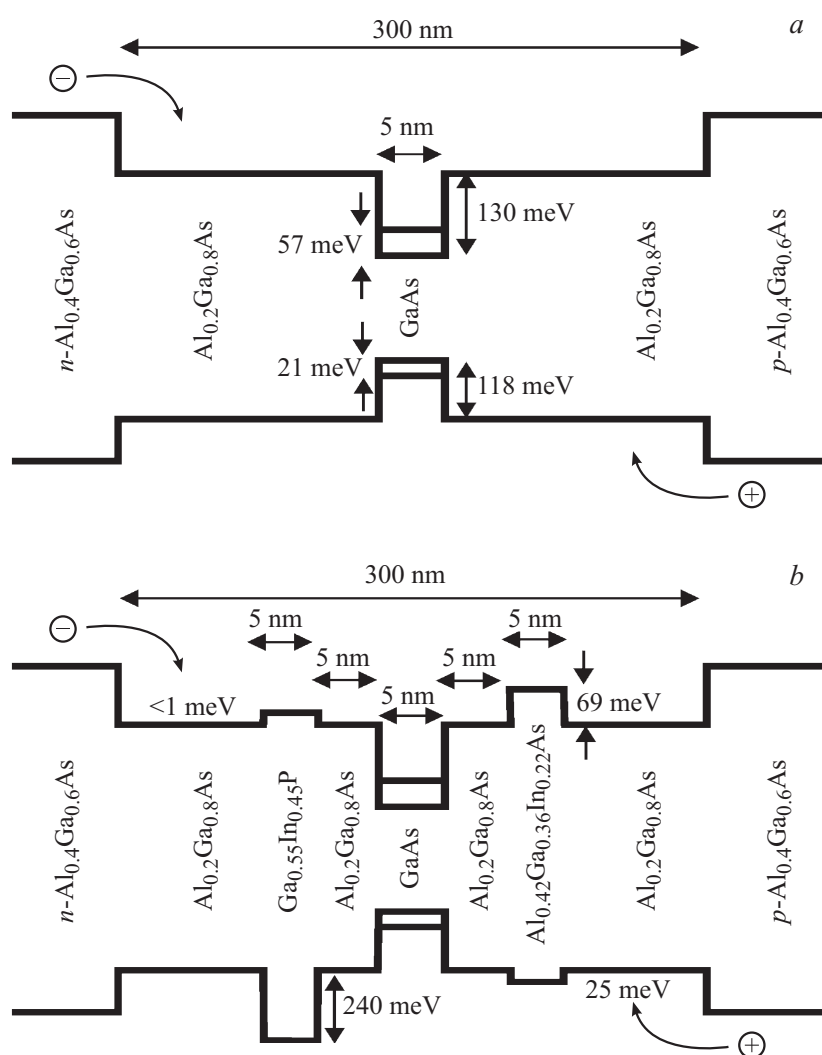
Концепция лазеров с асимметричными барьерами, предложенная в работе [1], состоит в использовании двух вспомогательных слоев в гетероструктуре, прилегающих к активной области по обе стороны. Один асимметричный барьерный слой, расположенный ближе к  $n$ -эмиттеру, образующий большой энергетический барьер в валентной зоне и малый в зоне проводимости, блокирует транспорт дырок, но не препятствует перемещению электронов. Другой асимметричный барьерный слой, с малым барьером в валентной зоне и большим в зоне проводимости, наоборот, пропускает дырки, но останавливает электроны. Таким образом,

паразитная рекомбинация в волноводе подавлена. В идеале областью сосуществования электронов и дырок является только активная область.

