

ного поглощения. Дифференциальная методика записи спектров образцов Si <Ni> в области ~ 1 мкм показывает, что наибольшее отклонение от нормального рассеяния (контрольный образец без Ni), вызванное наличием частиц второй фазы в Si, наблюдается в бескислородном Si БЗП, где обнаружена самая высокая концентрация ГУ $E_c - 0.41$ эВ и плотность дефектов выше, чем в кислородном Si. Спектры сравнения изображены на рисунке.

Более подробно эти дефекты исследовались по снимкам ИК микроскопии (МИК-4, увеличение в 500 раз). Оказалось, что при медленном охлаждении от 1080 °C образец остается прозрачным, никакие дефекты не наблюдаются. Напротив, быстрое охлаждение сильно нарушает прозрачность и приводит к образованию дефектов различной формы, размеров и плотности в зависимости от N_O в Si. В Si с $N_O \approx 10^{18}$ см⁻³ это — дефекты вытянутой формы с размытыми очертаниями размером 4×8 мкм и плотностью 10^4 см⁻². В Si БЗП, где наблюдалось более сильное рассеяние света в области ~ 1 мкм, дефекты представляют собой точки размером $2 \div 3$ мкм с плотностью $\approx 2 \cdot 10^5$ см⁻². Таким образом, от концентрации кислорода, а также от формы и плотности дефектов прозрачность не зависит.

В заключение сделаем следующие выводы.

1. С увеличением концентрации кислорода в *n*-Si уменьшается концентрация электрически активного Ni, имеющего ГУ $E_c - 0.41$ эВ. Концентрация ГУ $E_c - 0.2$ эВ, вызванного, вероятно, структурными дефектами, образующимися в процессе диффузии Ni, не зависит от концентрации кислорода в образце.

2. Слой атомарного (свободного) кислорода, или частицы SiO₂, служит сильным геттером для атомов Ni, и ГУ не наблюдаются.

3. Ухудшение прозрачности в Si <Ni> не коррелирует с изменением концентрации кислорода. Прямой связи между наличием частиц второй фазы, ухудшением прозрачности и наличием ГУ также не установлено. Полученные экспериментальные результаты позволяют предположить, что ухудшение прозрачности, по-видимому, наступает или из-за междоузельных атомов Ni, собираемых в скопления во время быстрого охлаждения, или ввиду вероятного образования комплексов типа Ni—C (если исходить из сильного эффекта уменьшения концентрации оптически активного углерода при введении Ni).

Список литературы

- [1] Болтакс Б. И., Бахадурханов М. К., Куликов Г. С., Малкович Р. Ш. Компенсированный кремний. Л., 1974. 462 с.
- [2] Лебедев А. А., Таптыгов Э. С., Джафаров Э. А. // Препринт ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР. Л., 1987. № 1172.
- [3] Pearton S. J., Tovendal J. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N 3. P. 1375—1379.
- [4] Витман Р. Ф., Гусева Н. Б., Лебедев А. А., Таптыгов Э. С. // Препринт ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР. Л., 1988. № 1221.
- [5] Батавин В. В. Контроль параметров полупроводниковых материалов и эпитаксиальных слоев. М., 1976. 101 с.

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

Получено 19.12.1988
Принято к печати 24.01.1989

ФТП, том 23, вып. 5, 1989

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ НА СВОЙСТВА ФОСФИДА ИНДИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО 3d-ЭЛЕМЕНТАМИ

Саморуков Б. Е., Слободчиков С. В.

Исследования кристаллов фосфида индия после облучения электронами показали, что уровень Ферми в них закрепляется вблизи $\sim E_c - 0.35$ эВ [1^{-3}]. При этом скорость удаления носителей заряда в *p*-InP гораздо больше, чем

в n -InP [2-4]. Легирование осуществлялось примесями с мелкими уровнями (Ge, Zn и др.). В фосфиде индия большой интерес вызывает легирование $3d$ -элементами, которые используются для получения полужолирующего материала [5, 6]. Известна одна работа по влиянию электронного облучения на спектры ЭПР InP <Fe> [7].

