

06.2; 12

© 1992

МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВАЯ ЭПИТАКСИЯ (МПЭ) $GaAs$
И $(Al, Ga)As$ НА РАЗОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОДЛОЖКАХ
 $GaAs$ (100).Б.Я. Б е р , В.П. Е в т и х и е в , А.Б. К о м и с с а р о в ,
А.О. К о с о г о в , Д.А. З у ш и н с к и й

Исследования, проведенные авторами [1, 2], показали, что разориентация подложек $GaAs$ (100) в сторону (111) А на $0-12^\circ$ улучшает электрофизические, оптические и морфологические свойства гетероструктур в системе $GaAs-AlGaAs$. В работе [3] сообщалось, что преднамеренная разориентация подложек $GaAs$ (100) в сторону (111) А на несколько градусов может приводить к улучшению параметров инжекционных $AlGaAs/GaAs$ гетеролазеров, получаемых методом МПЭ.

В настоящей работе исследуется влияние разориентации подложки на процесс МПЭ $GaAs$ в обычно используемом для изготовления приборных структур диапазоне температур $620-720^\circ C$. Ранее [8-11] было показано, что выращивание методом МПЭ слоев $GaAs$ при температуре подложки выше $630^\circ C$ сопровождается десорбцией Ga и, как следствие, уменьшением скорости роста $GaAs$. Процесс десорбции изучался нами по измерению толщин выращенных слоев.

Образцы были получены на отечественной МПЭ-установке. Температура подложки определялась с помощью $W-Re$ термпары и калибровалась до начала процесса роста по температуре десорбции окисла ($585^\circ C$), а также после проведения роста (при остаточном давлении As_2 в камере менее 10^{-8} Па) по температуре неконгруэнтного разложения свободно испаряющегося $GaAs$ ($620^\circ C$) [4]. Соотношение потоков элементов У/Ш групп было откалибровано с помощью метода регистрации интенсивности осцилляций ДБЭ и фазовой диаграммы реконструкции поверхности $GaAs$ (100) [5]. Образцы состояли из чередующихся слоев $GaAs$ и $AlGaAs$, выращенных при возрастающей (от 620 до $720^\circ C$) температуре подложкодержателя на подложках $GaAs$ (100), разориентированных в направлении (111)А на 2, 4 и 6 градусов. Процесс эпитаксии проводился на всех типах подложек одновременно, что исключало сложности, связанные с воспроизводимостью установки ростовых параметров. Толщины и составы слоев были определены с помощью методов ПЭМ и Оже-профилирования. ПЭМ-исследования велись на электронном микроскопе EM 420 при ускоряющем напряжении 120 кВ в режиме темного поля в отражении 002, обеспечивающем высокую чувствительность к химическому составу [6] и разрешение - 0.6 нм. Типичное микроизображение представлено на

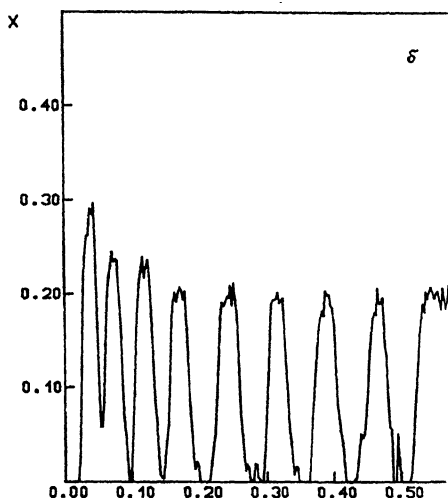
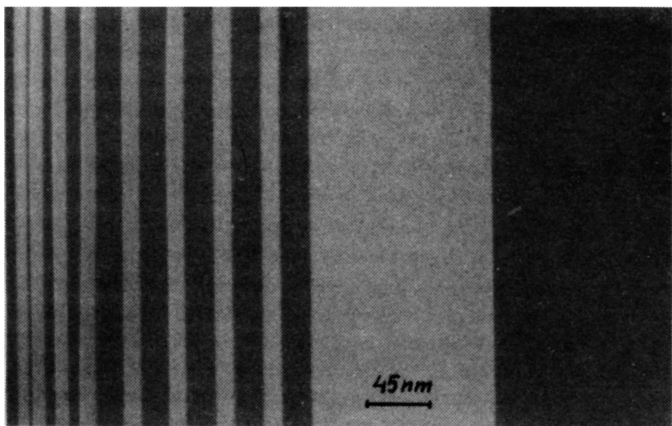


