

ВЛИЯНИЕ Yb НА ОСТАТОЧНЫЕ ДОНОРНЫЕ И АКЦЕПТОРНЫЕ ПРИМЕСИ В GaP

Лагвилава Т. А., Мильвидский М. Г., Соловьева Е. В.

Изучено влияние легирования расплава Ga редкоземельной примесью Yb (0—0.1 ат%) на концентрацию доноров и акцепторов в GaP *n*- и *p*-типа проводимости. Показано, что концентрация доноров уменьшается только при больших содержаниях Yb в расплаве, а концентрация акцепторов уменьшается только в области малых уровней легирования. При больших концентрациях Yb происходит накачка акцепторного фона. Сделан вывод о том, что основной причиной увеличения подвижности электронов при легировании GaP иттербием является образование донорно-акцепторных пар.

Литературные данные свидетельствуют о том, что при легировании соединений $A^{III}B^V$ редкоземельными примесями (РЗП) уменьшается концентрация электронов и увеличивается их подвижность. Обнаружено также, что введение РЗП в процессе жидкофазовой эпитаксии (например, в GaP [1], GaAs [2], InGaAs [3]) приводит к изменению типа проводимости слоев, когда количество вводимой в жидкую фазу РЗП превышает некоторую пороговую величину. Эти явления обычно интерпретируются с позиций «очистки» кристалла от фоновых примесей [4, 5]. Вопрос о механизме очистки остается пока открытым. Так, в [1] отмечалось, что не ясно, действительно ли уменьшение концентрации электронов и инверсия типа проводимости связаны с уменьшением концентрации доноров (D), а не с ростом концентрации акцепторов (A). Что касается роста подвижности электронов при легировании, то это также является неоднозначным указанием на очистку, ибо может быть обусловлено (как это было обнаружено в GaP [6]) другими причинами, например образованием донорно-акцепторных пар, рассеивающих слабее, чем изолированные кулоновские центры.

В настоящей работе мы попытались пролить дополнительный свет на механизмы происходящих процессов, изучая изменение концентраций D и A в эпитаксиальных слоях (ЭС) GaP *n*- и *p*-типа проводимости, полученных методом жидкофазовой эпитаксии из расплавов Ga с различным содержанием РЗП Yb. Интервал изменения содержания Yb в жидкой фазе составлял 0—0.1 ат%, что соответствовало, по данным рентгено-спектрального анализа, 0—0.025 ат% в твердой фазе. Процедура расчета концентрации мелких доноров $D = D_1 + D_2$ и A из электрических измерений ЭС GaP *n*-типа проводимости описана в [7]. Поэтому мы остановимся на методике анализа слоев GaP : Yb *p*-типа проводимости.

На рис. 1 приведены температурные зависимости концентрации дырок $p(1/T)$ для двух ЭС GaP : Yb *p*-типа. Приведены также теоретические кривые $p(1/T)$, учитывающие присутствие в ЭС одного акцепторного центра (одноуровневая модель) и двух акцепторов A_1, A_2 (двухуровневая модель), для чего решались соответствующие уравнения электронейтральности [7]. Параметры уравнения нейтральности (концентрация акцепторов и доноров, энергия ионизации акцепторов) определялись путем подгонки с помощью ЭВМ. Пример такой подгонки показан на рис. 1. Из рис. 1 видно, что модель с двумя акцепторами (A_1, A_2) удовлетворительно описывает зависимость $p(1/T)$ при параметрах, приведенных в подписи к рис. 1. Эти же параметры были использованы для опи-

сания температурной зависимости подвижности дырок μ (T) в этих ЭС (рис. 2). Поскольку экспериментальные значения μ превышают теоретические, учитывающие решеточное и кулоновское рассеяние дырок [8, 9], мы, как и в [6] (для n -GaP), ввели в рассмотрение рассеяние на донорно-акцепторных парах. При этом было получено хорошее совпадение теоретических и экспериментальных зависимостей $\mu(T)$ при плече донорно-акцепторной пары $\sim 25 \text{ \AA}$.

