

ВЫРАЩИВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ InAs-GaAs МЕТОДОМ БРИДЖМЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДПИТЫВАЮЩЕГО СТЕРЖНЯ

З.М. ЗАХРАБЕКОВА, В.К. КЯЗИМОВА, Э.М. ИСЛАМЗАДЕ, А.И. АЛЕКПЕРОВ, П.А. АСКЕРОВА, Р.А. ГАСАНОВА

Институт Физики НАН Азербайджана

AZ-1143, Баку, пр. Г. Джавида, 131

e-mail: zaura.zohrabbekova@gmail.com

Модифицированным методом Бриджмена выращены кристаллы InAs-GaAs из расплавов с начальными составами $\text{InAs}_{0.99}\text{GaAs}_{0.01}$ и $\text{InAs}_{0.97}\text{GaAs}_{0.03}$ и с использованием подпитывающих слитков $\text{InAs}_{0.85}\text{GaAs}_{0.15}$ и $\text{InAs}_{0.70}\text{GaAs}_{0.30}$ соответственно. Вплоть до окончания растворения подпитывающего слитка имеет место рост однородного кристалла с составом, равным составу подпитки. Далее, вплоть до окончания кристаллизации рост кристаллов происходит в режиме традиционного метода Бриджмена. Для выращенных кристаллов в пфанновском приближении решена задача аксиального распределения основных компонентов. Результаты дают хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных.

Выращивание твердых растворов полупроводников с полностью смешиваемыми компонентами дает возможность получать материалы с заданными физическими и электромагнитными свойствами за счет изменения состава матрицы. Поэтому, создание методик выращивания объемных кристаллов полупроводниковых твердых растворов с заданными однородным и переменным составами весьма актуально. Выращивание объемных полупроводниковых сплавов с однородным составом является довольно сложной задачей вследствие истощения второго компонента в расплаве за счет сильной сегрегации из расплава в растущий кристалл. Для решения этой проблемы требуется непрерывная подпитка расплава одним или двумя компонентами для поддержания его состава постоянным.

Основными базовыми методами для выращивания кристаллов являются метод Чохральского и Бриджмена, которые также применимы и для выращивания кристаллов твердых растворов. Со времени разработки этих методов до нашего времени продолжают попытки усовершенствовать их для получения более совершенных кристаллов с контролируемым концентрационным профилем основных компонентов и примесей в них. В работах [1-7] различными усовершенствованными методами Чохральского и Бриджмена получены качественные алмазоподобные кристаллы твердых растворов. В данной работе использовался модифицированный метод Бриджмена для выращивания кристаллов InAs-GaAs с использованием подпитывающего слитка, а также проведено математическое моделирование распределения основных компонентов в этих кристаллах. Ранее этот метод был успешно применен для системы Ge-Si [8].

Выращивание кристаллов InAs-GaAs с заданными однородными составами производили модифицированным методом Бриджмена с использованием предварительно изготовленного подпитывающего слитка InAs-GaAs с макрооднородным составом. На Рис.1 приведена концептуальная схема

выращивания кристаллов твердых растворов модифицированным методом Бриджмена с использованием подпитывающего стержня InAs-GaAs.

