

©1995 г.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ УПОРЯДОЧЕНИЕ КЛАСТЕРОВ МЫШЬЯКА В СЛОЯХ GaAs, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ ПРИ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Н.А.Берт, В.В.Чалдышев, Д.И.Лубышев,
В.В.Преображенский*, Б.Р.Семягин**

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
1994021, Санкт-Петербург, Россия

*Институт физики полупроводников Сибирского отделения

Российской академии наук,

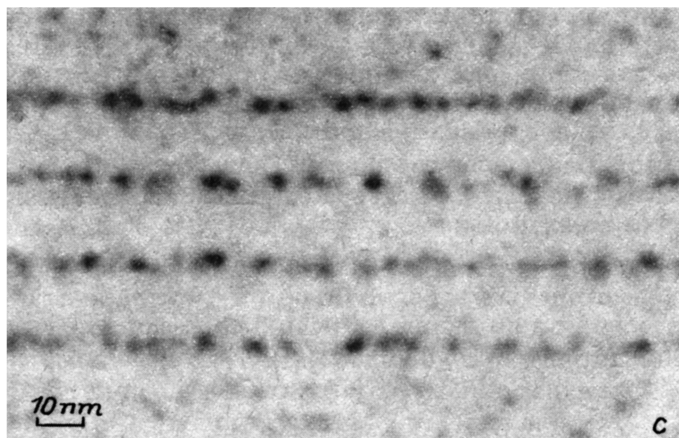
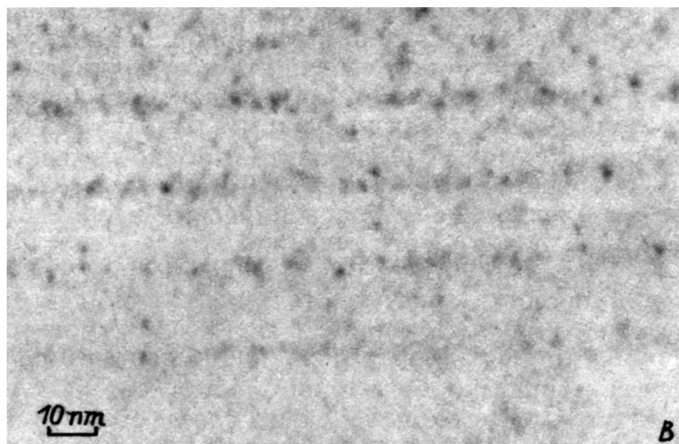
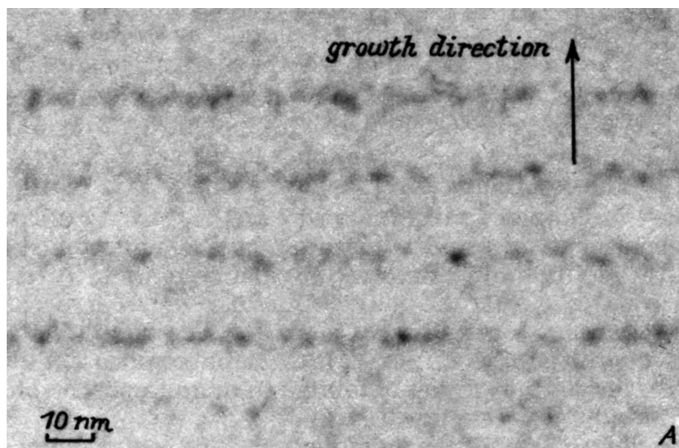
630090, Новосибирск, Россия

(Получена 12 июля 1995 г. Принята к печати 17 июля 1995 г.)

Показано, что путем дельта-легирования индием в пленках GaAs, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии при низкой (200°C) температуре, можно сформировать двумерные слои наноразмерных кластеров мышьяка, разделенные матрицей GaAs, не содержащей кластеров. Пространственно упорядоченные кластерные структуры были получены в эпитаксиальных пленках GaAs, легированных донорами Si, акцепторами Be, а также не легированных электрически активными примесями.

В последние годы большое внимание привлекает арсенид галлия, выращиваемый методом молекулярно-лучевой эпитаксии при низкой (200°C) температуре (см., например, [1-4]), обладающий высоким удельным сопротивлением и крайне малым (фемтосекундным) временем жизни носителей заряда. Особенностью такого материала является высокая (около $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$), концентрация избыточного мышьяка, захватываемого в кристалл в процессе роста. При последующем отжиге (600°C) избыточный мышьяк образует кластеры размером в единицы нанометров плотностью около $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, хаотически распределенные по всему объему эпитаксиальной пленки. В работе [5] была показана возможность формирования двумерных слоев кластеров As путем дельта-легирования кремнием. В работе [6] двумерная преципитация была реализована за счет дельта-легирования индием. Следует подчеркнуть, что в обоих случаях использовалась матрица GaAs, не легированная электрически активными примесями.

В данной работе мы покажем, что путем дельта-легирования индием двумерные слои кластеров мышьяка могут быть сформированы в матрицах арсенида галлия, равномерно легированных как мелкими донорами Si, так и мелкими акцепторами Be.



