

## Наблюдение прямозонной электролюминесценции из GaAs-структуры с квантовыми ямами Ge

© В.Я. Алешкин<sup>+,\*</sup>, Н.В. Дикарева<sup>†</sup>, А.А. Дубинов<sup>+,\*†</sup>, Б.Н. Звонков<sup>†</sup>, К.Е. Кудрявцев<sup>+,\*</sup>, С.М. Некоркин<sup>†</sup>

<sup>+</sup> Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>\*</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>†</sup> Научно-исследовательский физико-технический институт  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 23 мая 2014 г. Принята к печати 16 июня 2014 г.)

С использованием метода лазерного распыления выращена светодиодная структура на основе GaAs с 8 узкими квантовыми ямами Ge. Обнаружена линия электролюминесценции с преимущественно параллельной слоям структуры поляризации, соответствующая прямым в импульсном пространстве оптическим переходам в квантовых ямах Ge.

Исследования гетеропары Ge/GaAs начались еще в 60-х годах прошлого века из-за того, что постоянные решетки этих материалов практически равны [1]. Тогда же было выяснено, что в получаемых гетероструктурах возникали различные дефекты, связанные с взаимным легированием материалов и наличием сильного случайного потенциала в гетеропереходе [2], создающего заряд и электрическое поле на границе гетероперехода. Кроме того, возникали проблемы с плоскостями двойникования [3] при росте GaAs на Ge. Эти проблемы долгое время мешали использованию гетеропары для практических применений. Однако было показано, что использование различных ориентаций подложек и методов эпитаксиального роста существенно снижает количество дефектов в подобных структурах [4–12], что дает возможность использования германиевых подложек для роста лазерных структур на основе GaAs [13] и использование гетеропары Ge/GaAs в эффективных фотовольтаических элементах [14]. Все это указывает на то, что кристаллическое качество гетеропары Ge/GaAs может быть достаточным для оптических применений, в частности для создания эффективного излучателя на ее основе.

Вследствие непрямозонной природы германия этот материал долгое время не рассматривался как активная среда для лазера на межзонных переходах. Однако недавно был впервые реализован диодный лазер на основе объемного германия, обладающий огромной плотностью порогового тока [15].

В настоящее время в литературе не сложилось общего мнения о величинах разрывов зоны проводимости и валентной зоны для гетероперехода Ge/GaAs. Возможно, это связано с поверхностными состояниями на гетерогранице полярного и неполярного материалов Ge/GaAs, что приводит к зависимости разрывов зон на этой гетерогранице от параметров роста гетероструктуры. В ряде работ разрыв в зоне проводимости  $\Delta E_c$  оценивался значениями от 0.33 [16] до  $-0.025$  эВ [17] (в этом случае

гетеропереход GaAs/Ge является гетеропереходом второго рода). Под  $\Delta E_c$  понимается разрыв энергий между дном  $L$ -долины Ge и дном  $\Gamma$ -долины GaAs. Более того, в работе [17] было сделано утверждение, что  $\Delta E_c$  зависит от условий роста гетероперехода. Если Ge/GaAs — гетеропереход первого рода и разрыв зон на границе равен  $0.28–0.33$  эВ, то, согласно расчетам зонного спектра [18] квантовых ям Ge, выращенных на GaAs, при толщинах слоя Ge  $< (2–3)$  нм квантовая яма становится прямозонной. Прямозонную фотолюминесценцию (ФЛ) удалось наблюдать в структурах Ge/GaAs, выращенных при температурах  $> 550^\circ\text{C}$  [12] даже с широкими квантовыми ямами Ge (толщиной слоя 6 нм). Однако для структур Ge/GaAs, выращенных при низкой температуре ( $400^\circ\text{C}$ ), а затем отожженных при  $700^\circ\text{C}$ , разрыв зон на границе составил  $\sim 0.14$  эВ, что сопоставимо с разницей между энергиями  $L$ -долины и  $\Gamma$ -долины в Ge. В результате наблюдалась линия ФЛ при комнатной температуре в районе длины волны 1.3 мкм [19]. Эта линия соответствует непрямым переходам в координатном пространстве, но прямым в импульсном пространстве переходам между слоями GaAs и Ge.

