

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДУЛИРОВАННО- И  
ДЕЛЬТА-ЛЕГИРОВАННЫХ Р-НЕМТ ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУР**  
Васильевский И.С., Галиев Г.Б., Климов Е.А., Новожилов С.А., Черечукин А.А.,  
Широков С.С.

Институт СВЧ полупроводниковой электроники РАН  
117105 Москва, Нагорный проезд д. 7, корп. 8/0

AlGaAs/InGaAs/GaAs псевдоморфные НЕМТ (Р-НЕМТ) транзисторные структуры демонстрируют лучшие свойства по сравнению с гетероструктурами AlGaAs/GaAs и широко применяются в устройствах СВЧ-техники [1-4]. В Р-НЕМТ структурах тонкий напряжённый эпитаксиальный слой  $In_xGa_{1-x}As$  с содержанием In около 20 % и толщиной  $\leq 20$  нм выращивается между GaAs и AlGaAs. Увеличение подвижности и концентрации двумерного электронного газа в этом случае достигается за счёт большей высоты барьера, определяемой разрывом дна зоны проводимости  $\Delta E_C$  и за счёт меньшей эффективной массы электронов в  $In_xGa_{1-x}As$  по сравнению с GaAs. Из-за сильного несоответствия параметров решётки InAs и GaAs мольная доля In (x) и толщина слоя  $In_xGa_{1-x}As$  ( $d_{ch}$ ) должны быть меньше некоторых критических значений ( $x \leq 0,2$  и  $d_{ch} \leq 20$  нм).

Анализ основных характеристик Р-НЕМТ транзисторных структур, приведённых в литературе, показывает, что идёт постоянный поиск и усовершенствование технологических приёмов и структуры образцов. К ним относятся: а) последовательность, состав и толщины слоёв; б) способы легирования барьерных слоёв (модулированное,  $\delta$ -, “pulse”-легирование). Для таких структур существует ограничение на уровень легирования (и, соответственно, на концентрацию электронов в канале), выше которого проявляется параллельная проводимость в легированном слое, ухудшающая параметры транзистора.

Целью настоящей работы является исследование электрофизических свойств односторонних модулированно- и  $\delta$ -легированных Р-НЕМТ структур методами спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ) и эффекта Холла, в зависимости от концентрации легирования и при разных толщинах спейсерного слоя.

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращены согласно рис. 1 по два образца: по схеме а) № 1 и № 2, по схеме б) № 3 и № 4.

Т [°С] роста слоёв

GaAs:Si $n=2,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$	200 Å	600	600	GaAs:Si $n=2,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$	200 Å
$Al_{0,23}Ga_{0,77}As-i$	150 Å	630	630	$Al_{0,23}Ga_{0,77}As-i$	260 Å
$Al_{0,23}Ga_{0,77}As:Si$	150 Å	630	600	$\delta$ -Si	
$Al_{0,23}Ga_{0,77}As-i$	30 Å	600	600	GaAs	10 Å
GaAs	10 Å	600	630	$Al_{0,23}Ga_{0,77}As-i$	60 Å
$In_{0,15}Ga_{0,85}As$	120 Å	510	510	GaAs	10 Å
GaAs	5000 Å	600	510	$In_{0,15}Ga_{0,85}As$	120 Å
Полуизолирующая подложка GaAs		600	600	GaAs	5000 Å
				Полуизолирующая подложка GaAs	

а)

б)

Рис. 1. Схематическая структура исследуемых Р-НЕМТ структур при: а) модулированно- и б)  $\delta$ -легировании барьерных слоёв.

Образцы № 1 и № 2 выращены с использованием модулированного легирования и отличаются друг от друга тем, что донорный слой  $\text{Al}_{0,23}\text{Ga}_{0,77}\text{As}:\text{Si}$  в образце № 1 легировался до  $n=1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а в образце № 2 до  $n=2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Образцы № 3 и № 4 выращены с применением метода  $\delta$ -легирования; слоевые концентрации кремния  $N_S$  в них составляют  $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  и  $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  соответственно. Кроме того, в образце № 3 перед нанесением  $\delta$ -Si-слоя наносился слой GaAs толщиной  $\sim 10 \text{ \AA}$ .