Рис. 1. а) Микроизображение скола гетероструктуры, полученной на подложке *GaAs* (100), разоориентированной на 2 градуса в сторону (111)А. б) Оже-профиль распределения *Al* по глубине гетероструктуры.

рис. 1, а. Оже-профилирование структур проводилось на спектрометре МР2000 (РИБЕР) в режиме аналоговой регистрации [7]. Ионное травление осуществлялось ионами аргона с энергией 2 кэВ при угле падения на образец, отсчитанном от его нормали, равном 60°. Количественный анализ проводился на основе факторов элементной чувствительности, определенных на серии эталонных образцов (*Al*, *Ga*)*As*.

Типичные результаты Оже-анализа для разоориентированной структуры представлены на рис. 1, б. Они демонстрируют уменьшение толщин слоев *GaAs* с возрастанием температуры роста. Процессы десорбции, происходящие во время роста, приводят к уменьшению

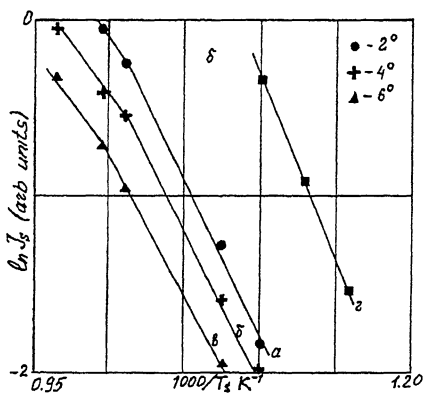
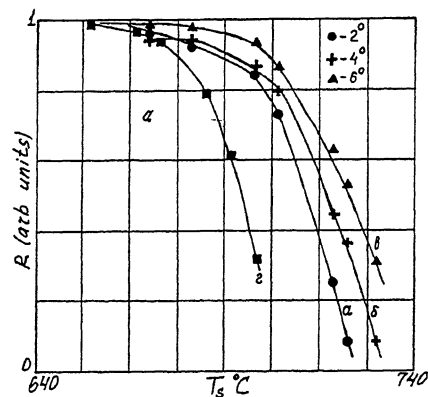


Рис. 2. а) Зависимость нормированной скорости роста от температуры роста для структур с разориентацией на 2° , 4° , 6° . б) Зависимость скорости десорбции от обратной температуры роста для структур с разориентацией на 2° , 4° , 6° .

скорости роста R , так как она пропорциональна результирующему потоку: $J = (J_0 - J_s)$, где J_0 - падающий поток Ga , а J_s - поток десорбированного Ga . Тогда скорость роста $GaAs$ выразится как разность между измеренной низкотемпературной скоростью роста R_0 (коэффициент прилипания Ga равен 1) и скоростью R_s десорбции $GaAs$.

На рис. 2 (а) представлены экспериментальные зависимости скоростей роста слоев $GaAs$ (нормированных на свои низкотемпературные значения) от температуры подложки. Кривые „а“, „б“, „в“ соответствуют подложкам, разориентированным соответственно на 2, 4 и 6 градусов в направлении (111)А.

Скорости роста для всех разориентированных подложек одинаковы до температуры $T_s = 630^\circ C$ и равны 0.5 мкм/ч. Кривые „б“ и „в“ смещены в область более высоких температур относительно

кривой „а“. Данные авторов работы [8] для ориентированной поверхности $GaAs$ (100) представлены кривой „г“.