Рассмотрим влияние легирования Yb на концентрации в ЭС мелких доноров D и акцепторов $A = A_1 + A_2$. Разброс концентраций D и A в нелегированных слоях GaP даже при фиксированных условиях получения значителен: $D = (0.5 \div 5) \cdot 10^{17}$, $A = (0.15 \div 4) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Практически в тех же пределах меня-

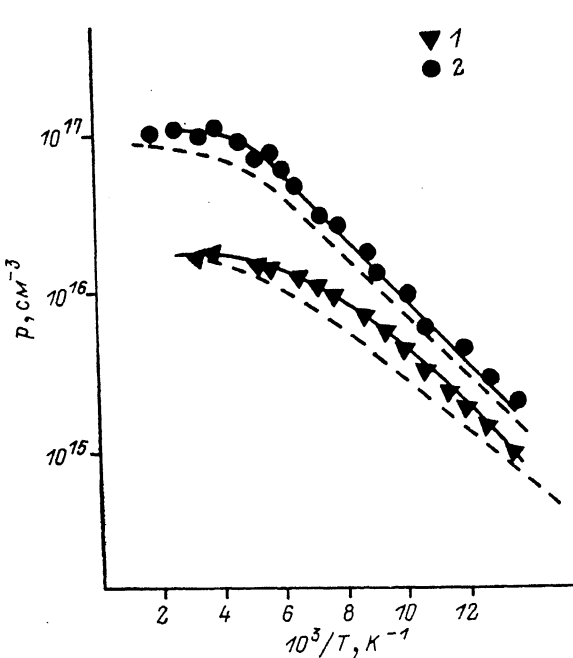


Рис. 1. Зависимость концентрации дырок от температуры в ЭС GaP : Yb.

Точки — эксперимент, сплошная линия — теория, двухуровневая модель. $A_1 \cdot 10^{-18}, \text{ см}^{-3}$: 1 — 6.1, 2 — 8.7; $A_2 \cdot 10^{-18}, \text{ см}^{-3}$: 1 — 6.5, 2 — 4.5; $D \cdot 10^{-16}, \text{ см}^{-3}$: 1 — 5, 2 — 2.2; $E_1, \text{ эВ}$: 1 — 0.03, 2 — 0.346; $E_2, \text{ эВ}$: 1, 2 — 0.048. Штриховые кривые — одноуровневая модель.

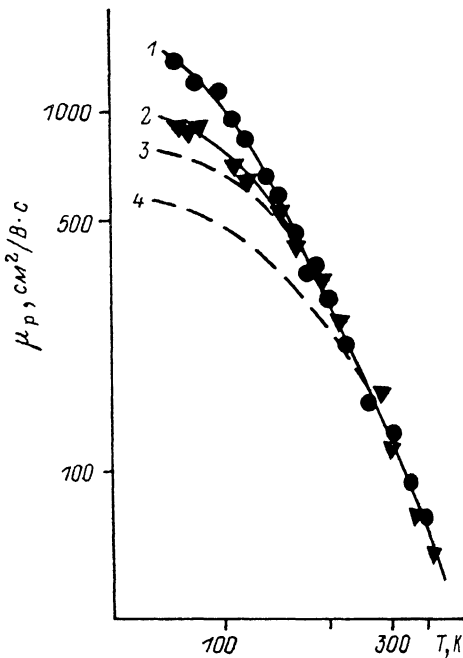


Рис. 2. Зависимость холловской подвижности дырок от температуры.

Точки — эксперимент, сплошные линии — теория. 1, 2 — с учетом, 3, 4 — без учета дипольного рассеяния.

