

# Влияние плотности дефектов упаковки на люминесцентные характеристики структур оптически накачиваемых лазеров на основе Cd(Zn)Se квантовых точек, излучающих в желто-зеленой области спектра

А. Г. Войнилович<sup>1</sup>, В. Н. Павловский<sup>1</sup>, В. А. Шуленкова<sup>1</sup>, Е. В. Луценко<sup>1</sup>,  
Г. П. Яблонский<sup>1</sup>, С. В. Гронин<sup>2</sup>, Г. В. Клишко<sup>2</sup>, С. В. Сорокин<sup>2</sup>, И. В. Седова<sup>2</sup>,  
С. В. Иванов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь;  
e-mail: a.vainilovich@ifanbel.bas-net.by

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

При создании приборных гетероструктур полупроводниковых лазеров необходим тщательный контроль плотности структурных дефектов. В настоящей работе приведен пример выявления дефектов упаковки в структурах оптически накачиваемых лазеров на основе квантовых точек Cd(Zn)Se, излучающих в желто-зеленой области спектра с использованием люминесцентной микроскопии. Проанализированы пространственные картины фотолюминесценции поверхности гетероструктур и их спектры фотолюминесценции в зависимости от плотности дефектов упаковки в диапазоне  $\sim 10^4$ – $10^7$  см<sup>-2</sup>. Показано, что величина отношения интенсивности полосы, связанной с глубокими уровнями, к интенсивности полосы межзонной рекомбинации  $R_{DL}$  существенно возрастает с ростом числа дефектов упаковки, начиная со значения  $(2-3) \cdot 10^5$  см<sup>-2</sup>. Установлено, что величина  $R_{DL}$  может использоваться как интегральный показатель кристаллического качества гетероструктур с активной областью Cd(Zn)Se.

**Ключевые слова:** полупроводниковый лазер, дефекты упаковки, люминесцентная микроскопия, фотолюминесценция

## Введение

Гетероструктуры II-VI на подложках GaAs с активной областью в виде квантовых ям и квантовых точек Cd(Zn)Se/ZnSe перспективны для создания компактных оптически накачиваемых лазеров на желто-зеленую спектральную область [1–2]. Для создания на их основе приборных структур необходимо, чтобы плотность структурных дефектов составляла  $\leq 10^4$  см<sup>-2</sup>. В ряде исследованных лазерных структур были выявлены такие структурные дефекты, как дефекты упаковки (ДУ). В настоящей работе проведены измерения плотности ДУ люминесцентным методом и исследовано влияние плотности ДУ на люминесцентные характеристики структур.

## 1. Методика эксперимента и результаты измерений

Дефекты упаковки, выступающие в роли безызлучательных центров, могут быть обнаружены в люминесцентных изображениях исследуемых структур в виде темных (несветящихся) областей прямоугольной формы на общем ярком фоне. Такие дефекты, зарождаясь чаще всего на гетеровалентном интерфейсе ZnSe/GaAs, увеличиваются в размере пропорционально толщине растущего слоя и выходят на поверхность структуры. Поскольку ДУ выходят на поверхность, их плотность может быть непосредственно определена путем селективного травления структур и подсчета возникших фигур травления. Однако, оптическая диагностика, очевидно, более удобна, поскольку позволяет оценивать пространственное распределение дефектов по всему образцу, не приводя к его потере. На рис. 1, а представлена фотография всего образца, снятая в свете его фотолюминесценции. Учитывая равномерный характер засветки, на снимке обнаруживается заметная неоднородность распределения интенсивности и/или цвета люминесценции. При помощи люминесцентного микроскопа ЛЮМАМ (ЛОМО), оснащенного современной цифровой камерой и спектрометром, была получена серия

снимков поверхности и измерены соответствующие им спектры излучения в различных областях на образце. Для возбуждения ФЛ использовалось излучение голубого светодиода со спектральной полосой  $465 \text{ nm} \leq \lambda \leq 490 \text{ nm}$ , которая была вырезана оптическими фильтрами.

Снимки поверхности, сделанные в различных областях образца, показали, что неоднородность его свечения вызвана вариацией плотности дефектов упаковки. Для примера на рис. 1, *в-д* представлены изображения трех областей диаметром 100 микрон, на которых видно, что число темных точек изменяется, в то время как интенсивность поля вокруг остается практически постоянной. Как видно из рис. 1, *б*, преимущественное влияние на картину излучения оказывают ДУ в виде двух размытых темных штрихов, вытянутых преимущественно в направлении  $[1 -1 0]$  – ДУ типа “ $V_\alpha$ ”. Кроме этих доминирующих ДУ, на снимках можно заметить считанное количество ДУ в виде двух четких штрихов, вытянутых в направлении  $[1 1 0]$  – ДУ типа “ $V_\beta$ ”. Следует отметить, что для ДУ типа  $V_\alpha$  характерно наличие некоторой области, вокруг безызлучательного центра, в которой интенсивность излучения существенно снижена. В дальнейшем, при расчетах плотности дефектов в расчет принимались только ДУ типа  $V_\alpha$ .

