

06;12

Влияние высоты ступеней вицинальной поверхности германия на процесс образования антифазных границ в системе арсенид галлия– –германий–арсенид галлия (001)

© А.К. Гутаковский, А.В. Катков, М.И. Катков,
О.П. Пчеляков, М.А. Ревенко

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск

Поступило в Редакцию 16 апреля 1998 г.

Исследован процесс образования антифазных границ в системе GaAs/Ge/GaAs(001) при использовании подложек точной ориентации и с отклонением 3 и 5° по направлению [110]. Показано, что рост германия на отклоненной поверхности арсенида галлия приводит к образованию двухатомных ступеней высотой $a_0/2$ и, как следствие, к отсутствию антифазных границ в пленке GaAs, выращенной на такой поверхности. Определены условия получения вицинальной поверхности Ge, состоящей из моноатомных ступеней высотой $a_0/4$, наличие которых приводит к формированию антифазных границ при росте GaAs.

Возможность выращивания структурно-совершенных пленок полярных полупроводников АІІІV на неполярных подложках германия и кремния позволяет существенно усовершенствовать ряд полупроводниковых приборов, а также решить проблему технологического совмещения оптоэлектронных приборов на основе АІІІV с кремниевой технологией. Так, практически идеальное согласование по параметру решетки в гетеросистеме GaAs/Ge (0.07%) позволяет реализовать на ее основе новый тип солнечных элементов [1], а также гетеробиполярных транзисторов [2]. Основным структурным дефектом при эпитаксиальном выращивании псевдоморфных слоев арсенида галлия на поверхности Ge(001) являются антифазные границы [3], однако, несмотря на значительное количество публикаций, механизм образования антифазных границ до конца не понят. Целью настоящей работы

является исследование влияния субмонослойных покрытий галлия на высоту ступеней на вицинальной поверхности Ge(001), а также влияния высоты ступеней на концентрацию антифазных границ в арсениде галлия, выращенном на отклоненной поверхности Ge(001).

Для исследования процесса возникновения антифазных границ в системе GaAs/Ge/GaAs(001) проводилось выращивание пленок Ge на подложках GaAs(001), отклоненных на 3 и 5° по направлению [110], с последующим наращиванием на Ge пленки GaAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Выращивание слоев GaAs и Ge осуществлялось из стандартных молекулярных источников эффузионного типа. Скорость роста GaAs составляла $0.5 \mu\text{m/h}$, а скорость роста Ge — $0.2 \div 0.3 \mu\text{m/h}$. Температура подложки изменялась от 200 до 600°C. Для контроля процесса роста применялась дифракция быстрых электронов с энергией 30–40 keV. Рост GaAs проводился в условиях стабилизации поверхности мышьяком при наличии сверхструктуры (2×4) . Для регистрации изменения высоты ступеней (рис. 1) при росте на отклоненных подложках GaAs(001) использовался метод наблюдения за величиной расщепления рефлекса дифракционной картины в азимуте, параллельном направлению ступеней [4]. Для исследования влияния молекулярного потока Ga на высоту ступеней вицинальной грани на поверхность германия во время роста подавался поток атомов галлия с плотностью $\sim 5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Исследования структуры пленок GaAs выполнены с помощью просвечивающей электронной микроскопии на электронном микроскопе JEM-4000 EX. Объекты для исследований препарировались в виде тонких фольг, параллельных поверхности роста, по стандартной методике химического струйного травления.

При использовании подложек GaAs точной ориентации (001) после открывания заслонки молекулярного источника Ge за время роста, соответствующее примерно одному монослою Ge, образовывалась поверхностная сверхструктура (2×2) , интерпретируемая как смесь сверхструктур (2×1) и (1×2) , что является следствием того, что поверхность состоит из ступеней монокристаллической высоты $a_0/4$ [5]. Перед началом роста GaAs на Ge проводился нагрев образца до температуры эпитаксии ($T \approx 550^\circ\text{C}$) в потоке As₄. Начало роста арсенида галлия характеризовалось быстрым образованием сверхструктуры (4×4) , являющейся смесью сверхструктур (2×4) , характерной при наличии антифазных доменов [3,5]. Данная сверхструктура сохранялась на протяжении всего процесса роста. Наблюдение сверхструктуры (4×4)

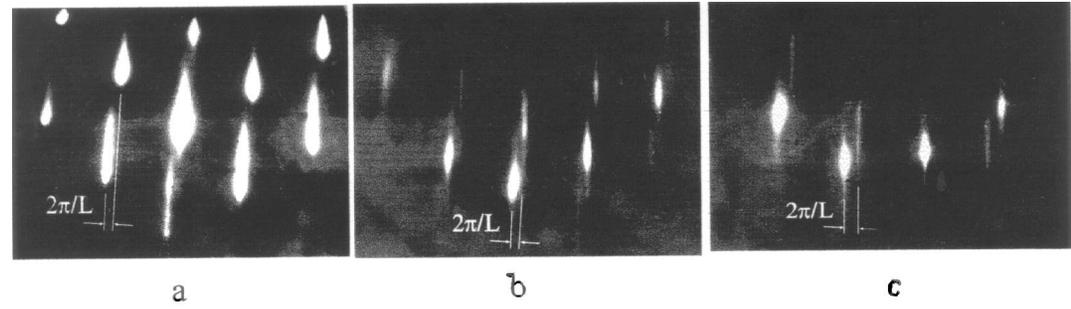


Рис. 1. Изменение величины расщепления рефлексов картины дифракции быстрых электронов в азимуте $\langle 100 \rangle$: a — GaAs, b — Ge на GaAs, c — Ge на GaAs после напыления Ga. L — расстояние между кромками ступеней [4].