В таблице 1 приведены измеренные с помощью эффекта Холла значения подвижности  $\mu_e$  и слоевой концентрации  $n_s$  двумерного электронного газа при  $T=300$  и  $77 \text{ К}$ . На рис. 2 представлены спектры ФЛ, измеренные при  $T=77 \text{ К}$ .

Таблица 1.

№ образца	T = 300 K		T = 77 K	
	$\mu_e, \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$n_s, \text{ см}^{-2}$	$\mu_e, \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$n_s, \text{ см}^{-2}$
1	7230	$5,46 \cdot 10^{11}$	39600	$7,6 \cdot 10^{11}$
2	9440	$6,05 \cdot 10^{11}$	56800	$9,1 \cdot 10^{11}$
3	9220	$8,8 \cdot 10^{11}$	44600	$1,2 \cdot 10^{12}$
4	6400	$8,9 \cdot 10^{11}$	20500	$1,25 \cdot 10^{12}$

Как известно [5, 6], спектроскопия ФЛ позволяет чётко разделять переходы от первой ( $E_1$ ) и второй ( $E_2$ ) электронных подзон к первой подзоне тяжёлых дырок ( $E_{11}$  и  $E_{21}$ ). При этом соотношение амплитуды пиков этих переходов характеризует степень заполнения подзон и может служить критерием для оптимизации параметров Р-НЕМТ структур. В нашем случае спектры ФЛ образцов № 1 и 2 практически одинаковые, а отношение интенсивностей сигнала ФЛ  $I_1$  и  $I_2$  для переходов  $E_{11}$  и  $E_{21}$   $I_1/I_2$  составляют 0,68 и 0,67. Это свидетельствует об относительно малой заполненности второй подзоны.

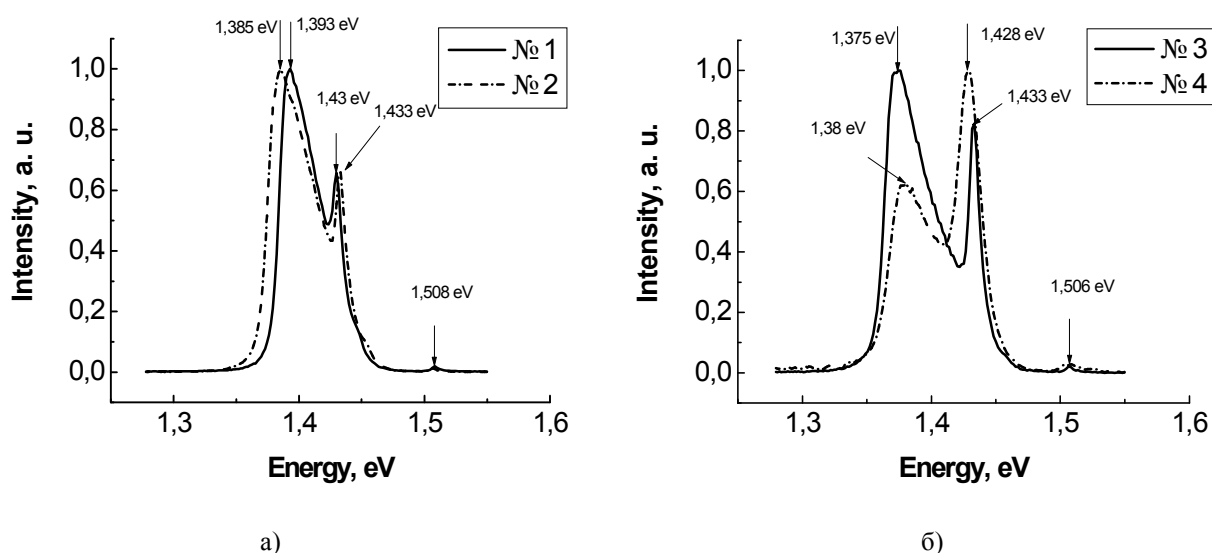


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции исследуемых образцов, измеренные при  $T = 77 \text{ К}$  а) образцы № 1 и 2; б) образцы № 3 и 4.

