

# Идентификация полос фотолюминесценции AlGaAs/InGaAs/GaAs $p$ HEMT гетероструктур с донорно-акцепторным легированием барьеров

© Д.В. Гуляев\*, К.С. Журавлев\*+, А.К. Бакаров\*+, А.И. Торопов\*

\* Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

+ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

(Получена 23 мая 2014 г. Принята к печати 9 июня 2014 г.)

Изучена фотолюминесценция AlGaAs/InGaAs/GaAs  $p$ HEMT гетероструктур с донорно-акцепторным легированием AlGaAs-барьеров. Обнаружено, что введение в конструкцию дополнительных  $p^+$  легированных слоев AlGaAs приводит к появлению новых полос в спектрах фотолюминесценции. Данные полосы идентифицированы как переходы между: 1) донорно-акцепторными парами в легированных AlGaAs-слоях и 2) подзоной проводимости и акцепторным уровнем в нелегированной яме InGaAs.

## 1. Введение

На сегодняшний день одними из наиболее распространенных электронных компонент современных приборов, работающих в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн, остаются мощные СВЧ транзисторы, созданные на псевдоморфных AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктурах (pseudomorphic High Electron Mobility Transistor,  $p$ HEMT). Поэтому задачи, направленные на улучшение характеристик подобных гетероструктур, до сих пор не утратили ни своей актуальности, ни практического значения. Так, недавно нами было установлено, что донорно-акцепторное легирование барьеров AlGaAs приводит к значительному улучшению характеристик  $p$ HEMT транзисторов [1]. При этом зачастую оказывается, что характеристики  $p$ HEMT гетероструктур зависят не только от особенностей конструкции, но и от выбора условий роста. Условия роста  $p$ HEMT гетероструктур должны обеспечивать, с одной стороны, высокое структурное совершенство слоев AlGaAs и InGaAs различного состава, оптимальная температура роста которых значительно отличается, а с другой — стороны обеспечивать достаточный уровень легирования слоев при отсутствии существенной сегрегации примесей. Таким образом, дальнейшее усложнение  $p$ HEMT гетероструктуры за счет применения дополнительных  $p^+$  легированных акцепторных слоев неминуемо влечет за собой необходимость оптимизации не только конструкции структуры, но и условий ее роста.

Фотолюминесценция (ФЛ), во многом определяющаяся такими параметрами гетероструктуры, как состав, количество примесей и дефектов, шероховатость гетерограниц слоев и т.д., является широко известным и развитым методом, используемым для характеристики качества гетероструктур [2]. В настоящее время люминесценция традиционных AlGaAs/InGaAs/GaAs  $p$ HEMT гетероструктур достаточно хорошо исследована, идентифицированы оптические переходы в слоях различного

состава, определены зависимости энергетического спектра структур от толщины и состава слоев, наличия примесей и дефектов [3–6]. В то же время введение в конструкцию гетероструктуры дополнительных  $p^+$  легированных слоев в совокупности с изменением условий роста гетероструктуры неизбежно приведет к изменению спектров ФЛ гетероструктур. Поэтому в данной работе проведено исследование спектров фотолюминесценции  $p$ HEMT гетероструктур, вызываемой донорно-акцепторным легированием AlGaAs-барьеров.

## 2. Методика эксперимента

Исследуемые  $p$ HEMT гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках GaAs ориентации (100) с буфером, состоящим из слоя GaAs толщиной 0.4 мкм и 12-периодной сверхрешетки (GaAs)/(AlGaAs). Выращено три типа  $p$ HEMT гетероструктур, отличающихся конструкцией легированных AlGaAs-слоев. Основные слои исследованных гетероструктур приведены в табл. 1. Гетероструктуры первого типа представляют собой  $p$ HEMT гетероструктуры с двухсторонним донорно-акцепторным легированием, т.е.  $p^+$  легированные слои AlGaAs расположены по обе стороны от InGaAs квантовой ямы (далее  $D(pn)$ - $p$ HEMT) гетероструктуры. Гетероструктуры второго типа представляют собой  $p$ HEMT гетероструктуры с односторонним донорно-акцепторным легированием, т.е.  $p^+$  легированные слои AlGaAs расположены только сверху от InGaAs квантовой ямы (далее  $(pn)$ - $p$ HEMT) гетероструктуры. И наконец, гетероструктуры третьего типа представляют собой типичную  $p$ HEMT гетероструктуру без акцепторного легирования. В гетероструктурах акцепторной примесью являются атомы бериллия, донорной примесью — атомы кремния. Характерные концентрации и подвижности для

