

К. т. н. С. И. КРУКОВСКИЙ

Украина, г. Львов, Научно-производственное предприятие "Карат"
E-mail: krukovsky@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
25.10 2002 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Е. М. СЕМАШКО
("Сатурн-Микро", г. Киев)

КОМПЛЕКСНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ СЛОЕВ GaAs, InGaAs ПРИ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

Полученные результаты могут быть использованы при получении эпитаксиальных структур для фотоприемников, фотопреобразователей солнечной энергии, датчиков.

Слаболегированные слои GaAs, AlGaAs, InGaAs используются в составе чувствительных фотоприемников, термосенсоров, различных датчиков радиации [1, 2]. Сложность получения чистых слоев A^3B^5 обусловлена присутствием в компонентах шихты таких фоновых примесей как кремний, углерод, кислород, магний [1, 3]. Микронные и субмикронные слои получают при низких температурах жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), при которых значения коэффициентов сегрегации легирующих примесей небольшие [2]. В связи с этим для большинства материалов A^3B^5 возникают трудности в получении эпитаксиальных слоев p -типа проводимости с уровнем легирования примерно $(1... 7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и выше [4].

Исследование электрофизических параметров слоев GaAs, легированных одновременно изовалентными и редкоземельными элементами (комплексное легирование), полученных ЖФЭ в интервале температур $800\text{—}700^\circ\text{C}$ [5], показало, что эта методика позволяет существенно уменьшить фоновую концентрацию примесей в эпитаксиальных слоях. При этом уменьшение концентрации до 10^{17} см^{-3} сопровождалось существенным ростом подвижности основных носителей. Предельные значения концентрации и подвижности, достигнутые в эпитаксиальных слоях GaAs, полученных ЖФЭ с использованием комплексного легирования, на порядок — полтора превышают значения, полученные при легировании слоев только редкоземельными элементами. В связи с этим возникает интерес к исследованию эффекта комплексного легирования и на других материалах A^3B^5 .

В данной работе проведены исследования эпитаксиальных слоев GaAs, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0,38\text{—}0,4$), полученных методом ЖФЭ в интервале температур $650\text{—}600^\circ\text{C}$ из расплавов галлия, легированного одновременно Yb и Al. Интерес к исследованию слоев такого состава обусловлен их использованием в составе тандемных гетероструктур GaAs—InGaAs—AlGaAs для фотопреобразователей солнечной энергии.

Наращивание эпитаксиальных слоев GaAs, InGaAs осуществлялось методом ЖФЭ на установке с горизон-

тальным реактором в кассете поршневого типа. Ростовый зазор составлял 1 мм. Кристаллизация слоев GaAs проводилась из галлиевых, а слоев InGaAs — из индиевых растворов-расплавов, легированных иттербием и алюминием. В качестве подложки использовался полупроводящий GaAs марки АГЧП-6. Подложки были ориентированы в направлении (100) с разориентацией $10'$ в сторону плоскости (110). Для формирования шихты использовался галлий марки Гл99,9997, индий марки ИН000, алюминий 99,9999 и иттербий 99,9.

Растворы-расплавы предварительно не отжигались. Температура и время гомогенизации расплавов составляли соответственно 700°C и 1,5 ч. Нарастивание слоев проводилось в интервале температур $650\text{—}600^\circ\text{C}$, а скорость кристаллизации составляла $1,0\text{—}1,2^\circ\text{C}/\text{мин}$. Толщина эпитаксиальных слоев находилась в пределах $5\text{—}10 \text{ мкм}$.

Концентрация и подвижность носителей определялись по эффекту Холла.

Для исследования влияния легирования растворов-расплавов иттербием и алюминием на электрофизические свойства слоев GaAs и InGaAs были проведены две серии экспериментов. В первой серии растворы-расплавы галлия и индия легировались только редкоземельным элементом — Yb. Концентрация иттербия изменялась в пределах от 0 до 0,044 ат.%. Во второй серии экспериментов растворы-расплавы галлия легировались одновременно иттербием и алюминием. В галлиевых расплавах концентрация алюминия составляла 0,015 и 0,026 ат.%, а в растворах-расплавах индия — 0,015 ат.%. Концентрация иттербия в расплавах галлия изменялась от 0 до 0,044 ат.%, а в расплаве индия — от 0 до 0,010 ат.%.

Особенности влияния Yb и Al на электрофизические свойства слоев GaAs и InGaAs, полученных ЖФЭ, отображают данные, приведенные на **рис. 1 и 2**.

