

05.3

©1995

## СВЯЗЬ АТОМНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ И АВТОМОДУЛЯЦИИ

### В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНКАХ GaAlAs, ВЫРАЩЕННЫХ MOS-ГИДРИДНЫМ СПОСОБОМ

*С.К.Максимов*

Эпитаксиальные процессы проводятся в условиях, способствующих протеканию неравновесных фазовых переходов и формированию диссипативных структур [1-3]. В эпитаксиальных пленках  $A^{III}B^V$  выявлены два типа таких структур: композиционная автомодуляция с периодом, многократно превышающим межатомный [2,3], и атомное упорядочение (атомы компонент закономерно распределены в элементарной ячейке [3]). Для соединений  $A^{III}B^V$  диссипативные структуры приводят к изменениям электрофизических параметров композиций, искажениям геометрии квантовых ям и точек; без изучения закономерностей неравновесных процессов невозможно развитие прецизионных технологий, их освоение открывает принципиально новые пути в нанoeлектронике.

В настоящей работе изучались закономерности формирования диссипативных структур в эпитаксиальных пленках GaAlAs, в которых в проведенных ранее исследованиях обнаружены оба типа неравновесных образований: автомодуляция [4-6] и атомное упорядочение [3,7].

Пленки GaAlAs/GaAs выращивались с помощью MOS-гидридной технологии [4]. Направление роста совпадало с [001].

Образцы для электронно-микроскопических исследований вырезались по плоскости (100) так, что направление роста лежало в плоскости фольги. Автомодуляция выявлялась по изображениям в рефлексах 004, 022 с использованием дилатационного контраста [8].

В пленках  $Ga_{1-x}Al_xAs$  наблюдались флуктуации состава двух типов [4]: при  $x = 0.2$  возникала модуляция состава с периодом  $\geq 5.0$  нм и амплитудой, превышающей 1 мол.% AlAs, аналогичная описанной для GaAsP [2], однако в отличие от модуляции в GaAsP, для которой направление модуляции совпадало с направлением роста [001], для GaAlAs направление модуляции совпадало с одним из направлений

$\langle 110 \rangle$ , перпендикулярных направлению роста. При  $x \gg 0.2$  формировалась структура “эвтектического” типа, подобная описанной в [9]: области, однородные по составу, представляли собой “домены” с характерным размером 5.0 нм. Композиционным флуктуациям при электрофизических исследованиях отвечала прыжковая проводимость [4].

В настоящей работе наряду с модуляцией были обнаружены сверхструктурные отражения 001, 021 и т. д., отвечающие сверхструктуре типа CuAu, однако в отличие от классической сверхструктуры CuAu упорядочение, так же как в [7], было одномерным (см. схему). При  $x = 0.2$  направление упорядочения совпадало с направлением роста [001], при  $x \gg 0.2$  направление упорядочения лежало в плоскости подложки (001) и совпадало с одним из направлений  $\langle 010 \rangle$ .

В решетке  $A^{III}B^V$  существует направление порядка  $\langle 111 \rangle$ , вдоль которого происходит чередование атомов 3 и 5-й групп. В упорядоченной решетке GaAlAs появляется второе направление порядка  $\langle 001 \rangle$ , вдоль которого чередуются атомы Al и Ga. В результате потоков компонент к поверхности растущего кристалла на ней формируются атомные цепочки, ориентированные вдоль направлений  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 001 \rangle$  и лежащие в плоскостях  $\{110\}$ , т. е. плоскость  $\{110\}$  является “естественной плоскостью огранки поверхностных ступеней”, и рост кристалла происходит за счет развития и перемещения подобных ступеней.

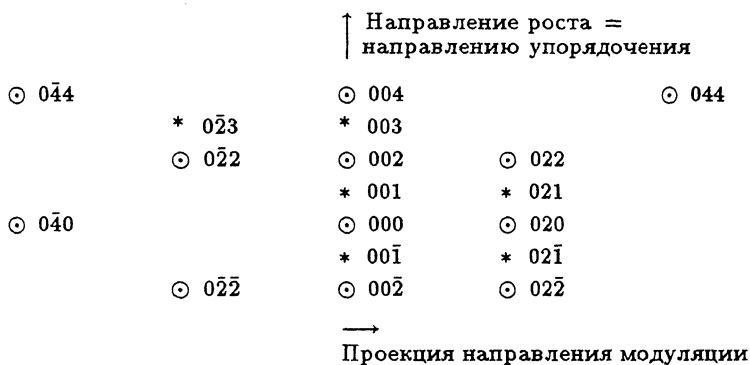


Схема центральной области электронограммы для образца с композиционной модуляцией вдоль направления [110]: ⊙ — структурные отражения для GaAlAs, \* — сверхструктурные отражения. Указаны направление роста (упорядочения) и проекция направления модуляции.

