

в подрешетке меди In_{Cu} (донор), $E_D=60$ мэВ; 3) вакансии меди V_{Cu} (акцептор), $E_A=150$ мэВ; 4) медь в подрешетке индия Cu_{In} (акцептор), $E_A=120$ мэВ.

Список литературы

- [1] Wagner S., Bridenbaugh P. M. // J. Cryst. Growth. 1977. V. 39. N 1. P. 151—159.
- [2] Bridenbaugh P. M., Migliorato P. // Appl. Phys. Lett. 1975. V. 26. N 8. P. 459—460.
- [3] Masse G., Lahlou N., Butti C. // J. Phys. Chem. Sol. 1981. V. 42. N. 6. P. 449—454.
- [4] Masse G., Redjai E. // J. Phys. Chem. Sol. 1986. V. 47. N 1. P. 99—104.
- [5] Ueng H. Y., Hwang H. L. // J. Appl. Phys. 1987. V. 62. N 2. P. 434—439.
- [6] Look D. C., Manthuruthil J. C. // J. Phys. Chem. Sol. 1975. V. 37. N 2. P. 173—180.
- [7] Koschel W. H., Sorger F., Baars J. // J. Phys. 1975. V. 36. Colloq. C3. Suppl. 9. P. 177—181.
- [8] Tell B., Bridenbaugh P. M. // Phys. Rev. B. 1975. V. 12. N 8. P. 3330—3335.

Институт физики твердого тела
и полупроводников АН БССР
Минск

Получено 11.07.1988
Принято к печати 26.04.1989

ФТП, том 23, вып. 9, 1989

ЛЕГИРОВАНИЕ СЛОЕВ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ САМАРИЕМ

Воробьева В. В., Егорова М. В.,
Крещук А. М., Новиков С. В., Савельев И. Г.

Известно [1, 2], что добавление редкоземельных элементов (РЗЭ) Yb, Gd, Dy, Ho в раствор-расплав при жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) слоев InP , InGaAs позволяет существенно понизить концентрацию электронов и перейти от n -типа проводимости слоя при низких концентрациях РЗЭ в жидкой фазе к p -типу при высокой концентрации ($\geq 10^{-2}$ ат%). В работе [3] показано, что причиной этого является взаимодействие РЗЭ с атомами примеси в растворе-расплаве с образованием химических соединений, не попадающих в твердую фазу. Причем в большей степени происходит снижение фона доноров VI группы. Однако область концентраций РЗЭ в жидкой фазе ($x_{\text{РЗЭ}}$), при которой происходит эффективная очистка материалов, достаточно узка [2], что затрудняет воспроизводимое получение слоев с заданными параметрами — концентрацией носителей и типом проводимости.

Отличительный характер изменения электрофизических параметров слоев наблюдается при легировании жидкой фазы Sm. Даже малые добавки Sm ($\sim 10^{-3}$ ат%) инвертируют тип проводимости растущего слоя, причем концентрация дырок плавно возрастает с увеличением x_{Sm} [2, 4]. Это позволяет надеяться на воспроизводимое получение слоев p -типа проводимости с низкой концентрацией. Установление механизма влияния Sm на свойства слоев InGaAs является важным для выяснения целесообразности их приборного применения.

С этой целью проводилось исследование свойств эпитаксиальных слоев $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, полученных методом жидкофазной эпитаксии при $T \approx 650^\circ\text{C}$ из раствора-расплава с различным содержанием Sm ($x_{\text{Sm}}=10^{-4}$ — 10^{-1} ат%). Гальваномангнитные измерения проводились по стандартной методике на образцах в форме двойного холловского креста в магнитном поле до 10 кГс.

На рис. 1, а показана экспериментальная зависимость концентрации носителей в слоях от содержания Sm в растворе-расплаве. Величина погрешности x_{Sm} определяется точностью взвешивания навески Sm. Для навесок, меньших 0.1 мг, погрешность считается равной цене деления делительного устройства весов ВЛР-20 г (0.005 мг).

При возрастании x_{Sm} от 10^{-4} до 10^{-3} ат% наблюдается снижение концентрации электронов от $(1 \div 2) \cdot 10^{16}$ до $(0.5 \div 1) \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$. При $x_{\text{Sm}} \approx 1 \cdot 10^{-3}$ ат%

происходит инверсия типа проводимости, а при изменении x_{Sm} в широком диапазоне значений (от 10^{-3} до 10^{-1} ат%) концентрация носителей плавно возрастает от $p=10^{14}$ до $p=10^{15}$ см $^{-3}$.