В работе [2] представлены результаты расчетов, которые показали, что добавление асимметричных барьерных слоев в лазер на квантовой яме позволяет существенно уменьшить пороговый ток и увеличить его характеристическую температуру по сравнению с традиционной лазерной гетероструктурой с отдельным ограничением. Позже были определены полупроводниковые твердые растворы, позволяющие реализовать концепцию асимметричных барьерных слоев в некоторых материалах волноводов [3]. В [4,5] было впервые экспериментально продемонстрировано, что лазеры с асимметричными барьерами обладают меньшим пороговым током, большей внешней дифференциальной квантовой эффективностью вблизи порога генерации (в области малых накачек), меньшими внутренними оптическими потерями, а также более высокой температурной стабильностью перечисленных параметров в сравнении с тестовыми лазерами традиционной конструкции, не содержащими асимметричных барьеров. Представленные в [6] расчеты показали, что использование асимметричных барьеров также позволяет значительно улучшить мощностные характеристики полупроводниковых лазеров, работающих в режиме больших токов накачки, за счет подавления насыщения ватт-амперной характеристики (ВтАХ), связанного с паразитной рекомбинацией и задержкой захвата носителей заряда в активную область [7,8].

В данной работе мы экспериментально изучили влияние асимметричных барьеров на ВтАХ лазерных диодов вплоть до высоких токов накачки, когда начинает проявляться насыщение выходной оптической мощности. Также определены зависимости КПД от накачки и степень отклонения ВтАХ от линейности. Представлены результаты измерений мощностных характеристик при 20 и 75°C.

Объектом исследования являлись лазерные диоды спектрального диапазона 830 nm, изготовленные из гетероструктур двух типов — с асимметричными барьерами и без них. Синтез проводился методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложках  $n^+$ -GaAs (100). Гетероструктура первого типа (рис. 1, *a*) была тестовой и, по сути, являлась традиционной структурой полупроводникового лазера на квантовой яме для данной длины волны генерации. Одиночная квантовая яма GaAs толщиной 5 nm располагалась в середине волноводного слоя  $Al_{0,2}Ga_{0,8}As$  толщиной 300 nm. Эмиттерами служили



**Рис. 1.** Зонные энергетические диаграммы тестового лазера с традиционной конструкцией (а) и лазера с асимметричными барьерными слоями (b). Выходная оптическая мощность ( $P$ ) в зависимости от тока накачки ( $I$ ) лазера с асимметричными барьерами (1) и тестового лазера (2) при 20°C (c) и 75°C (d). Прямые на графиках соответствуют линейной аппроксимации вблизи порога.

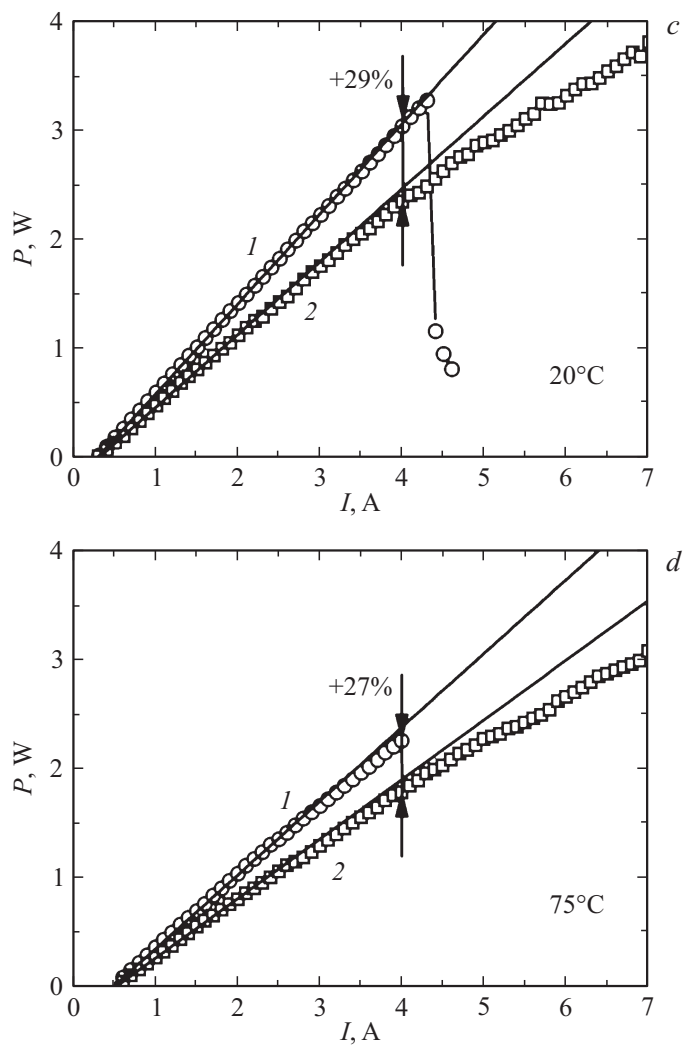


Рис. 1 (продолжение).

