

К. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА, д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ,
Ф. А. ГИЯСОВА, Р. А. САИДОВА

Узбекистан, г. Ташкент, НПО «Физика–Солнце»
E-mail: karimov@uzsci.net

Дата поступления в редакцию
30.11.2006 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Н. Н. ГРИГОРЬЕВ
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ ВЫРАЩИВАНИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ A^3B^5

Предлагаемые способ и устройство предназначены для создания многослойных полупроводниковых приборов различного спектрального диапазона, а также структур на основе арсенидгаллиевых соединений.

Известно, что на сегодняшний день тонкие эпитаксиальные гомо- и гетерослои широко используются при создании эффективных фотопреобразователей, излучателей и фотоприемников различного спектрального диапазона, а также для получения биполярных и полевых транзисторных структур на основе полупроводниковых соединений A^3B^5 . В связи с этим актуальной задачей является совершенствование способов получения тонких и многослойных эпитаксиальных гомо- и гетероструктур.

Необходимость создания сложных многослойных полупроводниковых приборов требует разработки новых методов получения полупроводниковых слоев и структур, особенно на гетеропереходах. Анализ современного состояния технологии получения полупроводниковых слоев показывает, что к настоящему времени для получения монокристаллических слоев и $p-n$ -переходов в полупроводниковых структурах в основном используются три метода эпитаксиального наращивания — вакуумное испарение и конденсация, газотранспортные химические реакции, жидкостная эпитаксия [1, с. 105—121]. Однако ни один из перечисленных методов еще не выделился в качестве доминирующего. Вместе с тем для получения сильнолегированных слоев полупроводниковых соединений A^3B^5 жидкостная эпитаксия является почти незаменимой. Кроме того, методом жидкостной эпитаксии можно получить резкие $p-n$ -переходы [2; 3, с. 41—61]. В частности, в методе жидкостной эпитаксии могут независимо задаваться изменение ширины запрещенной зоны, в заметной степени характеризующее оптические свойства материала, и внедрение примесей, определяющих его электрические свойства. Более того, состав полупроводника в процессе роста можно непрерывно менять, например от арсенида галлия до арсенида галлия–алюминия и т. д., и при этом ширина запрещенной зоны может быть управляемо изменена в пределах любого заранее заданного расстояния.

Так как метод жидкостной эпитаксии довольно скоростной и прост в работе, то его усовершенствование для целей получения различных полупроводниковых структур заслуживает внимания [4]. Известно, что в жидкостной эпитаксии принципы охлаждения и подачи раствора-расплава фактически являются определяющим фактором конкретного метода. Так, при смешивании двух растворов-расплавов при фиксированной температуре имеем изотермическую жидкостную эпитаксию, а при выращивании из тонкого зазора, куда раствор-расплав втягивается за счет смачивания, имеем капиллярную жидкостную эпитаксию [5, с. 18—30]. В зависимости от требуемых параметров получаемой структуры могут использоваться одновременно несколько методов роста, тогда возникает необходимость совмещения этих методов в едином процессе, что может быть реализовано в специальных комбинированных устройствах, обладающих широкими возможностями управления параметрами выращиваемых слоев [6—8].

В настоящей работе описаны процессы роста эпитаксиальных слоев полупроводниковых соединений A^3B^5 комбинированным способом с помощью универсального устройства. Устройство с ячейками для трех растворов-расплавов (рис. 1) позволяет реализовать в едином процессе два отличающихся способа роста. Один способ (принудительное охлаждение) позволяет управлять толщиной выращиваемых слоев, а другой (изотермический) — задаваемым составом получаемых пленок.