Приведенная зависимость качественно совпадает с результатами, которые были получены ранее на слоях, легированных другими РЗЭ [2, 4].

На рис. 1, б показана зависимость подвижности носителей (электронов при $x_{Sm} < 1 \cdot 10^{-3}$ ат% и дырок при больших x_{Sm}) при 77 К от содержания Sm в жидкой фазе. Видно, что подвижность как электронов, так и дырок возрастает при увеличении x_{Sm} . Более подробно рассмотрим область электронной проводимости.

На рис. 2 представлена полученная из рис. 1, а и б зависимость подвижности электронов при 77 К от их концентрации. Анализ показывает, что при 77 К основным механизмом рассеяния электронов в исследуемых слоях являются рассеяния на дефектах кристаллической решетки (вклад фонового рассеяния $< 1\%$). При дан-

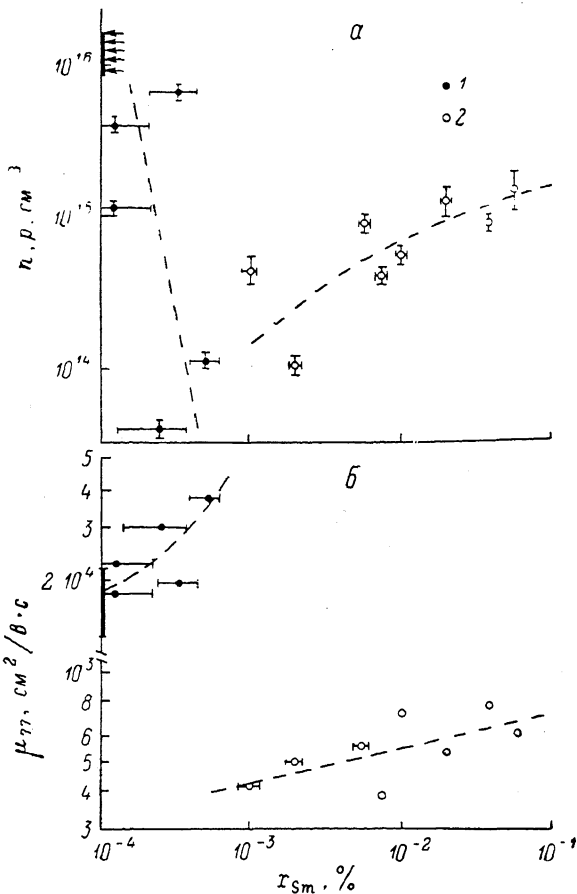


Рис. 1. Зависимости концентрации (а) и подвижности (б) при 77 К электронов (1) и дырок (2) в слоях $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ от концентрации самария в растворе-расплаве.

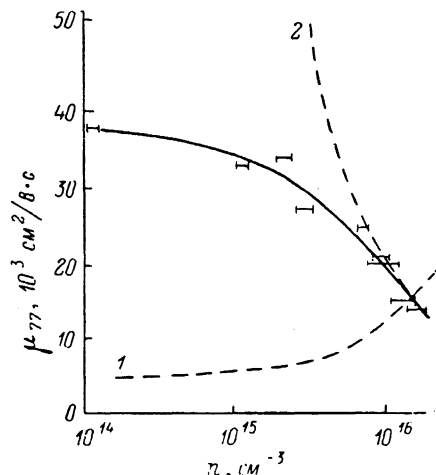


Рис. 2. Зависимость подвижности электронов при 77 К от их концентрации в слоях $In_{0.53}Ga_{0.47}As$, легированных самарием ($x_{Sm} < 5 \times 10^{-3}$ ат% в жидкой фазе).

Штриховые кривые — зависимости $\mu_I(n)$, рассчитанные в предположении постоянства концентрации доноров в слоях $N_D = 3 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ (1) и постоянства степени компенсации $K = N_A/N_D = 0.6$ (2).

ных экспериментальных величинах подвижности вклад рассеяния на сплавном потенциале не превышает 10% [3, 5], что позволяет пренебречь этим механизмом при качественном описании наблюдаемых закономерностей. Поэтому при дальнейшем анализе мы будем учитывать только рассеяния на ионизованных примесях и рассчитывать подвижность μ_I по модели Брукса—Херринга [6].