слои  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  с концентрацией легирующей примеси на уровне  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . В качестве примеси  $n$ -типа был использован кремний, а в качестве примеси  $p$ -типа — углерод.

Структура второго типа (рис. 1, *b*) отличалась от первой тем, что содержала в волноводе асимметричные барьерные слои толщиной 5 нм, расположенные по обе стороны от квантовой ямы на расстоянии 5 нм. В качестве асимметричного барьерного слоя, расположенного со стороны *n*-эмиттера, использовался  $\text{Ga}_{0.55}\text{In}_{0.45}\text{P}$ , а со стороны *p*-эмиттера —  $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.36}\text{In}_{0.22}\text{As}$ . Рассчитанные значения потенциальных барьеров на гетерогранице  $\text{Ga}_{0.55}\text{In}_{0.45}\text{P}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  составили 240 meV для дырок и менее 1 meV для электронов, а на гетерогранице  $\text{Al}_{0.42}\text{Ga}_{0.36}\text{In}_{0.22}\text{As}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  — 69 и 25 meV для электронов и дырок соответственно. Расчет положения краев зон, учитывающий влияние как химического состава, так и упругих напряжений, был выполнен с использованием методики, приведенной в работе [9]. Рассогласование постоянных решеток асимметричных барьерных слоев по отношению к подложке не превышало 1.5%, что при использованной толщине вспомогательных слоев позволило провести псевдоморфный синтез структуры.

На поверхности эпитаксиальных пластин посредством стандартных операций постростовой обработки, включающих оптическую литографию, ионно-лучевое травление, а также напыление металлов и диэлектрика, были созданы лазерные полоски шириной 50  $\mu\text{m}$ . Посредством скалывания кристалла были созданы лазерные резонаторы длиной 2 мм. Какие-либо покрытия на зеркала не наносились. Лазерные чипы напаялись на медный теплоотвод *p*-контактом вниз. Во время измерения характеристик исследуемых приборов температура теплоотвода задавалась при помощи термоконтроллера с элементом Пельте.

Насыщение ВtАХ лазера может быть обусловлено как ее перегревом (так называемый тепловой загиб), так и паразитной рекомбинацией носителей заряда в волноводе. Для устранения влияния перегрева активной области на характеристики приборов накачка исследуемых образцов проводилась короткими прямоугольными импульсами тока длительностью 200 ns с малой частотой следования 100 Hz. Максимальная накачка была ограничена токовым усилителем и составляла 7 А. Для определения ВАХ и ВтАХ приборов измерялись амплитуды импульсов напряжения на лазере, известном тестовом сопротивлении, включенном последовательно с прибором, и известном тестовом сопротивлении, включенном последовательно с кремниевым фотодиодом большой площади  $1 \times 1 \text{ cm}^2$ , установленным вплотную к образцу. Запись сигнала велась при помощи цифрового осциллографа Tektronix TDS 2024B