При атомном упорядочении вдоль  $[001]$  плоскостью огранки является плоскость  $(110)$ , параллельная направлению роста. Поэтому изменения в условиях роста, обусловленные, например, действием механизма работы  $[10]$ , приводят к флуктуациям состава вдоль направления  $[110]$ .

При атомном упорядочении вдоль  $\langle 010 \rangle$  "плоскостью огранки" становится одна из плоскостей  $\{110\}$ , наклонных к плоскости роста, и изменения условий роста в сочетании с движением ступеней ведут к формированию доменной структуры.

Подтверждением гипотезы о связи закономерностей автомодуляции и атомного упорядочения являются результаты  $[11-13]$ . Для GaInP обычна сверхструктура типа CuPt  $[3,13,14]$ , и атомы Ga и In чередуются вдоль того же направления  $\{111\}$ , что и атомы 3 и 5-й групп. Поэтому, если направление роста  $[111]$  совпадает с направлением упорядочения, последнее не вносит дополнительных ограничений в структуру поверхности и для автомодуляции должны наблюдаться те же закономерности, что для атомно-неупорядоченных композиций типа GaAsP. Действительно, при росте пленок GaInP  $(111)$  наблюдалась композиционная модуляция вдоль направления роста  $[111]$ , а все ее особенности — закон изменения состава, амплитуда и период — были близки к таковым для GaAsP. В  $[13]$ , где исследовались слои  $(001)$  GaInP с направлениями упорядочения  $\langle 111 \rangle$ , наклонными относительно направления роста  $[001]$ , была обнаружена доменная структура. Домены различались направлением упорядочения и чередовались вдоль  $[001]$ . Однако в  $[12]$  для пленок GaInP атомные слои Ga и In принудительно чередовались вдоль направления роста  $[001]$  и были обнаружены признаки макромасштабной автомодуляции вдоль направления  $[110]$ , перпендикулярного направлению роста, что полностью соответствует выдвигаемой гипотезе.

Результаты настоящей статьи и  $[11-13]$  свидетельствуют, что атомное упорядочение для GaAlAs и GaInP является первичным эффектом, который определяет закономерности вторичного эффекта макромасштабной модуляции по составу.

## Список литературы

- [1] *Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных процессах. М.: Мир, 1979. 512 с.
- [2] *Максимов С.К., Нагдаев Е.Н.* // ДАН СССР. 1979. Т. 245. С. 1369–1372.
- [3] *Chevalier J.-P., Portier R.* // Proc. Inst. Phys. Conf. 1991. V. 117. P. 453–462.
- [4] *Ильичев Е.А., Максимов С.К., Нагдаев Е.Н. и др.* // ЖТФ. 1986. V. 56. С. 2245–2247.
- [5] *Maksimov S.K.* // Proc. Inst. Phys. Conf. 1991. V. 117. P. 491–496.
- [6] *Максимов С.К.* // Кристаллография. 1994. Т. 39. С. 315–321.
- [7] *Kuan T.S., Kuech T.F., Wang W.I., Wilkie W.I.* // Phys. Rev. Lett. 1985. V. 54. P. 201–205.
- [8] *Maksimov S.K., Nagdaev E.N.* // Phys. stat. sol. (a). 1982. V. 69. P. 505–512.
- [9] *Шефталъ Н.Н., Козлов Ю.М.* // Процессы реального кристаллообразования. М.: Наука, 1977. С. 74–91.
- [10] *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Суриц Р.А.* // Дефекты структуры в полупроводниках. Методы их исследования и влияние на свойства кристаллов и пленок. М.: МИЭТ, 1982. С. 3–12.
- [11] *Максимов С.К., Бондаренко Л.А., Гайдуков Г.Н.* // ФТТ. 1982. Т. 24. С. 628–632.
- [12] *Ueda O., Nakata Y., Fuji T.* // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. P. 705–708.
- [13] *Barter C.S., Stobbs W.M., Wilkie J.M.* // Proc. Inst. Phys. Conf. 1991. V. 117. P. 469–472.
- [14] *Suzuki T., Gomyo A., Iijima S. et al.* // Jap. J. Appl. Phys. 1988. V. 27. P. 2098–2101.

Поступило в Редакцию  
19 июля 1995 г.