

## МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СВОЙСТВА СЛОЕВ GaAs, ВЫРАЩЕННЫХ ЖИДКОСТНОЙ ЭПИТАКСИЕЙ

В.А. Беспалов, А.Г. Елкин, Б.Г. Журкин, А.В. Квит, С.Р. Октябрьский, Г.А. Пережогин

*С помощью электрофизических методов, радиоизотопного анализа и фотолюминесценции при температуре 4,2К изучен механизм влияния лантаноидов на свойства слоев GaAs, выращенных жидкостной эпитаксией. Добавление Gd и Yb в раствор-расплавы приводит к уменьшению концентрации остаточных доноров, что связано с образованием химических соединений с элементами VI группы, которые оттесняются во вторую фазу.*

Широкое применение арсенида галлия в различных приборах полупроводниковой электроники требует постоянного совершенствования традиционных ростовых методов. Благодаря легированию GaAs редкоземельными элементами (РЗЭ) из раствора-расплава достигнут определенный прогресс в выращивании высококачественных слоев методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ). В результате изготовлены слои с концентрацией электронов  $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и подвижностью до  $40000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  при температуре 77К /1/. Качественно похожие результаты получены при легировании РЗЭ других соединений типа  $A_2B_5$  (InP и InGaAs), выращенных ЖФЭ /2/. Несколько худшие показатели имели объемные монокристаллы InP, выращенные по Чохральскому /3/. Настоящее сообщение посвящено выяснению механизма влияния РЗЭ на свойства монокристаллических слоев GaAs, полученных ЖФЭ.

Исследовались пленки GaAs толщиной 3–20 мкм, выращенные методом ЖФЭ при температуре 850 – 900 °С на полуизолирующих подложках (100) GaAs:Сг в графитовых кассетах пеньального типа, в том числе покрытых карбидом кремния. В качестве легирующих примесей применялись Gd и Yb. Для анализа образцов использовались электрофизические методы (электропроводность, эффект Холла) в конфигурации Ван-дер Пау, радиоизотопный анализ и фотолюминесценция при температуре 4,2К.

На рис.1 представлены результаты электрофизических измерений слоев GaAs, полученных в двух сериях процессов при последовательном увеличении содержания Cd и Yb в растворе-расплаве. Как следует из рисунка, сначала наблюдается некоторое уменьшение концентрации электронов и увеличение их подвижности. В дальнейшем происходит инверсия типа проводимости, при этом в образцах р-типа температурная зависимость концентрации дырок дает энергию ионизации акцепторов 27 – 30 мэВ, что может соответствовать  $C_{As}$  (26,2 мэВ),  $Zn_{Ga}$  (30,7 мэВ) или, возможно,  $Si_{As}$  (34,5 мэВ). Характер влияния лантаноидов на электрофизические свойства GaAs указывает на своеобразную "очистку" слоев от фоновой донорной примеси. Причины указанного явления обсуждались ранее в /2,3/. В частности, предполагалось, что РЗЭ проникают в слой из жидкой фазы с образованием электрически неактивных ассоциатов с Si, С и О. Следует отметить, что характер влияния РЗЭ на свойства полупроводника существенно зависит от метода легирования. В результате ионной имплантации (с последующим отжигом) лантаноиды встраиваются в катионную подрешетку InP и GaP, о чем свидетельствуют характерные серии линий люминесценции, связанные с внутрицентровыми переходами в оболочке 4f РЗ иона, расщепленной кристаллическим полем /4/. При равновесном легировании из жидкой фазы лантаноиды в эпитаксиальных слоях, как правило, не обнаруживают никакой оптической активности, однако электрические параметры материала при этом улучшаются. Отсутствие корреляции между фактом "очистки" слоев и встраиванием ионов РЗЭ в решетку приводит к предположению, что лантаноиды в процессе эпитаксии оттесняются в жидкую фазу, и в пленке их концентрация очень мала.

На поверхности пленок, выращенных с добавлением РЗЭ, наблюдаются крупные включения (размером 10 – 30 мкм), связанные с захватом второй фазы, которая возникает из-за неравномерного распределения РЗЭ в процессе гомогенизации раствора-расплава. Анализ методом "меченых атомов" с использованием радиоактивного изотопа  $^{169}\text{Yb}$  показал, что концентрация РЗЭ в объеме пленок не превышает  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ , и только включения второй фазы содержат заметное количество лантаноидов. Таким образом, "очистка"

GaAs происходит в жидкой фазе и не связана с образованием разного рода комплексов и ассоциатов в пленке. При дальнейшем улучшении технологии были получены слои GaAs с совершенной морфологией поверхности.

