

06.2; 12

© 1991

ОБРАЗОВАНИЕ РЕЛЬЕФА ПРИ ИОННОМ РАСПЫЛЕНИИ $AlGaAs/GaAs$ -ГЕТЕРОСТРУКТУР

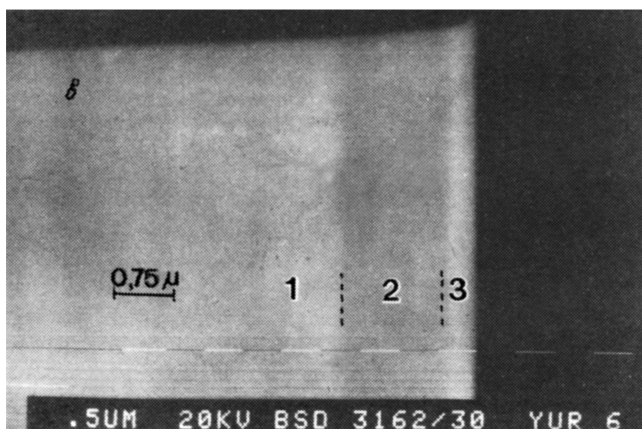
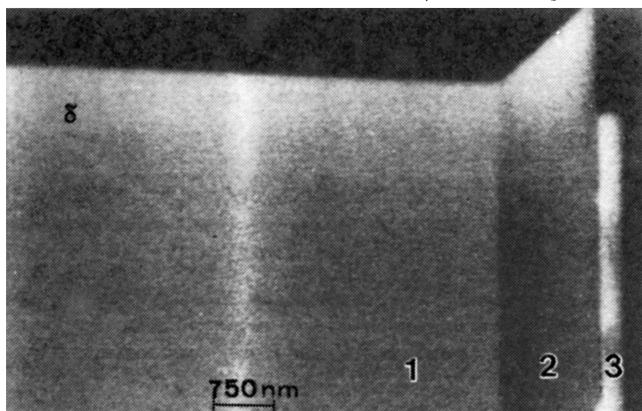
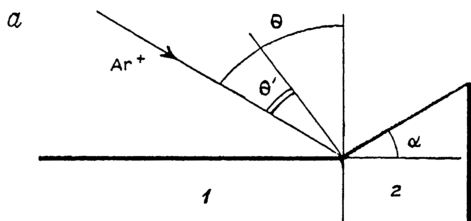
Н.А. Б е р т, А.О. К о с о г о в, Ю.Г. М у с и х и н

Ионное распыление широко используется для обработки и анализа материалов. Одним из важных эффектов при ионной бомбардировке является возникновение рельефа на первоначально гладкой поверхности мишени. Трансформация морфологии поверхности однородного монокристаллического полупроводника, обусловленная случайными возмущениями, детально исследована в [1]. Однако для полупроводниковых гетероструктур, где в ряде случаев требуется распыление с поперечного сечения, закономерности образования поверхностного рельефа не изучены. Для сглаживания рельефа, возникающего при ионно-лучевой обработке поперечных сечений полупроводниковых гетероструктур, например, при подготовке образцов для просвечивающей электронной микроскопии [2,3], зачастую просто используются условия, предложенные в [1] для однородного материала.

Целью работы являлось изучение закономерностей образования рельефа при ионно-лучевом распылении поперечных сечений гетероструктур $AlGaAs/GaAs$ при различных углах падения частиц.

Образцы представляли собой гетероэпитаксиальный слой $Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0.1, 0.3, 0.6$) толщиной от 0.5 до 2 мкм на подложке $GaAs$ (001). Распыляемой поверхностью служило поперечное сечение структуры, полученное скалыванием по плоскости спайности (110). Распыление осуществлялось ионами Ar^+ с энергией 5 кэВ при плотности тока в пучке 100–120 мкА/см² в установке *Balzers IEC -100*. Для достижения заведомо стационарного рельефа использовались длительные времена распыления, достигающие 10–15 час. Наклон образца по отношению к пучку осуществлялся вокруг оси, параллельной границе раздела слой-подложка, так, что ионный пучок падал на поверхность со стороны подложки. Характер образовавшегося рельефа определялся путем изучения поперечного сечения (110) структуры, полученного повторным скалыванием, в электронном микроскопе *Philips EM 420* в сканирующем режиме с регистрацией вторичных или обратнорассеянных электронов.