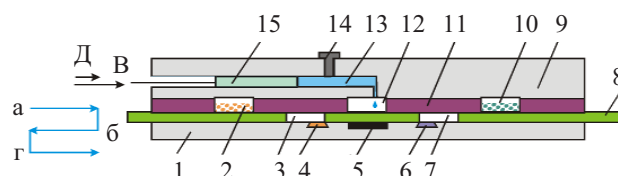


Рис. 1. Разрез рабочей части универсального (сдвигового + поршневого) устройства жидкостной эпитаксии

Устройство состоит из неподвижного основания 1 с углублениями, где расположены источники 4, 6 для среза раствора и с ячейкой 5 для подложки. Для подачи растворов служит подвижная (позиции а, б, г) пластина 8 с отверстиями 3, 7. В дополнительной пластине 11 расположены бункеры 2, 10 и отверстие 12 для подачи раствора-расплава, выдавливаемого поршнем 15 (позиции В, Д) из емкости 13 с капил-

лярным отверстием и пробкой 14 в верхней части контейнера 9.

Для проведения процесса эпитаксии подготовленное устройство с подложкой $n^+\text{GaAs}$ 5 и расплавами $\text{Ga}+n\text{GaAs}$ ($5,0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) 10 и $\text{Ga}+n\text{GaAs}$ ($7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) 2 помещали в кварцевый реактор, продуваемый потоком очищенного водорода. Затем всю систему нагревали до необходимой температуры (например до 808°C) и выдерживали в течение 10—15 мин. Далее при перемещении пластины 8 вправо расплав 10 из бункера сливался в отверстие, которое в дальнейшем совмещали с поверхностью подложки. Затем включали программное охлаждение, при этом выращивали слои за счет принудительного охлаждения до 805°C . При этой же температуре приостанавливали охлаждение системы и в раствор-расплав с определенной скоростью порциями через капиллярное отверстие вливали раствор-расплав $\text{Ga}+\text{Al}$ 13, содержащий замещающий элемент (в данном случае Al). При этом осуществлялся изотермический способ выращивания эпитаксиального слоя $n\text{-AlGaAs}$ с увеличивающейся шириной запрещенной зоны, определяемой различием количества замещающих элементов.

Особенность предлагаемого устройства заключается в том, что поочередно выращиваемые многослойные эпитаксиальные пленки на подложке $n^+\text{GaAs}$ получают комбинированным способом: принудительным охлаждением создаются первый слой $n\text{GaAs}$ ($5,0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) и второй — $n\text{GaAs}$ ($7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$), затем изотермической эпитаксией формируется третий гетерослой $n\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$). Для этого подобран специальный программируемый режим, приведенный на рис. 2, где горизонтальный участок кривой (б) соответствует изотермической жидкостной эпитаксии, а спадающие (а, б) — выращиванию слоя принудительным охлаждением.

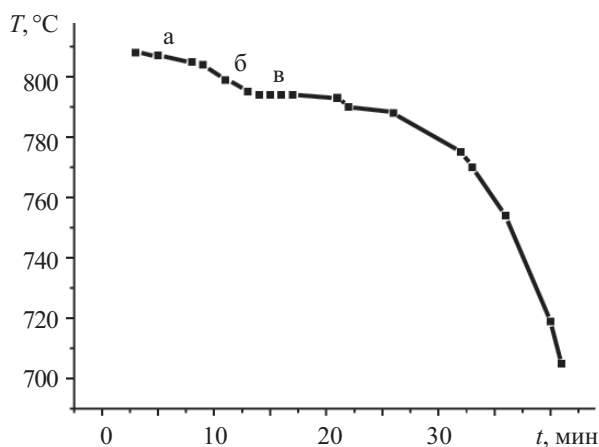


Рис. 2. Температурный режим процесса эпитаксии

При принудительном охлаждении после достижения начальной температуры кристаллизации (например 808°C) раствор-расплав приводится в контакт с подложкой и включается охлаждение, обеспечивающее снижение температуры по заданной кривой (участок а на рис. 2). В соответствии с данной кривой на начальном линейном участке снижение температуры идет с постоянной скоростью 1—2 $^\circ\text{C}/\text{мин}$. Далее, с целью ослабления диффузии примесей из твердой

фазы в выращиваемый эпитаксиальный слой, система, начиная с 805°C , охлаждается с переменной скоростью в соответствии с уравнением

$$V_{\text{п}} = 3,3 - (3...7) \cdot 10^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{мин},$$

что обеспечивает уменьшающуюся во времени скорость охлаждения на участке б от 805 до 796°C в течение 6—7 минут периода процесса выращивания.