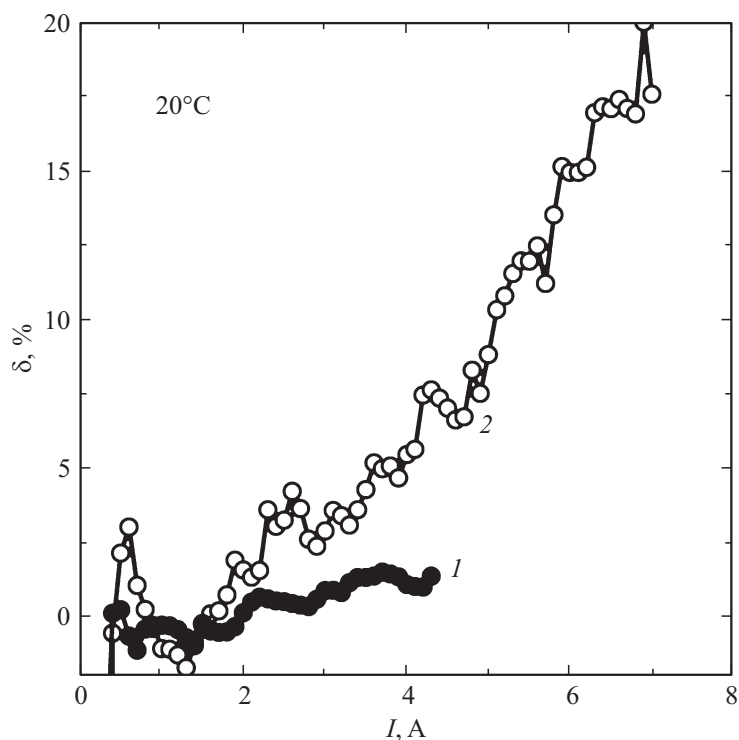
в режиме усреднения по 128 осциллограммам. Наибольшие фронты нарастания и спада имели импульсы фототока, время которых составляло не более 150 ns при максимальной накачке лазерных диодов. Для предотвращения насыщения фотодиода мощным лазерным излучением использовались калиброванные светофильтры, устанавливаемые между лазером и фотодиодом.

Нами было изготовлено и исследовано 15 лазерных диодов каждого типа. Наблюдался небольшой разброс характеристик лазерных диодов, связанный, вероятно, с неоднородностью эпитаксиального синтеза, постростовой обработки и монтажа лазерных чипов на теплоотвод. Далее приводятся результаты измерения приборов, обладающих наилучшими характеристиками в каждой группе.

На рис. 1, *c* и *d* представлены ВтАХ лазеров, полученные для 20 и 75°C. Значения мощности на графиках соответствуют суммарному излучению от обоих зеркал. Существенное увеличение внешней дифференциальной квантовой эффективности имеет место в лазере с асимметричными барьерами в сравнении с лазером традиционной конструкции как при 20°C, так и при повышенной температуре. Например, наклон ВтАХ, определенный для участка от порогового тока до 1 А, где влияние насыщения мощности пренебрежимо мало, составил 0.82 и 0.66 W/A при 20°C в лазере с асимметричными барьерами и тестовом лазере соответственно. При 75°C внешняя дифференциальная эффективность составила 0.67 и 0.54 W/A соответственно. При этом пороговый ток в двух лазерах отличался незначительно.

Как видно, в области больших токов лазеры с асимметричными барьерами при одинаковой накачке демонстрируют значительный прирост выходной оптической мощности по сравнению с тестовыми лазерами. При токе накачки, равном 4 А, увеличение лазерной мощности составило 29% (с 2.34 до 3.02 W, прирост 0.68 W) при 20°C. При повышенной температуре также наблюдался значительный прирост выходной оптической мощности на уровне 27%.

