

$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.23}\text{P}_{0.77}$ -ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С ДВУМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ГАЗОМ

Гореленок А. Т., Рехвиашвили Д. Н., Надточий М. Ю.,
Устинов В. М.

Методом ЖФЭ впервые получены гетероструктуры $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.23}\text{P}_{0.77}$ с двумерным электронным газом. Исследованы механизмы эффекта устойчивой фотопроводимости в структурах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$. Показано, что введение спейсера и буферного слоя позволяет получить структуры с очень высокой подвижностью — $12\,300\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при комнатной температуре, в которых отсутствует влияние освещения на транспортные характеристики при низких температурах.

Гетероструктуры на основе твердых растворов InGaAsP , изопериодических с InP , перспективны для полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов, так как максимальная дрейфовая скорость электронов и их подвижность в этих материалах больше, чем в GaAs . К настоящему времени в литературе имеются сообщения о получении гетероструктур $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ с двумерным электронным газом (ДЭГ), полученных как газофазной (ГФЭ), так и жидкофазной эпитаксией (ЖФЭ) [1–6], однако подвижность электронов в ГФЭ структурах [3] существенно превышает подвижность в лучших ЖФЭ структурах [6].

В данной работе впервые сообщается о получении методом ЖФЭ гетероструктур $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.23}\text{P}_{0.77}$ с ДЭГ и высокой подвижностью электронов при комнатной температуре, не уступающей лучшим результатам на структурах, выращенных ГФЭ.

Объектом исследования служили различные типы структур $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ и $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.23}\text{P}_{0.77}$ (рис. 1), полученных ЖФЭ на полужолирующих подложках $\text{InP}:\text{Fe}$ (100) ориентации. Толщина узкозонного слоя $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ во всех структурах составляла $0.7\text{--}1.0\text{ мкм}$, толщина широкозонного слоя (поставщика электронов) варьировалась в пределах $0.1\text{--}0.35\text{ мкм}$, толщина спейсера составляла $\sim 200\text{ \AA}$, а буферного слоя — 0.5 мкм . Несоответствие параметров решетки Δa между подложкой InP и узкозонным $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ при 300 К ($E_g \approx 0.73\text{ эВ}$) изменялось в пределах от $-6.5 \cdot 10^{-3}$ до $+4.6 \cdot 10^{-3}\text{ \AA}$. Параметры решетки широкозонного $\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.23}\text{P}_{0.77}$ и подложки InP совпадали при температуре эпитаксиального наращивания ($T=645\text{ }^\circ\text{C}$), что соответствовало Δa при комнатной температуре, равному $-2.3 \cdot 10^{-3}\text{ \AA}$ [7]. Концентрация электронов в узкозонном InGaAs , а также в спейсере и буферном слое была снижена до $n^0 \leq 10^{15}\text{ см}^{-3}$ путем легирования раствора-расплава диспрозием [8, 9]. Часть широкозонного слоя (InP или InGaAsP) специально не легировалась и фоновая концентрация электронов составляла $6 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$. Исследование полученных структур проводилось путем определения температурных зависимостей подвижности и концентрации электронов в диапазоне $4.2\text{--}300\text{ К}$, а также измерения эффекта Холла и магнитосопротивления при 4.2 К в темноте и после освещения через стекловолоконно белым (лампочка накаливания) или зеленым (светодиод на основе GaP) светом в режиме устойчивой фотопроводимости (УФП). Образцы для измерений были выполнены в форме двойного креста.

Т а б л и ц а 1

Электрофизические параметры структур InP/InGaAs (рис. 1, а) в зависимости от изменения параметра решетки InGaAs при толщине слоя InP ~ 0.5 мкм

Образец	$\Delta a, \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$ (300 К)	300 К		4.2 К			
		$n_H, \text{ см}^{-2}$	$\mu, \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	до освещения		после освещения	
				$n_S, \text{ см}^{-2}$	$\mu, \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$n_S, \text{ см}^{-2}$	$\mu, \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
d-551	-6.55	$2.5 \cdot 10^{11}$	3100	$3.7 \cdot 10^{11}$	7000	$3.5 \cdot 10^{11}$	37000
d-552	-2.39	$1.3 \cdot 10^{11}$	5350	—	—	$3.4 \cdot 10^{11}$	32000
d-553	0	$2.4 \cdot 10^{11}$	3500	—	—	$3.7 \cdot 10^{11}$	22500
d-554	+1.75	$1.7 \cdot 10^{11}$	4470	—	—	$3.6 \cdot 10^{11}$	39600
d-555	+4.61	—	—	—	—	$4.2 \cdot 10^{11}$	25000

Примечание. Концентрация электронов при 4.2 К n_S определена из осцилляций Шубникова—де-Гааза. n_H — концентрация электронов, определенная из холловских измерений.