При принудительном охлаждении толщина выращенного слоя определяется скоростью роста независимо от объема раствора-расплава. Например, на первом участке кривой охлаждения скорость роста равна 1,0 мкм/мин. При этом можно выращивать эпитаксиальные слои попеременно из имеющихся трех растворов-расплавов с соответствующими типами проводимости или составом.

Процесс изотермической жидкостной эпитаксии осуществляется путем смешивания растворов-расплавов с отличающимся составом — раствора-расплава, расположенного в верхнем поршне, с раствором-расплавом, совмещенным с подложкой. Процесс происходит при постоянной температуре, например 794°C , как показано на рис. 2, участок в. В данном случае раствор-расплав из поршня подается порциями, определяемыми временем выравнивания концентраций t_c и интервалом времени t между подачами. При интервалах времени между подаваемыми порциями $t < t_c$ растут слои с увеличивающейся к поверхности шириной запрещенной зоны, а при $t > t_c$ получается периодическая структура.

Исследования показали, что при $t = t_c/2$ можно получить эпитаксиальные слои $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с линейно увеличивающейся шириной запрещенной зоны. На основе измерений на косом шлифе на установке “Сатеса” получены данные по распределению Al по толщине слоев. В пересчете на ширину запрещенной зоны по формуле [9, с. 18—21]

$$E_g(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}) = 1,424 + 1,247x$$

эти данные сведены в таблицу.

Состав выращенного эпитаксиального гетерослоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ по толщине

Толщина эпитаксиального слоя, мкм	0	1	2	3	4	5	6
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,424	1,474	1,524	1,574	1,624	1,674	1,723
Содержание Al, x	0,0	0,04	0,08	0,12	0,16	0,2	0,24
Содержание Ga, 1-x	1,0	0,96	0,92	0,88	0,84	0,8	0,76

Границы толщины слоев взяты из данных микроанализа. В таблице содержание Al и Ga приведено в атомных долях, что соответствует определенному на основе микроанализа процентному соотношению между ними. Для этого основной раствор-расплав выбирается из соотношения $\text{Ga}/\text{GaAs} = 16,6$, а дополнительный $(\text{Ga}+\text{Al})-(\text{Ga}/\text{Al}) = 57$. При этом толщина выращенного слоя зависела от температуры процесса и количества добавляемого раствора-расплава, а

также от времени подачи порций растворов-расплавов. Толщину выращиваемых слоев можно было варьировать от 0,2 до 2 мкм.

Профиль ширины запрещенной зоны зависел от скорости подачи порций (V) дополнительного раствора-расплава, определяемой выражением для получения линейного изменения состава:

$$V = m[t^0 - (t-1)^0].$$

Массу дискретной порции m дополнительного раствора выбирали из условия $m \approx 5 \cdot 10^{-2}$ массы основного раствора-расплава. Для случая $t_c = 2$ мин, $t = 1$ мин, $m = 40$ мг скорости подачи порций расплавов соответственно равнялись

$$V_1 = m t_1^0 = 40 \cdot 1 = 40 \text{ мг} \cdot \text{мин};$$

$$V_2 = m t_2^0 = 40 \cdot 1 = 40 \text{ мг} \cdot \text{мин};$$

$$V_3 = m t_3^0 = 40 \cdot 1 = 40 \text{ мг} \cdot \text{мин}.$$

Таким образом, с помощью данного устройства можно выращивать в едином процессе эпитаксиальные слои полупроводниковых соединений A^3B^5 как методом изотермической эпитаксии — смешиванием (при постоянной температуре) двух растворов-расплавов, так и принудительным охлаждением — из каждого раствора-расплава. При этом можно чередовать как последовательность выращиваемых слоев, так и их тип проводимости, а также задавать количество выращиваемых слоев, причем растворы-расплавы могут содержать не только Al, но и In, P или Sb, а также другие примеси — такие как Si, Ge, Sn.

