

**О ВЫРАЩИВАНИИ ОБЪЁМНЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ ТВЁРДЫХ  
РАСТВОРОВ InSb-InAs С РАВНОМЕРНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ  
КОМПОНЕНТОВ**

**Г.Х.АЖДАРОВ, Э.С.ГУСЕЙНОВА, А.И.АЛЕКПЕРОВ, В.В.МИР-БАГИРОВ**

*Институт Физики НАН Азербайджана  
AZ 1143, Баку, пр. Г. Джавида, 33*

Показана возможность выращивания полностью однородных монокристаллов системы твёрдых растворов InSb-InAs с заданным составом в условиях непрерывной подпитки расплава стержнями составных компонентов. Получено математическое соотношение, определяющее зависимость композиции однородного кристалла от соотношения скоростей кристаллизации и подпитывания расплава первым и вторым компонентами, а также исходного состава расплава.

Интерес к полупроводниковым твёрдым растворам обусловлен возможностью прецизионного управления оптоэлектронными свойствами материала путём изменения его состава. Поэтому вопрос получения кристалла с заданным составом является одним из главных в технологии полупроводниковых твёрдых растворов. Известно, что для выращивания качественных объёмных монокристаллов используется в основном метод Чохральского. Однако, в случае твёрдых растворов получение однородных кристаллов стандартным методом Чохральского невозможно в силу сегрегации компонентов при кристаллизации. Существует ряд технологических приёмов, позволяющих выращивать однородные кристаллы твёрдых растворов вытягиванием из расплава по Чохральскому [1-6]. Суть этих приёмов сводится к компенсации изменения состава расплава, происходящего в процессе роста кристалла, путём подпитки его одним из компонентов твёрдого раствора или предварительно изготовленным макрооднородным поликристаллическим слитком с заданным составом.

Алмазоподобные полупроводники InSb и InAs полностью растворяются друг в друге как в жидком, так и в твёрдом состояниях [7]. В настоящей работе решена математическая задача, демонстрирующая возможность выращивания полностью однородных монокристаллов InSb-InAs методом Чохральского при непрерывной двойной подпитке расплава стержнями из составных компонентов системы. Аналогичная задача была решена ранее для системы Ge-Si [8].

В основу математического определения условий выращивания полностью однородных монокристаллов твёрдых растворов InSb-InAs методом двойной подпитки заложили следующую технологическую процедуру. С момента роста кристалла InSb-InAs из расплава, соответствующего состава, в него вводятся стержни из InSb и InAs. В течение всего процесса роста кристалла скорости кристаллизации и подпитывания расплава InSb-InAs составными компонентами поддерживаются постоянными. При решении задачи принималось выполнение следующих стандартных условий [1]: на фронте кристаллизации существует равновесие между твёрдой и жидкой фазами, определяемое диаграммой состояния системы; скорости диффузии молекул составных компонентов в расплаве достаточно высоки и обеспечивают равномерность его состава по всему объёму; диффузия компонентов в растущем кристалле пренебрежимо мала; в расплаве отсутствует испарение и разложение компонентов.

Введём следующие обозначения:  $V_m^0$  и  $V_m$  – объёмы расплава в тигле в начальный и текущий моменты;  $V_c$  – объём расплава, кристаллизующийся в единицу времени;  $V_1$  и  $V_2$ , соответственно, объёмы подпитывающих слитков из

первого и второго компонентов, вводимые в расплав в единицу времени;  $C_{2m}$  и  $C_{2c}$  – концентрации молекул второго компонента (InSb или InAs) в расплаве и кристалле соответственно;  $C$  – общее количество второго компонента в расплаве;  $K_2=C_{2c}/C_{2m}$  – равновесный коэффициент сегрегации второго компонента;  $t$  – время, отсчитываемое от начала роста кристалла.

