

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЛАКСАЦИОННОЙ ЖИДКОСТНОЙ ЭПИТАКСИИ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ СУПЕРТОНКИХ ГОМОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ A^3B^5

В.Н.Демин

Институт неорганической химии СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия
(Поступило в Редакцию 12 октября 1994 г.)

Для создания структур с супертонкими ($\sim 100 \text{ \AA}$) слоями недавно был предложен и реализован метод релаксационной жидкостной эпитаксии с инверсией массопереноса [1-3]. Сущность предложенного метода заключается в том, что выращивание слоев АВ (например, GaAs) происходит из переохлажденного раствора-расплава ($\Delta T = 1 - 15 \text{ K}$), находящегося в тонком зазоре между двумя подложками, одна из которых АВС (например, GaAlAs) основанная и АВ (GaAs) — инвертирующая. При этом скорость гомоэпитаксиального роста на подложке GaAs существенно больше, чем на подложке GaAlAs. Это позволяет основную часть растворенного компонента высаживать на инвертирующей подложке и получать на основной подложке супертонкий слой осаждаемого компонента.

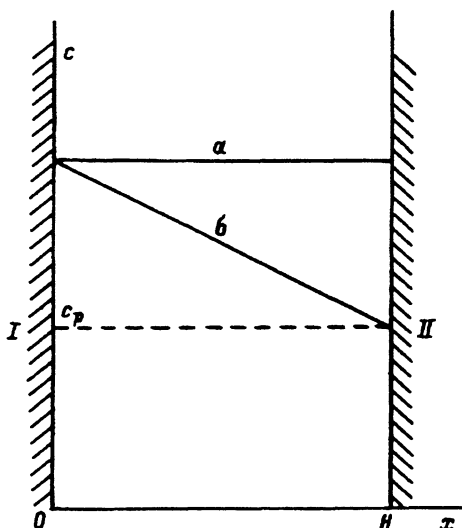
Основная идея метода, согласно [3], заключается в использовании различия в скоростях осаждения вещества при гетерогенном зарождении на гетероподложку и гомоэпитаксиальном росте. Необходимым условием предложенного метода считается наличие гетероэпитаксиальной подложки. Накопленные в настоящее время экспериментальные данные по жидкостной эпитаксии и существующие модели процесса кристаллизации позволяют расширить применение этого метода для роста гомоэпитаксиальных слоев по крайней мере GaAs.

Как известно, при достаточно тонких толщинах жидких зон скорость гомоэпитаксиального роста может лимитироваться гетерогенной стадией процесса осаждения. В рассматриваемом нами случае это лимитирование может наступать как для одной, так и одновременно для двух подложек, между которыми находится пересыщенный раствор-расплав. Распределение концентрации с растворенного вещества по толщине жидкой зоны H для этих двух случаев представлено на рисунке.

Скорость гетерогенного процесса кристаллизации из раствора V (см/с) достаточно хорошо описывается линейной зависимостью от пересыщения $\Delta c = c - c_p$ при не очень малых значениях относительного пересыщения $\Delta c/c_p \geq 10^{-2}$ [4]

$$V = k \frac{\Delta c}{c_p}. \quad (1)$$

Отсюда ясно, что в случае лимитирования процесса осаждения на двух подложках одновременно (см. рисунок, а) отношение толщин слоев, выросших на подложках, будет равно отношению соответствующих



Распределение концентрации осаждаемого компонента по толщине жидкой зоны в случае гетерогенных кинетических затруднений на обеих подложках (а) и на одной подложке (б).

I — основная подложка, *II* — инвертирующая.

констант кристаллизации

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{k_2}{k_1}.$$

Если на одной из подложек скорость осаждения будет лимитироваться диффузией осаждаемого компонента (см. рисунок, б), то она будет равна

$$V_2 = -D \frac{dc}{dx} = -D \frac{\Delta c}{H}$$

и отношение толщин выросших слоев на обеих подложках запишется как

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{Dc_p}{Hk_1\Omega}. \quad (2)$$

Здесь D ($\text{см}^2/\text{с}$) — подвижность осаждаемого компонента в жидкой фазе, c_p ($\text{моль}/\text{см}^3$) — его равновесная концентрация при температуре осаждения, H (см) — толщина жидкой зоны, Ω ($\text{моль}/\text{см}^3$) — молекулярная плотность в твердой фазе осаждаемого компонента. Теория роста кристаллов предсказывает, что наиболее быстро процессы кристаллизации идут на сингулярных гранях (110) и (100). Так что для констант кристаллизации выполняется неравенство $k(110), k(100) > k(111)$ [5]. В случае роста из растворов-расплавов определенную трудность представляет достижение кинетических режимов процесса. Как показано при рассмотрении моделей таких процессов, лимитирование скорости осаждения гетерогенной стадией кристаллизации наступает при выполнении неравенства $kH \ll D$ [6,7]. Экспериментально было показано [7], что в случае жидкофазной эпитаксии арсенида галлия лимитирование гетерогенным этапом наступает при толщинах жидкой зоны

$H \leq 100$ мкм ($T_0 = 800^\circ \text{C}$) в случае использования подложек ориентации (111). Условие лимитирования гетерогенной стадией для ориентации (110) и (100) в этом случае достичь гораздо сложнее. Так, эксперименты по ЭЖЭ арсенида галлия на переменном токе при этой же температуре свидетельствуют об отсутствии кинетических затруднений вплоть до $H = 2-3$ мкм [8]. Полученные в [9] экспериментальные данные по зависимости скорости роста арсенида галлия от пересыщения дают следующие значения величин констант кристаллизации: $k(100) = 2.5 \cdot 10^{-3}$ см/с, $k(111)B = 2.0 \cdot 10^{-4}$ см/с, $k(111)A = 0.9 \cdot 10^{-4}$ см/с при 840°C . Согласно этим значениям, при проведении процесса в кинетическом режиме, например, с подложками (111)B и (100) отношение толщин выросших слоев $h(100)/h(m)B = 12.5$.