Таблица 1. Структура исследованных образцов

Тип гетероструктуры			Слой гетероструктуры. Назначение	Состав, $x_{AlAs}, y_{InAs}$	Толщина	Уровень легирования
1	2	3				
$D(pn)$ - $p$ HEMT	$(pn)$ - $p$ HEMT	$p$ HEMT				
+	+	+	Полуизолирующая GaAs-подложка		600 мкм	SI,(WT)
+	+	+	Буферный слой GaAs		400 нм	–
+	+	+	CP AlGaAs 6 нм/GaAs 5 нм × 12	–	–	–
+	+	+	Барьерный слой $Al_xGa_{1-x}As$	0.25	100 нм	–
+	Нет	Нет	Барьерный слой $p^+$ - $Al_xGa_{1-x}As$	0.25	15 нм	$4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
+	+	+	Барьерный слой $Al_xGa_{1-x}As$	0.25	5 нм	–
+	+	Нет	$\delta$ -Si слой в матрице GaAs	–	–	$8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$
+	+	+	Спейсер $Al_xGa_{1-x}As$	0.25	3 нм	–
+	+	+	Сглаживающий слой GaAs	–	3 нм	–
+	+	+	Канал $In_yGa_{1-y}As$	0.165	14 нм	–
+	+	+	Сглаживающий слой GaAs	–	1.5 нм	–
+	+	+	Спейсер $Al_xGa_{1-x}As$	0.25	3 нм	–
+	+	+	$\delta$ -Si слой в матрице GaAs	–	–	$7.25 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$
+	+	+	Барьерный слой $Al_xGa_{1-x}As$	0.25	7 нм	–
+	+	Нет	Барьерный слой $p^+$ - $Al_xGa_{1-x}As$	0.25	8 нм	$5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
+	+	+	Барьерный слой $Al_xGa_{1-x}As$	0.25	6 нм	–
+	+	+	Стоп-слой $Al_xGa_{1-x}As$	0.86–0.9	3 нм	–
+	+	+	Барьерный слой GaAs	–	27 нм	–
+	+	+	Контактный слой $n^+$ - GaAs	–	52 нм	$4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

Таблица 2. Характерные значения холловской концентрации и подвижности электронов исследованных образцов

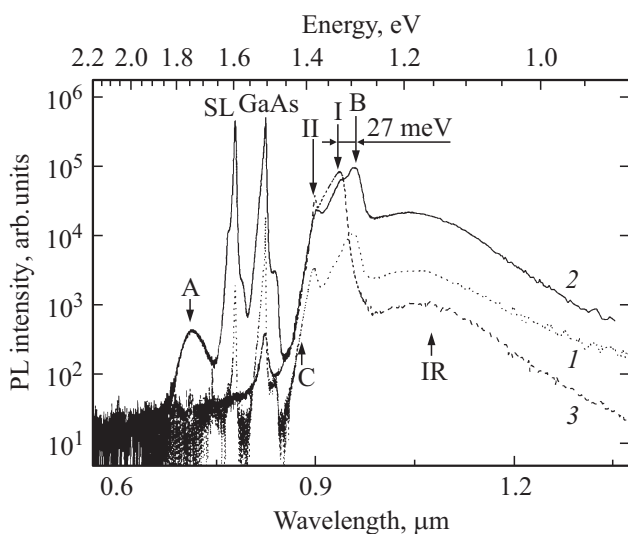
Тип гетероструктуры	Концентрация, $10^{12} \text{ см}^{-3}$	Подвижность, $10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	
		77 К	300 К
$D(pn)$ - $p$ HEMT	4–5	до 13	5.0
$(pn)$ - $p$ HEMT	3	до 16	5.7
$(n)$ - $p$ HEMT	1.65–1.85	до 30	6–7

всех типов исследованных гетероструктур приведены в табл. 2.

