

## ВЫРАЩИВАНИЕ СУБМИКРОННЫХ СЛОЕВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ОХЛАЖДЕНИИ НАСЫЩЕННОГО РАСТВОРА-РАСПЛАВА

*Т.Ф.Кулюткина, И.Е.Марончук, А.В.Шорохов*

Выращивание субмикронных слоев жидкофазной эпитаксии в основном осуществляется при быстром перемещении подложки через слой переохлажденного раствора-расплава [1] или при низкотемпературной кристаллизации [2]. В настоящей работе рассматривается метод выращивания тонких слоев при импульсном охлаждении насыщенного раствора-расплава.

Подложка арсенида галлия при температуре  $T_0$  находилась в контакте с насыщенным при этой температуре раствором-расплавом. К тыльной стороне подложки подводился теплопоглотитель, температура которого  $T_1$  на величину  $\Delta T = T_0 - T_1$  меньше, чем температура подложки. Через некоторое время теплопоглотитель нагревается до температуры  $T_0$ , но за это время происходит охлаждение подложки и прилегающего к ней слоя раствора-расплава, что приводит к наращиванию на ее поверхности эпитаксиального слоя.

Для нахождения толщины выросшего слоя  $d$  в зависимости от разности температур  $\Delta T$  и толщины теплопоглотителя рассматривалось распределение температуры в системе теплопоглотитель-подложка-раствор-расплава и ее изменение во времени.

С целью упрощения задачи принималось, что теплопоглотитель сделан из того же материала, что и подложка, и их коэффициенты температуропроводности и теплопроводности равны  $\kappa_1$  и  $\lambda_1$ . Для раствора-расплава соответственно  $\kappa_2$  и  $\lambda_2$ .

Функция  $T(z, t)$  определилась в виде

$$T(z, t) = T_0 + T_{\text{н}}(z, t), \quad (1)$$

где  $T_{\text{н}}(z, t)$  удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\frac{\partial T_{\text{н}}}{\partial t} = \kappa(z) \frac{\partial^2 T_{\text{н}}}{\partial z^2}, \quad (2)$$

$$\kappa(z) = \begin{cases} \kappa_1 & \text{при } -\delta_1 \leq z \leq 0, \\ \kappa_2 & \text{при } 0 \leq z \leq \delta_2, \end{cases} \quad (3)$$

начальным условиям

$$T_{\text{н}}(z, 0) = \begin{cases} -\Delta T = T_1 - T_0 & \text{при } -\delta_1 \leq z \leq -\delta_3 \\ 0 & \text{при } -\delta_3 \leq z \leq \delta_2, \end{cases} \quad (4)$$

которые изображены также на рис. 1, граничным условиям на внешних границах системы

$$T_{\text{н}}(-\delta_1, t) = T_{\text{н}}(\delta_2, t) = 0 \quad (5)$$

и условиям на границе теплопоглотитель-подложка

$$\begin{cases} T_{\text{н}}(-\delta_3 - 0, t) = T_{\text{н}}(-\delta_3 + 0, t) \\ \lambda_1 \frac{\partial T_{\text{н}}(-\delta_3 - 0, t)}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_{\text{н}}(-\delta_3 + 0, t)}{\partial z}. \end{cases} \quad (6)$$

В предположении, что скорость поверхностных процессов много больше скорости доставки вещества, толщина кристаллизационного эпитаксиального слоя определялась из выражения

$$d = \frac{M_1 \rho_2 D}{M_2 \rho_1 m} \int_0^{t_0} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} dt, \quad (7)$$

где  $m$  — тангенс угла наклона линии ликвидуса,  $M_{1,2}$  и  $\rho_{1,2}$  — молярные массы и плотности арсенида галлия и раствора-расплава.

На рис. 1 представлены расчетные графики зависимости толщины эпитаксиальных слоев от переохлаждения  $\Delta T$  и толщины теплопоглотителя  $\delta_1 - \delta_3$ .

Анализ влияния скорости нарастания импульса охлаждения на процессы зародышеобразования свидетельствует