Кроме того, для модулированно легированных образцов (№ 1 и № 2) увеличение уровня легирования на ~25% приводит к такому же увеличению подвижности в канале и увеличению концентрации электронов.

Применение  $\delta$ -легирования в образце № 3 позволило увеличить концентрацию электронов в канале без ухудшения подвижности. Субслоем  $10 \text{ \AA}$  GaAs вводился дополнительно для уменьшения диффузии кремния из  $\delta$ -слоя в канал, так как в AlGaAs происходит более сильное расплывание  $\delta$ -слоя [7].

Другая ситуация наблюдается для образца № 4. При увеличении уровня легирования  $\delta$ -слоя в два раза соотношение интенсивностей ФЛ для образцов  $I_1/I_2$  составили 0,81 и 1,47 для образцов № 3 и № 4 соответственно. Это свидетельствует об увеличении степени заполнения второй подзоны в образце № 4. Однако холловские измерения показывают незначительное изменение концентраций в этих образцах. В то же время подвижность в образце №4 по сравнению с образцом №3 уменьшается в два раза при  $T = 77 \text{ K}$ . Аналогичные изменения спектров ФЛ, а также  $n_s$  и  $\mu_e$  наблюдались и в работе [8]. Это можно объяснить заполнением общей подзоны в легированном слое и квантовой яме и наличием параллельной проводимости в  $\delta$ -слое.

Для анализа зонной структуры образцов проводились расчёты самосогласованной системы уравнений Шрёдингера-Пуассона. Расчёты показали, что при сильном легировании и достаточно широком спейсерном слое искривление дна зоны проводимости приводит к сильному понижению дна зоны в области  $\delta$ -слоя. Часть электронов заполняют образовавшуюся подзону в  $\delta$ -слое, при этом волновая функция электронов в квантовой яме проникает в область  $\delta$ -слоя, что приводит к увеличению рассеяния на ионизированных примесях и уменьшению подвижности электронов в канале. Этот эффект ограничивает максимально достижимую концентрацию носителей в таких структурах, в нашем случае возникает при уровне легирования  $\sim 3\div 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

Таким образом, представленные результаты показывают, что совместное использование спектроскопии ФЛ и холловских измерений позволяют детально исследовать электрофизические свойства Р-НЕМТ транзисторных структур. При этом удаётся довольно точно зафиксировать изменение электрофизических характеристик при тех или иных изменениях структуры, таких как: 1) смена способа и уровня легирования; 2) введение дополнительных слоёв толщиной порядка нескольких монослоёв.

Работа выполнена при финансовой поддержке РАН по программе целевых расходов Президиума РАН "Поддержка молодых ученых".

#### Литература

1. J. Brad Boos. *Compound Semiconductor* **5**, 8, 36 (1999).
2. L.D. Nguyen, D.C. Radulescu, M.C. Eoisy, P.J. Taster, L.E. Eastman. *IEEE Trans. Electron. Dev.* **36**, 5, 833 (1989).
3. D.C. Look, B. Jegal, C.E. Stutz. *J. Appl. Phys.* **76**, 1, 328 (1994).
4. X. Cao, Y. Zeng, K. Kong. *Solid State Electronics* **45**, 751 (2001).
5. X. Cao, Y. Zeng, M. Kong. *Journ. Cryst. Growth* **231**, 520 (2001)
6. T.H. Chen, Y.S. Huang, T.S. Shou. *Physica E* **8**, 297 (2000)
7. A. Leuthery, A. Forstery, H. Luthy, H. Holzbrecherz, U. Breuer. *Semicond. Sci. Technol.* **11**, 766 (1996).
8. X. Cao, Y. Zeng, L. Cui. *Journ. Cryst. Growth* **231**, 227 (2001).