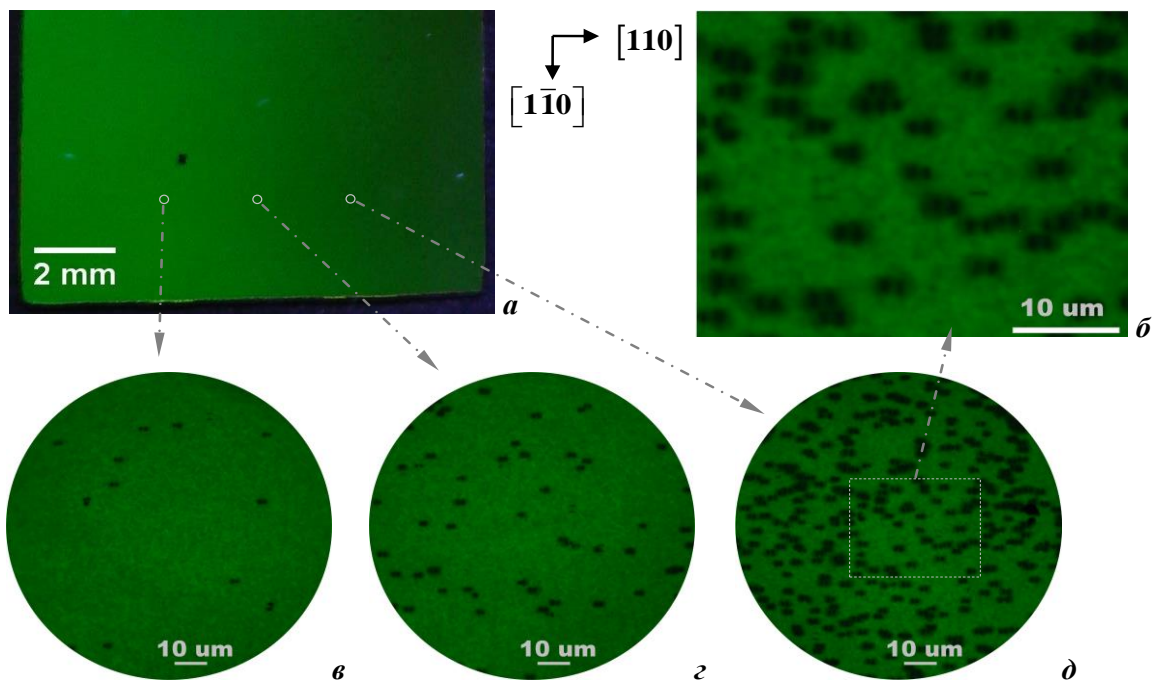


Рис. 1. – Люминесцентный снимок поверхности структуры при равномерной засветке излучением светодиода (*а*); микролюминесцентные снимки для указанных участков поверхности с размерами:  $40 \times 30 \text{ мкм}$  – (*б*);  $\varnothing 100 \text{ мкм}$  – (*в*), (*г*), (*д*).

На рис. 2, *а* представлены спектры ФЛ для участков с различной плотностью ДУ. В спектрах наблюдаются две фотолуминесцентные полосы с максимумами на  $h\nu \sim 2.30 \text{ эВ}$  и  $h\nu \sim 1.81 \text{ эВ}$ , обусловленные, соответственно, межзонными переходами (NBE) и переходами с участием глубоких состояний (DL) в активной области Cd(Zn)Se. Узкая полоса излучения с максимумом на  $h\nu \sim 2.50 \text{ эВ}$  обусловлена длинноволновым крылом полосы возбуждения.