На рис. 1 приведены зависимости концентрации электронов и дырок в эпитаксиальных слоях GaAs и $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, выращенных из расплавов галлия и индия, легированных иттербием и алюминием. Как видно из рисунка, введение иттербия в растворы-расплавы галлия и индия (кривые 1 и 2) сопровождается уменьшением концентрации электронов в эпитаксиальных слоях. При концентрации иттербия $\sim 0,033$ ат.% для галлиевых и $\sim 0,015$ ат.% для индиевых растворов-расплавов происходит инверсия типа проводимости эпитаксиальных слоев из n - в p -тип. Такой же характер поведения концентрации электронов наблю-

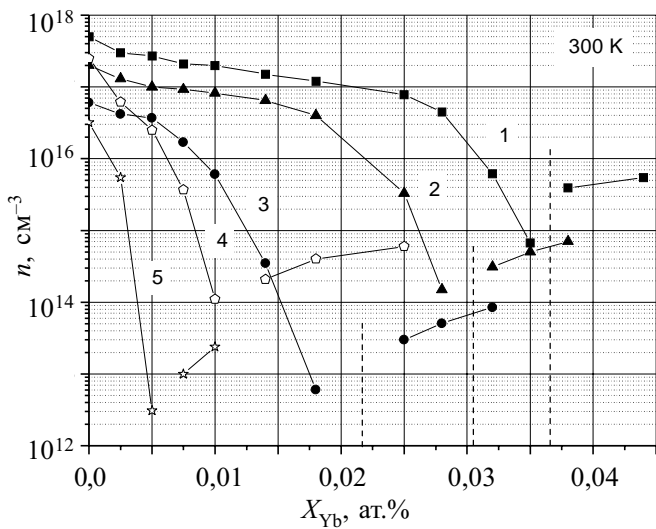


Рис. 1. Зависимость концентрации n электронов и дырок в эпитаксиальных слоях GaAs (1, 2, 3) и $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (4, 5) от концентрации Al и Yb (X_{Yb}) в расплавах галлия и индия: 1, 4 — 0 ат.% Al; 2, 5 — 0,015 ат.% Al; 3 — 0,026 ат.% Al

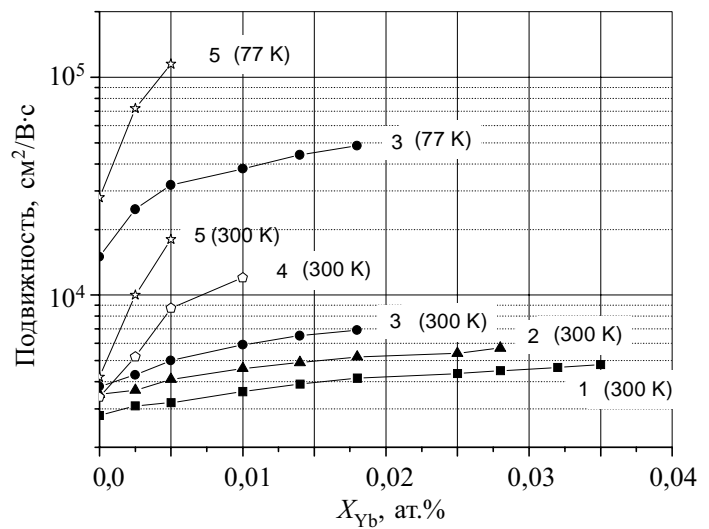


Рис. 2. Зависимость подвижности в эпитаксиальных слоях GaAs (1, 2, 3) и $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (4, 5) от концентрации Al и Yb в расплавах галлия и индия: 1, 4 — 0 ат.% Al; 2, 5 — 0,015 ат.% Al; 3 — 0,026 ат.% Al

дается в эпитаксиальных слоях GaAs и InGaAs при одновременном легировании иттербием и алюминием как расплавах галлия, так и индия (кривые 2,3,5). При достижении иттербием определенных критических значений $N_{\text{кр}}(\text{Yb})$ в расплавах галлия и индия происходит инверсия типа проводимости слоев GaAs и InGaAs. При увеличении концентрации алюминия значение $N_{\text{кр}}(\text{Yb})$ существенно уменьшается по сравнению с аналогичным значением $N_{\text{кр}}(\text{Yb})$ для слоев, полученных из растворов-расплавов, легированных только иттербием.