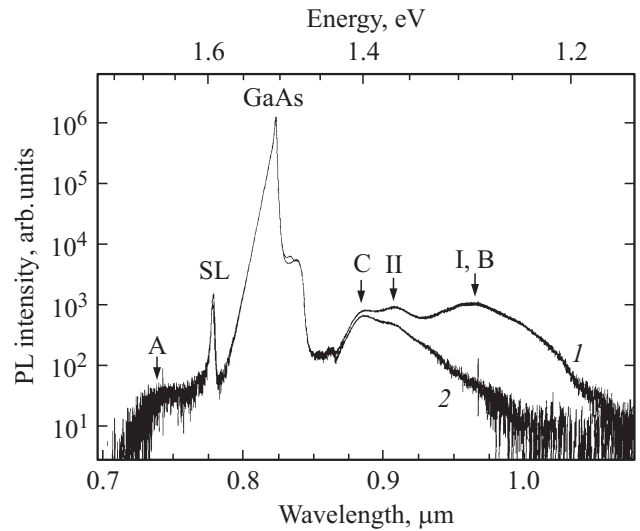
Для возбуждения фотолюминесценции использовался YAG:Nd лазер с длиной волны 527 нм и максимальной мощностью 150 мВт. Регистрация фотолюминесценции в спектральном диапазоне от 0.3 до 1 мкм проводилась спектрометром на основе одинарного дифракционного монохроматора, оснащенный кремниевой CCD матрицей, далее до 1.7 мкм спектрометром на основе двойного дифракционного монохроматора, оснащенный охлаждаемым азотом Ge-детектором. Измерение температурной зависимости фотолюминесценции проводилось в криостате в парах гелия. Точность поддержания температуры составляла не более 0.2 К.

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены спектры фотолюминесценции AlGaAs/InGaAs  $D(pn)$ - $p$ HEMT и  $(pn)$ - $p$ HEMT гетероструктур, измеренные при  $T = 77$  К. Для сравнения на этом же рисунке приведен спектр ФЛ  $p$ HEMT гетероструктуры, не содержащей слоев  $p^+$  легированных слоев AlGaAs. Как можно увидеть из этого рисунка, в спектрах ФЛ гетероструктур наблюдается множество полос ФЛ, связанных с оптическими переходами в различных слоях гетероструктуры. В спектре ФЛ  $p$ HEMT гетероструктуры наблюдаются комплексы полос, обозначенные на рис. 1 как SL, GaAs, C, I, II и IR. Введение в структуру дополнительных акцепторных  $p^+$  легированных слоев AlGaAs приводит к появлению новых полос ФЛ (полосы А и В на рис. 1).



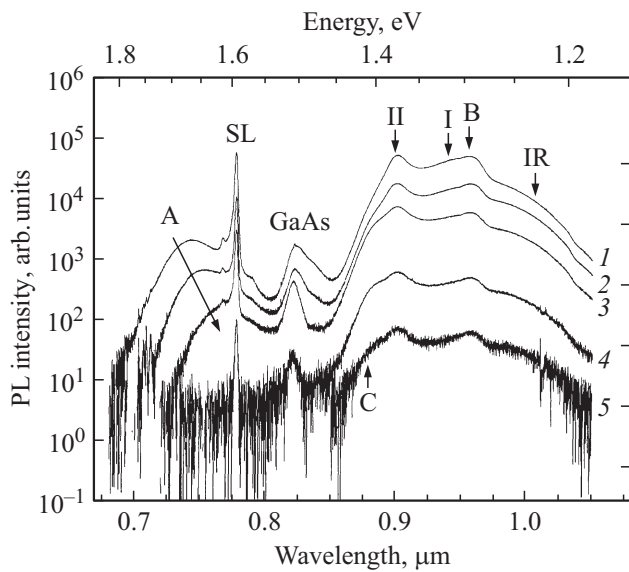
**Рис. 1.** Типичные спектры ФЛ: 1 —  $D(np)$ - $p$ HEMT, 2 —  $(np)$ - $p$ HEMT и 3 —  $p$ HEMT гетероструктур. Мощность возбуждения 50 мВт. Температура измерений 77 К. Спектры ФЛ получены сшивкой спектров, измеренных Ge-детектором и CCD-матрицей.