На рис. 2(б) представлены скорости десорбции Ga с поверхности $GaAs$ для подложек $GaAs$ (100), разориентированных на 2, 4, и 6 градусов в направлении (111)А (линии „а“, „б“, „в“ соответственно). Линия „г“ построена по данным работы [8]. Используя простую кинетическую теорию [9], свяжем десорбируемый поток J_s с равновесным давлением Ga над поверхностью $GaAs$ ($P(Ga/GaAs)$):

$$J_s(T) = P(Ga/GaAs) / (2\pi m k T)^{1/2},$$

где m — молекулярная масса Ga , k — постоянная Больцмана. В исследуемом диапазоне температур роста равновесное давление десорбируемого Ga приблизительно пропорционально десорбируемому потоку Ga [8]. Тогда процесс десорбции Ga может быть представлен в рамках термодинамической модели роста хорошо известным уравнением:

$$P(Ga/GaAs) = A(sys) \times P_{As_2}^{1/2} \times \exp(-E_a/kT), \quad (2)$$

где $A(sys)$ — системно-зависимый размерный множитель, учитывающий изменение энтропии системы при протекании реакции образования-разложения $GaAs$. Энергия активации E_a составляет по данным работ [8, 10, 11] от 3.7 до 4.7 эВ в случае As -стабилизированной поверхности и 2.7–2.9 эВ — для Ga -стабилизированной поверхности.

Из представленных данных следует:

1. Температурные зависимости процесса десорбции Ga с поверхностей $GaAs$ (100), разориентированных на 2, 4 и 6 градусов в сторону (111) А, являются экспоненциальными.

2. Энергии активации процесса десорбции Ga с поверхности $GaAs$, определенные из наклонов линий „а“, „б“, „в“ (рис. 2, б), не зависят от разориентации и равны 4.6 эВ в диапазоне 620–670 °С (As — стабилизированная поверхность), совпадающим с данными работ [8, 10]. В диапазоне температур подложки 670–720 °С энергия активации для всех подложек составила 2.7 эВ, что также соответствует данным работ [10, 11].

Из уравнения (2) следует, что смещение прямых „а“, „б“ и „в“ (рис. 2, б) друг относительно друга, может быть объяснено уменьшением равновесного давления As_2 над поверхностями $GaAs$ (100), разориентированными в направлении (111)А с увеличением угла разориентации.

Приведенные данные свидетельствуют, что процессы роста на разориентированных подложках могут быть описаны в рамках существующих термодинамических представлений.

- [1] Radulescu D.C., Wicks G.W., Schaff W.J., Calawa A.R., Eastman L.F. // J. Appl. Phys. 1987. V. 62. P. 954.
- [2] Tsui R.K., Curless J.A., Karmel G.D., Peffley M.S., Wicks G.W. // J. Appl. Phys. 1986. V. 59. P. 1508.
- [3] Chen H.Z., Ghaffari A., Morkoc H., Yariv A. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51 (25).
- [4] Mizutani T. // J. Vac. Sci. Technol. 1988. B6(6). P. 1671.
- [5] Newstead S.M., Kubiak R.A., Parker E.H.C. // J. Cryst. Growth. 1987. V. 81. P. 49.
- [6] Petroff P.M. // J. Vac. Sci. Technol. 1973. V. 14. N 4. P. 973.
- [7] Бер Б.Я., Гольберг А.Э., Копьев П.С. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9, В. 12. С. 751-754.
- [8] Heckingbottom R. // J. Vac. Sci. Technol. 1985. B 3. P. 573.
- [9] Ralston J., Wicks G.W., Eastman J.F. // J. Vac. Sci. Technol. 1986. B4(2). P. 594.
- [10] Gibson E.M., Foxon C.T., Zhang J., Joyce B.A. // Appl. Phys. Lett. 1990. 57(12). P. 1203.
- [11] Spring Thorpe A.J., Mandeville P. // J. Vac. Sci. Technol. 1988. B 6(2). P. 754.

Поступило в Редакцию

16 декабря 1991 г.