Поверхность поперечного сечения гетероструктуры $AlGaAs/GaAs$ представляет собой чередующиеся полосы материалов, распылявшихся с различной скоростью, причем скорость распыления $AlGaAs$ (s_2) меньше, чем $GaAs$ (s_1) [4]. Стационарный вид рельеф приобретает, когда каждая образующая его плоскость перемещается



вдоль нормали к исходной плоской поверхности с одной и той же скоростью, что достигается, очевидно, разворотом поверхности $AlGaAs$ на некоторый угол α , такой, что

$$s_2(\theta - \alpha) = s_1(\theta) \cos \alpha, \quad (1)$$

где θ — угол падения частиц относительно нормали к исходной плоской поверхности (рис. 1). Величина угла α определяется видом угловой зависимости скоростей распыления $GaAs$ и $AlGaAs$ и их соотношением. Такая зависимость для $GaAs$, полученная в отдельном цикле экспериментов [5], представлена на рис. 2, а. Влияние угла падения частиц на величину разворота поверхности $AlGaAs$ анализировалось посредством численного решения уравнения (1) в предположении, что скорости распыления $AlGaAs$ и $GaAs$ связаны простым соотношением

$$s_2(\theta) = k s_1(\theta), \quad (k < 1). \quad (2)$$

Результаты расчета, представленные на рис. 2, б, обнаруживают скачкообразное уменьшение высоты рельефа при достижении критического угла θ_{cr} . Такое поведение объясняется сменой факторов, за счет которых достигается стационарное состояние. Для скользящих углов, соответствующих спадающему участку угловой зависимости скорости распыления (рис. 2, а), при $\theta > \theta_{cr}$ уже небольшой разворот поверхности на угол α , уменьшая угол бомбардировки $AlGaAs$ до $\theta' = \theta - \alpha$, быстро повышает скорость его распыления до ее величины для $GaAs$. На меньших углах бомбардировки разворот поверхности $AlGaAs$, наоборот, уменьшает скорость его распыления, и стационарное состояние обеспечивается сильным увеличением скорости перемещения наклонной поверхности $AlGaAs$ вдоль исходной нормали, что происходит лишь при значительной величине разворота α . Значение θ_{cr} возрастает с увеличением разности скоростей распыления (с уменьшением k), а его минимальное значение (при $k = 1$) соответствует максимуму угловой зависимости скорости распыления $GaAs$ θ_m .

Экспериментальное изучение в электронном микроскопе профиля поверхностного рельефа на поперечном сечении однослойной гетероструктуры $AlGaAs/GaAs$ после ионно-лучевого распыления подтвердило, что при переходе к скользящим углам бомбардировки происходит резкое уменьшение высоты рельефа. На рис. 1 представлены примеры профилей поверхности поперечного сечения гетеро-

Рис. 1. Схема ионного распыления $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ -гетероструктуры (а) и электронно-микроскопические изображения скола образца ($x = 0.6$) после ионного травления под углом $\theta = 60^\circ$ (б) и $\theta = 70^\circ$ (в). 1 — $GaAs$, 2 — эпитаксиальный слой $Al_xGa_{1-x}As$, 3 — напыленный слой.

