

О. Н. Лебедь, к. т. н., доц.

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ МОНОКРИСТАЛЛОВ GaAs ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ИЗ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

Разработаны технологические режимы снижения плотности дислокаций в эпитаксиальных слоях (ЭС) арсенида галлия при использовании изовалентного металла-растворителя висмута, позволяющие стабилизировать фронт кристаллизации. Рассмотрены и проанализированы механизмы, отвечающие за изменение структуры ЭС.

Ключевые слова: арсенид галлия, эпитаксиальный слой, висмут, дислокации, фронт кристаллизации.

Введение

Повышение надежности, экономичности и массовости производства, дискретных и интегральных полупроводниковых приборов, в особенности плотности интеграции твердотельных микросхем, не может быть осуществлено только совершенствованием технологии производства приборов и устройств, так как во всех случаях процент выхода и предельные параметры ограничиваются микронеоднородностью физических и физико-химических свойств используемых полупроводниковых материалов. Одной из причин микронеоднородности монокристаллических материалов, обуславливающих не только локальные изменения физических свойств исходных материалов, но и воспроизводимость результатов многих технологических процессов, являются одномерные и двумерные нарушения кристаллической решетки, а именно: дислокации, дислокационные ряды, межзерные границы.

Дислокации часто являются причинами повышенных токов утечки, ухудшения электрических характеристик и развития процессов деградации в различных полупроводниковых приборах [1, 2].

Одним из путей снижения плотности дислокаций в арсениде галлия является использование ряда изотермических выдержек во время охлаждения раствора-расплава, проводимого с постоянной скоростью. Введение в объем ЭС упругих напряжений также позволяет снижать плотность дислокаций. Они могут изгибать линию наследуемой дислокации параллельно металлургической границе и выводить ее на боковую поверхность ЭС [3, 4].

Использование изовалентных металлов-растворителей позволяет в некоторой степени управлять структурными параметрами выращиваемого слоя. Они могут выступать в качестве легирующей примеси, а также изменять стехиометрию основных компонентов соединения в жидкой фазе. Одним из таких растворителей является висмут, который, кроме указанных, выше свойств существенно не изменяет энергетический спектр монокристаллов арсенида галлия при жидкофазной эпитаксии [5].

Ряд авторов утверждает, что при переходе от галлиевых к висмутовым растворителям улучшается структура и понижается плотность дислокаций в эпитаксиальных слоях арсенида галлия [5]. Так, эффект снижения плотности дислокаций в процессе ЖФЭ при переходе от галлиевых к висмутовым растворам-расплавам авторы [6] объясняют повышением критических напряжений гетерогенного зарождения дислокаций. Снижение плотности дислокаций при этом также объясняют повышением энергии создания дислокаций в GaAs:Bi [7, 8].

Целью данной работы является разработка технологических режимов понижения

плотности дислокаций в арсениде галлия на основе изотермических выдержек при использовании изовалентного металла-растворителя висмута.

Методика эксперимента и результаты

Мы предлагаем выращивать эпитаксиальные слои арсенида галлия при использовании периодической стабилизации фронта кристаллизации за счет изотермических выдержек.

Эпитаксиальные слои выращивали путем принудительного охлаждения раствора-расплава в вертикальном реакторе в атмосфере очищенного диффузией через палладиевый фильтр водорода. Температура начала эпитаксии – 850°C, скорость охлаждения порядка 10^{-3} °C/с, расстояние между подложками – $1,2 \cdot 10^{-3}$ м. В качестве подложек использовали монокристаллические пластины АГЧО (100) с концентрацией носителей заряда $1 \cdot 10^{23}$ м⁻³. Насыщение расплава Вi проводилось растворением поликристаллического GaAs ($n = 6 \cdot 10^{21}$ м⁻³).

Процесс выращивания осуществлялся с помощью температурно-временной схемы, состоящей из 38 циклов [9]. Цикл представляет собой: интервал гомогенизации раствора-расплава при 850°C, интервал кристаллизации (охлаждения) до 830°C, интервал гомогенизации раствора-расплава при 830°C, интервал растворения (рис. 1).