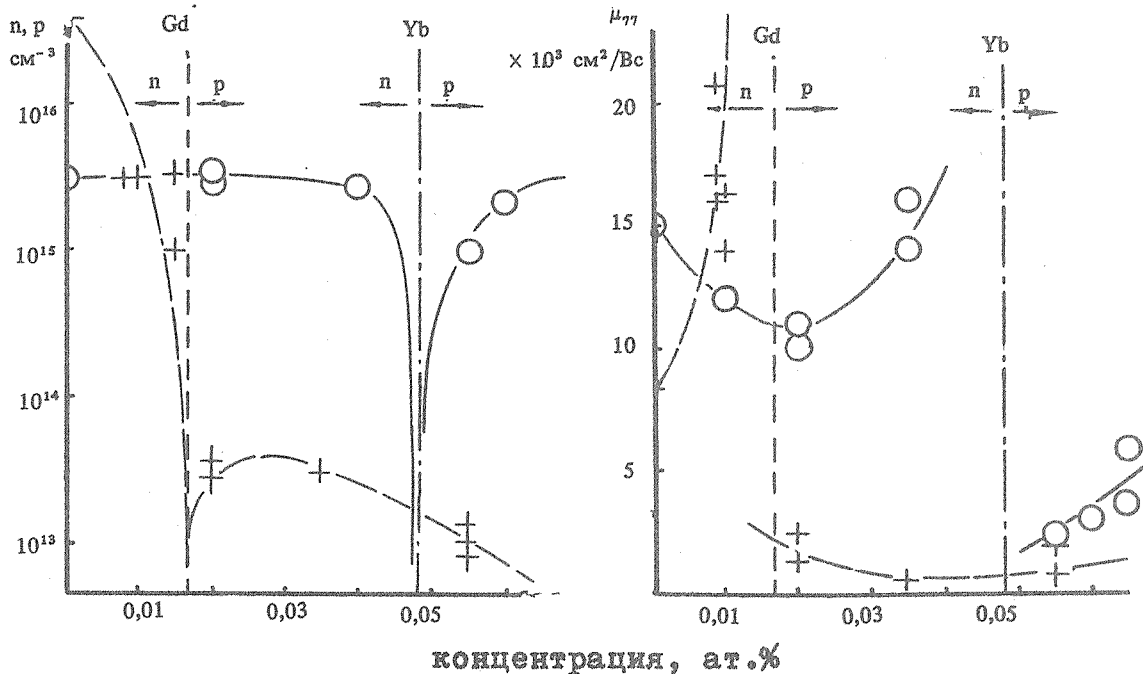


Рис. 1. Зависимость концентрации и подвижности свободных носителей при температуре 77К от содержания Gd (+) и Yb (o) в растворе-расплаве.

