

06.2; 06.3

© 1990

СПЕКТРОСКОПИЯ δ -ЛЕГИРОВАННЫХ
СЛОЕВ $GaAs : Si$ Ю.Ю. Бачериков, Е.Ф. Венгер,
Н.Л. Дмитриук, Д.В. Корбутяк,
Д.И. Лубышев, В.П. Мигаль,
О.В. Снитко, Н.А. Фидря

δ - легирование полупроводников, предложенное для улучшения профиля легирования [1], оказалось весьма перспективным для изучения двумерных электронных систем и практических применений в полевых транзисторах с рекордной подвижностью электронов. В настоящей работе проведены спектроскопические исследования так называемых $\delta_i\delta_i$ - структур, содержащих 5 δ -слоев $GaAs : Si$, разделенных нелегированными слоями $GaAs$ толщиной 20,75 и 600 Å [2]. Структуры получены способом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках из полуизолирующего арсенида галлия [3]. Для изучения $\delta_i\delta_i$ - структур - установления структурного совершенства, выявления фоновых (неконтролируемых) примесей, определения концентрации и подвижности электронов - использованы два спектроскопических метода: 1 - фотолюминесценция (ФЛ), возбуждаемая аргоновым лазером при $T = 4.2$ К и 2 - нарушенное полное внутреннее отражение света (НПВО) в спектральной области возбуждения смешанных поверхностных плазмон-фононных поляритонов (ПП).

Из спектра ФЛ (рис. 1) следует, что основной неконтролируемой примесью является углерод ($h\nu = 1.494 \pm 0.001$ эВ). Кроме того, проявляются также линии Ge , Si ($h\nu = 1.479$ эВ), меди ($h\nu = 1.330$ эВ), а также в области $h\nu = 1.44-1.46$ эВ наблюдаются полосы, обусловленные донорно-акцепторными переходами с участием V_{As} , а при $h\nu = 1.510-1.518$ эВ имеется тонкая структура из 2-4 узких линий, обусловленных излучением экситонов, связанных на акцепторах ($h\nu = 1.510-1.514$ эВ) и на донорах ($h\nu = 1.515-1.518$ эВ). Последнее подтверждается температурной зависимостью интенсивности соответствующих полос. Установлено, что линии ФЛ экситонов, связанных на акцепторах, более интенсивны в случае образцов с более высокой концентрацией Si в δ -слоях, а при $N_{Si} \lesssim 5 \cdot 10^{12}$ см⁻² такие линии отсутствуют. Это, по-видимому, свидетельствует о том, что при больших концентрациях в δ -слоях атомы Si формируют не только донорные центры, а также и акцепторные, т.е. Si_{Ga} , либо более сложные комплексы $V_{Ga} - Si_{Ga}$. Кроме того, в $\delta_i\delta_i$ - структурах в отличие от нелегированного $GaAs$, полученного тем же спо-

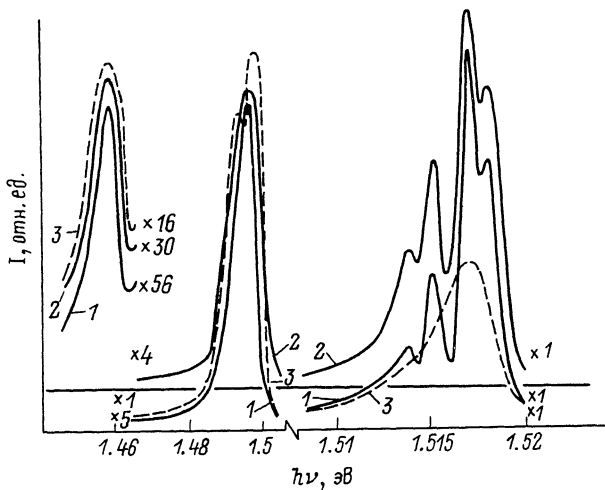


Рис. 1. Спектры ФЛ δ -GaAs ($T = 4.2$ К) при концентрации $n_s = 9 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$ (1), $n_s = 5 \cdot 10^{13}$ см $^{-2}$ (2), а также нелегированного GaAs (3).