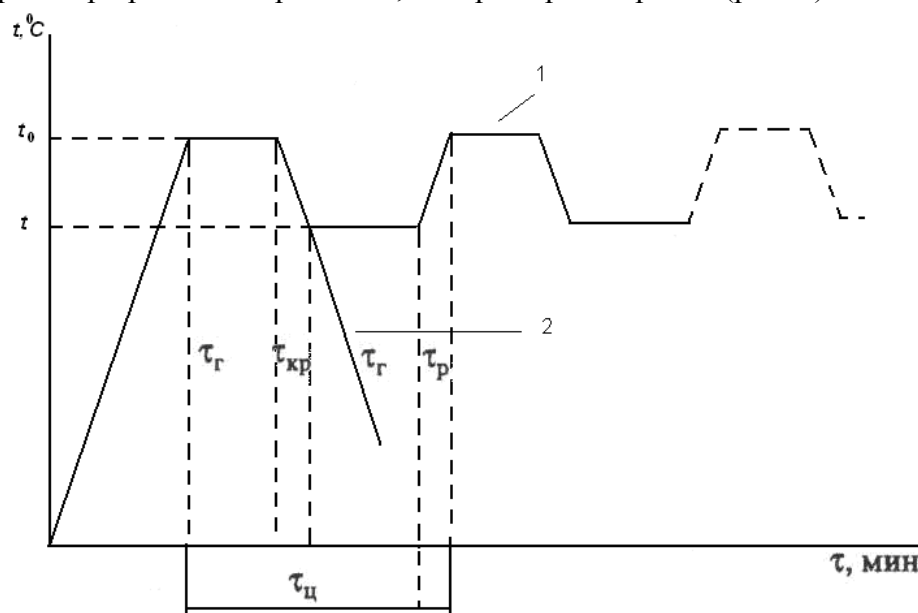


Рис. 1. Температурно-временная диаграмма выращивания ЭС методом принудительного охлаждения раствора-расплава (2) по схеме изотермических выдержек (1): $\tau_{ц}$ – длительность цикла; $\tau_{г}$ – интервал гомогенизации раствора-расплава; $\tau_{кр}$ – интервал кристаллизации; $\tau_{р}$ – интервал растворения

Помимо ступенчатого режима ЭС выращивания, применялся стандартный режим охлаждения (рис. 1, кривая 2).

Необходимо отметить, что при стандартном режиме охлаждения (принудительное охлаждение) реальное снижение плотности дислокаций начинало наблюдаться при толщине слоя около $15 \cdot 10^{-6}$ м и при дальнейшем увеличении толщины ЭС распределение дислокаций становилось более равномерным. Распределение плотности дислокации (N_d) по радиусу (R) ЭС, усредненное по нескольким образцам, а также типичное распределение плотности дислокации по радиусу подложки приведены на рис. 2.

Первоначальное распределение дислокаций в подложке на рис. 2 представляет кривая 1. Радиальное распределение плотности дислокации имеет V-образную форму, изменяясь от $0,5 \cdot 10^8$ м⁻² в центральной части подложки до $6 \cdot 10^8$ м⁻² в периферийной части. В ЭС происходит резкое уменьшение плотности дислокации на периферии и некоторое

уменьшение N_d в центральной части, достигающее значения 10^7 м^{-2} .

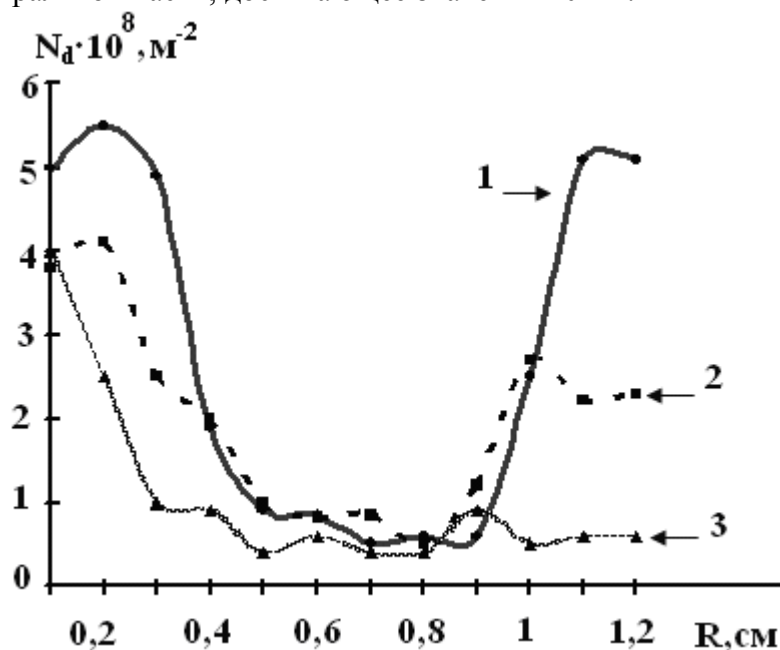


Рис. 2. Изменение радиального распределения плотности дислокаций в образцах по толщине образца: кривая 1 – подложки, кривая 2 – ЭС толщиной $15 \cdot 10^{-6}$ м, кривая 3 – ЭС толщиной $20 \cdot 10^{-6}$ м

При использовании метода ступенчатого охлаждения, основанного на изотермических выдержках, реальное снижение плотности дислокаций начинало происходить при толщине ЭС около 10^{-5} м², а при толщине $2 \cdot 10^{-5}$ м² плотность дислокаций достигала значения $5 \cdot 10^6$ м⁻².

Анализ полученных результатов

Понижение плотности дислокаций при ступенчатом режиме охлаждения мы связываем с характером изменения скорости системы. Скорость охлаждения, наряду с температурой эпитаксии, определяет степень пресыщения раствора-расплава и ее изменение в процессе роста.

