

Для получения окончательного результата предположим степенной характер зависимостей функций $\beta(T)$ и $\sigma(T)$, что присуще большинству полупроводников и полуметаллов. Например, для области температур, близких к температуре жидкого азота, данные зависимости для германия имеют вид $\beta \sim T^{-6}$, $\sigma \sim T^{-3/2}$, и для K получается наглядная формула

$$K = \frac{1 + 5\eta/(1 - 8.5\eta)}{1 - 4\eta/(1 - 8.5\eta)}. \quad (15)$$

Значения K в зависимости от $\eta = ZT$ представлены в таблице, из которой видно, что увеличение параметра эффективности ведет к непосредственному увеличению абсолютного уровня флуктуаций тока, так что в условиях больших значений K формула Найквиста становится неприемлемой. В заключение отметим возможное применение полученных результатов. Как известно, современные спектральные анализаторы позволяют измерять токовые флуктуации с большой точностью. Следовательно, зная характер температурных зависимостей термоэдс и проводимости образца и измерив величины шума с помощью формулы типа (15), можно в независимом эксперименте определить Z .

$\eta = TZ$	K
0.00	1.0
0.02	1.2
0.05	2.2

Список литературы

- [1] Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников. М., 1962. 616 с.
- [2] Де Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. М., 1964. 615 с.
- [3] Зубарев Д. Н. Неравновесная термодинамика. М., 1971. 415 с.
- [4] Антохин А. Ю., Козлов В. А. // Электрохимия. 1989. Т. 25. С. 1631—1635.
- [5] Bochkov G. N., Orlov A. L. // Int. Commun. Heat Mass. Trans. 1985. V. 12. P. 33—43.
- [6] Bochkov G. N., Orlov A. L. // Adv. Mod. Simulat. 1985. V. 3. P. 49—54.

Московский физико-технический институт
Долгопрудный

Получено 13.02.1990
Принято к печати 30.03.1990

ФТП, том 24, вып. 8, 1990

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ФОСФИДА ИНДИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ЕВРОПИЕМ

Штельмах К. Ф., Захаренков Л. Ф., Романов В. В.,
Терлецкий И. А., Штельмах С. В.

Результаты предварительных исследований ЭПР в фосфиде индия, легированном европием [1], показали отсутствие одиночных центров примеси обменно-связанных пар, причем каждый из ионов находится в зарядовом состоянии Eu^{2+} . Исследования эффекта Мессбауэра подтвердили выводы работы [1] и продемонстрировали отсутствие в кристаллах ионов в состоянии Eu^{3+} [2]. В связи с этим возникает вопрос о структуре обменно-связанной пары. Кроме того, существует возможность образования предвыделений второй фазы, что также требует экспериментальной проверки. В настоящей работе приведены результаты комплексного исследования кристаллов $\text{InP} \langle \text{Eu} \rangle$.

Статическая магнитная восприимчивость измерялась на установке MGD312 FG методом Фарадея в диапазоне температур 4—300 К.

Исследования однородности структуры проводились на установках рентгено-структурного анализа (РСА) «Дрон-2» и микрорентгеновского анализа MS-46 с пространственным разрешением ~ 1 мкм.

Качественный анализ поверхности образцов проводился с помощью послонной локальной оже-спектроскопии. При поверхностном разрешении 5—10 мкм

энергетическое разрешение составляло ~ 0.5 эВ. Следует сразу отметить, что на использованной установке проведение количественного анализа невозможно в силу низкой чувствительности.

Исследовались кристаллы, выращенные растворо-расплавным методом с содержанием европия в растворе-расплаве 0.01 и 0.1 мас%. В дальнейшем эти образцы будут обозначаться $\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle 0.01$ и $\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle 0.1$. В качестве контрольных использовались нелегированные образцы, выращенные при аналогичных режимах.

Температурные зависимости статической магнитной восприимчивости приведены на рис. 1. Из рис. 1 видно, что при низких температурах зависимости описываются законом Кюри—Вейсса

$$\chi = \frac{C}{T - \Theta}.$$

Постоянная Вейсса для образцов $\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle 0.01$ равна $\Theta = -6$, а для образцов $\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle 0.1 - \Theta = +9$ К. Если учесть, что одиночные центры в исследуемых кристаллах не зарегистрированы ни одним из использованных методов, знак

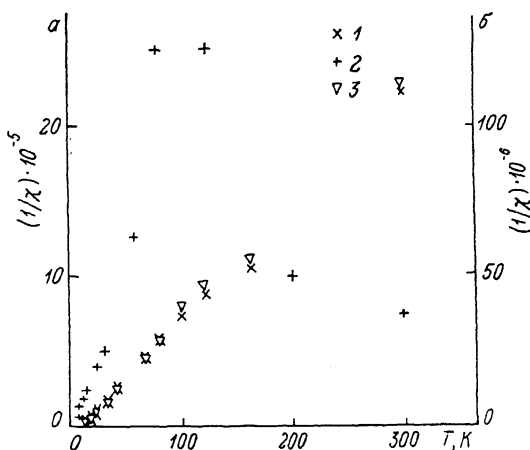


Рис. 1. Температурные зависимости статической магнитной восприимчивости образцов $\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle 0.1$ (а) и $\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle 0.01$ (б).