**Рис. 2.** Спектры ФЛ  $D(np)$ - $p$ HEMT гетероструктур, характеризующиеся разной подвижностью носителей заряда: 1 — 13 000 и 2 — 6000  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{с}$ . Мощность возбуждения 50 мВт. Температура измерений 77 К. Спектры ФЛ получены кремниевой CCD-матрицей.

По своему положению высокоэнергетическая полоса ФЛ А (1.86–1.66 эВ) может быть связана только с рекомбинацией носителей заряда в широкозонных AlGaAs-барьерах с содержанием алюминия  $x_{\text{Al}} = 0.25$ . Энергетическое положение комплекса полос SL, расположенных вблизи 1.6 эВ (776 нм), соответствует оптическим переходам в сверхрешетке GaAs/Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As с толщиной слоев 5 и 6 нм соответственно [7]. В спектре ФЛ такой сверхрешетки отчетливо видны полосы, связанные с рекомбинацией  $1s$  и  $2s$  экситонов, отстоящие друг от друга на 18 мэВ, так же в качестве низкоэнергетического плеча наблюдается полоса экситона, связанного на примеси [8]. Комплекс полос ФЛ GaAs, расположенный вблизи 1.51 эВ (822 нм), соответствует межзонным и зона-примесным оптическим переходам в слоях GaAs [9].

Полосы С, I, II, В и IR с энергией излучения меньше ширины запрещенной зоны объемного GaAs могут быть связаны либо с примесной ФЛ в слоях GaAs, либо с краевой ФЛ в слое InGaAs. Поэтому для определения принадлежности этих полос к конкретным слоям был исследован образец, в котором люминесценция слоя InGaAs подавлена из-за безызлучательной рекомбинации. В качестве такого образца выбрана  $D(np)$ - $p$ HEMT гетероструктура, характеризующаяся малой подвижностью носителей заряда (менее 6000  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{с}$  при 77 К) и, следовательно, большой концентрацией центров безызлучательной рекомбинации и дефектов в канале. Как можно увидеть из рис. 2, в спектре ФЛ такого образца наблюдается только полоса С, тогда как полосы I, II, В и IR практически пропадают. Соответственно мы можем заключить, что полосы I, II, В и IR связаны с рекомбинацией неравновесных носителей заряда в слое InGaAs.



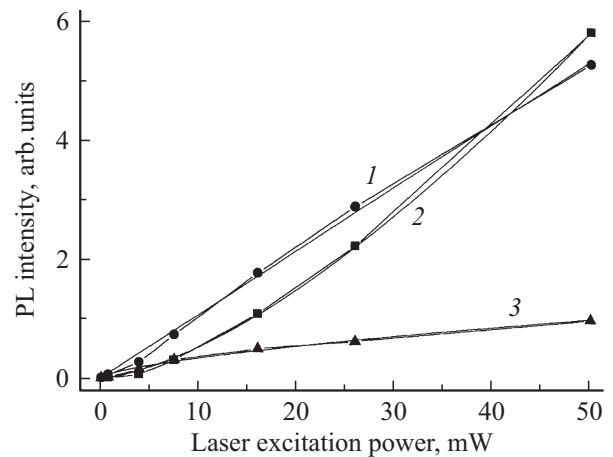
**Рис. 3.** Спектры ФЛ  $D(np)$ -HEMT гетероструктуры при разной мощности лазерного возбуждения: 1 — 50, 2 — 16, 3 — 7.5, 4 — 0.8 и 5 — 0.1 мВт. Температура 77 К. Спектры ФЛ измерены кремниевой CCD-матрицей.