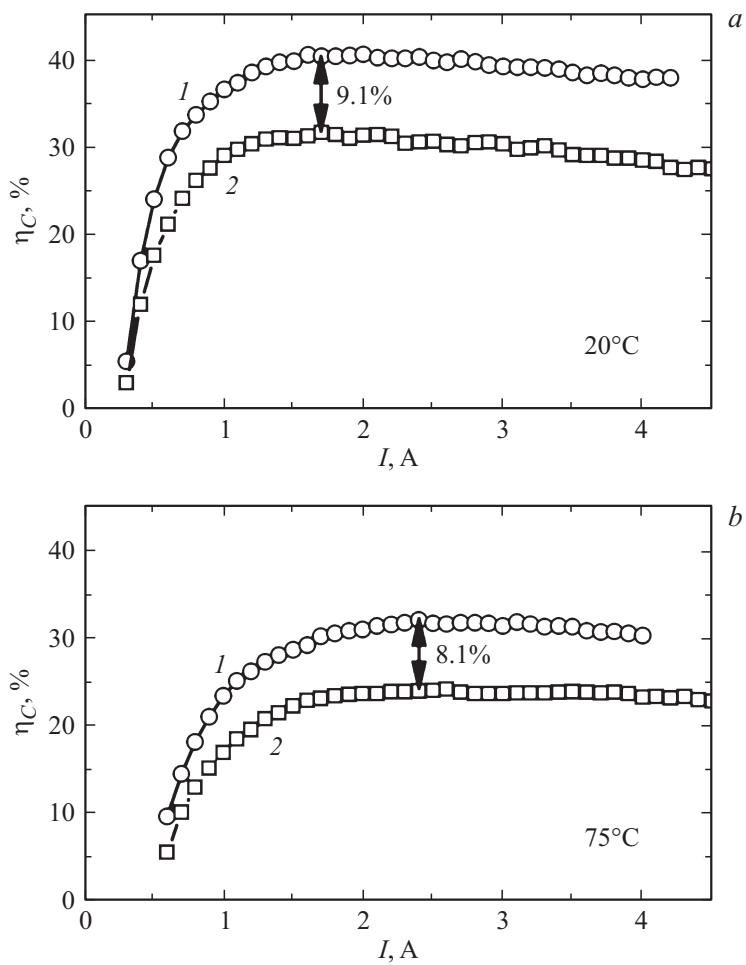
Следует отметить, что увеличение мощности в лазерах с асимметричными барьерами обусловлено как более высокой дифференциальной эффективностью, так и меньшим отклонением их ВтАХ от линейного поведения, что согласуется с теоретическими предсказаниями [6]. На рис. 2 представлена степень отклонения от линейности  $\delta$  измеренных ВтАХ при 20°C, вычисленная как  $[(\eta_0 I - P)/\eta I] \cdot 100\%$ , где  $\eta_0$  — внешняя дифференциальная квантовая эффективность, опреде-



**Рис. 2.** Отклонение от линейности ( $\delta$ ) измеренных ВТАХ в зависимости от тока накачки ( $I$ ) в лазере с асимметричными барьерами (1) и тестовом лазере традиционной конструкции (2) при  $20^\circ\text{C}$ .

ленная на начальном участке ВТАХ (вблизи порога генерации),  $I$  — ток накачки,  $P$  — измеренная выходная оптическая мощность. Так при максимальной накачке, достигнутой в лазере с асимметричными барьерами, равной  $4.3 \text{ A}$ , отклонение от линейности в тестовом лазере составило около  $7\%$ , тогда как в лазере с барьерами — только около  $1\%$ .

Помимо положительного влияния асимметричных барьеров на мощностные характеристики лазеров наблюдался также и негативный эффект. При токе около  $4.5 \text{ A}$  во всех образцах лазеров с асимметричными барьерами имела место необратимая деградация, заключающаяся во вне-



**Рис. 3.** КПД ( $\eta_c$ ) в зависимости от тока накачки ( $I$ ) для лазера с асимметричными барьерами (1) и тестового лазера традиционной конструкции (2) при  $20^\circ\text{C}$  (a) и  $75^\circ\text{C}$  (b).

запом падении выходной оптической мощности до уровня около 30% от исходной (см. ВГАХ при  $20^\circ\text{C}$  на рис. 1, a). Предельная оптическая мощность излучения, достигнутая в лучшем лазере с асимметричными



барьерами, равна 3.26 W. Оценивая площадь излучающей поверхности  $2 \times 300 \text{ nm} \times 50 \text{ }\mu\text{m}$ , плотность мощности на зеркалах, соответствующая деградации лазера, составила около  $11 \text{ MW/cm}^2$ . Отметим, что в тестовых лазерах в использованном диапазоне накачек какой-либо необратимой деградации не наблюдалось. Для определения причин деградации лазеров с асимметричными барьерами и возможности ее преодоления требуются дальнейшие исследования.