ются A и D в слоях GaP : Yb. На рис. 3, а, б представлены гистограммы распределения ЭС по концентрациям D и A как для нелегированных ЭС GaP, так и для ЭС GaP : Yb. При легировании характер распределения изменяется. Возрастает число ЭС с $D < 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и число ЭС с $A > 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, т. е. легирование Yb является значимым фактором в формировании донорно-акцепторного фона, причем более существенным, чем случайные факторы (колебания температуры роста, давление, уровень загрязнения и т. д.), оказывающие влияние на выращивание нелегированных слоев. Этот вывод делает корректным построение зависимости концентраций D и A от концентрации Yb (рис. 4).

При малых концентрациях Yb ($[Yb] < 0.03 \text{ ат\%}$) в расплаве концентрация доноров выше ее максимальной величины в нелегированных ЭС ($5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$). Концентрация D уменьшается при росте $[Yb]$. Низкая концентрация D ($[D] < 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) наблюдается в слоях p -GaP : Yb при больших содержаниях Yb в расплаве ($[Yb] > 0.05 \text{ ат\%}$), и, по-видимому, в данном случае можно говорить об истинной очистке ЭС от доноров. Отсюда следует, что наблюдающееся в n -GaP : Yb возрастание подвижности в основном обусловлено не очисткой от доноров ЭС, а, как было показано в [3], образованием донорно-акцепторных пар. Очистка от акцепторов, напротив, происходит при малых концентрациях

Уб ($[Yb] < 0.03-0.04$ ат%) в расплаве и сменяется их «накачкой» при дальнейшем повышении $[Yb]$.

Таким образом, легирование расплава Уб приводит к сложным изменениям в фоне остаточных примесей в ЭС, которые могут быть связаны с процессами, происходящими как в расплаве, так и в твердой фазе. Очистку ЭС от примесей обычно связывают с геттерированием в расплаве. Например, предполагается, что РЗП в расплаве образует стойкие соединения с примесями, препятствуя их переходу в кристалл. При детализации таких подходов следует учитывать то,

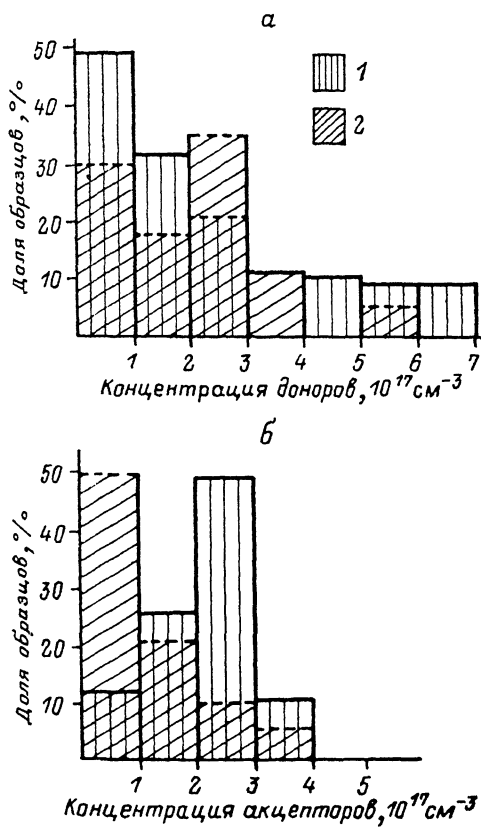


Рис. 3. Гистограммы распределения концентраций доноров (а) и акцепторов (б) в ЭС.

1 — GaP : Yb, 2 — GaP (нелегированный).