При этом полосы I и II, присутствующие в спектрах ФЛ всех трех типов pHEMT гетероструктур, по своему энергетическому положению можно идентифицировать как переходы из первой и второй электронных подзон в первую подзону тяжелых дырок  $e1-h1$  и  $e2-h1$  соответственно [6]. Что касается полосы C, то, согласно литературным данным, оптический переход в GaAs с энергией около 1.4 эВ может соответствовать переходу с участием либо Mn-акцептора [9] либо вакансии галлия [10,11]. Поскольку pHEMT структуры были выращены на установках МЛЭ, не имеющих источников Mn, мы можем заключить, что полоса C вызвана оптическим переходом зона проводимости–уровень вакансии галлия. Следует отметить, что вакансии галлия расположены в буферном слое GaAs, поскольку рост только этого слоя начинается при достаточно низких температурах, требуемых для формирования вакансий.

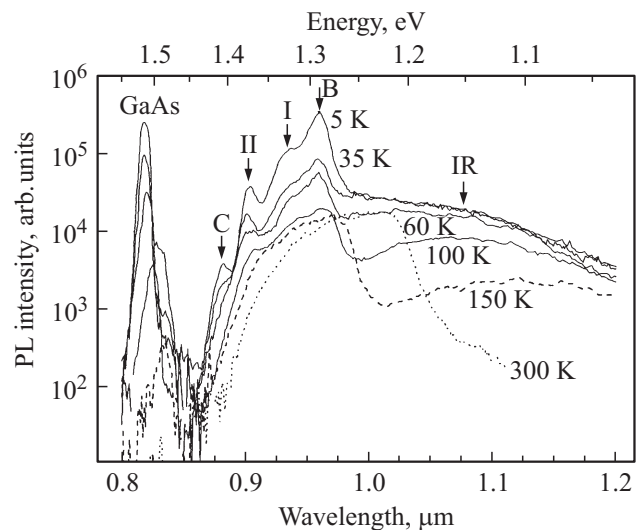
Для более подробной идентификации полос ФЛ были измерены температурные и мощностные зависимости спектров ФЛ гетероструктур  $D(np)$ -pHEMT.

На рис. 3 приведены характерные спектры фотолюминесценции типичной  $D(pn)$ -pHEMT, измеренные при различной мощности лазерного возбуждения. Как можно увидеть из этого рисунка, ФЛ новая полоса A с энергией порядка 1.86–1.66 эВ (660–750 нм) демонстрирует поведение, характерное для донорно-акцепторной рекомбинации, а именно смещается в сторону низких энергий при уменьшении мощности лазерного возбуждения [12]. Поскольку слои AlGaAs намеренно легированы кремнием, являющимся донорной примесью, и бериллием, являющимся акцепторной примесью, то можно ожидать, что в роли донорно-акцепторных пар выступают эти

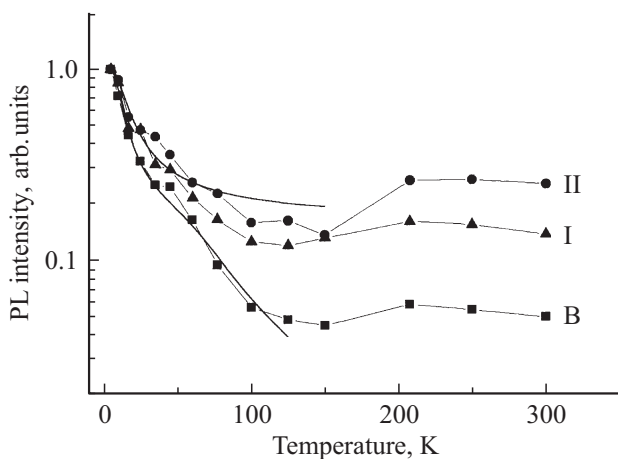
примесные атомы. На рис. 4 представлены зависимости интенсивности полос ФЛ от мощности лазерного возбуждения. Экспериментальные зависимости интенсивности хорошо описываются степенными функциями вида  $I_{pl} = C \cdot P^a$ , где  $I_{pl}$  — интенсивность ФЛ,  $P$  — мощность лазерного возбуждения,  $C$  — константа. Полосы I, II, B и IR, связанные с рекомбинацией носителей заряда в слое InGaAs, демонстрируют схожие зависимости от мощности лазерного возбуждения, близкие к линейной, что указывает на незначительное влияние безызлучательной рекомбинации в канале обычной  $D(np)$ -pHEMT гетероструктуры. Комплекс полос ФЛ SL описывается сверхлинейными зависимостями интенсивности ФЛ от мощности лазерного возбуждения с показателем степени, близким к 1.5, что подтверждает экситонную