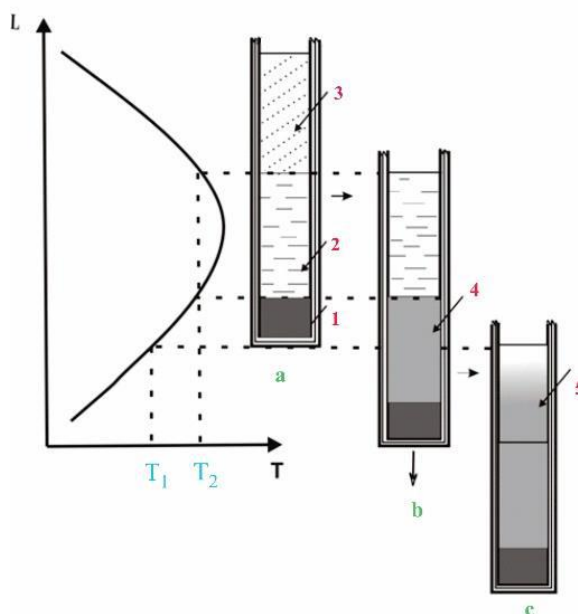


Рис. 1. Температурный профиль в нагревателе и схема выращивания кристаллов InAs-GaAs с однородным и переменным составами; 1 –затравка из GaAs, 2– расплав InAs-GaAs, 3 – макрооднородный подпитывающий стержень InAs-GaAs, 4 – однородный кристалл InAs-GaAs, 5– кристалл InAs-GaAs с переменным составом; T_1 – температура плавления InAs, T_2 – температура солидуса подпитывающего стержня InAs-GaAs, а –стартовая позиция кристаллизации, б – завершение процесса роста однородного кристалла, с – полное завершение процесса кристаллизации расплава.

Над затравкой из GaAs в соответствующем порядке закладываются заранее приготовленные грузики из InAs и GaAs и подпитывающий

макрооднородный поликристаллический стержень InAs-GaAs заданного состава. Загрузки из InAs и GaAs, расположенные между затравкой и подпитывающим стержнем InAs-GaAs расплавляют в нагревателе с характерным аксиальным температурным полем, представленным на рис.1 (см. профиль на рис. 1а). Предпусковая температура на уровнях затравка/расплав и подпитывающий стержень/расплав равны температуре солидуса подпитывающего стержня InAs-GaAs, взятого в таком составе, чтобы быть в равновесии с расплавом, согласно фазовой диаграмме системы InAs-GaAs. Далее включается механизм перемещения тигля вниз до полной кристаллизации расплавленного материала. Вначале процесса кристаллизации, когда скорость растворения подпитывающего стержня и скорость кристаллизации равны, идет рост однородного кристалла. После растворения всего подпитывающего слитка, начинается этап роста кристалла в режиме традиционного метода Бриджмена, при котором концентрация GaAs в растущем кристалле уменьшается от значения, соответствующего этапу однородного роста кристалла до нуля в момент окончания кристаллизации. Вышеописанным методом получены два кристалла InAs-GaAs длиной 42.6 мм, с концентрациями GaAs на однородных участках равными 15 и 30 ат.% соответственно. Исходная высота расплава в обоих случаях бралась равной 12.6 мм, длина подпиток – 30 мм. Концентрация второго компонента в подпитывающих слитках равна 15 и 30 ат.%, а в первичном расплаве – 1 и 3 ат.% соответственно. Кристаллы InAs-GaAs с содержанием GaAs до 30 ат.%, выращивались со скоростью 2-3 мм/ч и имели: диаметр - 12-14мм,

длина - 40-42,6мм. Аксиальное распределение концентрации GaAs в кристаллах определяли изменением плотности дисков, вырезанных из различных частей слитков в направлениях параллельных плоскости кристаллизации.

Решение задачи распределения компонентов в слитках, выращенных в этих условиях, проводили в пфанновском приближении при следующих стандартных условиях: фронт кристаллизации плоский; на фронте кристаллизации существует равновесие между твердой и жидкой фазами; диффузия компонентов и конвекция в расплаве обеспечивают однородность жидкой фазы по всему объёму; диффузия атомов In и Ga в твердой фазе пренебрежимо мала; растворение подпитывающего стержня осуществляется полностью после погружения его в расплав.

Приняв GaAs в качестве второго компонента, введём следующие обозначения: C_l^0 - доля атомов второго компонента в исходном расплаве до начала его кристаллизации; C_l, C_c - доли атомов второго компонента в расплаве и кристалле соответственно; V_0, V_l - объёмы расплава в тигле в начальный и текущий моменты; V_c - объём расплава InAs-GaAs, кристаллизующийся в единицу времени; C - общее количество второго компонента в расплаве; $K=C_c/C_l$ - равновесный коэффициент сегрегации второго компонента, зависящий от состава расплава; V_f - объём подпитывающего слитка, растворяющийся в единицу времени; C_f - доля атомов второго компонента в подпитке; t - время. С учётом выше принятых обозначений имеем:

$$C_l = \frac{C}{V_l}; \quad \frac{dC_l}{dt} = \frac{\dot{C}V_l - \dot{V}_l C_l}{V_l^2} = \frac{\dot{C} - \dot{V}_l C_l}{V_l} \quad (1)$$

$$V_l = V_0 - (V_c - V_f)t, \quad \dot{V} = -V_c + V_f, \quad \dot{C} = V_f C_f - V_c C_l K \quad (2)$$