В табл. 1 представлены результаты измерений структур InGaAs/InP (рис. 1, а) с переменным Δa . Структуры обладают сравнительно низкими подвижностями при комнатной температуре; при низкой температуре во всех образцах, кроме d-551, проводимость до освещения отсутствует. После освещения белым светом все структуры обладают примерно одинаковой концентрацией электронов в двумерном канале, а подвижность имеет слабую тенденцию к уменьшению с ростом Δa InGaAs при температуре роста [7]. В структуре d-551 ($\Delta a =$

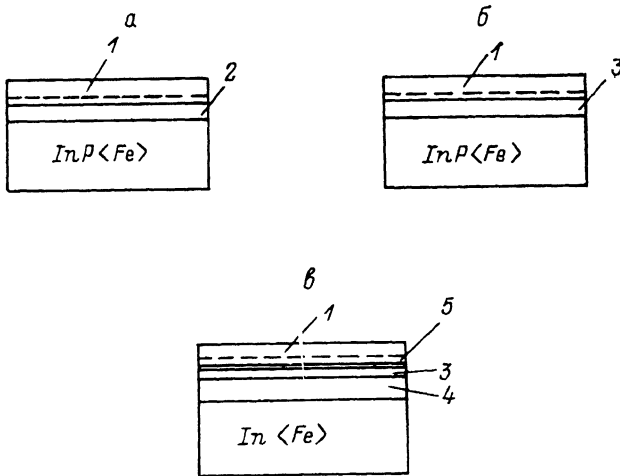


Рис. 1. Схематическое изображение структур, исследованных в настоящей работе.

1 — $n^0\text{-In}_{0.88}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, 2 — $n\text{-InP}$, 3 — $n\text{-In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.23}\text{P}_{0.77}$, 4 — $n^0\text{-In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.23}\text{P}_{0.77}$ (буферный слой), 5 — $n^0\text{-In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.23}\text{P}_{0.77}$ (спейсер).

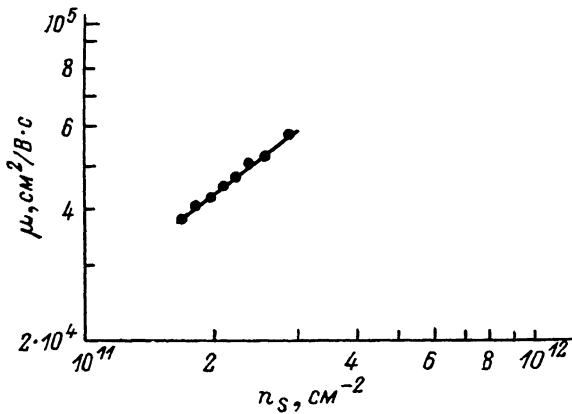
$= -6.5 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$), несмотря на то что концентрация двумерных электронов в результате подсветки практически не изменяется, подвижность резко возрастает от $7 \cdot 10^3$ до $37 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

В табл. 2 представлены результаты измерения структур, в которых широкозонным материалом (поставщиком электронов) служил твердый раствор $\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.23}\text{P}_{0.77}$ ($E_g \approx 1.17$ эВ) (рис. 1, б), причем переменным параметром была его толщина. Из табл. 2 видно, что эти структуры обладают большей подвижностью как при комнатной, так и при низкой температурах, чем в случае структур InGaAs/InP (рис. 1, а). Доля параллельной, шунтирующей двумерный канал, проводимости, как это следует из сравнений результатов, полученных из измерений эффектов Холла (n_H) и Шубникова—де-Гааза (n_S), уменьшается с уменьшением толщины InGaAsP. Только в структуре d-512 ($d=0.1$ мкм)