собом молекулярно-пучковой эпитаксии, экситонные линии ФЛ более интенсивны и узки, т.е. δ -слой Si, возможно, является геттером примесей и дефектов из матрицы GaAs. Например, интенсивность „углеродной“ линии ФЛ уменьшается в $\delta_i \delta_i$ -структуре даже при межслоевых промежутках в 1200 Å, т.е. длина геттерирования существенно превышает 0.1 мкм.

Спектры НПВО измерялись при $T = 300$ К в р-поляризованном свете с применением геометрии Отто и режима частотного сканирования в спектральной области активного плазмон-фононного взаимодействия в GaAs ($\nu = 270-300$ см $^{-1}$) [4]. Использование полуцилиндра CsI в качестве элемента связи позволило при изменении угла падения света φ от 40° до 60° перекрыть диапазон

приведенных волновых чисел ПП $k_x = \frac{k_x c}{\omega_T} = \frac{\omega}{\omega_T} \cdot n \cdot \sin \varphi$ ($n =$

$= 1.72$ - показатель преломления CsI). По угловой зависимости частотного положения минимумов НПВО построена дисперсия ПП $\omega(k_x)$ (рис. 2). Видно, что с увеличением межслоевого промежутка Δ дисперсионные кривые смещаются в коротковолновую сторону, а полуширина минимумов НПВО, имеющих лоренцеву форму, слабо возрастает от 5.0 до 5.6 см $^{-1}$.

Для интерпретации данных НПВО мы попытались применить следующие модели:

1) трехслойная полярная среда, в которой I и III слои - чистый GaAs, а II - однородной легированный до объемной концентрации

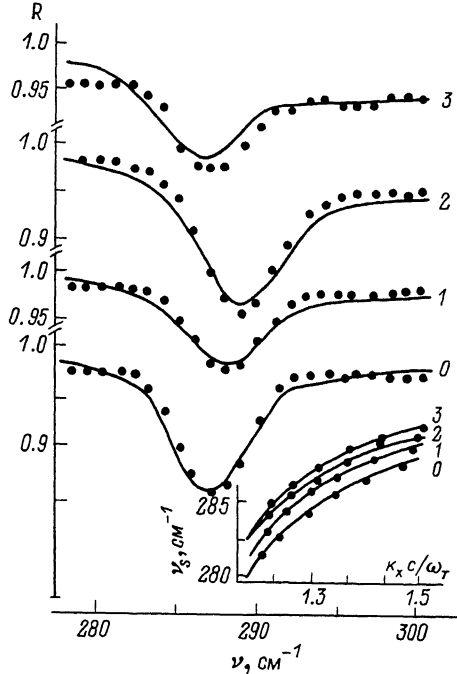


Рис. 2. Спектры НРВО для δ -легированных образцов № 1-3 и нелегированного GaAs. (•) - точки - эксперимент, сплошные линии - расчет. На вставке - дисперсия плазмон-фононных ПП (нижняя ветвь).

электронов $n_0 = \frac{n_s}{l}$, $l = 5\Delta = 0, 0.01, 0.03, 0.24$ мкм. Плазменная частота $3D$ - электронного газа $\omega_p = \left(\frac{4\pi n_0 l^2}{m^* \epsilon_\infty} \right)^{1/2}$ и затухание плазмонов γ_p , фононов - γ_f , n_s - поверхностная концентрация электронов;

2) двумерная плазма в полубесконечной полярной среде на глубине L от поверхности, т.е. дисперсия смешанных ПП описывается уравнением, следующим из [5]:

$$\left(\frac{\epsilon_1(\omega)}{\alpha} + \frac{1}{\alpha_0} \right) \left(\frac{2\epsilon_1(\omega)}{\alpha} - \frac{\Omega_S c}{\omega^2} \right) - \frac{\Omega_S c}{\alpha} \left(\frac{\epsilon_1(\omega)}{\alpha} - \frac{1}{\alpha_0} \right) e^{-2\alpha L} = 0, \quad (1)$$

где

$$\alpha = \left(k_x^2 - \frac{\epsilon_1(\omega) \omega^2}{c^2} \right)^{1/2}, \quad \alpha_0 = \left(k_x^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \right)^{1/2},$$