Для роста однородного кристалла необходимо, чтобы состав расплава не менялся со временем. Подставляя (2) в (1) и решая полученное выражение для случая $\frac{dC_l}{dt} = 0$ имеем:

$$C_l = \frac{V_f C_f}{V_c K + V_f - V_c}, \quad C_l = \frac{K V_f C_f}{V_c K + V_f - V_c} \quad (3)$$

Из (3) видно, что для роста однородного кристалла с составом, соответствующим составу подпитывающего слитка необходимо, чтобы $V_c = V_f$. Таким образом, на первом этапе роста кристалла, в период с момента начала кристаллизации до момента полного окончания растворения подпитки – $V_l = V_0$, $V_c = V_f$ и $C_l = C_l^0, C_c = C_f = C_l^0 K_f$. (K_f – коэффициент сегрегации второго компонента, соответствующий составу подпитывающего слитка).

На втором этапе с момента образования финальной зоны расплава InAs-GaAs, кристаллизация идет в режиме традиционного метода Бриджмена.

В этом случае, начиная отсчёт времени с момента кристаллизации финальной расплавленной зоны и решая уравнение (1) после подстановки в него уравнений (2), для концентрационного профиля второго компонента на этом участке получаем выражение:

$$\left[\int_{C_l^0}^{C_l} \frac{dC_l}{C_l(1-K)} \right] = \ln \frac{V_0}{V_0 - V_c t} \quad (4)$$

Введя символ $\gamma = V_c t / V_0$, отражающий долю закристаллизовавшегося расплава длиной L за время t , уравнение (4) преобразуем к следующему виду

$$\gamma = \frac{L}{L_0} = 1 - \exp \left[- \int_{C_l}^{C_l^0} \frac{dC_l}{C_l(K-1)} \right] \quad (5)$$

Коэффициент сегрегации зависит от состава расплава, поэтому интеграл в уравнении (5) решается численным методом, используя диаграмму фазового состояния системы InAs-GaAs.

На рис. 2 представлены характерные зависимости аксиального распределения концентрации GaAs вдоль двух кристаллов InAs-GaAs, выращенных модифицированным методом Бриджмена из расплавов с начальными составами InAs_{0.99}GaAs_{0.01} и InAs_{0.97}GaAs_{0.03} и с использованием подпитывающих слитков InAs_{0.85}GaAs_{0.15} и InAs_{0.70}GaAs_{0.30} соответственно (согласно диаграмме фазового состояния системы).

Как видно, на первом этапе имеет место рост однородного кристалла с составом $C_c=C_f$ вплоть до окончания растворения подпитывающего слитка. Часть кривой, соответствующая второму этапу, отвечает распределению компонентов по традиционному методу Бриджмена по формуле (5). Экспериментальные данные представлены на рисунке кружками. Для обоих слитков расчетные кривые достаточно хорошо описывают экспериментальные данные, по всей длине кристаллов. Это свидетельствует о практическом удовлетворении выше принятых условий при теоретическом решении задачи.

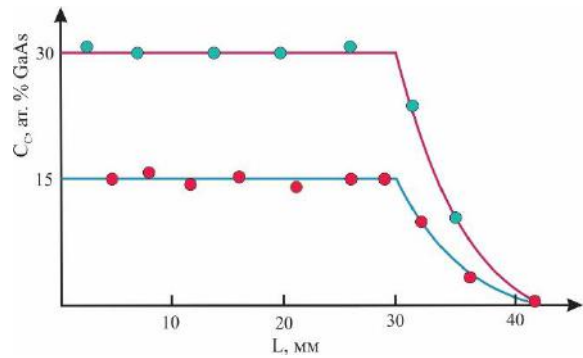


Рис.2. Концентрационное распределение GaAs по длине двух кристаллов InAs-GaAs, выращенных модифицированным методом Бриджмена: линия – расчёт, кружки – экспериментальные данные. Исходная высота расплавов - $L_0=12.6$ мм, длина подпиток - $L_f=30$ мм, $C_l^0=1$ и 3 ат. % GaAs, $C_f=15$ и 30 ат. % GaAs для голубой и красной линий соответственно.