При неизменной скорости принудительного охлаждения системы степень пресыщения раствора-расплава изменяется в процессе роста слоя. Это неблагоприятно сказывается на равномерности его свойств по толщине, вызывая, например, появление скоплений дислокаций. Подобный эффект может быть объяснен следующим образом. На линии ликвидуса фазовой диаграммы существует точка, по одну сторону от которой поверхность раздела двух фаз шероховатая, а по другую – гладкая. При малых пресыщениях изменение структуры поверхности раздела приводит к изменению механизма роста от нормального к тангенциальному. Это может привести к образованию дефектов структуры кристалла, а также увеличить вероятность проявления эффекта замуровывания металла-растворителя и примесей. Подобные причины и объясняют появление скоплений дислокаций.

Применение ступенчатого режима охлаждения системы позволяет за время отжига привести фронт кристаллизации в состояние, близкое к равновесному. Это создает достаточные условия для сглаживания последствий изменения механизма роста слоя, проявляющиеся в переориентации и аннигиляции дислокаций. Результатом этого является улучшение структуры монокристаллического слоя. Соответственно это приводит к более равномерному распределению дислокаций в ЭС и понижению их плотности.

Также нужно отметить более благоприятные условия для роста арсенида галлия из жидкой фазы при замене галлия на висмут за счет увеличения стабильности фронта кристаллизации (при равных прочих условиях). Важнейшим условием получения структурно и морфологически совершенных ЭС является обеспечение морфологической стабильности фронта кристаллизации, нарушение которой обусловлено возникновением концентрационного переохлаждения раствора-расплава вблизи подложки. Так как удельная теплопроводность жидкого висмута при температуре эпитаксии в 6 раз ниже удельной теплопроводности расплавленного галлия, то использование висмута в качестве растворителя позволяет увеличить температурный градиент в растворе-расплаве вблизи подложки в 6 раз [10] (по сравнению с галлиевым растворителем). Таким образом, при выращивании из растворов в расплаве висмута обеспечивается более высокое значение стабильности фронта кристаллизации, что значительно увеличивает морфологическое и структурное совершенство ЭС арсенида галлия.

Выводы

Предложены технологические режимы улучшения совершенства структуры монокристаллов арсенида галлия, основанные на изотермических выдержках. Выращивание эпитаксиальных слоев GaAs методом ЖФЭ при использовании специальных технологических режимов обуславливает повышение однородности распределения дислокаций и ведет к их уменьшению в ЭС. При использовании висмута в качестве растворителя плотность дислокаций в ЭС достигает значения $(3 - 5) \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В. М. Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов. / Андреев В. М., Долгинов Л. М., Третьяков Д. Н.; под ред. Ж. И. Алферова. – М.: Сов. радио, 1975. – 328 с.
2. Мильвидский М. Г. Полупроводниковые материалы в современной электронике / Мильвидский М. Г. – М.: Наука, 1986. – 144 с.
3. Braun A. Analytical solution to Matthews' and Blakeslee's critical dislocation formation thickness of epitaxially grown thin films / A. Braun, K. M. Briggs, P. Böni // Journal of Crystal Growth. – 2002. – V. 241 – P. 231 – 234.
4. Baganov Ye. A. Reducing the density of threading dislocations in GaAs epitaxial layers. Efficiency assessment of isovalent Bi doping and Pb doping. / Ye. A. Baganov, V. A. Krasnov, O. N. Lebed and S. V. Shutov. // Materials Science–Poland. – 2009. – Vol. 27. – No. 2. – P. 355 – 363.
5. Ганина Н. В. Физико-химические особенности изовалентного легирования полупроводников / Н. В. Ганина // Фізика і хімія твердого тіла. – 2002. – т. 3. № 4. – С. 565 – 572.
6. Василенко Н. Д. Образование дислокаций в эпитаксиальных слоях, выращенных из различных растворов-расплавов. / Н. Д. Василенко, О. К. Городниченко, В. А. Краснов // Сб. Докл. 5 Междун конф. «Свойства и структура дислокаций в полупроводниках». – 1986. – С. 57 – 63.
7. Вальковская М. М. Пластичность и хрупкость полупроводниковых материалов при испытаниях на микротвердость. / Вальковская М. М., Пушкаш Б. М., Марончук И. Е. – Кишинев: Штиинца, 1984. – 107 с.
8. Петухов Б. В. О пороговых напряжениях при движении дислокаций в примесных полупроводниках. / Б. В. Петухов // Физика и техника полупроводников. – 2007. – т. 41. – в. 6. – С. 645 – 650.
9. Патент 28402 Україна, МПК⁶ Н 01 L 21/20 Спосіб отримання товстих гомоепітаксійних шарів арсеніду галію / Шутов С. В., Краснов В. О., Лебедь О. М. заявник та патентовласник Херсонський національний технічний університет. – №u200707996 ; заявл. 16.07.07 ; опубл. 10.12.07, Бюл. № 20.
10. Кристаллизация и свойства кристаллов / [Марончук И. Е., Кулюткина Т. Ф., Полещук В. С., Шутов С. В.] – Новочеркасск: НПИ. – 1989. – 64 с.

Лебедь Олег Николаевич – к. т. н., доцент кафедры научно-естественной подготовки.
Херсонская государственная морская академия.