Учитывая принятые обозначения имеем:

$$C_{2m} = \frac{C}{V_m} \quad \text{и} \quad \frac{dC_{2m}}{dt} = \frac{\dot{C}V_m - \dot{V}_m C}{V_m^2} = \frac{\dot{C} - V_m \dot{C}_{2m}}{V_m}. \quad (1)$$

По условию задачи считаем, что скорости кристаллизации и подпитывания расплава постоянны и не зависят от времени. Тогда, справедливы следующие уравнения:

$$V_m = V_m^0 - (V_c - V_1 - V_2)t, \quad \dot{V}_m = -V_c + (V_1 + V_2), \quad \dot{C} = -V_c C_{2m} K + V_2. \quad (2)$$

Очевидно, что необходимым условием для выращивания однородных кристаллов твёрдых растворов является постоянство состава расплава в течении всего технологического цикла. При  $dC_{2m}/dt=0$  из уравнения (1) имеем:

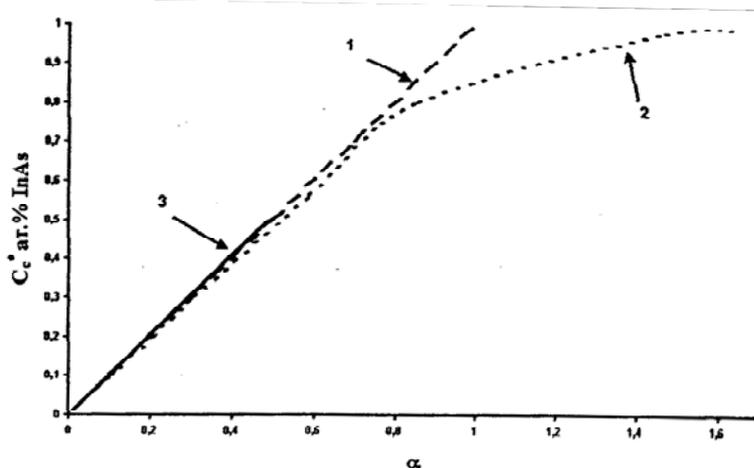
$$\dot{C} - \dot{V}_m C_{2m} = 0. \quad (3)$$

Введя обозначения  $\alpha = V_1/V_c$  и  $\beta = V_2/V_c$ , определяющие соотношения скоростей подпитывания и кристаллизации расплава, из (3) с учётом (2) получим:

$$C_{2m} = \frac{\alpha}{K - 1 + \alpha + \beta} \quad \text{и} \quad C_{2c} = \frac{K\alpha}{K - 1 + \alpha + \beta}. \quad (4)$$

Таким образом, рост однородных по всей длине кристаллов твёрдых растворов будет происходить при соблюдении условий, определяемых уравнениями (4). Анализ этих уравнений показывает, что рост полностью однородных кристаллов возможен как при  $K > 1$ , так и при  $K < 1$ . Расчёт зависимостей равновесных концентраций  $C_{2m}$  и  $C_{2c}$  от  $\alpha$  и  $\beta$  требует знания величины  $K$  во всём интервале соотношений концентраций компонентов. Для системы  $\text{InSb}_{1-x}\text{InAs}_x$  требуемые значения  $K$  могут быть определены из диаграммы состояния [7]. Отметим, что коэффициент сегрегации InAs изменяется с составом сложным образом от 20,5 при  $x \rightarrow 0$  до 1 при  $x \rightarrow 1$ . Для выращивания полностью однородных кристаллов  $\text{InSb}_{1-x}\text{InAs}_x$  с требуемым составом  $C_{2c}$  из диаграммы состояния системы определяем соответствующие значения  $K$  и  $C_{2m}$ . Затем, задав конкретное значение  $\alpha + \beta$ , из (4) находим величины операционных параметров  $\alpha$  и  $\beta$ . Рассчитанные таким образом значения  $\alpha$  и  $\beta$  для ряда заданных  $C_{2c}$  во всём непрерывном ряду композиций определяют график зависимости равновесной концентрации кристалла от  $\alpha$  и  $\beta$ . Рис.1 демонстрирует эти графики на примере трёх заданных значений  $\alpha + \beta$  равных 0,5; 1 и 2. Кривые определяют операционные параметры  $-\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\alpha + \beta$  и стартовый состав расплава для выращивания однородных кристаллов  $\text{InSb}_{1-x}\text{InAs}_x$  с заданным составом. Как видно, путём подбора различных комбинаций операционных параметров можно получать полностью однородные кристаллы во всём ряду твёрдых растворов рассматриваемой системы.