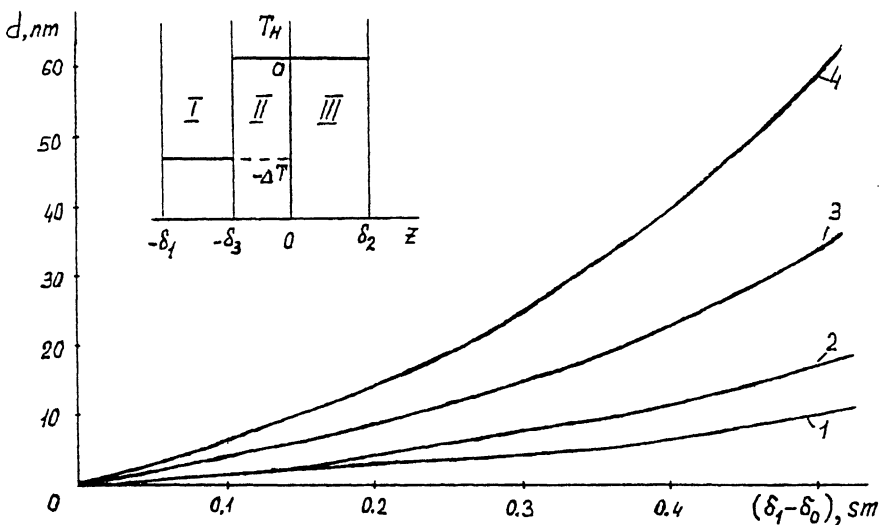


Рис. 1. Зависимость толщины эпитаксиальных слоев от толщины теплопоглотителя при  $\Delta T$ , равном: 1 —  $10^\circ\text{C}$ ; 2 —  $25^\circ\text{C}$ ; 3 —  $50^\circ\text{C}$ ; 4 —  $100^\circ\text{C}$ . На вставке — начальные условия для уравнения теплопроводности: I — теплопоглотитель; II — подложка; III — раствор-расплав.

о том, что сплошные и однородные по толщине слои будут образовываться при выполнении следующих условий:

$$9 \cdot 10^{-5} < K_1 < 5 \cdot 10^{-4}; \quad K_1 = \frac{\kappa_1 \delta_1 \Delta T}{\kappa_2 \delta_2 m T_0};$$

$$K_2 = \frac{m \rho_1 M_2 d}{\rho_2 \delta_2 M_1 \Delta T_{\text{кр}}} < 1, \quad (8)$$

$\Delta T_{\text{кр}}$  — минимальное переохлаждение, необходимое для образования зародыша. (Как показано в [3], для начала эпитаксиального роста GaAs из раствора в расплаве галлия  $\Delta T_{\text{кр}} = 0.25^\circ\text{C}$ .)  $K_1$  характеризует способность теплопоглотителя создавать требуемое пересыщение в растворе-расплаве на каждый градус температуры. При  $K_1 < 9 \cdot 10^{-5}$  ат.доли/град пересыщение, возникающее в растворе-расплаве, недостаточно для равномерного образования зародышей по всей поверхности подложки, но достаточно для образования зародышей в тех местах подложки, где имеются структурные дефекты, например дислокации с винтовой компонентой. При  $K_1 > 5 \cdot 10^{-4}$  ат.доли/град наблюдается образование гомогенных кристаллов вблизи нарастающего слоя, что приводит к резкому ухудшению морфологии и однородности эпитаксиального слоя.

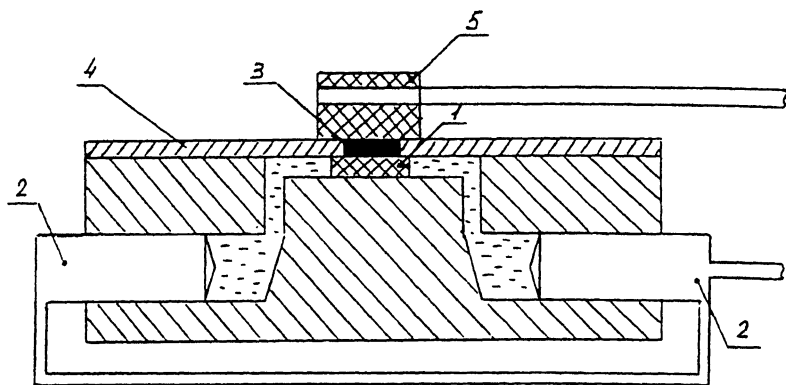


Рис. 2. Схема поршневой кассеты.

Второй критерий связан с тем, что после завершения процесса кристаллизации и нагревания теплопоглотителя до температуры  $T_0$  раствор-расплав становится недосыщенным. При  $K_2 > 1$  недосыщение становится таким, что после кристаллизации эпитаксиального слоя происходит его растворение.

Выращивание слоев  $Ga_xAl_{1-x}As$  и многослойных структур на их основе осуществлялось в кассете поршневого типа, схема которой представлена на рис. 2.

Растворы-расплавы двух составов разделены «плавающим клапаном» 1, который препятствует их смешиванию. Поршни 2, работая в противофазе, приводят подложку 3, размещенную в слайдере 4, в контакт с одним из растворов-расплавов. Теплопоглотитель 5 представляет собой брусок из графита.

Получены эпитаксиальные слои с толщиной 10–100 нм. Экспериментально наблюдаемая зависимость толщины слоев от  $\Delta T$  и толщины теплопоглотителя соответствует зависимостям, представленным на рис. 2. Это свидетельствует о том, что выбранная математическая модель адекватно отображает процессы, протекающие при выращивании слоев методом импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава.

## Список литературы

- [1] Алферов Ж.И., Арсентьев И.Н., Вавилова Л.С., Гарбузов Д.З., Красовский В.В. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 9. С. 1665–1659.
- [2] Алферов Ж.И., Андреев В.М., Воднев А.А. и др. // Письма в ЖТФ. Т. 12. В. 18. С. 1089–1093.
- [3] Groseley J., Smoll M.B. // J. Cryst. Growth. 1972. V. 15. N 4. P. 275–280.

Херсонский государственный  
технический университет

Поступило в Редакцию  
12 июля 1995 г.

---