Электрофизические параметры структур InGaAsP/InP (рис. 1, б)
в зависимости от толщины широкозонного слоя

Образец	d , мкм	Δa , $\cdot 10^{-3}$, Å (300 К)	300 К		4.2 К				
			n_H , см^{-2}	μ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	в темноте			после освещения	
					n_H , см^{-2}	n_{Sd} , см^{-2}	μ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	n_{S_e} , см^{-2}	μ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
d-512	0.1	-5.0	$1.3 \cdot 10^{11}$	9000	$1.5 \cdot 10^{11}$	$1.5 \cdot 10^{11}$	12100	$2.8 \cdot 10^{11}$	29300
d-513	0.22	-7.8	$5.5 \cdot 10^{11}$	7300	$2.5 \cdot 10^{11}$	$1.8 \cdot 10^{11}$	37500	$2.9 \cdot 10^{11}$	56100
d-514	0.3	-7.1	$7.9 \cdot 10^{11}$	6630	$3.1 \cdot 10^{11}$	$1.7 \cdot 10^{11}$	34900	$2.7 \cdot 10^{11}$	55200
d-515	0.35	-3.3	$1.3 \cdot 10^{12}$	5430	$5.2 \cdot 10^{11}$	$2.0 \cdot 10^{11}$	37800	$3.0 \cdot 10^{11}$	42500

при данном уровне фонового легирования параллельная проводимость отсутствует, что подтверждается наличием участков нулевого сопротивления и горизонтальных плато квантового эффекта Холла в экспериментальных зависимостях компонент тензора магнитосопротивления. Таким образом, параллельная проводимость в исследованных структурах обусловлена шунтирующим действием необходимых носителями широкозонного твердого раствора. Освещение белым светом при низких температурах приводило к существенному



возрастанию концентрации электронов в двумерном канале n_s , причем $\Delta n_s = n_{S_e} - n_{S_d}$ возрастает с уменьшением толщины InGaAsP (n_{S_e} определена из осцилляций Шубникова — де Гааза после освещения, n_{S_d} — до освещения). Зависимость подвижности от концентрации измерялась при импульсной под-

Рис. 2. Зависимость подвижности от концентрации электронов при 4.2 К для структуры, изображенной на рис. 1, б.

светке структуры через оптическое волокно. С ростом концентрации подвижность электронов возрастает в соответствии с выражением $\mu \sim n_s^\gamma$ (рис. 2). Величина γ в нашем случае составляла 0.7, что, по-видимому, обусловлено совместным влиянием «сплавного» рассеяния и рассеяния на остаточных ионизированных примесях, причем концентрация этих центров не превосходит $(3-4) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ [10]. Особенностью эффекта устойчивой фотопроводимости (УФП) в исследованных структурах явилась его спектральная зависимость. При освещении структур зеленым светом заметного изменения концентрации электронов не происходило. Она увеличивалась до приведенных в таблицах величин лишь при засветке лампы накаливания.

Важным фактором увеличения подвижности, как и в работе [5], явилось введение в структуру спейсера в сочетании со сравнительно толстым буферным слоем широкозонного материала. В настоящей работе толщина буферного слоя и спейсера n^0 -InGaAsP составляла соответственно 0.5 мкм и 200 Å (рис. 1, в). Температурные зависимости подвижности и концентрации электронов такой структуры приведены на рис. 3. Видно, что при понижении температуры от комнатной подвижность экспоненциально возрастает, что характерно для рассеяния на LO-фононах [11]. При $T < 50$ К подвижность от температуры практически не зависит. Концентрация электронов в структуре почти не изменяется во всем диапазоне температур. Освещение белым светом при низких T не приводило к изменению параметров структуры. Величина подвижности при комнатной температуре ($12300 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) находится на уровне или несколько превышает

лучшие результаты, полученные на структурах InGaAs/InP, выращенных ГФЭ [2, 3]. Низкотемпературная подвижность в отсутствие освещения μ (4.2 К) $\approx 7.3 \cdot 10^4$ см²/В·с, по-видимому, является наибольшей среди структур, выращенных ЖФЭ. Величина $1.03 \cdot 10^5$ см²/В·с, о которой сообщалось в [6], получена лишь после освещения структуры GaAs светодиодом.