Результаты проведенных экспериментов еще раз подтверждают, что математическое моделирование в пфанновском приближении распределения компонентов в выращиваемых из расплава кристаллах твердых растворов можно успешно использовать для получения качественных полупроводниковых материалов с заданными свойствами.

- | | |
|--|--|
| [1] J. Yonenaga. Cryst. Growth, 1999, v. 198/199, p. 404. | [5] P. G. Azhdarov and N. A. Agaev. Neorg. Mater., 1999, v. 35 (8), p.763. |
| [2] I. Yonenaga. Cryst. Growth, 1999, v. 226, p.47. | [6] C. Marin and A. G. Ostrogorsky. J. Cryst. Growth, 2000, v. 211, p.378. |
| [3] G.Kh. Azhdarov, T. Kucukomeroglu, A.Varilci, et al.. J.Crystal Growth, 2001, v. 226, p. 437. | [7] P. Dold, A. Barz, S. Recha, et al.. J. Crystal Growth, 1998, v. 192, p.125. |
| [4] N. V. Abrosimov, S. N. Rossolenko, W. Thieme, et al.. J.Crystal Growth, 1997, v. 174, p.182. | [8] G.Kh. Azhdarov, Z.M. Zeynalov, L.A. Huseynli. Crystallography Reports, 2009, v. 54(1), p. 150. |

Z.M. Zöhrabbəyova, V.K. Kazımova, E.M. İslamzadə, A.İ. Ələkbərov, P.Ə. Əsgərova, R.A. Həsənova

GİDALANDIRICI KÜLÇƏLƏRDƏN İSTİFADƏ ETMƏKLƏ MODİFİKASİYƏDİLMİŞ BRİCMEN ÜSULU İLƏ InAs-GaAs KRİSTALLARININ GÖYƏRDİLMƏSİ

InAs-GaAs kristalları ilkin tərkibləri InAs_{0.99}GaAs_{0.01} və InAs_{0.97}GaAs_{0.03} olan ərintilərdən müvafiq olaraq InAs_{0.85}GaAs_{0.15} və InAs_{0.70}GaAs_{0.30} qidalandırıcı külçələrdən istifadə etməklə, modifikasiyaedilmiş Bricmen üsulu ilə göyərdilmişdir. Gidalandırıcı külçəsinin həllinin sonuna qədər qida tərkibinə bərabər tərkibə malik homogen kristalın böyüməsi baş verir. Bundan sonra, kristallaşmanın sonuna qədər kristalların böyüməsi ənənəvi Bricmen üsulu rejimində baş verir. Pfann yaxınlaşmasında göyərdilmiş kristallar üçün əsas komponentlərin aksial paylanması məsələsi həll edilib. Nəticələr eksperimental və hesablanmış məlumatlar arasında yaxşı uyğunluq göstərir.

Z.M. Zakhrabekova, V.K. Kazimova, E.M. Islamzade, A.I. Alekperov, P.A. Asgarova, R.A. Hasanova

GROWTH OF InAs-GaAs CRYSTALS BY THE MODIFIED BRIDGMAN METHOD USING A FEEDING ROD

InAs-GaAs crystals were grown from the melts with initial compositions InAs_{0.99}GaAs_{0.01} and InAs_{0.97}GaAs_{0.03} by the modified Bridgman method with the use of InAs_{0.85}GaAs_{0.15} and InAs_{0.70}GaAs_{0.30} feeding ingots, respectively. Up to the end of

ВЫРАЩИВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ InAs-GaAs МЕТОДОМ БРИДЖМЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ...

the dissolution of the feeding ingot, a homogeneous crystal grows with a composition equal to the feed's composition. Further, up to the end of crystallization, the growth of crystals occurs in the mode of the traditional Bridgman method. For grown crystals, in the Pfann approximation, the problem of the axial distribution of the main components is solved. The results give a good agreement between the experimental and calculated data.