Введение в раствор-расплав с определенной скоростью дополнительных растворов с известной концентрацией элемента-источника и растворителя позволяет на порядок повысить точность управления составом выращиваемого твердого раствора по сравнению с методом последовательной замены раствора-расплава с увеличивающимся компонентом. Выбранная скорость и метод подачи раствора обеспечивают более плавное (непрерывное) изменение состава за счет сохранения при этом почти неизменной степени пересыщения раствора-расплава. В данном случае исключается скачок состава, имеющий место при выращивании слоя из нескольких растворов-рас-

плавов с увеличивающейся с каждым разом концентрацией ростовых компонентов.

Концентрация носителей задается подбором исходного источника с соответствующей концентрацией, т. к. концентрация носителей в эпитаксиальных слоях получается близкой к концентрации растворимого в галлии материала-источника.

На основе разработанной технологии получены структуры с барьером Шоттки $Au-nAlGaAs-nGaAs-n^+GaAs$, $Ag-nGaAs-n^+GaAs$ [10], а также фотодиоды на основе $Au-nAlGaAs-pGaAs-Ag$ -структуры [11, с. 133—139], перспективные для волоконно-оптических систем.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия. — М.: Мир, 1991.
2. Андреев В. М., Долгинов Л. М., Третьяков Д. Н. Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов. — М.: Сов. радио, 1975.
3. Karimov A. V., Yodgorova D. M., Akopyan A. A. et al. Photoconverters with AlGaAs-GaAs heterojunction on textured GaAs substrates. — Tashkent: Fan, 2004.
4. Karimov A. V., Yodgorova D. M. Features of growth epitaxial layers of firm solutions on a basis of indium's and aluminium's arsenide // Semiconductor Physics Quantum Electronics Optoelectronics. — 2004. — N 4. — P. 382—385.
5. Материалы для оптоэлектроники. — М.: Мир, 1976.
6. А. с. 913759 СССР. Устройство для жидкостной эпитаксии / А. В. Каримов, М. Мирзабаев, Ш. З. Миртурсунов, Н. Ф. Мухитдинова. — 1981.
7. А. с. 1037795 СССР. Способ эпитаксиального наращивания полупроводниковых соединений типа A^3B^5 / А. В. Каримов, Ш. З. Миртурсунов. — 1983.
8. Каримов А. В., Ёдгорова Д. М., Юлдашев Ш. Ш., Болтаева Ш. Ш. Физико-технологические основы получения резкого $p-n$ -перехода // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2006. — № 4. — С. 59—60.
9. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. Кн. 2. — М.: Мир, 1981.
10. Yodgorova D. M., Giasova F. A., Karimov A. V., Khaydarov Sh. A. Analysis of influence of electrical field on space charge layer's thickness in $Ag-nGaAs-n^+GaAs$ -structures // Young Scientists Conf. Optics and High Tech. Mater. Sci. SPO-2006. — Kyiv. — 2006. — BP. 32. — P. 152—154.
11. Каримов А. В., Ёдгорова Д. М. Физические явления в арсенидгаллиевых структурах с микрослойным квазиизопериодическим переходом. — Ташкент: Фан, 2005.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Шерченков А. А., Штерн Ю. И. Физика и технология полупроводниковых преобразователей энергии: Уч. пособие. Часть 1. — М.: МИЭТ, 2006. — 164 с.

Рассматриваются основные вопросы физики и технологии полупроводниковых преобразователей энергии, принципы работы термоэлектрических элементов и приводятся их различные конструкции. Рассматриваются термоэлектрические преобразователи энергии, действие которых основано на использовании эффектов Пельтье или Зеебека.

Особое место в пособии занимает раздел, посвященный термоэлектрическим материалам и технологиям их получения. Рассмотрены факторы, влияющие на эффективность работы полупроводниковых преобразователей энергии.

Учебное пособие предназначено для студентов старших курсов, магистрантов и аспирантов.