Целью настоящей работы являлось наблюдение прямозонной электролюминесценции (ЭЛ) из диодной структуры на основе GaAs с узкими квантовыми ямами Ge (0.7 нм).

Диодная структура с 8 квантовыми ямами Ge была выращена на подложке GaAs [001] $p^+$ -типа проводимости в установке МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений) при атмосферном давлении. Слои германия и часть слоев GaAs выращивались с помощью метода лазерного распыления (ЛР в таблице) в той же установке, часть слоев GaAs выращена методом МОС-гидридной эпитаксии (Э в таблице). Детали технологии роста приведены в [20].

Исследования ФЛ и ЭЛ были проведены при температурах 77 и 300 К. Для возбуждения ФЛ использовалось непрерывное излучение Nd:YAG-лазера с длиной волны

<sup>†</sup> E-mail: sanya@ipm.sci-nnov.ru

Параметры структуры Ge/GaAs

№ слоя	Состав и легирование	Толщина, нм	Метод и температура роста, °С
1	<i>p</i> -GaAs	660	Э, 600
2	<i>i</i> -GaAs	330	Э, 600
3	<i>p</i> -GaAs	33	ЛР, 400
4	Ge	0.7	ЛР, 400
5	<i>p</i> -GaAs	165	ЛР, 400
6–26	Повторение 7 раз слоев 3–5		
27	<i>i</i> -GaAs	165	Э, 600
28	<i>n</i> <sup>+</sup> -GaAs	330	Э, 600

532 нм. В качестве приемника излучения использовалась диодная линейка.

Для возбуждения ЭЛ к диодной структуре длиной 1 мм и шириной 450 мкм были изготовлены контакты, по которым подводился постоянный электрический ток величиной до 0.5 А. Приемником излучения был Ge-фотодиод. Прямая ветвь вольт-амперной характеристики исследуемого диода, измеренная при температурах 77 и 300 К, приведена на рис. 1. Из рис. 1 видно, что *p-n*-переход достаточно качественный.

На рис. 2 приведены спектры ЭЛ изучаемой структуры при температуре 77 К для нескольких токов накачки. Из рисунка видно, что в спектре при малых токах накачки наблюдаются 3 пика. Самый коротковолновый пик (длина волны 0.835 мкм) соответствует рекомбинации из зоны проводимости на акцепторные состояния в *p*-GaAs [21]. Самый длинноволновый пик (длина волны 1.05 мкм) отвечает за рекомбинацию носителей на дефектах в GaAs, возникающих из-за диффузии германия в слой GaAs [21]. Средний пик (длина волны уменьшается с ростом тока от 0.88 до 0.865 мкм), как показало сравнение экспериментальных данных с расчетом в модели [18] (в предположении, что разрыв зон на границе Ge/GaAs равен 0.28–0.33 эВ), может отвечать прямым в импульсном пространстве переходам из первой подзоны Г-долины зоны проводимости в первую подзону тяжелых дырок германиевых квантовых ям. С ростом тока накачки „мелкие“ подзоны размерного квантования электронов и дырок быстро заполняются и начинается рекомбинация из барьеров GaAs, что приводит к росту коротковолнового пика ЭЛ. Отметим, что, согласно расчетам [18], в узких квантовых ямах Ge имеется только по одной подзоне размерного квантования электронов и тяжелых и легких дырок. На вставке с двойной логарифмической шкалой к рис. 2 виден сверхлинейный рост интегральной интенсивности излучения с ростом тока накачки, который можно объяснить постепенным заполнением состояний дефектов с ростом концентрации носителей. Как показали наши предыдущие исследования [12], время рекомбинации носителей на дефектах в GaAs значительно превосходит время рекомбинации носителей из зоны проводимости на акцепторные состояния в *p*-GaAs.