Целью настоящей работы явилось исследование влияния облучения электронами на электрические и оптические свойства InP, легированного Cr, Fe и Mn. В дополнение к литературным данным проведено также определение энергии ионизации этих примесей.

Монокристаллы фосфида индия выращивались методом Чохральского с жидкостной герметизацией расплава борным ангидридом. Облучение образцов проводилось при комнатной температуре электронами с энергией 1 МэВ и дозой

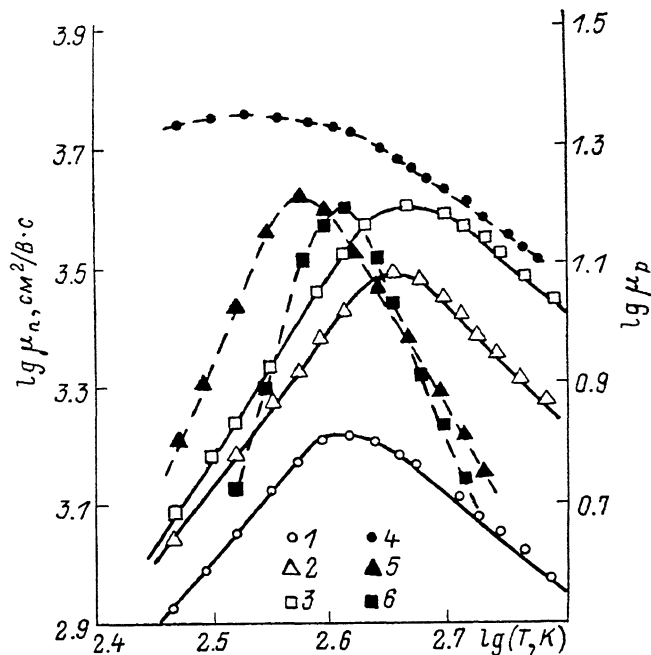


Рис. 1. Температурная зависимость подвижности электронов (1—3) и дырок (4—6; ось справа) образцов 47 и 55 до (1, 4) и после облучения электронами дозами 10^{17} (2, 5) и 10^{18} эл/см² (3, 6).

до 10^{18} эл/см². Эффект Холла измерялся на постоянном токе компенсационным методом на образцах $12 \times 2 \times 1$ мм. Омические контакты изготавливались с помощью лазера или вплавлением в водороде сплава In—Ni (3%) или In—Zn (3%)—Ni (3%) соответственно для n - и p -типа InP. Спектры оптического поглощения (ОП) и фотопроводимости (ФП) снимались по стандартной методике. Разрешение при этом составляло 0.005—0.01 эВ.

Кристаллы фосфида индия, легированные хромом и железом, были n -типа с ρ , равным соответственно $2 \cdot 10^3$ — $4 \cdot 10^5$ и $5 \cdot 10^6$ — $5 \cdot 10^7$ Ом·см (293 К). Сопротивление InP <Mn> p -типа составляло 10^1 — 10^3 Ом·см (293 К).

С помощью модели компенсированного полупроводника определена термическая энергия ионизации хрома, железа и марганца в фосфиде индия, равная соответственно (0.37 ± 0.04) , (0.65 ± 0.05) эВ от дна зоны проводимости и (0.16 ± 0.03) эВ от потолка валентной зоны. Оптическая (из спектров ОП и ФП) энергия ионизации Cr, Fe и Mn в InP равна соответственно $E_c - 0.47$, 0.67 и $E_v + 0.26$ эВ.

Параметры кристаллов при комнатной температуре до и после облучения электронами приведены в таблице. Из таблицы видно, что электронное облучение приводит к уменьшению концентрации носителей заряда во всех образцах. При этом снижение концентрации электронов (293 К) у InP <Fe> при дозе 10^{17} — 10^{18} эл/см² не превышало 16%, а у InP <Cr> концентрация электронов умень-

Параметры при 293 К исходных образцов [$n_0(p_0)$, μ_0] и после облучения их электронами с энергией 1 МэВ.