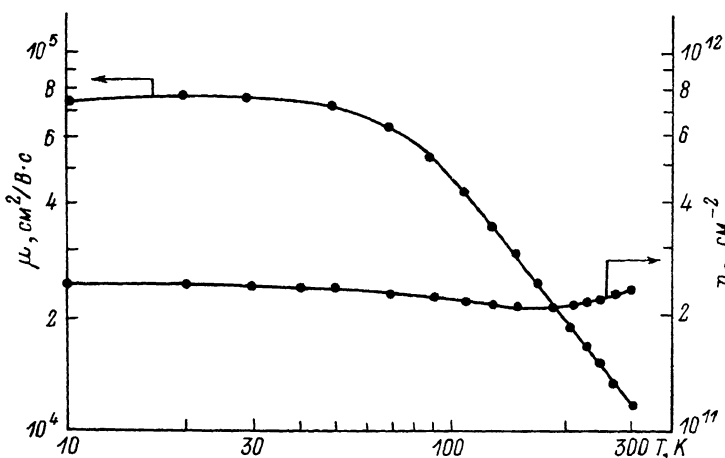


Рис. 3. Температурные зависимости концентрации и подвижности электронов в структуре $\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.23}\text{P}_{0.77}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ с буферным слоем и спейсером, рис. 1, в.

Результаты магнитотранспортных измерений в сильных магнитных полях при 4.2 К представлены на рис. 4. Горизонтальные плато квантового эффекта Холла и соответствующие им участки нулевого сопротивления, а также совпадение двумерной концентрации, полученной из анализа осцилляций Шубникова—де-Гааза, с результатом холловских измерений в слабых полях говорят об отсутствии параллельной проводимости в полученной структуре.

Совокупность приведенных выше экспериментальных результатов позволяет предположить, что за эффект УФП в исследованных структурах ответственны глубокие центры, образующиеся в результате диффузии атомов Fe

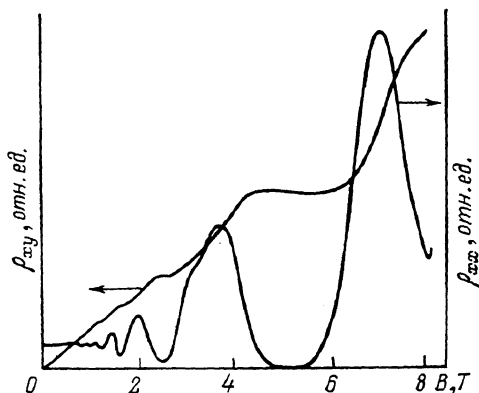


Рис. 4. Квантовый эффект Холла и осцилляции Шубникова—де-Гааза двумерного электронного газа в структуре, изображенной на рис. 1, в.

в широкозонный материал из подложки InP : Fe. В случае структур InGaAs/InP (табл. 1) во всех образцах, кроме d-551, проводимость при низких температурах до освещения отсутствует, а в самой структуре d-551 освещение, не изменяя концентрацию двумерных электронов, резко увеличивает их подвижность. Данный результат, по-видимому, является следствием того факта, что условия для диффузии Fe в эпитаксиальный слой из InP : Fe полуизолирующей подложки улучшаются с увеличением постоянной решетки Δa InGaAs при температуре роста и небольших отклонениях от Δa InP [12]. В этом случае для структур d-552—d-555 глубокие центры Fe в InP полностью опустошают канал, тогда как в структуре d-551 концентрация Fe вблизи канала меньше и она не влияет на концентрацию двумерных электронов, а только на их подвижность. В результате освещения белым светом двумерная концентрация во всех структурах становится примерно одинаковой вследствие фотовозбуждения электронов с глубоких центров акцепторной природы с последующим переходом в узко-