Те же три пика наблюдались в спектрах ЭЛ при комнатной температуре. Все три пика (длины волн 0.87, 0.9 и 1.15 мкм соответственно) сдвинулись в длинноволновую область из-за уменьшения ширины запрещенной зоны GaAs и уширились, в результате чего 2 коротковолновых пика существенно перекрылись (см. рис. 3).

Для прояснения природы пика ЭЛ на длине волн 0.88 мкм при температуре 77 К была исследована поляризация ЭЛ. На рис. 4 представлены спектры ЭЛ с разной поляризацией (вдоль слоев и перпендикулярно слоям структуры), а также для сравнения приведен спектр ФЛ. В спектре ФЛ наблюдаются два перекрывающихся пика (длины волн 0.81 и 0.835 мкм). Более интенсивный коротковолновый пик соответствует оптическим переходам из сильно легированного поверх-

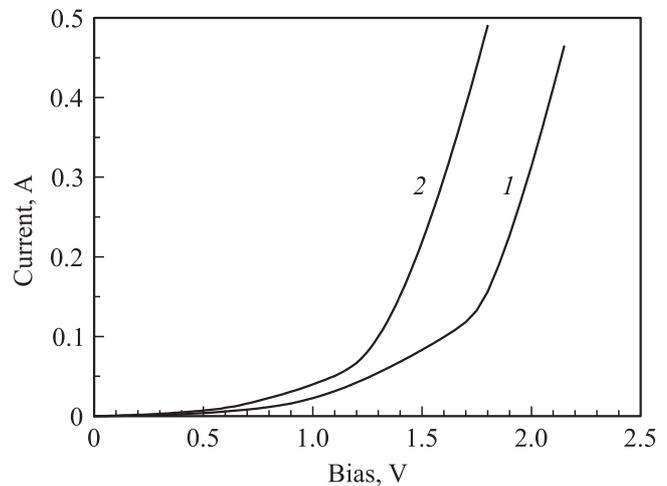


Рис. 1. Прямая ветвь вольт-амперной характеристики GaAs диода с квантовыми ямами Ge при температурах 77 К (1) и 300 К (2).

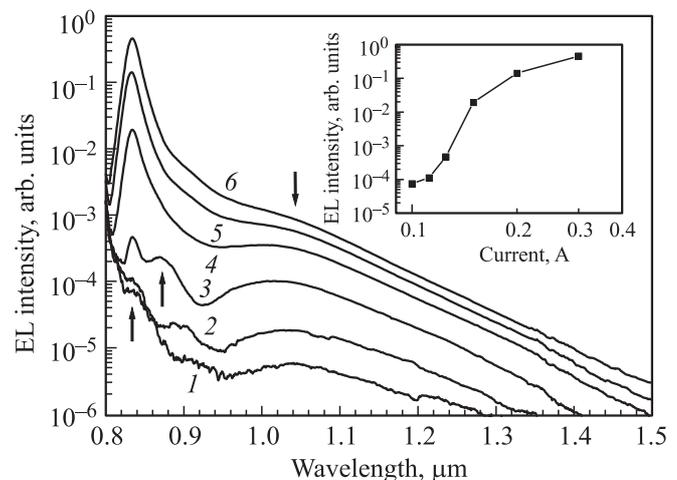
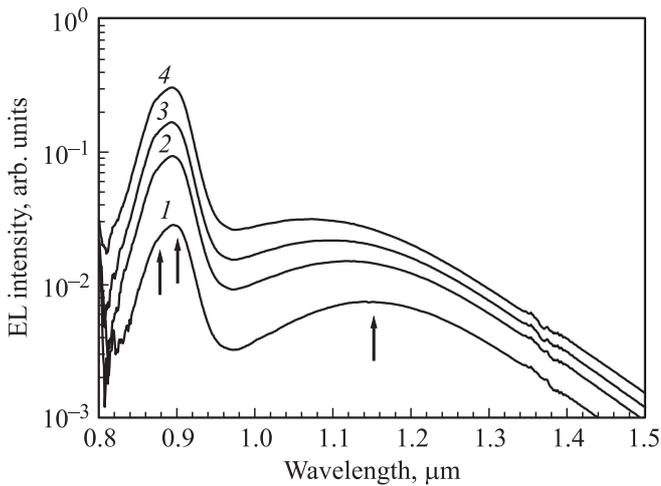
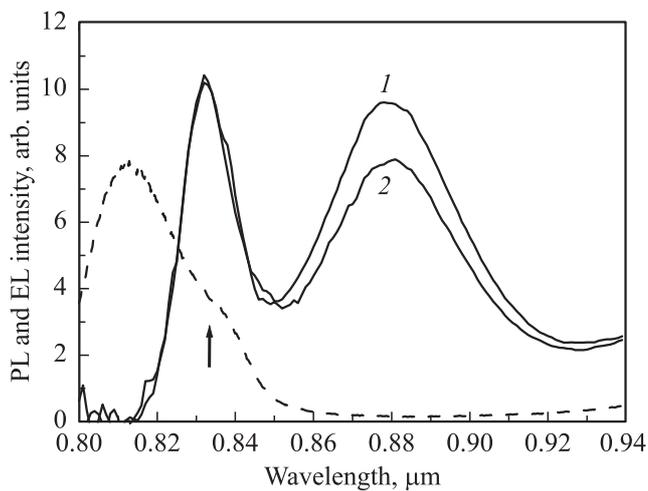


