

06.3

УВЕЛИЧЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ ДВУМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ
НА ГЕТЕРОГРАНИЦЕ $AlAs/GaAs$
ПО СРАВНЕНИЮ С $AlGaAs/GaAs$
В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С СЕЛЕКТИВНЫМ δ -ЛЕГИРОВАНИЕМ

П.С. Копьев, А.А. Будза,
С.В. Иванов, Б.Я. Мельцер,
М.Ю. Надточий, В.М. Устинов

Переход к δ -легированию широкозонного материала в гетероструктурах с модулированным легированием дает возможность повысить концентрацию носителей в двумерном канале без существенного падения подвижности, что приводит к значительному улучшению характеристик транзисторов, создаваемых на основе подобных структур [1, 2]. Увеличение концентрации в гетероструктурах с селективным δ -легированием по сравнению с традиционными, в которых широкозонный материал однородно легирован донорной примесью ($AlGaAs:Si$ в структурах $AlGaAs/GaAs$), происходит вследствие возрастания „эффективного разрыва зоны проводимости“ [1] из-за образования при δ -легировании квантовой ямы с сильно вырожденным электронным газом и отсутствия области обеднения в широкозонном материале. Плоскость, содержащая атомы доноров, может находиться либо непосредственно в $AlGaAs$ [1-3], либо в очень тонкой $GaAs$ квантовой яме, специально для этих целей помещаемой в широкозонном барьере симметричной [1, 4] или несимметричной [5] формы. $GaAs$ квантовые ямы в этом случае используются с целью уменьшения величины эффекта устойчивой фотопроводимости (УФП) [6], а в последнем случае еще и для увеличения эффективности модулированного легирования, так как в достаточно узкой несимметричной квантовой яме уровни размерного квантования могут отсутствовать [5]. Цель настоящей работы состояла в сравнении свойств гетероструктур с селективным δ -легированием, имеющих разный профиль потенциала вблизи области образования двумерного электронного газа.

Структуры выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии [7] в одной установке непосредственно друг за другом с целью уменьшения влияния различного рода неконтролируемых факторов. Каких-либо специальных мер для уменьшения уровня фонового легирования, как например в [8], не предпринималось, не проводилось даже отжига установки после перезарядки исходных компонентов. Структуры выращивались при температуре 600 °С, концентрация атомов кремния в плоскости легирования составляла $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, толщина спейсера - 50 Å. Были изготовлены структуры трех типов, зонные диаграммы которых приведены на рис. 1. В структуре типа „в“, в отличие от работы [5], в качестве спейсера использовал-

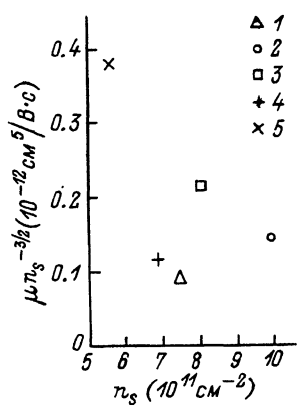
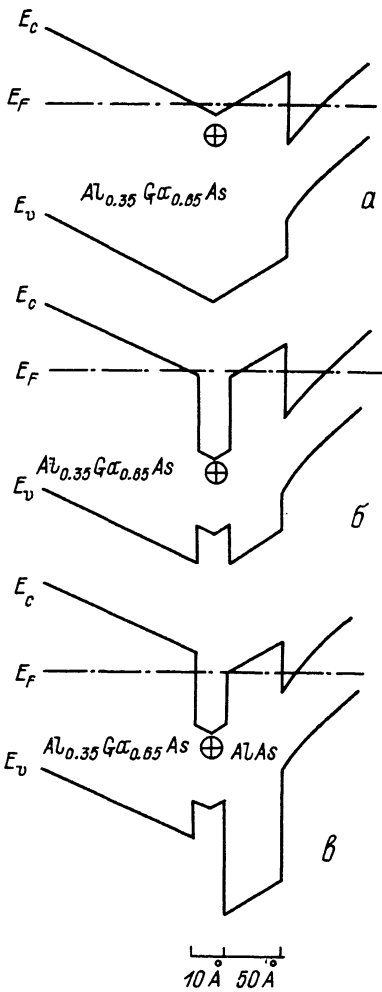


Рис. 1. Зонные диаграммы исследованных гетероструктур с селективным S-легированием. Плоскость с атомами Si в $Al_{0.35}Ga_{0.65}As$ - „а“; в $GaAs$ квантовой яме толщиной 10 Å симметричной - „б“ и несимметричной - „в“ формы. В структуре „в“ спейсером является $AlAs$.

Рис. 2. Нормализованная подвижность ($\mu \cdot n^{-3/2}$) как „показатель качества“ [11] для структур разных типов с толщиной спейсера 50 Å. 1 - „а“, настоящая работа; 2 - „а“ [2]; 3 - „а“ [3]; 4 - „б“, 5 - „в“, настоящая работа.

ся $AlAs$, а зонная диаграмма для гетероперехода $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ изображена в предположении, что $\Delta E_c \sim 0.6 \Delta E_g$ для составов с прямой структурой зон, а $\Delta E_v \sim 0.55x$ (эВ) для $0 < x < 1$ [9]. Проводились исследования эффекта Холла и Шубникова-де Гааза при 4.2 К в темноте и после освещения комнатным светом в режиме устойчивой фотопроводимости.