На рис. 2, *б* представлены зависимости интенсивности (по максимальному значению) полос NBE ( $I_{\text{NBE}}$ ) и DL ( $I_{\text{DL}}$ ). Экспериментальные значения  $I_{\text{NBE}}$  и  $I_{\text{DL}}$ , соответствующие микролюминесцентным снимкам на рис. 1, *в-д*, помечены как

незакрашенные кружки. Видно, что при плотности менее  $\sim 2 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2}$  дефекты упаковки практически не влияют на интенсивности люминесцентных полос NBE и DL, значения которых можно считать постоянными:  $I_{\text{NBE}} = I_{\text{NBE}}^0$ ,  $I_{\text{DL}} = I_{\text{DL}}^0$ . Это обусловлено тем, что площадь поверхности, охватываемая малочисленными дефектами (рис. 1, в), значительно меньше общей площади пятна засветки. При дальнейшем увеличении плотности ДУ интенсивность полосы NBE уменьшается, а полосы DL увеличивается. Как видно, относительное изменение интенсивности полосы DL,  $I_{\text{DL}}/I_{\text{DL}}^0$ , заметно более чувствительно к росту плотности ДУ, чем  $I_{\text{NBE}}/I_{\text{NBE}}^0$ , т. е. нарастание интенсивности полосы  $I_{\text{DL}}$  идет с заметно большей скоростью, чем спад полосы  $I_{\text{NBE}}$ .

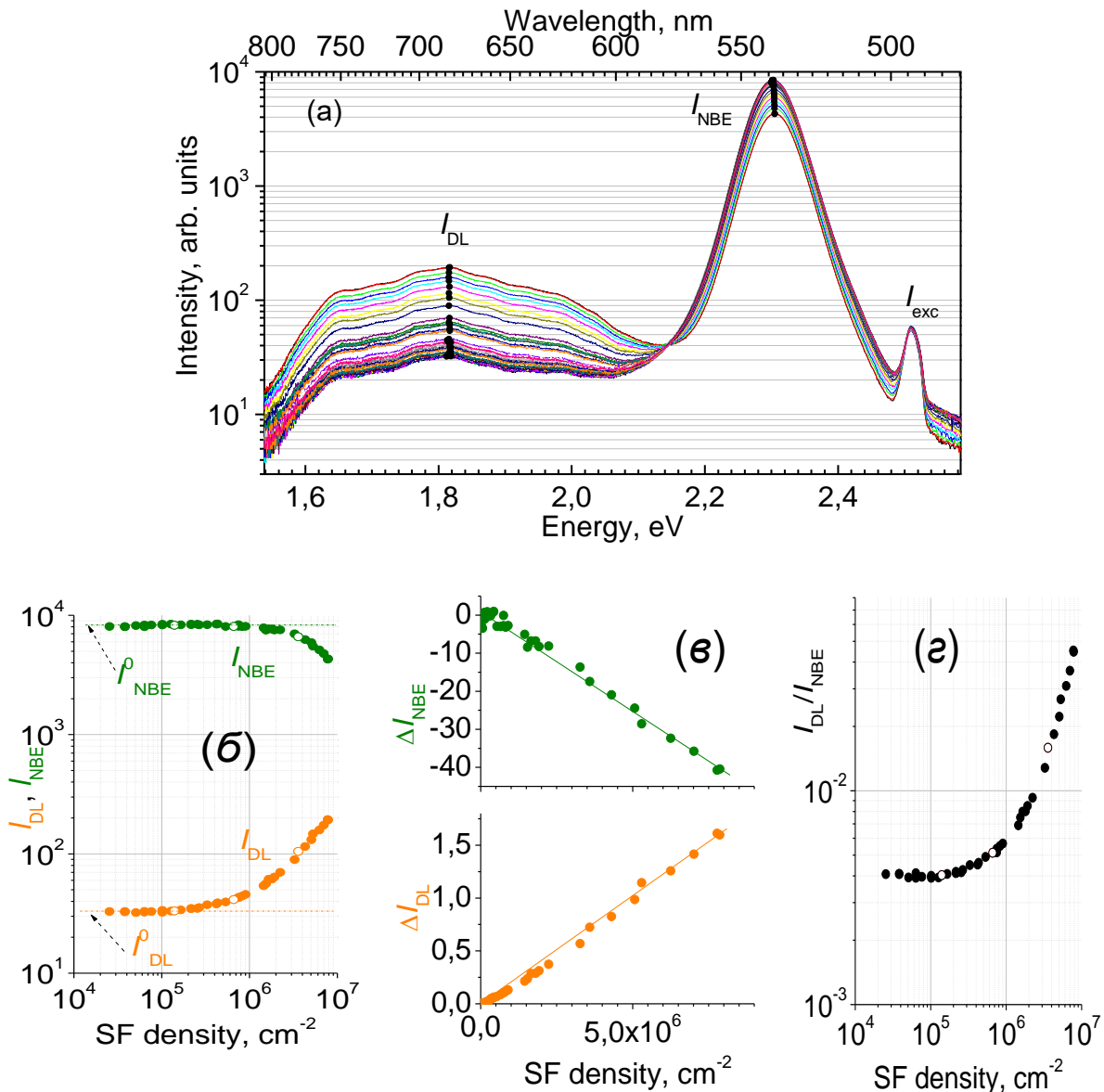


Рис. 2. – Спектры ФЛ участков с различной плотностью ДУ (а); зависимость интенсивности полос NBE ( $I_{\text{NBE}}$ ) и DL ( $I_{\text{DL}}$ ) – (б), величины  $\Delta I_{\text{DL}} = I_{\text{DL}} - I_{\text{DL}}^0$  и  $\Delta I_{\text{NBE}} = I_{\text{NBE}} - I_{\text{NBE}}^0$  – (в); и величины  $R_{\text{DL}} = I_{\text{DL}}/I_{\text{NBE}}$  – (д) от плотности ДУ.