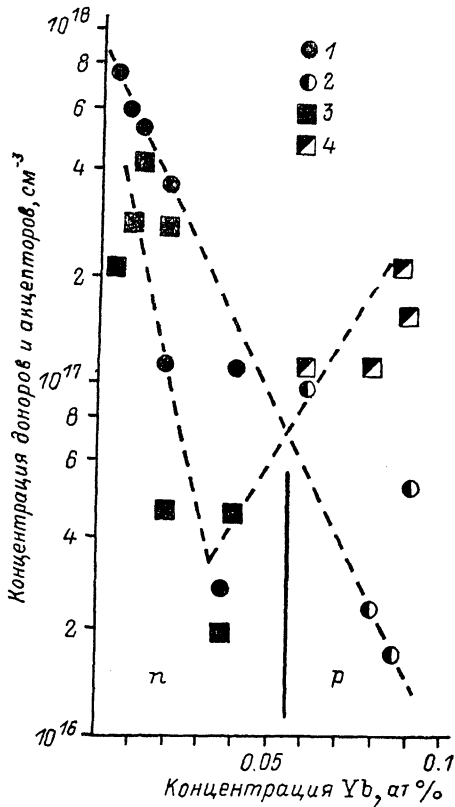


Рис. 4. Зависимость концентрации доноров и акцепторов в ЭС от концентрации Уб в жидкой фазе.

Доноры типа: 1 — n, 2 — p; акцепторы типа: 3 — n, 4 — p.

что модель должна включать в себя возможность геттерирования, как минимум, двух примесей серы и углерода, которые, согласно [1, 6], являются основными остаточными донором и акцептором в ЭС GaP. Кроме того, не исключена возможность изменения коэффициентов распределения остаточных примесей при легировании расплава РЗП.

Рост концентрации акцепторов при больших $[Yb]$ также не может быть объяснен однозначно. Учитывая уровень чистоты Уб, нельзя исключить возможность загрязнения расплава при легировании. Вторая возможность связана с влиянием Уб на процессы дефектообразования в твердой фазе. Атомы Уб вызывают вокруг себя существенную упругую деформацию решетки. Вследствие этого в их окрестности уменьшаются энергия образования собственных точечных структурных дефектов, создающих деформацию противоположного знака, и, следовательно, их концентрация [10]. Аналогичное рассуждение может быть отнесено к атомам остаточного углерода — акцептору, который по сравнению с Уб вызывает в решетке деформацию противоположного знака. Поэтому можно

полагать, что при достаточно больших [Yb] в твердой фазе либо возрастает растворимость углерода, либо генерируются точечные структурные дефекты, имеющие акцепторную природу.

Список литературы

- [1] Баранский П. И., Беляев А. Е., Городничий О. П., Макаренко В. Г. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 158—161.
- [2] Воронина Т. И., Лагунова Т. С., Саморуков Б. Е., Стругов Н. А. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 147—150.
- [3] Мамутин В. В. // Автореф. канд. дис. Л., 1984.
- [4] Баграев Н. Т., Власенко Л. С., Гацоев К. А., Гореленок А. Т., Каманина А. В., Мамутин В. В., Пушный Б. В., Тибилов В. К., Толпаров Ю. П., Шубин А. Е. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 1. С. 83—85.
- [5] Романов В. В., Саморуков Б. Е. // Изв. вузов СССР. Физика. 1980. № 9. С. 103—104.
- [6] Дмитриева Л. А., Лагвилава Т. А., Твилова Э. А., Рытова Н. С., Соловьева Е. В. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 11. С. 2061—2065.
- [7] Бирюлин Ю. В., Лагвилава Т. А., Мильвидский М. Г., Писаревская В. А., Соловьева Е. В., Чалдышев В. В., Шмарцев Ю. В. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 6. С. 1070—1075.
- [8] Wiley J. D., DiDomenico M. // Phys. Rev. 1970. V. 2. N 2. P. 427—433.
- [9] Somogyi K. // Phys. St. Sol. (a). 1976. V. 37. N 2. P. 635—662.
- [10] Мильвидский М. Г., Рытова Н. С., Соловьева Е. В. // Проблемы кристаллографии. К 100-летию со дня рождения академика Шубникова А. В. М., 1987. С. 215.

Государственный
научно-исследовательский и проектный институт
редкометаллической промышленности
Москва

Получена 27.02.1990
Принята к печати 6.03.1990