Следует отметить, что инверсия типа проводимости для слоев InGaAs происходит при меньших значениях иттербия по сравнению со слоями GaAs. По-видимому, этот эффект может быть обусловлен как различной концентрацией фоновых примесей в индии и галлии, так и различной эффективностью взаимодействия иттербия с фоновыми примесями в расплавах галлия и индия.

На рис. 2 приведены зависимости подвижности электронов в слоях GaAs и InGaAs, выращенных ЖФЭ из расплавах галлия и индия, легированных Yb и Al. Сравнение значений подвижности в слоях GaAs и InGaAs, измеренных при 300 К и 77 К (кривые 3 и 5), показывают, что они существенно отличаются как для слоев GaAs, так и — особенно — для InGaAs. Это может свидетельствовать об эффективной “очистке” эпитаксиальных слоев от фоновых примесей.

Сравнение приведенных результатов с нашими данными по двойному легированию иттербием и алюминием эпитаксиальных слоев GaAs, выращенных ЖФЭ в температурном диапазоне 800—700°C [5], показывает, что характер изменений электрофизических параметров сохраняется. Однако точка инверсии типа проводимости в эпитаксиальных слоях GaAs, полученных при низких температурах, сдвигается в сторону меньших концентраций иттербия — от 0,042 ат.% (при 800—700°C) до 0,032 ат.% для слоев, выращенных при 560—600°C, что можно объяснить уменьшением количества примесей, попадающих в эпитаксиальный слой при снижении температуры эпитаксии.

Как известно [6, с. 147], основными фоновыми примесями в GaAs и InGaAs являются амфотерный кремний и кислород. Кремний при низких температурах эпитаксии может занимать вакантные узлы в галлиевой подрешетке. Кислород может проявлять себя как донор [6, с. 156] и как акцептор, в зависимости от условий выращивания [7].

Иттербий и алюминий являются элементами третьей группы по отношению к GaAs и InGaAs, т. е. изовалентными, и поэтому не могут компенсировать донорные центры — тем более, что высокая подвижность носителей заряда в эпитаксиальных слоях свидетельствует об отсутствии в них примесных центров. Ковалентный радиус иттербия имеет значение 1,57 Å [8, с. 37], что существенно превышает значение ковалентного радиуса галлия — 1,25 Å [8, с. 34]. Поэтому вероятность вхождения иттербия в подрешетку галлия невысока. Это подтверждают результаты исследования авторов [3], которые, используя метод “меченых атомов”, показали, что максимальная концентрация иттербия в слоях GaAs, выращенных ЖФЭ, может составлять 10^{13} см^{-3} . Таким образом, наиболее вероятным является связывание иттербием фоновых примесей в растворах-расплавах и предотвращение их попадания в эпитаксиальный слой. Такой характер взаимодействия редкоземельных элементов подтверждается в ряде работ [3, 9, 10] с применением фотолюминесцентных и холловских измерений.

Смещение точки инверсии типа проводимости слоев в сторону меньших концентраций иттербия в растворе-расплаве, а также снижение концентрации и повышение подвижности основных носителей при комплексном легировании алюминием и иттербием расплавах галлия и индия можно объяснить тем, что алюминий, имея ковалентный радиус 1,25 Å [8, с. 32], входит в подрешетку галлия. Концентрация вакансий галлия в эпитаксиальных слоях уменьшается и, соответственно, уменьшается вероятность встраивания кремния в кристаллическую решетку GaAs и InGaAs.

Изложенный выше механизм влияния изовалентных и редкоземельных элементов на свойства слоев GaAs и InGaAs является наиболее вероятным. Следует отметить, что на формирование электрофизических свойств слоев могут оказывать влияние как глубокие акцепторные и донорные уровни с участием кислорода, так и мелкие, обусловленные замещением кислородом атомов мышьяка и галлия. Более глубокое изучение этой проблемы требует привлечения фотолуминесцентных измерений при гелиевых температурах, спектроскопии глубоких уровней, вторичной ионной масс-спектрологии и является темой самостоятельных исследований.