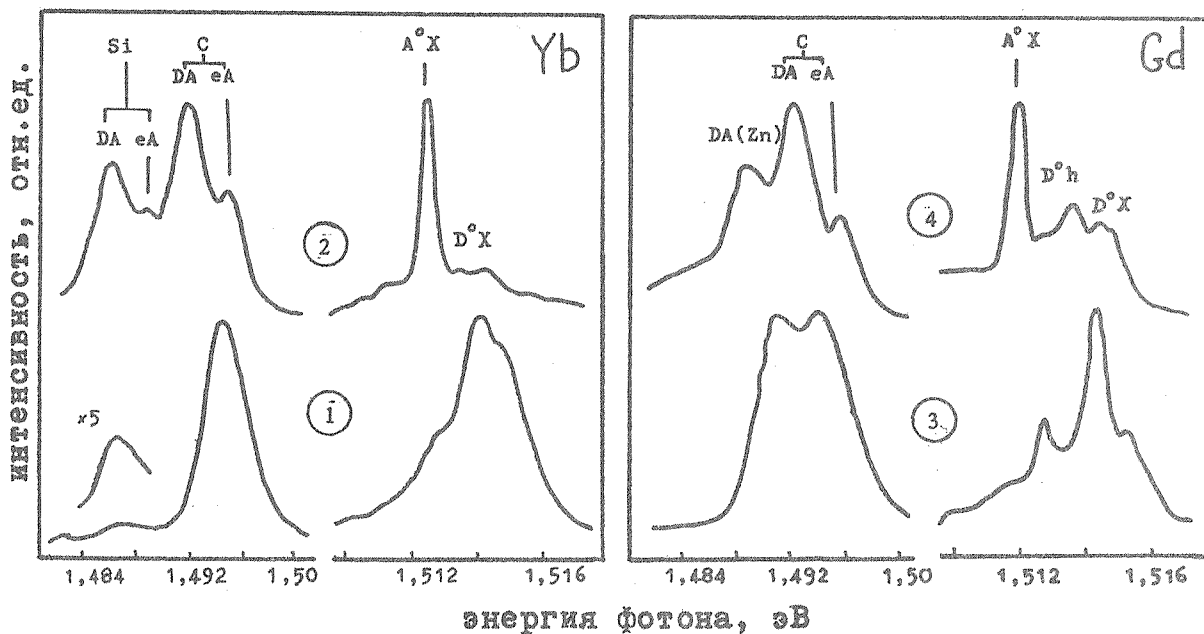


Рис. 2. Спектры фотолуминесценции GaAs, легированного Yb и Gd, при различном содержании РЗЭ в растворе-расплаве. Температура 4,2К, обозначения приведены в тексте. 1 – 0,01 ат.% Yb; 2 – 0,06 ат.% Yb; 3 – 0,008 ат.% Gd; 4 – 0,055 ат.% Gd.

На рис. 2 показаны типичные спектры фотолюминесценции пленок GaAs, легированных лантаноидами из раствора-расплава. С увеличением содержания РЗЭ в жидкой фазе разгорается линия рекомбинации экситона, связанного на нейтральном акцепторе ( $A^{\circ X}$ ). При этом полосы в экситонной области сужаются до 0,8 мэВ, разрешаются линии, обусловленные рекомбинацией электрон-акцептор (eA) и донор-акцептор (DA). Происходит также длинноволновый сдвиг последних. Все это свидетельствует о значительном уменьшении концентрации электрически активных центров, а следовательно, об улучшении качества материала и смене типа проводимости. Из спектров следует, что основными акцепторами в слоях являются Si и C в случае Yb или Zn и C при легировании Gd. Принимая во внимание, что в рабочем диапазоне температур роста Si сильно автокомпенсирован /5/, воздействие РЗЭ на донор  $Si_{Ga}$  должно приводить к аналогичному воздействию на акцептор  $Si_{As}$ . Однако заметного уменьшения концентрации акцепторов Si при добавлении РЗЭ в жидкую фазу обнаружено не было даже в специальных экспериментах по двойному легированию Si + Gd. Наиболее вероятно, что РЗЭ реагируют в растворе-расплаве с донорами VI группы, среди которых самым распространенным при ЖФЭ является сера /6/. Характерно также, что при отсутствии Si в слоях (в случае использования Gd) эффективность "очистки" значительно возрастает (рис. 1).

Таким образом, предложен новый механизм "очистки" слоев GaAs при введении РЗЭ в жидкую фазу, суть которого состоит во взаимодействии лантаноидов с остаточными примесями VI группы (прежде всего с S) с образованием химических соединений, которые отгесняются во вторую фазу и не проникают в объем растущей пленки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Артамонов М. М. и др. Тезисы докладов на VII конференции по процессам роста и синтеза полупроводниковых кристаллов и пленок. Новосибирск, 1986, 2, 250 (1986).
2. Баграев Н. Т. и др. ФТП, 18, 83 (1984).
3. Захаренков Л. Ф. и др. ФТП, 21, 347 (1987).
4. Ennen H., Schneider J. J. Electron. Matter., a 14, 115 (1985).
5. Ashen D. J. et al. J. Phys. Chem. Solids, 36, 1041 (1975).
6. Skromme B. J. et al. In: Gallium Arsenide and Related Compounds. Inst. Phys. Conf. Ser. 65, ch. 6, 485 (1982).

Поступила в редакцию 22 мая 1987 г.