

## ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА ПОДЛОЖКИ ДЛЯ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ : ИССЛЕДОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

С.Ю. Карпов, Ю.В. Ковальчук,  
В.Е. Мясин, А.Ю. Островский,  
Ю.В. Погорельский, И.Ю. Русанович,  
И.А. Соколов, Г.А. Фокин,  
М.И. Этинберг

В настоящее время достаточно надежно установлено, что плавление приповерхностного слоя кремния наносекундными лазерными импульсами приводит к эффективной очистке поверхности от кислорода и углерода [1]. Кроме того, лазерная перекристаллизация кремния приводит к уменьшению в нем количества протяженных дефектов [2]. Можно ожидать такого же эффекта и для других полупроводников.

Эффект лазерной очистки поверхности продемонстрирован также для германия и арсенида галлия [1]. Однако в случае арсенида галлия при этом наблюдались явные признаки нарушения стехиометрического состава приповерхностного слоя полупроводника и заметное разупорядочение кристаллической структуры поверхности. Очевидно, что эти факторы могут привести в дальнейшем к срыву эпитаксиального роста (так, при накоплении галлия на поверхности, рост арсенида галлия становится невозможным). Таким образом, вопрос о возможности восстановления после лазерной очистки стехиометрического состава и монокристалличности поверхности подложки является принципиальным.

В данной работе с помощью дифракции быстрых электронов на отражение исследуются результаты лазерной очистки и последующего низкотемпературного отжига в потоке  $As_4$  поверхности  $GaAs$  (100) для молекулярно-лучевой эпитаксии. Данные сравниваются с результатами стандартной процедуры подготовки подложки перед ростом.

Исследования проводились в установке молекулярно-лучевой эпитаксии, обеспечивающей давление остаточной атмосферы  $\sim 10^{-10}$  Торр, и снабженной окнами для ввода лазерного излучения. В качестве образцов использовались пластины полуизолирующего  $GaAs$  :  $Cr$  ориентации (100). Все образцы подвергались стандартной химической обработке [3]. После пассивации поверхности в дистиллированной воде наклейка образцов на молибденовые держатели, транспортировка и загрузка в высоковакуумную камеру осуществлялась в атмосфере сухого азота. Структура поверхности исследовалась с помощью дифрактометра быстрых электронов при энергиях электронов  $W = 12-14$  кэВ. Температура подложки и рабочие отношения потоков  $J_{As_4} / J_{Ga}$  калибровались в предварительных

экспериментах на основе фазовой диаграммы поверхности  $GaAs$  (100) [4]. Абсолютная величина потока галлия  $J_{Ga}$  определялась по скорости роста гомоэпитаксиального слоя.

Картина дифракции быстрых электронов, полученная на приготовленных таким образом образцах, представляла собой набор слегка вытянутых объемных рефлексов в сочетании с сильным диффузным фоном. Часть образцов не подвергалась лазерной очистке. Для удаления собственного окисла эти образцы подвергались термическому отжигу при температуре  $T_S = 620^\circ C$  в течение 5 мин в потоке  $As_4$ . После отжига интенсивность диффузного фона уменьшилась, а объемные рефлексы вытягивались в тяжи, свидетельствующие о получении атомарно-гладкой поверхности. Последующее выращивание буферного слоя  $GaAs$  ( $T_S = 590^\circ C$ , скорость роста  $\dot{V} = 0.45$  мкм/час и  $J_{As_4} / J_{Ga} = 5 : 1$ ) толщиной  $d = 400 \text{ \AA}$  приводило к исчезновению диффузного фона рассеяния и появлению дополнительных тяжей, соответствующих реконструкции  $2 \times 4$  мышьяк-стабилизированной поверхности  $GaAs$  (100).