Результаты электрических измерений представлены в таблице. Из таблицы видно, что подвижность электронов в структуре типа „в“ значительно превосходит подвижность, полученную в структурах типа „а“ и „б“, несмотря на меньшую концентрацию электронов в канале при одинаковых толщинах спейсера. Уменьшение концентрации

Концентрация и подвижность двумерных электронов при 4.2 К в структурах, зонная диаграмма которых представлена на рис. 1. Концентрация электронов определена из периода осцилляций Шубникова-де Гааза.

Структура	В темноте		После освещения	
	концентрация электронов (см^{-2})	подвижность электронов ($\text{см}^2/\text{В с}$)	концентрация электронов (см^{-2})	подвижность электронов ($\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$)
а	$7.5 \cdot 10^{11}$	56760	$1.3 \cdot 10^{12}$	95430
б	$7.0 \cdot 10^{11}$	61300	$1.1 \cdot 10^{12}$	93500
в	$5.5 \cdot 10^{11}$	153400	$6.0 \cdot 10^{11}$	230000

двумерных электронов в структуре типа „в“, по-видимому, является следствием относительного уменьшения величины эффективного разрыва зоны проводимости (рис. 1). В структурах „а“ и „б“ после освещения концентрация электронов в канале возрастает более чем в полтора раза. Наличие ярко выраженного эффекта устойчивой фотопроводимости в структуре „б“, по величине почти не уступающего структуре „а“, говорит о том, что профиль легирования в исследованных структурах отличается от δ -функции и характерный размер области размытия превышает 10 \AA . В этом случае значительная часть атомов *Si* находится в $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ и образует DX -центры, ответственные за эффект УФП. В структуре „в“ эффект УФП проявляется значительно более слабо. По сравнению со структурой „б“ в ней изменен лишь материал спейсера на *AlAs*. Так как в $\text{AlAs}:\text{Si}$ величина эффекта УФП гораздо меньше, чем в $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}:\text{Si}$ [10], то полученный результат позволяет предположить, что размытие профиля концентрации *Si* при δ -легировании в большей степени происходит в направлении, противоположном направлению роста структуры.

Обычно считается, что в селективно-легированных гетероструктурах при низких температурах подвижность зависит от концентрации как $\mu \sim n^{3/2}$ [11]. Поэтому для сравнения качества полученных структур удобно использовать „нормализованную“ подвижность, т.е. величину $\mu \cdot n^{-3/2}$ [8]. На рис. 2 приведена зависимость нормализованной подвижности от концентрации для структур, исследованных в данной работе, а также для сравнения приведены взятые из литературы результаты, полученные на структурах с селективным δ -легированием, в которых толщина спейсера ($d_{\text{сп}}$) составляет $50\text{--}60 \text{ \AA}$. Последнее условие важно, так как известно, что $\mu \sim d_{\text{сп}}^3$ [2]. Из рисунка видно, что структура со спейсером из *AlAs* обладает наивысшим качеством среди структур с селективным δ -легированием, у которых толщина спейсера составляет 50 \AA , т.е. обычно используемых для изготовления транзисторов типа НЕМТ. По наше-

му мнению, данный результат обусловлен отсутствием рассеяния на флуктуациях состава твердого раствора и уменьшением флуктуаций потенциала на гетерогранице, образующейся при контакте двух бинарных полупроводников.

Таким образом, среди гетероструктур $AlGaAs/GaAs$ с селективным δ -легированием структура со спейсером из $AlAs$ по своим транспортным характеристикам является наиболее перспективной для создания транзисторов типа НЕМТ.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Schubert E.F., Cunningham J.E., Tsang W.T., Timp G.L. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. N 15. P. 1170-1172.
- [2] Cunningham J.E., Tsang W.T., Schubert E.F., Timp G., Chiu T.H., Chang A., Agyekum E., Ditzemberger J.A. // J. Vac. Sci. Technol. B. 1988. V. 6. N 2. P. 599-602.
- [3] Ishikawa T., Ogasawara K., Nakamura T., Kuroda S., Kondo K. // J. Appl. Phys. 1987. V. 61. N 5. P. 1937-1940.
- [4] Hiyamizu S., Sasa S., Ishikawa T., Kondo K., Ishikawa H. // Jap. J. Appl. Phys. 1985. V. 24. N 6. P. L431-L433.
- [5] Horikoshi Y., Fischer A., Schubert E.F., Ploog K. // Jap. J. Appl. Phys. 1987. V. 26. N 2. P. 263-266.
- [6] Stormer H.L., Dingle R., Gossard A.C., Wiegmann W., Sturge M.D. // Solid State Commun. 1979. V. 29. N 10. P. 705-709.
- [7] Копьев П.С., Леденцов Н.Н. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 10. С. 1729-1742.
- [8] English J.H., Gossard A.C., Stormer H.L., Baldwin K.W. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 50. N 25. P. 1826-1828.
- [9] Batey J., Wright S.L. // Surf. Sci. 1986. V. 174. P. 320-323.
- [10] Chand N., Henderson T., Klem J., Masselink W.T., Fischer R., Chang Y.-C., Morkoc H. // Phys. Rev. B. 1984. V. 30. N 8. P. 4481-4492.
- [11] Lee K., Shur M.S., Drummond T.J., Morkoc H. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N 11. P. 6432-6438.