Рис. 2. Спектр электролюминесценции (EL) GaAs-диода с квантовыми ямами Ge при температуре 77 К. Ток накачки, А: 0.1 (1), 0.112 (2), 0.125 (3), 0.15 (4), 0.2 (5), 0.3 (6). На вставке — зависимость интегральной интенсивности электролюминесценции от тока накачки.



**Рис. 3.** Спектр электролюминесценции (EL) GaAs-диода с квантовыми ямами Ge при температуре 300 К. Ток накачки, А: 0.1 (1), 0.15 (2), 0.2 (3), 0.3 (4).



**Рис. 4.** Спектры фотолуминесценции (PL, штриховая кривая) и электролюминесценции (EL, сплошные кривые) GaAs-диода с квантовыми ямами при температуре 77 К и токе 0.1 А. Поляризация электролюминесценции: 1 — вдоль слоев структуры, 2 — перпендикулярно слоям структуры.

ностного  $n^+$ -GaAs, а второй, как было написано выше, соответствует оптическим переходам в барьерных слоях  $p$ -GaAs. Пик на длине волны 0.88 мкм в спектре ФЛ не наблюдается. Отметим, что ЭЛ, отвечающая оптическим переходам в барьерном GaAs (длина волны 0.835 мкм), не поляризована (см. рис. 4).

Из рис. 4 видно, что ЭЛ на длине волны 0.88 мкм с поляризацией вдоль слоев структуры значительно интенсивнее, чем ЭЛ с поляризацией перпендикулярно слоям структуры. Это является характерным признаком оптических переходов с участием преимущественно тяжелых дырок в квантовых ямах и подтверждает нашу гипотезу о физической природе этого пика.

Работа поддержана РФФИ-Поволжье (13-02-97052) и ЦКП ИФМ РАН „Физика и технологии микро- и наноструктур“.