Из рис. 2, в можно заключить, что приращение интенсивности полос  $\Delta I_{\text{NBE}} = I_{\text{NBE}} - I_{\text{NBE}}^0$  и  $\Delta I_{\text{DL}} = I_{\text{DL}} - I_{\text{DL}}^0$  прямо пропорционально плотности ДУ, т. е. эти изменения обусловлены геометрическим увеличением суммарной площади темных пятен. Приращение интенсивности полосы DL может происходить за счет излучения из темных пятен, и, что более вероятно, из слабосветящихся областей вокруг темных пятен (рис. 1, б).

На рис. 2, г приведена зависимость отношения интенсивностей полос DL и NBE,  $R_{\text{DL}} = I_{\text{DL}}/I_{\text{NBE}}$ , в зависимости от плотности ДУ. Очевидно, что величина  $R_{\text{DL}}$  будет наиболее чувствительна к фактической плотности ДУ и может использоваться как интегральный (по площади пятна засветки) показатель кристаллического качества активной области гетероструктуры. В отличие от величин  $I_{\text{NBE}}$  и  $I_{\text{DL}}$  этот показатель не должен существенно зависеть от функции выхода излучения из кристалла, обусловленной шероховатостью его поверхности.

Предварительные исследования серии лазеров различного дизайна (длина волны генерации ~540–555 нм) с относительно высокой плотностью ДУ также показывают связь величины  $R_{\text{DL}}$  с плотностью ДУ в них. Плотность дефектов упаковки, определенная по люминесцентным картинкам, подтверждается методикой подсчета фигур травления при жидкостном селективном травлении структур. Таким образом, показаны возможность использования люминесцентного контроля для определения плотности ДУ и применимость величины  $R_{\text{DL}}$  как показателя кристаллического качества активной области гетероструктур желто-зеленых лазеров.

### Литература

1. Ivanov S. V. et al. True Green and Yellow Low-Threshold II-VI Laser Heterostructures for II-VI/III-N Laser Diode Converters. Proc. 2015 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim. Busan, South Korea, 2015P. 27H1\_2.
2. Vainilovich A. G. et al. Microchip laser converter based on InGaN laser diode and (Zn)CdSe quantum dot heterostructure. Phys. Status Solidi B. 2016. Vol. 253, No. 8. P. 1498–1502.

## **Influence of the stacking fault density on the luminescence characteristics of structures of optically pumped lasers based on Cd(Zn)Se quantum dots emitting in the yellow-green spectral region**

A.G. Vainilovich<sup>1</sup>, V.N. Pavlovskii<sup>1</sup>, B.A. Shulenkova<sup>1</sup>, E.V. Lutsenko<sup>1</sup>, G.P. Yablonskii<sup>1</sup>, S.V. Gronin<sup>2</sup>, G.V. Klimko<sup>2</sup>, S.V. Sorokin<sup>2</sup>, I.V. Sedova<sup>2</sup>, S.V. Ivanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> B. I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus;

*e-mail: a.vainilovich@ifanbel.bas-net.by*

<sup>2</sup> Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

When creating device structures of semiconductor lasers, careful control of the structural defect density is required. In this paper, an example of the luminescence microscopy detection of stacking faults in the optically pumped Cd(Zn)Se quantum dot heterostructures emitting in the yellow-green spectral region is given. The spatial photoluminescence patterns and photoluminescence spectra are analyzed depending on the density of stacking faults in the range of  $\sim 10^4$ – $10^7$  cm<sup>-2</sup>. It is shown that the ratio of the intensity of the band associated with deep levels to the intensity of near band edge emission  $R_{\text{DL}}$  significantly increases with an increase in the number of stacking faults, starting from a value of  $2 \cdot 3 \cdot 10^5$  cm<sup>-2</sup>. It was found that the  $R_{\text{DL}}$  value can be used as an integral indicator of the crystal quality of the heterostructures with a Cd(Zn)Se active region.

**Keywords:** semiconductor laser, stacking faults, luminescent microscopy, photoluminescence.