Штриховая кривая 1 на рис. 2 рассчитана в предположении акцепторного действия Sm [4], т. е. когда снижение концентрации электронов происходит за счет возрастания концентрации акцепторов N_A при фиксированной концентрации доноров N_D . Видно, что расчетная кривая ни качественно, ни количественно не описывает эксперимент. Зависимость 2 на рисунке соответствует

случаю, когда Sm в одинаковой степени препятствует попаданию в твердую фазу как доноров, так и акцепторов, т. е. когда степень компенсации $K = N_A/N_D$ остается постоянной. Видно, что подвижность электронов в образцах, легированных Sm, существенно ниже рассчитанной в предположении $K = \text{const}$, что свидетельствует об увеличении степени компенсации в слоях при добавлении Sm в раствор-расплав. Этот вывод подтверждается и оценками концентрации примеси и степени компенсации для образцов с различным x_{Sm} , сделанными в предположении, что $\mu_{77}^{\text{экв}} = \mu_{\text{I}}$. Для $x_{\text{Sm}} = 0$ $N_D = (3.5 \pm 0.5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_A = (2.3 \pm 0.5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $K = 0.64 \pm 0.02$, а для $x_{\text{Sm}} = 5 \cdot 10^{-4}$ ат% (вблизи точки инверсии) $N_D = 4.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 4.3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $K = 0.98$. Описанные тенденции качественно совпадают с результатами, полученными ранее при использовании других РЗЭ [3]. Количественное отличие в поведении Sm от других РЗЭ, по-видимому, следует связывать с высокой химической активностью Sm, имеющей 6 электронов на 4f-подоболочке.

Об отсутствии акцепторного действия Sm при его большей концентрации в жидкой фазе, т. е. в области дырочной проводимости, свидетельствуют следующие факты: при увеличении концентрации Sm в жидкой фазе на 2 порядка концентрация дырок не превышает концентрации акцепторов ($4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) в слоях вблизи точки инверсии (рис. 1, а); подвижность при 77 К в слоях p-типа имеет тенденцию к возрастанию при увеличении содержания Sm (рис. 1, б).¹

Таким образом, установлено, что при введении Sm в раствор-расплав при ЖФЭ наблюдается очистка слоев $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, объясняющаяся взаимодействием Sm с атомами примеси (в большей степени донорами) в растворе-расплаве. Это приводит к резкому снижению концентрации электронов при малых уровнях легирования, инверсии типа проводимости при $x_{\text{Sm}} \approx 1 \cdot 10^{-3}$ ат% и плавному возрастанию концентрации дырок от 10^{14} до 10^{15} см^{-3} при дальнейшем увеличении количества Sm, вводимого в раствор-расплав. Этот результат свидетельствует о перспективности использования Sm для воспроизводимого получения слоев p-типа проводимости с заданной концентрацией носителей и низкой концентрацией примеси ($10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$), применяемых при создании структур с двумерным электронным газом [8].

Авторы благодарны О. Н. Нащекиной за техническую помощь.

Список литературы

- [1] Гацов В. А., Гореленок А. Т., Карпенко С. С., Мамутин В. В., Сейсян Р. П. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 12. С. 2148—2151.
- [2] Кумар Р. Автореф. канд. дис. Л., 1987.
- [3] Гореленок А. Т., Груздов В. Г., Кумар Р., Мамутин В. В., Полянская Т. А., Савельев И. Г., Шмарцев Ю. В. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 35—43.
- [4] Лариков С. И., Петров А. И., Рычков О. В., Юнович А. Э. // Письма ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 6. С. 328—331.
- [5] Takeda Y. // Japan. J. Appl. Phys. 1984. V. 23. N 4. P. 446—452.
- [6] Braaks H. // Phys. Rev. 1951. V. 21. N 3. P. 879—887.
- [7] Hayes J. R., Adams A. R., Greene P. D. // Electron. Lett. 1980. V. 16. N 8. P. 282—284.
- [8] Голубев Л. В., Крещук А. М., Новиков С. В., Полянская Т. А., Савельев И. Г., Сайдашев И. И. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 11. С. 1948—1954.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получено 26.04.1989
Принято к печати 27.04.1989

¹ Определение концентраций электрически активной примеси исходя из подвижности дырок затруднено, так как анализ [7] показывает, что в слоях InGaAs p-типа большой вклад вносит рассеяние на сплавном потенциале в широком диапазоне температур.