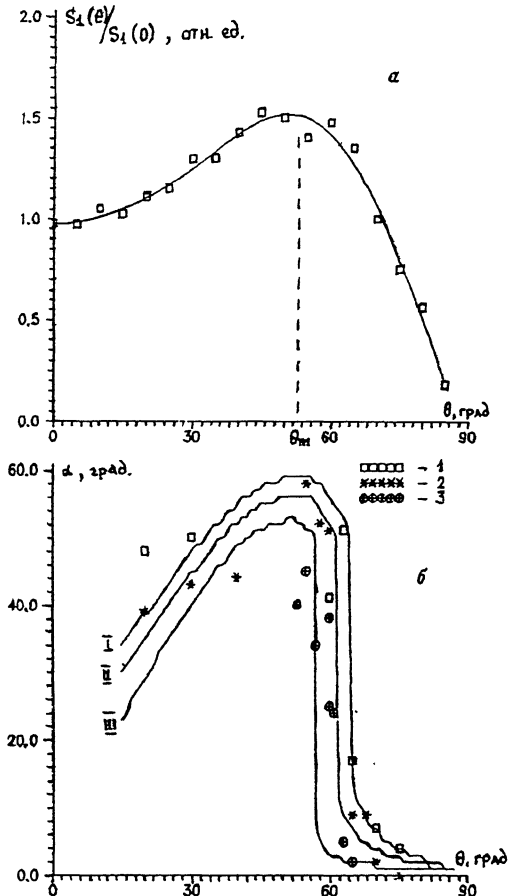


Рис. 2. Угловые зависимости скорости распыления $GaAs$ (а) и угла разворота α поверхности $Al_xGa_{1-x}As$ (б).
 1, П, Ш - расчетные кривые для $k = 0.81, 0.88, 0.96$;
 1, 2, 3 - экспериментальные результаты для $x = 0.6, 0.3, 0.1$.

структур $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$. Экспериментальные значения угла разворота α для $x = 0.6; 0.3; 0.1$ представлены на рис. 2, б и демонстрируют неплохое согласие с расчетными кривыми для $k = 0.81; 0.88; 0.96$ соответственно.

Следует заметить, что в наших экспериментах на боковой затененной поверхности образца наблюдалось напыление слоя толщиной около 0.5 мкм, состоящего по данным рентгеноспектрального микроанализа из конструкционных материалов установки. Ввиду слабой адгезии этот слой был подвержен частичному разрушению при подготовке (скальвании) образцов для электронно-микроскопических исследований. Существование этого медленно распыляющегося слоя,

выступающего над рельефом гетероструктуры и отражающего часть ионного потока, по-видимому, служило причиной того, что на малых углах бомбардировки $\theta \leq 15^\circ$ наблюдаемый рельеф приобретал качественно иной характер.

Таким образом, несмотря на то, что на углах бомбардировки $\theta = 75-80^\circ$, широко используемых по аналогии с однородным материалом при ионно-лучевом распылении поперечных сечений гетероструктур [2,3], наблюдается сглаживание рельефа, эти условия не являются оптимальными вследствие низкой скорости распыления. Удачный компромисс достигается уменьшением угла бомбардировки к θ_{cr} , который, например, для $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$ равен 62° и позволяет увеличить скорость распыления в 1.7-2.1 раза без существенного возрастания высоты рельефа.

В заключение авторы выражают благодарность В.П.Евтихееву и В.П.Хвостикову за предоставление образцов гетероструктур, а также И.П.Сошникову за полезные обсуждения и С.Г.Конникову за поддержку работы.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] B u l l e - L i e u w m a C.W.T., Z a l m P.C. // Surface and Interface Analysis. 1987. V.10. P.210-215.
- [2] V i e g e r s M.P.A. et al. // Spectrochimica Acta. 1985. V. 40B. N 5-6. P.835-845.
- [3] I c h i n o s e H. et al. // J.Electron. Microsc. 1987. V. 36. N 3. P. 82-89.
- [4] K a j i w a r a K., K a w a i H. // Surf. and Interface Analysis. 1990. V. 15. N 7. P. 433-439.
- [5] Б е р т Н.А., С о ш н и к о в И.П. Тез. докл. XIУ Всес. конф. по электронной микроскопии (Суздаль), М., 1990. С.108-109.

Поступило в Редакцию
17 сентября 1991 г