Измерения в поле, кГс: 1 — 4, 2, 3 — 11.

постоянной Вейсса свидетельствует о типе упорядочения обменно-связанных включений. Таким образом, в образцах $\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle 0.01$ содержатся фрагменты с антиферромагнитным, а в образцах $\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle 0.1$ — с ферромагнитным упорядочением.

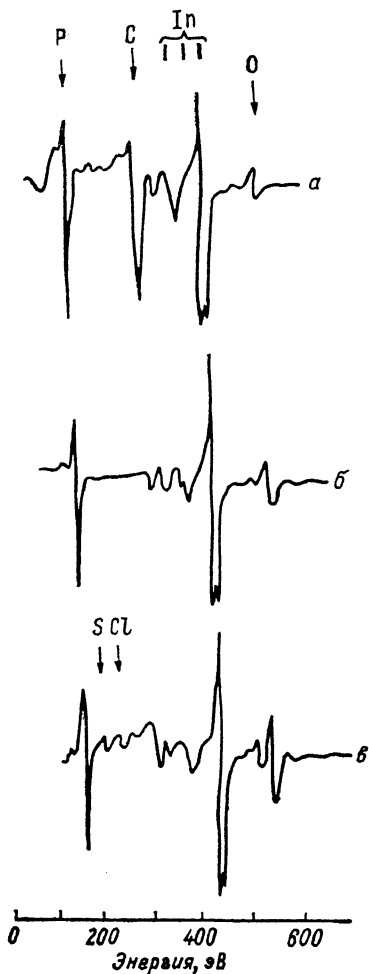
Значительное изменение χ в области $T \approx 100$ К (рис. 1) в настоящее время не до конца понятно. Однако можно предположить, что это связано с генерацией носителей в исследуемых образцах. Взаимодействие носителей с упорядоченными областями может приводить как к изменению характера обменного взаимодействия за счет рассеяния неполяризованных носителей на магнитных моментах включений, так и к возможному изменению зарядового состояния фрагментов поляризованных областей.

Если принять, что высокотемпературные аномалии зависимостей магнитной восприимчивости определяются лишь генерацией носителей, то по линейному участку зависимостей $\chi (1/T)$ можно определить концентрацию ионов европия. Для образца $\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle 0.1$ она составляет $(2 \pm 0.5) \cdot 10^2$, а для образца $\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle 0.01 - (2.2 \pm 0.3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Результаты микрорентгеновского анализа наличия включений второй фазы не показали. Тем более интересным представляется результат, полученный при проведении РСА. Решетка фосфида индия при введении европия остается кубической гранцентрированной, но постоянная решетки с увеличением содержания европия уменьшается (см. таблицу). Такая ситуация может реализо-

ваться, если в решетке существуют включения размерами менее 1 мкм, причем расстояния между однотипными атомами включения меньше постоянной решетки основной матрицы.

Исследование оже-спектров позволяет ответить на вопрос о возможном составе примесных включений. На рис. 2 представлены спектры оже-электронов, полученные на исследованных образцах. Из рисунка видно, что примеси, способные замещать фосфор в решетке фосфида индия, представлены кислородом в образцах $\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle 0.01$, серой и кислородом в образцах $\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle 0.1$. Пики, соответствующие углероду и хлору, объясняются наличием поверхностной пленки, их интенсивность сильно уменьшается при ионном травлении поверхности (рис. 2).



Постоянные решеток исследованных образцов и некоторых монохалькогенидов европия

Матрица	a , Å	Температура
InP	5.8687 ± 0.0001	—
(нелегированный)		
$\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle 0.01$	5.8680 ± 0.0002	—
$\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle 0.1$	5.8660 ± 0.0004	—
EuO	5.143	[3]
EuS	5.969	[3]
EuTe	6.585	[3]

Совокупность результатов исследования структуры и состава кристаллов $\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle$ показывает, что европий входит в матрицу фосфида индия в связанном виде. Предположительный состав включений — EuO и EuS ; кроме того, нельзя исключить и соединений европия с фоновыми донорами типа EuTe . Размеры включений не определены, но можно предполагать, что линейные размеры обмен-

Рис. 2. Оже-спектры образцов $\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle 0.01$ без травления (а), после травления (б), $\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle 0.1$ после травления (в).