Т а б л и ц а

№ обр.	Δ , ° А	ν_p , см ⁻¹	γ_p , см ⁻¹	n_s , см ⁻²		μ_s , см ² /В.с	
				НПВО	Холл	НПВО	Холл
1	20	1670	70	$1.83 \cdot 10^{13}$	$1.7 \cdot 10^{13}$	$1.33 \cdot 10^3$	$1.50 \cdot 10^3$
2	75	1352	45	$5.49 \cdot 10^{13}$	$3.1 \cdot 10^{13}$	$2.08 \cdot 10^3$	$1.64 \cdot 10^3$
3	600	720	11	$1.25 \cdot 10^{14}$	-	$8.5 \cdot 10^3$	-

$$\Omega_s = \left(\frac{4\pi n_s e^2}{m^* c} \right)^{1/2} - \text{характеристическая частота } 2D -$$

плазмы;

3) полубесконечная сверхрешетка $2D$ - газа в полярной среде, дисперсия ПП которой описывается формулой [6]:

$$\frac{2\varepsilon_1(\omega)}{\alpha} (\cos q\Delta - \text{ch}\alpha\Delta) = \frac{c\Omega_s}{\omega^2} \text{sh}\alpha\Delta, \quad (2)$$

где $0 < q < \frac{\pi}{\Delta}$, Ω_s - характеристическая частота для концентрации n_s/N , N - число δ -слоев ($N = 5$ в нашем случае).

Численный расчет дисперсии ПП по трем моделям показал, что наиболее близкие к эксперименту результаты дает первая модель, т.е. представление системы δ -слоев $3D$ - плазменным слоем. Это, по-видимому, естественно, т.к. при $T = 300$ К и туннельно-прозрачных промежутках между δ -слоями заполнено несколько подзон и волновые функции электронов соседних слоев перекрываются. Даже при больших межслоевых промежутках из-за перекрытия потенциалов и с учетом высокой чистоты этих промежутков высота барьеров относительно уровня Ферми понижается и концентрация электронов в промежутках составляет заметную долю от n_0 [3]. В таком случае по формулам Френеля можно рассчитать сами спектры НПВО и осуществить машинную оптимизацию подгонки их под экспериментальные [7] (рис. 2). По полученным в ре-

зультате расчетов плазменной частоте $\nu_p = \frac{\omega_p}{2\pi c}$ и затуханию плазмонов γ_p были рассчитаны поверхностная концентрация электронов n_s и их подвижность μ_n в δ -слоях:

$$n_s = \pi \tau c^2 \varepsilon_\infty \nu_p^2 \frac{1}{e^2}, \quad (3)$$

$$\mu_n = \frac{e}{2\pi c \gamma_p m^*}, \quad (4)$$

если значение эффективной массы m^* считать известным. Как видно из таблицы, при m^* , равной массе $3D$ -электронов в однородно слабо легированном $GaAs$ вычисленные по формулам (3), (4) n_s, μ_n , оказались хорошо согласующимися со значениями, определенными по Холлу. Подвижность электронов в δ -слоях увеличивается с возрастанием их поверхностной концентрации и межслоевого промежутка вплоть до 600 \AA . Последнее, по-видимому, обусловлено тем, что подвижность определяется, в основном, движением электронов в межслоевых промежутках с высокой подвижностью, очищенных дополнительно геттеризирующим действием δ -слоев.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Wood C.E.C. et al. // J. Appl. Phys. 1980. 51. P. 383.
- [2] Бачериков Ю.Ю., Венгер Е.Ф., Дмитрук Н.Л. и др. // Тез. докл. Всесоюз. конф. „Поверхность-89“, Черногловка, 4-6.07.89 г. С. 179.
- [3] Мигаль В.П., Лубышев Д.И., Преображенский В.В. и др. // Электронная промышленность. 1989. № 6. С. 6-8.
- [4] Поверхностные поляритоны / Под ред. В.М.Аграновича и Д.Л.Милса. М.: Наука, 1985. 519 с.
- [5] Дмитрук Н.Л., Крюченко Ю.В., Литовченко В.Г. // УФЖ. 1984. Т. 29. № 3. С. 357-361.
- [6] Saile A., Bannville M., Zuckerman // Sol. St. Comm., 1979. V. 24. N 12. P. 805.
- [7] Венгер Е.Ф., Дмитрук Н.Л., Снитко О.В., Фидря Н.А. // ЖПС. 1989. Т. 51. № 6. С. 964-968.

Поступило в Редакцию
8 января 1990 г.