В гетеросистемах GaAs—InGaAs на электрофизические параметры слоев InGaAs определенное влияние могут оказывать также напряжения, возникающие на гетерогранице из-за различия в параметрах решеток. Разница в параметрах решетки в гетеросистемах GaAs—In_xGa_{1-x}As ($x=0,4$) и InP—In_xGa_{1-x}As ($x=0,4$) составляет 4,5 и 0,72%, соответственно. Для оценки такого влияния было проведено сравнение электрофизических параметров (подвижности и концентрации носителей) слоев In_xGa_{1-x}As ($x=0,4$), полученных на подложках InP:Fe и подложках полупроводящего GaAs. Было установлено, что отличие в параметрах составляет не более 5%. Это практически соизмеримо с точностью измерений установки Холла – 4%. Таким образом, механические напряжения, возникающие в гетеросистеме, существенно не влияют на электрофизические параметры слоев, а определяющим фактором является концентрация редкоземельного (Yb) и изовалентного (Al) элемента в растворе-расплаве.

Одновременное действие двух механизмов, т. е. взаимодействие иттербия с фоновыми примесями и уменьшение вероятности вхождения кремния в подрешетку галлия при введении алюминия в раствор-расплав, позволяет достигать эффективной очистки слоев GaAs и InGaAs от неконтролируемых примесей.

Проведенные исследования показали, что комплексное легирование индиевых и галлиевых растворов-расплавов иттербием и алюминием при кристаллизации слоев GaAs и InGaAs в интервале температур 650—600°C позволяет достигать значений концентрации электронов в слоях GaAs $\sim(5...6) \cdot 10^{12} \text{см}^{-3}$

(300 К) и подвижности $\sim 50000 \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ (77 К), а в слоях In_xGa_{1-x}As ($x=0,38...0,40$) — соответственно значений $\sim 3 \cdot 10^{12} \text{см}^{-3}$ (300 К) и $\sim 116000 \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ (77 К). Этот результат можно объяснить геттерирующим действием иттербия по отношению к фоновым примесям в растворах-расплавах галлия и индия, а также уменьшением концентрации кремния в слоях благодаря встраиванию алюминия в подрешетку галлия.

Полученные результаты могут быть использованы при получении эпитаксиальных структур для фотоприемников, фотопреобразователей солнечной энергии, датчиков температуры, датчиков ионизирующих излучений.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Корольков В. И., Рахимов Н. Диоды, транзисторы и тиристоры на основе гетероструктур.— Ташкент: ФАН, 1986.
2. Novotny J., Prochazkova O., Zdansky K., Zavadil J. Preparation and properties of Er and Yb doped In-based semiconductor compounds // Czechoslovak Journal of Physics.— 1999.— Vol. 49, N 5.— P. 757—763.
3. Беспалов В. А., Елкин А. Г., Журкин Б. Г. и др. Механизм влияния редкоземельных элементов на свойства слоев GaAs, выращенных жидкофазной эпитаксией // Краткие сообщения по физике.— 1987.— № 9.— С. 32—34.
4. Уфимцев В. Б., Акчурин Р. Х. Физико-химические основы жидкофазной эпитаксии.— М.: Металлургия, 1983.
5. Круковский С. І., Рибак О. В., Мрихін І. О. Високочині слабологовані шари GaAs та AlGaAs, отримані РФЕ / Тези доповідей 1-ї Української наук. конф. з фізики напівпровідників. Т. 1.— 2002.— Одеса.— С. 159.
6. Шишияну Ф. С. Диффузия и деградация в полупроводниковых материалах и приборах.— Кишинев: Штиинца, 1978.
7. Allen R. E., Dow J. D. Theory of GaAs-oxide interface states // Sol. State Commun.— 1983.— Vol. 45, N 4.— P. 379—381.
8. Стрельченко С. С., Лебедев В. В. Соединения А³В⁵. Справочник.— М.: Металлургия, 1984.
9. Мастеров В. Ф., Захаренков Л. Ф. Редкоземельные элементы в А³В⁵ // ФТП.— 1990.— Т. 24.— С. 610—629.
10. Семенова Г. М., Криштаб Т. Г., Кладько В. П. та ін. Властивості епітаксійних шарів арсеніду галію при легуванні галієвого розплаву ітербієм або скандієм // УФЖ.— 1995.— Т. 40, № 10.— С. 1101—1106.



Тел.: +7 (812) 360-6007 Факс.: +7 (812) 360-6001
 E-mail: electron@primexpo.ru
www.primexpo.ru/expoelectronica

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ

**ЕЖЕГОДНАЯ
 СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ
 ПРОМЫШЛЕННАЯ ВЫСТАВКА
 ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ
 И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**28—31 мая 2003 г.
 Россия, Москва, СК "Олимпийский"**