Полученные в электронном микроскопе микрофотографии поперечных сечений образцов *LT*-GaAs, выращенных при 200°C и отожженных в течение 10 мин при 600°C. А — *LT*-GaAs, равномерно легированный бериллием; В — *LT*-GaAs, равномерно легированный кремнием; С — нелегированный.

Слой GaAs выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии в двукамерной установке «Катунь» на подложках полуизолирующего нелегированного арсенида галлия диаметром 40 мм с ориентацией (100). На подложке предварительно выращивался при обычной температуре 580°C буферный слой GaAs толщиной 85 нм. Затем температура подложки понижалась до 200°C, и выращивался слой *LT*-GaAs. Скорость роста составляла 1 мкм/ч, толщина слоев — около 0.5 мкм. Слои равномерно легировались донорами Si или акцепторами Be до концентрации $7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Были выращены также слои, электрически активными примесями специально не легированные. Дельта-легирование индием осуществлялось путем прерывания потока Ga на 4 с и использования потока In. Содержание индия в каждом дельта-слое оставляло около 0.5 монослоя. Расстояние между дельта-слоями составляло 20 нм. Выращенные слои отжигались в установке молекулярно-лучевой эпитаксии под избыточным давлением мышьяка при 600°C в течение 10 мин.

Распределение кластеров мышьяка по объему пленки изучалось по поперечному сечению образцов с помощью просвечивающего электронного микроскопа Philips EM 420 при ускоряющих напряжениях 100 или 120 кВ. Образцы в поперечном сечении приготавливались для просвечивающей электронной микроскопии посредством общепринятой процедуры с использованием для предварительного утонения механической обработки (шлифовка, полировка) и ионно-лучевого (Ar^+ , 5 кВ) распыления на конечном этапе.

Фотографии электронно-микроскопических изображений поперечного сечения образцов *LT*-GaAs, содержащих дельта-слои индия, приведены на рисунке. Видно, что распределение кластеров мышьяка по объему пленки является пространственно-упорядоченным. Наблюдаются двумерные слои кластеров мышьяка, по своему пространственному положению в точности соответствующие положению дельта-слоев индия. Плотность кластеров в слоях составляет $(1-3) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, а размер — 4–5 нм. Прилегающие к таким слоям области обеднены кластерами As, так что при расстоянии между слоями 20 нм разделяющее их пространство практически не содержит кластеров. Следует отметить, что качественно сходная картина наблюдается как в не легированном электрически активными примесями материале, так и в *LT*-GaAs, равномерно легированном донорами Si или акцепторами Be. Этот факт указывает на возможность формирования в *LT*-GaAs проводящих каналов, разделенных тонкими (двумерными) слоями кластеров As. Полученный результат открывает новые перспективы использования *LT*-GaAs в электронике.

Работа выполнена в рамках Российских национальных программ: «Физика твердотельных наноструктур» и «Фуллерены и атомные кластеры», а также при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 95-02-05532). Н.А. Берт также благодарен за поддержку Международному научному фонду (грант № R1U300).

- [1] F.W. Smith, A.R. Calawa, C.L. Chen, M.J. Mantra, L.J. Mahoney. *Electron Dev. Lett.*, **9**, 77 (1988).
- [2] M. Kaminska, Z. Liliental-Weber, E.R. Weber, T. George, J.B. Kortright, F.W. Smith, B.Y. Tsang, A.R. Calawa. *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 1831 (1989).
- [3] M.R. Melloch, K. Mahalingam, N. Otsuka, J.M. Woodall, A.C. Warren. *J. Cryst. Growth*, **111**, 39 (1991).
- [4] Н.А. Берт, А.И. Вейнгер, М.Д. Вилисова, С.И. Голощапов, И.В. Ивонин, С.В. Козырев, А.Е. Куницын, Л.Г. Лаврентьева, Д.И. Лубышев, В.В. Преображенский, Б.Р. Семягин, В.В. Третьяков, В.В. Чалдышев, М.П. Якубеня. *ФТТ*, **35**, 2609 (1993).
- [5] M.R. Melloch, N. Otsuka, K. Mahalingam, C.L. Chang, P.D. Kirchner, J.M. Woodall, A.C. Warren. *Appl. Phys. Lett.*, **61**, 177 (1992).
- [6] T.M. Cheng, C.V. Chang, A. Chin, M.F. Huang, J.H. Huang. *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 2517 (1994).

Редактор В.В. Чалдышев

Spatial ordering of arsenic clusters in GaAs layers, grown by molecular beam epitaxy at low temperature

N.A. Bert, V.V. Chaldyshev, D.I. Lubyshev, V.V. Preobrazhenskii*, B.R. Semyagin**

A.F. Ioffe Physico-Technical Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

*Institute of Semiconductor Physics, 630090 Novosibirsk, Russia

We have shown that two-dimensional layers of arsenic nanoclusters separated by cluster-free GaAs matrix can be formed using indium delta-doping of GaAs films grown by molecular beam epitaxy at low (200°C) temperature. Spatially ordered structures of As clusters have been obtained in the epitaxial GaAs films doped with Si donors, Be acceptors and undoped as well.