№ образца	Легирующая примесь	$n_0(p_0)$, см^{-3}	μ_0 , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	Доза, $\text{эл}/\text{см}^2$	$n(p)$, см^{-3}	μ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
11	Cr	$1.2 \cdot 10^{12}$	1860	10^{17}	$5.5 \cdot 10^{11}$	3880
12		$2.0 \cdot 10^{12}$	1850	10^{17}	$9.6 \cdot 10^{11}$	3860
21		$1.2 \cdot 10^{12}$	1740	10^{18}	$1.9 \cdot 10^{11}$	3800
22		$1.2 \cdot 10^{12}$	1870	10^{18}	$1.6 \cdot 10^{11}$	4080
31	Fe	$8.0 \cdot 10^8$	740	10^{17}	$7.0 \cdot 10^8$	1610
35		$2.5 \cdot 10^9$	560	10^{17}	$2.1 \cdot 10^9$	1220
42		$2.5 \cdot 10^9$	580	10^{18}	$2.2 \cdot 10^9$	1470
47		$1.0 \cdot 10^{10}$	850	10^{18}	$8.8 \cdot 10^9$	1300
53	Mn	$5.2 \cdot 10^{16}$	27	10^{17}	$1.1 \cdot 10^{16}$	12
55		$6.0 \cdot 10^{16}$	21	10^{17}	$1.2 \cdot 10^{16}$	7
62		$5.4 \cdot 10^{16}$	22	10^{18}	$1.1 \cdot 10^{16}$	11
69		$7.2 \cdot 10^{16}$	20	10^{18}	$2.0 \cdot 10^{16}$	10

шалась в 2.1—2.2 раза при дозе 10^{17} и в 6—8 раз при дозе 10^{18} $\text{эл}/\text{см}^2$. Концентрация дырок в InP <Mn> после облучения снижалась в 4—5 раз, при этом зависимости от дозы не наблюдалось.

Заметное влияние дозы облучения на концентрацию электронов в InP <Cr> обусловлено, вероятно, малой растворимостью Cr в InP ($2 \cdot 10^{16}$ см^{-3}) и наличием микровключений CrP [8]. Рост дозы от 10^{17} до 10^{18} $\text{эл}/\text{см}^2$ может увеличить кон-

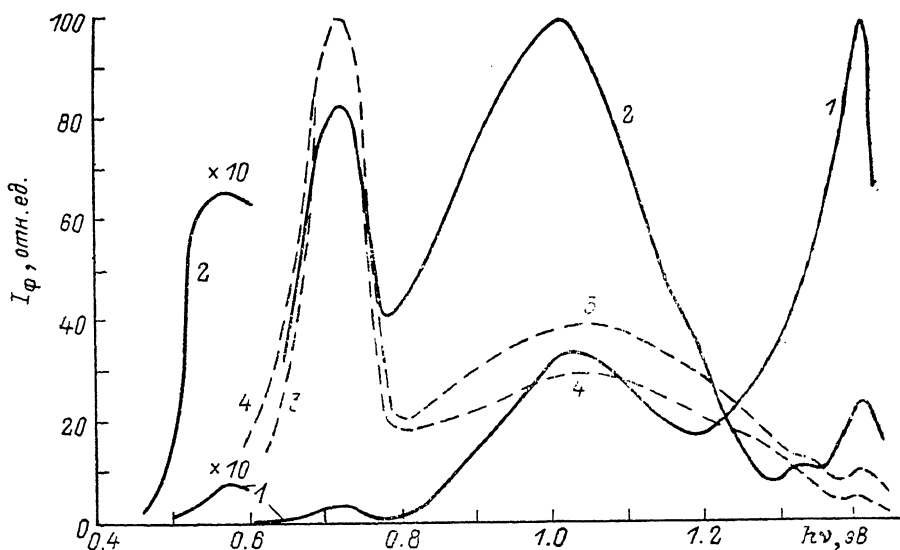


Рис. 2. Спектры фотопроводности при 77 К образцов 21 (1, 2) и 69 (3, 4) до (1, 3) и после облучения (2, 4) электронами (1 МэВ, 10^{17} $\text{эл}/\text{см}^2$).