## Список литературы

- [1] R.L. Anderson. IBM J. Res. Dev., **4**, 283 (1960).
- [2] W.A. Harrison, E.A. Kraut, J.R. Waldrop, R.W. Grant. Phys. Rev. B, **18**, 4402 (1978).
- [3] H. Kroemer. J. Cryst. Growth, **81**, 193 (1987).
- [4] S.L. Wright, H. Kroemer, M. Inada. J. Appl. Phys., **55**, 2916 (1984).
- [5] Y. Bai, K.E. Lee, C. Cheng, M.L. Lee, E.A. Fitzgerald. J. Appl. Phys., **104**, 084 518 (2008).
- [6] R. Jakomin, M. de Kersauson, M. El Kurdi, L. Largeau, O. Mauguin, G. Beaudoin, S. Sauvage, R. Ossikovski, G. Ndong, M. Chaigneau, I. Sagnes, P. Boucaud. Appl. Phys. Lett., **98**, 091 901 (2011).
- [7] S. Strite, D. Biswas, N.S. Kumar, M. Fradkin, H. Morkoc. Appl. Phys. Lett., **56**, 244 (1990).
- [8] R.M. Sieg, S.A. Ringel, S.M. Ting, E.A. Fitzgerald, R.N. Sacks. J. Electron. Mater., **27**, 900 (1998).
- [9] G. Brammertz, Y. Mols, S. Degroote, V. Motsnyi, M. Leys, G. Borghs, M. Caymax. J. Appl. Phys., **99**, 093 514 (2006).
- [10] C.K. Chia, J.R. Dong, D.Z. Chi, A. Sridhara, A.S.W. Wong, M. Suryana, G.K. Dalapati, S.J. Chua, S.J. Lee. Appl. Phys. Lett., **92**, 141 905 (2008).
- [11] V.A. Volodin, L.V. Sokolov, M.A. Pytyato, N.I. Petikov, M. Stoffel, H. Rinnert, M. Vergnat. J. Appl. Phys., **115**, 053 518 (2014).
- [12] В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов, М.Н. Дроздов, Б.Н. Звонков, К.Е. Кудрявцев, А.А. Тонких, А.Н. Яблонский, Р. Werner. ФТП, **47**, 621 (2013).
- [13] M. D'Hondt, Z.-Q. Yu, B. Depreter, C. Sys, I. Moerman, P. Demeester, P. Mijlemans. J. Cryst. Growth, **195**, 655 (1998).
- [14] A. Freundlich, A. Alemu. Phys. Status Solidi C, **2**, 2978 (2005).
- [15] R.E. Camacho-Aguilera, Y. Cai, N. Patel, J.T. Bessete, M. Romagnoli, L.C. Kimerling, J. Michel. Opt. Exp., **20**, 11 316 (2012).
- [16] M.K. Hudait, Y. Zhu, D. Maurya, S. Priya, P.K. Patra, A.W.K. Ma, A. Aphale, I. Macwan. J. Appl. Phys., **113**, 134 311 (2013).
- [17] M. Dahmen, U. Rau, M. Kawanaka, J. Sone, J.H. Werner. Appl. Phys. Lett., **62**, 261 (1993).
- [18] V. Ya. Aleshkin, A.A. Dubinov. J. Appl. Phys., **109**, 123 107 (2011).
- [19] V. Ya. Aleshkin, A.A. Dubinov, K.E. Kudryavtsev, V.V. Rumyantsev, A.A. Tonkikh, N.D. Zakharov, B.N. Zvonkov. J. Appl. Phys., **115**, 043 512 (2014).
- [20] Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Е.С. Демидов, П.Б. Дёмина, М.В. Дорохин, Ю.Н. Дроздов, В.В. Подольский, М.В. Сапожников. Опт. журн., **75**, 56 (2008).
- [21] К.С. Журавлев, С.И. Чикичев, Р. Штаске, Н.А. Якушева. ФТП, **24**, 1645 (1990).

Редактор Л.В. Шаронова

## **Observation of direct band electroluminescence in GaAs structure with Ge quantum wells**

*V.Ya. Aleshkin<sup>+\*</sup>, N.V. Dikareva<sup>†</sup>, A.A. Dubinov<sup>+\*†</sup>,  
B.N. Zvonkov<sup>†</sup>, K.E. Kudryavtsev<sup>+\*</sup>, S.M. Nekorkin<sup>†</sup>*

<sup>+</sup> Institute for Physics of Microstructures,  
Russian Academy of Science,  
603950, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>\*</sup> Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>†</sup> Research Physical-Technical Institute  
of the Lobachevsky State University  
of Nizhny Novgorod,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** A GaAs-based light diode structure with 8 narrow Ge quantum wells were grown using the method of laser-assisted sputtering. A predominantly polarized parallel to the layers of the structure electroluminescence line corresponding to direct optical transitions in momentum space in Ge quantum wells was detected.