Практическая реализация рассматриваемого метода двойной подпитки расплава может быть осуществлена на установке, схема которой приведена в [5]. Эта установка позволяет в автоматическом режиме поддерживать заданный диаметр растущего кристалла твёрдого раствора и обладает механизмом ввода в расплав подпитывающих слитков.



**Рис.1.**

Зависимость состава кристалла от  $\alpha$  при выращивании однородных твёрдых растворов InSb-InAs методом двойной подпитки расплава: 1)  $\alpha + \beta = 1$ ; 2)  $\alpha + \beta = 2$ ; 3)  $\alpha + \beta = 0.5$

На основе вышеизложенного материала можно сделать следующее заключение: математическое описание распределения компонентов в твёрдых растворах InSb-InAs, выращенных методом двойной подпитки расплава, показывает возможность выращивания полностью однородных кристаллов во всём непрерывном ряду соотношений компонентов; технологические операционные параметры для выращивания полностью однородных кристаллов с заданным составом определяются с помощью уравнения полученного в работе.

1. В.М.Глазов, В.С.Земсков, *Физико-химические основы легирования полупроводников*, М.: Наука, (1967) 371.
2. Д.А.Петров, В.С.Земсков, *Рост кристаллов*, М.: Изд. АН СССР, (1957) 97.
3. В.Н.Романенко, *Управление составом полупроводниковых кристаллов*, М.: Металлургия (1976) 368.
4. Г.Х.Аждаров, Н.А.Агаев, В.В.Мир-Багиров, *Изв. АН СССР, Неорганические материалы*, **35** (1989)1131.
5. N.V.Abrosimov, S.N.Rossolenko, W.Thieme, A.Gerhardt, W.Schooeder, *Journal of Crystal Growth*, **174** (1997) 182.
6. G.Kh.Azhdarov, T.Kucukomeroglu, A.Varilci, M.Altunbas, A.Kobyay, P.G.Azhdarov, *Journal of Crystals Growth*, **226** (2001) 437.
7. G.B.Stringfellow, P.E.Greene, *J. Electrochem. Soc.*, **118** (1971) 805.
8. Г.Х.Аждаров, С.М.Багирова, К.Н.Мамедов, *Известия АН Азербайджана*, **13** № 2 (2003) 35.

#### **KOMPONENTLƏRİN BƏRABƏR PAYLANMASI İLƏ InSb-InAs BƏRK MƏHLULLARININ ALINMASI HAQQINDA**

**Н.Х.ӘСДӘРОВ, Е.С.ҲҮСЕЙНОВА, Ә.І.ӘЛӘКПӘРОВ, В.В.МІР-БАҚІРОВ**

InSb-InAs ərintisini InSb və InAs ilə fasiləsiz qidalandırma şəraitində bu sistemin verilən tərkibdə tam birjinsli monokristallarının alınmasının mümkünlüyü göstərilmişdir. Birjinsli kristalın kompozisiyasının ərintinin kristallaşma və birinci ilə ikinci komponentlərlə qidalandırma sürətlərinin münasibətindən asılılığını müəyyən edən riyazi tənlik alınmışdır.

#### **GROWTH OF UNIFORM BULK InSb-InAs MIXED SINGLE CRYSTALS**

**G.Kh.AZH DAROV, E.S.GUSEYNOVA, A.I.ALEKPEROV, V.V.MIR-BAGIROV**

It was found that a feeding of the melt with InSb and InAs rods technique can be applied for preparation of the fully uniform bulk InSb-InAs mixed single crystals with desired composition. An equation for the composition of the uniform crystal as a function of the ration of the crystallization and feeding rates of the melt, as well as a starting composition of the melt was established.

Редактор: М.Алиев