Наиболее реально реализовать экспериментально при осаждении эпитаксиальных слоев GaAs случай (см. рисунок, б) с основной подложкой (111) и инвертирующей подложкой (100). В этом случае вычисление по формуле (2) дает значение $h(100)/h(111)A = 5.7$ для толщины жидкой зоны 50 мкм. Легко показать, что это соотношение обеспечит толщину выросшей пленки 100\AA на подложке GaAs (111)A при переохлаждении $\Delta T = 2$ К и толщине жидкой зоны 50 мкм. При вычислении были использованы следующие величины: $c_p^{800} = 2.0 \cdot 10^{-3}$ моль/см³ [10], $D_{As}^{800} = 5 \cdot 10^{-5}$ см²/с [11], $\Omega = 3.8 \cdot 10^{-2}$ моль/см³.

Рассмотренный выше макромеханизм применим и к осаждению на гетероэпитаксиальную подложку. Нужно только иметь в виду, что образование первоначального (переходного) слоя на гетероподложке и дальнейший рост на этом слое гомоэпитаксиального слоя будут происходить с разными константами кристаллизации $K_{\text{гет}}$ и $K_{\text{гом}}$, причем $K_{\text{гет}} < K_{\text{гом}}$.

Отметим также, что формула (2) дает возможность вычисления константы кристаллизации из эксперимента по кристаллизации на двух подложках. Основная привлекательность такого определения константы кристаллизации заключается в том, что при этом не нужно знать пересыщение Δc на подложке, величину, обычно весьма малую, трудно определяемую и вносящую основной вклад в ошибку при определении константы скорости гетерогенной кристаллизации.

Выводы

Метод релаксационной жидкостной эпитаксии с инверсией массопереноса может быть использован во всех случаях, когда скорости осаждения на подложки, между которыми находится насыщенный раствор-расплав, различны. В случае гомоэпитаксии это различие может быть обусловлено различием макромеханизма осаждения вещества: процесс осаждения лимитируется диффузионной стадией на одной подложке и процессом зародышеобразования (кинетический режим) на другой, а также различием кинетических констант кристаллизации (для кинетического режима), обусловленных, например, различными ориентациями подложек одного соединения. Оценки толщин гомоэпитаксиальных слоев GaAs, выращенных при различных макромеханизмах осаждения и при различных кинетических константах кристаллизации, связанных с различием ориентации подложки, однозначно указывают на возможность применения метода при выращивании супертонких гомоэпитаксиальных слоев A^3B^5 .

- [1] Бессолов В.Н., Кукушкин С.А., Лебедев М.В., Царенков Б.В. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 8. С. 1507.
- [2] Сакало Т.В., Кукушкин С.А. // ЖТФ. 1990. Т. 10. Вып. 7. С. 78.
- [3] Сакало Т.В., Кукушкин С.А. // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 10. С. 95.
- [4] Чернов А.А. // УФН. 1961. Т. 73. № 2. С. 277.
- [5] Современная кристаллография. Т. 3. М: Наука, 1980. 407 с.
- [6] Лозовский В.Н. Зонная плавка с градиентом температуры. М.: Металлургия, 1972. 230 с.
- [7] Демин В.Н., Кузнецов Ф.А. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 5. С. 934.
- [8] Демин В.Н., Нарожняя О.В., Кузнецов Ф.А. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 5. С. 142.
- [9] Bryskiewicz T. // J. Cryst. Growth. 1978. Vol. 43. P. 101.
- [10] Hall R.N. // J. Electrochem. Soc. 1963. Vol. 110. P. 385.
- [11] Rode D.L. // J. Cryst. Growth. 1973. Vol. 20. P. 13.

09;12
© 1995 г.

Журнал технической физики, т. 65, в. 5, 1995

БЫСТРЫЙ ВЫВОД СВЧ ЭНЕРГИИ ИЗ РЕЗОНАТОРА

В.И.Иванников, Ю.Д.Черноусов, И.В.Шеболаев

Институт химической кинетики и горения СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия
(Поступило в Редакцию 12 октября 1994 г.)

В ряде приложений, например в технике импульсной ЭПР спектроскопии для реализации метода электронного спинового эха [1], в устройствах формирования мощных СВЧ импульсов [2], необходимо обеспечить быстрый вывод запасенной СВЧ энергии из высокодобротного резонатора. Возможным решением задачи быстрого вывода энергии является обеспечение управляемой связи с линией, что достигается быстрым изменением либо конфигурации связи [3,4], либо типа колебаний [5]. Прямая реализация таких методов затруднена при необходимости сохранения добротности резонатора и (или) структуры поля в нем. В [6] предложен метод быстрого вывода запасенной энергии из одного резонатора в другой изменением частоты одного из них. В [7] рассмотрено использование проходного резонатора для повышения эффективности ввода СВЧ энергии в ускоряющий резонатор.

В настоящей работе показано, что быстрый вывод запасенной СВЧ энергии из высокодобротного резонатора можно осуществить через дополнительный проходной резонатор с импульсно регулируемой связью с линией. Высокая скорость вывода обусловлена тем, что поток СВЧ энергии из основного резонатора в дополнительный через отверстие связи определяется полями как основного, так и дополнительного резонаторов.

Рассмотрим двухрезонаторную систему в виде закороченного на концах отрезка прямоугольного волновода (рис. 1), разделенного диафрагмой связи 4 на два полуволновых резонатора: основной 1 и дополнительный 2 с собственными добротностями Q_1 , Q_2 и одинаковой