Лазерная очистка части образцов осуществлялась импульсами рубинового лазера длительностью  $\tau = 20$  нс с плотностями энергии  $E \approx 0.60 - 0.75$  Дж/см<sup>2</sup>. При этом лазерный пучок сканировался по поверхности образца, обеспечивая десятикратный переплав обрабатываемой поверхности. Следует отметить, что такая процедура очистки требует жесткого контроля за распределением световой энергии по сечению лазерного пучка и флуктуациями энергии импульса, так как облучение полупроводника производилось с плотностями энергии, близкими к порогу разрушения  $GaAs$  ( $E_D \approx 0.8 - 0.9$  Дж/см<sup>2</sup>).

Картина дифракции электронов на образцах, подвергнутых лазерной очистке, представляла собой слегка вытянутые объемные рефлексы в сочетании с диффузным фоном. Дополнительных рефлексов, свидетельствующих о реконструкции поверхности  $GaAs$  не наблюдалось. Однако нагрев образца уже до температуры  $T_S \approx 400^\circ C$  без включения потока  $As_4$  приводил к появлению галлий-стабилизированной поверхности с реконструкцией  $4 \times 2$ . Последующее включение потока  $As_4$  и выдержка образца в нем в течение 10 минут (при постоянной  $T_S \approx 400^\circ C$ ) вызывает изменение реконструкции поверхности  $GaAs$  (100) от  $4 \times 2$  к  $2 \times 4$ .

Как мы видим, несмотря на то, что анализ Оже-спектров в [1] указывает на обеднение поверхности мышьяком, это обеднение не является катастрофическим. Низкотемпературный отжиг восстанавливает кристаллическую структуру поверхности вплоть до ее реконструкции. Обеднение мышьяком сказывается лишь в том, что реконструированная поверхность оказывается галлий-стабилизированной. Включение потока  $As_4$  компенсирует недостаток мышьяка на поверхности, о чем свидетельствует переход к мышьяк-стабилизированной поверхности  $2 \times 4$ .

Таким образом, описанная выше процедура, включающая лазерную очистку  $GaAs$  (100) и низкотемпературный отжиг образца в потоке  $As_4$ , позволяет получить мышьяк-стабилизированную поверхность

с реконструкцией  $2 \times 4$ , пригодную для эпитаксиального роста. Для получения такой поверхности традиционным путем, как мы видели, требуется дополнительно вырастить на поверхности буферный эпитаксиальный слой. Необходимая для этого толщина буферного слоя зависит от концентрации остаточного углерода на поверхности подложки (см., например, [5]). Получение мышьяк-стабилизированной реконструированной поверхности  $GaAs$  в результате лазерной обработки и отжига без дополнительного выращивания буферного слоя связано, по-видимому, с эффективной очисткой поверхности образца.

Авторы благодарят П.С. Копьева и Б.Я. Мельцера за помощь в проведении эксперимента.

## Л и т е р а т у р а

- [1] Z e h n e r D.M. Surface Studies of Pulsed Laser Irradiated Semiconductors. - In: Pulsed Laser Processing of Semiconductors (Semiconductors and Semimetals, vol. 23). Ed. R.F. Wood, C.W. White, R.T. Young, Academic Press, NY: 1985. P. 405-470.
- [2] C u l l i s A.G. - Rep. Prog. Phys. 1985. V. 48. N 8. P. 1155-1233.
- [3] N e w s t e a d S.M., K u b i a k R.A.A., P a r k e r E.H.C. On the practical applications of MBE surface phase diagrams. - In: Molecular Beam Epitaxy, 1986. Ed. C.T. Foxon, J.J. Harris. Amsterdam, 1987. P. 49-54.
- [4] К о п ь е в П.С., М и н ч е в Г.М., Б е р Б.Я., М е л ь ц е р Б.Я. // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. В. 19. С. 1209-1213.
- [5] C h o A.Y., A r t h u r J.R. // Prog. Solid State Chem. 1975. V. 10. P. 157-191.

Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе  
АН СССР,  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
13 октября 1988 г.