центрацию вакансий индия и, как следствие, содержание центров Cr_{In} . Это и вызывает дополнительное уменьшение концентрации электронов. Для железа растворимость в фосфиде индия достигает значения $3 \cdot 10^{18}$, а для марганца — $3 \cdot 10^{19}$ см^{-3} [8].

Подвижность электронов в облученных образцах увеличивалась в 2.1—2.6 раза. При этом температурный ход подвижности практически не изменялся, а положение максимума с ростом дозы облучения смещалось в сторону больших температур (рис. 1, 1—3). Для кристаллов InP <Mn> после облучения наблюдалось уменьшение подвижности дырок, причем температурный ход ее существенно менялся (рис. 1, 4—6).

Заметное влияние облучение оказывало и на спектры ФП образцов (рис. 2). Пик с максимумом ~ 0.57 эВ (кривая 1) наблюдался только у образцов InP <Cr>.

Интенсивность его коррелировала с содержанием хрома в кристаллах. Она росла после облучения электронами (кривая 2), что подтверждает предположение об увеличении растворимости хрома. Сильно увеличивалась интенсивность полос с максимумами 0.72 и ~ 1.0 эВ. Последняя значительно шире у $\text{InP} \langle \text{Mn} \rangle$ (кривые 3 и 4), что обусловлено, вероятно, наложением двух полос с максимумами ~ 1.0 и ~ 1.15 эВ. Полоса ~ 1.15 эВ вызвана, очевидно, переходами электронов с центра марганца в зону проводимости.

Тот факт, что полосы ФП 0.72 и ~ 1.0 эВ наблюдались в спектрах как облученных, так и исходных образцов, свидетельствует о том, что РД является, вероятнее всего, комплексами атом примеси—вакансия. Различия между Cr и Fe в составе такого комплекса должно быть небольшим. Это подтверждается изохронным отжигом облученных кристаллов n -типа. Основным отжиг РД ($\sim 70\%$) наблюдался у $\text{InP} \langle \text{Cr} \rangle$ при температуре 313—333 К. В интервале 333—413 К концентрация и подвижность электронов достигали исходных значений. Аналогично протекал отжиг облученного $\text{InP} \langle \text{Fe} \rangle$, только стадии имели температуру на 20 К больше.

Следовательно, облучение электронами фосфида индия, легированного $3d$ -элементами, вводит РД как акцепторного, так и донорного типа. Энергия ионизации этих центров, определенная из спектров ФП по критерию Мосса, составляет соответственно ~ 0.9 и ~ 0.6 эВ. РД донорного типа в кристаллах $\text{InP} \langle \text{Mn} \rangle$ отжигались частично при температуре 353—363 К. Легирование фосфида индия железом обеспечивает получение полужизолирующего материала, концентрация электронов в котором мало меняется при электронном облучении.

Список литературы

- [1] Брудный В. Н., Воробьев С. А., Цой А. А. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 2. С. 193—196.
- [2] Брудный В. Н., Новиков В. А. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 10. С. 1880—1882.
- [3] Suski J., Bourgojn J. C., Lim H. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N 7. P. 2852—2854.
- [4] Sibille A., Bourgojn J. C. // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 41. N 10. P. 956—958.
- [5] Омеляновский Э. М., Фистуль В. И. Примеси переходных металлов в полупроводниках. М., 1983. 192 с.
- [6] Мастеров В. Ф. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 1. С. 3—23.
- [7] Brailovskii E. Yu., Megela I. G., Pambuhchyan N. H., Teslenko V. V. // Phys. St. Sol. 1982. V. A72. N 1. P. K109—K111.
- [8] Захаренков Л. Ф., Зыков А. М., Макаренко В. Г., Саморуков Б. Е. // Электрон. техн. Материалы. 1982. № 8. С. 40—42.

Ленинградский политехнический институт
им. М. И. Калинина

Получено 21.12.1988
Принято к печати 24.01.1989