зонный InGaAs. При этом подвижность возрастает как за счет увеличения концентрации в канале (структуры $d=552-d=555$), так и вследствие нейтрализации ионизированных глубоких центров вблизи канала (структура $d=551$). В структурах InGaAs/InGaAsP (рис. 1, б) эффект УФП также отчетливо проявляется. Освещение их зеленым светом не приводит к изменению концентрации электронов в канале. В этом случае все излучение поглощается в InGaAs (толщина слоя InGaAs составляет 0.7—1.0 мкм). Тот факт, что освещение с $h\nu > E_g$ InGaAs не приводит к изменению концентрации электронов, свидетельствует об отсутствии заметного количества глубоких ловушек акцепторного типа в n^0 -InGaAs, которые считаются ответственными за эффект УФП в подобных структурах [11, 13]. К заметному эффекту УФП приводит лишь освещение образца лампой накаливания, в спектре которой присутствует излучение с $h\nu < E_g$ InGaAs, которое может привести к переходу электронов с уровней глубоких центров InP : Fe в зону проводимости, а затем в двумерный канал. В этом случае с уменьшением толщины InGaAsP относительно большая часть атомов Fe будет в результате диффузии находиться вблизи канала, что находит свое отражение в увеличении разности между концентрациями двумерных электронов до и после подсветки. Следует заметить, что при сравнении структур InGaAs/InP и InGaAs/InGaAsP (см. табл. 1, 2) видно, что подвижность электронов в канале во втором случае выше, чем у структур InGaAs/InP, что обусловлено более совершенной гетерограницей из-за отсутствия диссоциации твердого раствора InGaAsP в отличие от InP при температуре эпитаксии 650 °С. Только в структурах с буферным слоем n^0 -InGaAsP толщиной 0.5 мкм и спейсером (рис. 1, в) эффект УФП отсутствует полностью вследствие значительно большей удаленности канала от подложки.

Таким образом, методом ЖФЭ впервые получены гетероструктуры $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ с ДЭГ и исследованы их магнитотранспортные свойства. Предложен механизм экспериментально наблюдаемого эффекта устойчивой фотопроводимости, ответственными за который являются глубокие центры вблизи канала, образующиеся в результате диффузии Fe из полуизолирующей подложки InP : Fe. Введение спейсера и сравнительно толстого буферного слоя позволяет получить структуры $\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.23}\text{P}_{0.77}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ с очень высокой подвижностью — 12300 см²/В·с при комнатной температуре, что является одним из лучших результатов, полученных к настоящему времени. Отсутствие зависимости транспортных характеристик от освещения при низких температурах весьма привлекательно с точки зрения перспектив применений подобных структур в полевых транзисторах с высокой подвижностью электронов.

Список литературы

- [1] Komeno J., Takikawa M., Ozeki M. // Electron. Lett. 1983. V. 19. N 13. P. 473—474.
- [2] Zhu L. D., Sulewski P. E., Chan K. T. et al. // J. Appl. Phys. 1985. V. 58. N 8. P. 3145—3149.
- [3] Thijs P. J. A., Lagemaat J. M., Waltjer R. // Electron. Lett. 1988. V. 24. N 4. P. 226—227.
- [4] Алферов Ж. И., Гореленок А. Т., Каманин А. В. и др. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 7. С. 1230—1232.
- [5] Ворьбьева В. В., Егорова М. В., Крещук А. М. и др. // Письма ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 11. С. 73—77.
- [6] Воробьева В. В., Егорова М. В., Крещук А. М. и др. // I Всес. конф. по физическим основам твердотельной электроники. Л., 1989. Тез. докл. Т. 8. С. 80—81.
- [7] Берт Н. А., Гореленок А. Т., Конников С. Г. и др. // ЖТФ. 1981. Т. 51. В. 5. С. 1018—1020.
- [8] Баграев Н. Т., Власенко Л. С., Гореленок А. Т. и др. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 1. С. 83—84.
- [9] Гореленок А. Т., Груздов В. Г., Кумар Ракеш и др. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 35—43.
- [10] Kane M. J., Anderson D. A., Taylor L. L. et al. // J. Appl. Phys. 1986. V. 60. N 2. P. 657—664.
- [11] Wei H. P., Tsui D. C., Razeghi M. // Appl. Phys. Lett. 1984. V. 45. N 6. P. 666—668.
- [12] Болтакс Б. И. Диффузия в полупроводниках. М., 1961. 462 с.
- [13] Tsubaki K., Fukui T., Saito H. // J. Appl. Phys. 1986. V. 60. N 9. P. 3224—3226.