**Рис. 4.** Зависимости интенсивности ФЛ полос (1) I, II, B, (2) C и (3) SL от мощности лазерного возбуждения. Температура измерений 77 К. Сплошными линиями показаны аппроксимационные кривые формулы вида  $I_{pl} = C \cdot P^a$ .



**Рис. 5.** Спектры ФЛ  $(np)$ -pHEMT гетероструктуры, измеренные при различной температуре. Мощность лазерного возбуждения 10 мВт. Спектры ФЛ измерены Ge-детектором.



**Рис. 6.** Характерные зависимости интенсивности ФЛ полос I, II и B от температуры. Мощность лазерного возбуждения 10 мВт.

природу полос этого комплекса. Тогда как полоса ФЛ C демонстрирует сублинейную зависимость интенсивности ФЛ от мощности лазерного возбуждения с показателем степени 0,6, что характерно для оптических переходов через дефектные уровни из-за их насыщения при большой мощности лазерного возбуждения [13].

На рис. 5 приведены спектры фотолюминесценции (*np*)-*p*НЕМТ гетероструктуры, измеренные при различных температурах, а на рис. 6 — характерные зависимости интенсивности ФЛ различных полос от температуры. Из этих рисунков видно, что в диапазоне температур от 100 до 300 К относительная интенсивность полос I, II и B, связанных с рекомбинацией в слое InGaAs, существенно возрастает, тогда как ФЛ полос C и GaAs в этом температурном диапазоне наоборот пропадает. Такое поведение полос ФЛ может быть объяснено увеличением диффузии неравновесных носителей заряда из широкозонных слоев к InGaAs квантовой яме при повышении температуры выше 150 К. Зависимость интенсивности ФЛ полос I и II достаточно хорошо описывается формулой вида  $I = I_0 / [1 + A \exp(-E_A/kT)]$  [14] с энергией активации температурного тушения около 2 мэВ, что объясняется локализацией носителей заряда на мелких флуктуациях потенциала квантовой ямы InGaAs. Тогда как для описания зависимости интенсивности ФЛ новой полосы B, отстоящей от полосы I на 27 мэВ, требуется уже формула вида

$$I = I_0 / [1 + A \exp(-E_A/kT) + BA \exp(-E_B/kT)]$$

с энергиями активации  $E_A = 2$  мэВ и  $E_B = 25 \pm 5$  мэВ. Энергия  $E_B$  совпадает с энергией связи дырок на бериллии в слоях InGaAs, составляющей 27 мэВ [15]. Поэтому мы можем идентифицировать данную полосу с переходом подзона проводимости—Ве-акцептор в InGaAs квантовой яме.

Появление данной полосы в спектрах ФЛ (*np*)-*p*НЕМТ структур, в которых InGaAs квантовые ямы не

только намеренно не легировались, но выращивались до  $p^+$  легированных слоев AlGaAs (см. рис. 1), может быть объяснено только эффектом „Ве памяти“ в МЛЭ установке [16]. В то же время возрастание интенсивности ФЛ этой полосы в спектрах ФЛ *D(np)*-*p*НЕМТ структур, т.е. с двухсторонним донорно-акцепторным легированием, свидетельствует о сегрегации примесных атомов Ве во время эпитаксиального роста структуры, что указывает на необходимость оптимизации условий роста таких гетероструктур.