Применение асимметричных барьеров не приводит к возрастанию удельного последовательного сопротивления или росту напряжения открывания диода, которые составили около  $8 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$  и 1.5 V соответственно. С использованием полученных ВАХ и ВтАХ были установлены зависимости КПД лазеров от тока накачки для двух температур (рис. 3). Ток накачки, при котором достигается максимальный КПД в лазерах обоих типов, составляет около 1.7 A при 20°C и 2.4 A при 75°C, что заметно меньше тока, при котором происходит деградация лазеров. Как видно, за счет использования асимметричных барьерных слоев максимальный КПД вырос на 8–9%. Так при 20°C максимальный КПД в тестовом лазере составил 31.3%, а в лазере с асимметричными барьерами — 40.4% (прирост 9.1%), а при 75°C значения составили 23.9 и 32% соответственно (прирост 8.1%).

Таким образом, в работе было исследовано влияние асимметричных барьеров на мощностные параметры лазерных диодов при токах, значительно превышающих пороговый, при комнатной и повышенной температуре. Установлено, что за счет большей внешней дифференциальной эффективности и меньшего отклонения ВтАХ от линейного поведения в лазере с асимметричными барьерами достигается существенно большая выходная оптическая мощность при одинаковой накачке в сравнении с тестовым лазером традиционной конструкции, не содержащим асимметричных барьеров. Использование асимметричных барьерных слоев позволило увеличить максимальный КПД в температурном диапазоне от 20 до 75°C более чем на 8%. Обнаружено, что плотность оптической мощности, при которой в лазерах с асимметричными барьерами развивается катастрофическая деградация, составляет около  $11 \text{ MW/cm}^2$ .

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-42-00006 „Новый тип полупроводниковых лазеров с характеристиками, улучшенными за счет использования асимметричных барьеров“).

**Список литературы**

- [1] *Asryan L.V., Luryi S.* // Solid-State Electron. 2003. V. 47. P. 205.
- [2] *Asryan L.V., Kryzhanovskaya N.V., Maximov M.V., Egorov A.Yu., Zhukov A.E.* // Semicond. Sci. Technol. 2011. V. 26. P. 055 025.
- [3] *Жуков А.Е., Крыжановская Н.В., Максимов М.В., Егоров А.Ю., Павлов М.М., Зубов Ф.И., Асрян Л.В.* // ФТП. 2011. Т. 45. С. 540. [*Zhukov A.E., Kryzhanovskaya N.V., Maximov M.V., Egorov A.Yu., Pavlov M.M., Zubov F.I., Asryan L.V.* // Semiconductors. 2011. V. 45. P. 530.]
- [4] *Zhukov A.E., Kryzhanovskaya N.V., Zubov F.I., Shernyakov Yu.M., Maximov M.V., Semenova E.S., Yvind K., Asryan L.V.* // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 021 107.
- [5] *Жуков А.Е., Асрян Л.В., Шерняков Ю.М., Максимов М.В., Зубов Ф.И., Крыжановская Н.В., Yvind K., Семёнова Е.С.* // ФТП. 2012. Т. 46. С. 1049. [*Zhukov A.E., Asryan L.V., Shernyakov Yu.M., Maximov M.V., Zubov F.I., Kryzhanovskaya N.V., Yvind K., Semenova E.S.* // Semiconductors. 2012. V. 46. P. 1027.]
- [6] *Asryan L.V., Kryzhanovskaya N.V., Maximov M.V., Zubov F.I., Zhukov A.E.* // J. Appl. Phys. 2013. V. 114. P. 143 103.
- [7] *Asryan L.V., Luryi S., Suris R.A.* // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. P. 2154.
- [8] *Asryan L.V., Luryi S., Suris R.A.* // IEEE J. Quantum Electron. 2003. V. 39. P. 404.
- [9] *Krijn M.P.C.M.* // Semicond. Sci. Technol. 1991. V. 6. P. 27.