но-связанных областей не превышают нескольких постоянных решетки фосфида индия. В противном случае по крайней мере на образцах с высокой концентрацией европия должны были бы проявиться дифракционные пики, соответствующие структуре одного из указанных составов. Уменьшение постоянной решетки $\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle$ при увеличении концентрации европия можно объяснить большим содержанием микровключений состава EuO , поскольку это единственный халькогенид европия с постоянной решетки, меньшей, чем у фосфида индия.

Приведенные результаты и соображения позволяют конкретизировать данные исследования статической магнитной восприимчивости. Действительно, соединение EuO обладает ферромагнетизмом и характеризуется соответственно положительной величиной постоянной Вейсса, что и определяет положительный знак постоянной в кристаллах $\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle 0.1$. Наблюдаемый антиферромагнитный характер упорядочения в образцах $\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle 0.01$ при концентрации европия $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ может быть объяснен наличием включений состава EuTe . Это предположение в какой-то мере подтверждается совпадением величины посто-

янной Вейсса для соединения EuTe [4] и образцов $\text{InP}\langle\text{Eu}\rangle$ 0.01. Естественно, что подобное совпадение может быть и случайным.

Таким образом, результаты данной работы показывают, что европий входит в кристаллы фосфида индия в связанном виде. Структурная единица, содержащая европий и обладающая минимальным размером, представляет собой обменно-связанную пару. Химическая связь в паре осуществляется, вероятнее всего, через атом кислорода.

В заключение авторы приносят свою благодарность В. Ф. Мастерову за интерес к работе и дружескую поддержку при ее выполнении.

Список литературы

- [1] Захаренков Л. Ф., Марков С. И., Мастеров В. Ф., Штельмах К. Ф. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 10. С. 1841—1843.
- [2] Кобелев В. Ф., Марков С. И., Мастеров В. Ф., Штельмах К. Ф. // Тез. докл. XI Всес. конф. по физике полупроводников. Кипшинов, 1988. Т. 1. С. 82—83.
- [3] Таблица физических величин. Справочник // Под ред. И. К. Кикоина. М., 1976. 1006 с.
- [4] Тейлор К., Дарби М. Физика редкоземельных элементов. М., 1974. 374 с.

Ленинградский
политехнический институт
им. М. И. Калинина

Получено 20.03.1990
Принято к печати 30.03.1990

ФТП, том 24, вып. 8, 1990

ВЛИЯНИЕ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ НА ВРЕМЯ ЖИЗНИ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

Гарнык В. С., Башаленишвили З. В.

В работе [1] было показано, что в процессе облучения быстрыми электронами высокоомных монокристаллов кремния p -типа, полученных методом бестигельной зонной плавки, время жизни неосновных носителей заряда, значительно снизившееся после облучения малыми дозами, по мере увеличения дозы возрастало, достигая величины, наблюдавшейся в необлученных кристаллах. Этот экспериментальный факт был объяснен на основе теории Холла—Шокли—Рида, согласно которой время жизни неосновных носителей заряда возрастает по мере уменьшения концентрации носителей. Такое объяснение представляется вполне обоснованным. Однако дальнейшие исследования показали, что при облучении кристаллов, полученных методом Чохральского, восстановления времени жизни не наблюдалось даже после облучения дозами, при которых концентрация носителей заряда снижалась до уровня $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

Наблюдаемое различие влияния облучения на кристаллы, выращенные разными методами, можно объяснить возникновением в материале, полученном методом бестигельной зонной плавки, «пульсирующих рекомбинационных центров» [2] — модели, выходящей за рамки теории Шокли—Рида. В настоящей работе мы тем не менее использовали именно эту «классическую» теорию.

Напомним, что в работе [1] измерения проводили при температуре 300 К. Избыточная концентрация носителей создавалась при помощи освещения исследуемого образца импульсным потоком белого полихроматического света, пропущенного через фильтр, представлявший собой плоскопараллельную полированную пластину из кремния.

Для исключения влияния центров прилипания, возникавших в исследуемых образцах при облучении, в процессе измерения образцы освещались непрерывным потоком белого света. При анализе распределения удельного сопротивления в облученных образцах не выявлено какой-либо неоднородности, способной повлиять на результаты измерения времени жизни. Количество избыточных носителей заряда (Δn и Δp), определенное по изменению падения напряжения на