Рис. 2. Изображение антифазных границ в системе GaAs/Ge/GaAs(001), полученное методом просвечивающей электронной микроскопии.

может свидетельствовать о наличии в пленке GaAs смеси доменов с поверхностной структурой (2×4) и (4×2) , а значит и о наличии антифазных доменов. Это подтверждается данными просвечивающей электронной микроскопии. На рис. 2 эти домены выглядят в виде замкнутых областей произвольной геометрии, разделенных антифазными границами, которые на изображении имеют полосчатый черно-белый контраст, характерный для наклонных границ раздела.

Рост Ge на отклоненных подложках GaAs проходил с образованием ступеней высотой $a_0/2$, что следовало из наблюдения за величиной расщепления основных рефлексов дифракционной картины в азимуте, направленном вдоль ступеней (рис. 1, *a, b*). Так как после начала роста германия между расщепленными рефлексами в нашем случае не изменялось, можно сделать вывод о том, что высота ступеней германия соответствует $a_0/2$. Расчет ширины террас по расщеплению рефлексов для подложек, отклоненных на 5° , также дал величину ~ 3 нм, что

соответствует расчету по углу разориентации для высоты ступеней, равной $a_0/2$. Следует отметить, что, по-видимому, на поверхности растущей пленки германия присутствуют как двухатомные, так и моноатомные ступени, причем доля тех и других зависит от температуры роста. Об этом говорит и тот факт, что в азимуте $[1\bar{1}0]$, направленном поперек ступеней, всегда наблюдался дробный рефлекс $1/2$, тогда как в азимуте $[110]$ интенсивность дробного рефлекса $1/2$ заметно падала при увеличении температуры роста. Это хорошо согласуется данными, приведенными в работе [4].

Рост GaAs на поверхности германия, состоящей из ступеней высотой $a_0/2$, сразу начинался с образования сверхструктуры (2×4) , которая сохранялась в течение всего процесса роста. Это свидетельствовало о том, что образования антифазных границ не происходило. Исследования, проведенные с помощью просвечивающей электронной микроскопии, также не обнаруживают наличие антифазных границ в пленке арсенида галлия, выращенной на поверхности германия, состоящей из ступеней высотой $a_0/2$. Необходимо также отметить, что, в отличие от [3], рост арсенида галлия на германии в этом случае происходил с поворотом на 90° поверхностной сверхструктуры (2×4) относительно подложки.

Нами было обнаружено, что при наличии на поверхности субмонослойного покрытия атомов галлия во время роста германия наблюдается переход высоты ступеней от $a_0/2$ к $a_0/4$. В нашем случае, во время роста германия на отклоненной подложке GaAs, переход от двухатомных ступеней к преимущественно моноатомным происходил при подаче потока Ga за время около 20–40 с. Температура подложки при этом составляла 400°C . Изменение высоты ступеней фиксировалось по дифракционной картине в азимуте $[110]$ вдоль ступеней. На рис. 1, с видно, что образование моноатомных ступеней приводило к увеличению в два раза расстояния между расщепленными рефлексами. При дальнейшем прекращении роста Ge и охлаждении образца ступени моноатомной высоты на поверхности сохранялись. Возможность получения вицинальной поверхности Ge(001), состоящей из моно- или двухатомных ступеней, позволяет нам определить влияние высоты ступеней на концентрацию антифазных границ в пленке GaAs при ее последующем выращивании на германии. Рост арсенида галлия на вицинальной поверхности германия, состоящей из моноатомных ступеней, приводил к образованию антифазных границ. Наблюдаемая с помощью просвечивающей электронной микроскопии картина антифазных доменов в этом случае аналогична

приведенной на рис. 2, но средний размер доменов в несколько раз меньше, чем при росте сингулярной поверхности. Плотность антифазных границ соответственно в несколько раз выше.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что основной причиной образования антифазных границ в системе GaAs/Ge/GaAs(001) является наличие ступеней высотой $a_0/4$ на поверхности германия. Показано, что рост германия на отклоненных в направлении [110] на 3 и 5° подложках GaAs проходит с образованием ступеней двухатомной высоты и дальнейший рост арсенида галлия осуществляется без образования антифазных границ. Зафиксирован переход от двухатомных ступеней к моноатомным при подаче во время роста дополнительного потока Ga. Анализ с помощью просвечивающей электронной микроскопии арсенида галлия, выращенного на поверхности германия, состоящей из ступеней моноатомной высоты, показывает большую плотность антифазных границ, а в случае роста на отклоненной поверхности германия, состоящей из ступеней двухатомной высоты, антифазные границы в пленке арсенида галлия отсутствуют.

Исследования выполнены в рамках государственных программ Миннауки: "Астрономия. Фундаментальные космические исследования" (проект "Эпитаксия") и "Физика твердотельных наноструктур" (проекты № 97-2025 и № 3-011/4).

Список литературы

- [1] *Tobin S.P., Vernon S.M., Bajgar C.* // IEEE Electron Device Letters. 1988. V. 9. N 5. P. 256-258.
- [2] *Strite S., Unlu M.S., Demirel A.L.* // J. Vac. Sci. Technol. B10 (2). 1992. P. 675-682.
- [3] *Strite S., Biswas D., Adomi K.* // J. Appl. Phys. 1990. V. 67 (3). P. 609-1612.
- [4] *Pukite P.R., Cohen P.I., Batra S.* Reflection High-Energy Electron Diffraction and Reflection Imaging of Surfaces / Ed. P.K. Larsen and P.J. Dobson. New-York: Plenum Press, 1988.
- [5] *Strite S., Biswas D., Kumar N.S.* // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 56 (3). P. 244-246.