#### 4. Заключение

Таким образом, в данной работе проведено исследование фотолюминесценции *p*НЕМТ гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs с донорно-акцепторным легированием AlGaAs-барьеров. Обнаружено, что введение в структуру дополнительных акцепторных  $p^+$  легированных слоев AlGaAs приводит к появлению двух новых полос ФЛ, связанных с 1) донорно-акцепторной рекомбинацией в легированных AlGaAs-барьерах и 2) переходом зона проводимости — Ве-акцептор в намеренно не легированной InGaAs квантовой яме.

#### Список литературы

- [1] В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, В.Г. Лапин, Е.И. Голант, А.А. Капралова. ФТП, **48**, 684 (2014).
- [2] *Characterization of Semiconductor Heterostructures and Nanostructures*, ed. by Giovanni Agostini and Carlo Lamberti (Elsevier, 2013).
- [3] M. Wojtowicz, D. Pascua, A.-C. Han, T.R. Block, D.C. Streit. J. Cryst. Growth, **175–176**, 930 (1997).
- [4] Xin Cao, Yiping Zeng, Lijie Cui, Meiyong Kong, Liang Pan, Baoqiang Wang, Zhanping Zhu. J. of Cryst. Growth, **227–228**, 127 (2001).
- [5] A.Z.M. Touhidul Islam, K. Hatta, N. Murakoshi, T. Fukuda, T. Takada, T. Itatani, N. Kamata. Global Sci. Techn. J., **1**, 1 (2013).
- [6] Р.А. Хаббибуллин, И.С. Василевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, Д.С. Пономарев, В.П. Гладков, В.А. Кульбачинский, А.Н. Клочков, Н.А. Юзева. ФТП, **45**, 666 (2011).
- [7] S. Guha, Q. Cai, M. Chandrasekhar, H.R. Chandrasekhar, Hyunjung Kim, A.D. Alvarenga, R. Vogelgesang, A.K. Ramdas, M.R. Melloch. PRB, **58**, 7222 (1998).
- [8] В.Б. Тимофеев, А.И. Тартаковский, А.И. Филин, D. Birke-dal, J. Hvam. ФТТ, **40**, 833 (1998).
- [9] *Properties of Aluminium Gallium Arsenide*, ed. by Sadao Adachi (London, INSPEC, 1993) Datareviews Series N 7.
- [10] D.C. Look, G.S. Pomrenke. J. Appl. Phys., **54**, 3249 (1983).
- [11] M.J. Puska. J. Phys.: Condens. Matter, **1**, 7347 (1989).
- [12] P.J. Dean. *Progress in Solid State Chemistry*, ed. by J.O. McCaldin, G. Somorjai (Pergamon, N.Y., 1973) v. 8.
- [13] T. Schmidt, K. Lischka, W. Zulehner. PRB, **45**, 8989 (1992).
- [14] A. Chiari, M. Colocci, F. Fermi, Li Yuzhang, R. Querzoli, A. Vinattieri, Weihua Zhuang. Phys. Status Solidi B, **147**, 421 (1988).

- [15] *Properties of Lattice-matched and strained InGaAs*, ed. by Pallab Bhattacharya (London, INSPEC, 1993) Datareviews Series N 8.
- [16] J. Nagle, R.J. Malik, D. Gershoni. *J. Cryst. Growth*, **111**, 264 (1991).

Редактор Т.А. Полянская

### **Identification of photoluminescence bands in AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT heterostructures with donor-acceptor doping of barriers**

*D.V. Gulyaev\**, *K.S. Zhuravlev\*+*, *A.K. Bakarov\*+*,  
*A.I. Toropov\**

\* Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
630090 Novosibirsk, Russia

+ Novosibirsk State University,  
630090 Novosibirsk, Russia

**Abstract** We have studied the photoluminescence (PL) of AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT heterostructures with donor-acceptor doping of AlGaAs barriers. We have found out that the application of additional  $p^+$  doped AlGaAs layers leads to the appearance of the new bands in the PL spectra. These bands are identified as the transitions between 1) donor–acceptor pairs in the doped AlGaAs layers and 2) conduction subband–acceptor levels in the undoped InGaAs well.