

блужденного ионами фосфора, наблюдалась сильная зависимость концентрации от температуры (рисунок). Вероятно, при имплантации Ge и последующем отжиге образуется глубокий уровень с энергией ионизации, близкой к $0.09 \div 0.11$ эВ, такой энергии ионизации соответствует комплекс $[^4]$ типа вакансии — дефект внедрения (рисунок, кривая 1). Предварительная обработка ионами фосфора приводит к исчезновению глубокого уровня (рисунок, кривая 2). Поскольку такое явление не наблюдается при внедрении ионов кремния и селена, его можно объяснить амфотерным поведением германия в фосфиде индия и образованием в случае германия более сложных радиационных дефектов $[^5]$. Для температурных зависимостей $\mu(T)$ в диапазоне $T = 77 \div 300$ К характерно, что величина подвижности при 77 К значительно ниже, чем при 300 К (таблица), следовательно, при рассеянии носителей заряда в таких образцах имеется существенный вклад рассеяния, соответствующий закону $\mu \sim T^P$, где $P > 0$. К такому типу рассеяния относится рассеяние на ионизированной примеси и диполях, образованных парами противоположно заряженных ионов, что может быть связано с высокой концентрацией железа в узлах индия. С помощью измерений эффекта Холла на полуизолирующем InP установлено, что концентрация Fe составляет 10^{17} см $^{-3}$. В зависимости от режимов ионного легирования и постимплантационного отжига внедренная примесь и железо могут вести себя различным образом, неоднозначно влияя на общую картину легирования.

Эксперименты по облучению InP ионами кремния с предварительным введением фосфора и с последующим импульсным отжигом радиационных дефектов показали возможность получения донорных слоев с высокими и стабильными электрическими параметрами. Предварительное облучение ионами фосфора при легировании полуизолирующего InP кремнием и последующий импульсный отжиг позволили снизить контактное сопротивление для диодов Ганна в структуре Au/AuGe/Ni/InP с 10^{-2} до 10^{-6} Ом·см 2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] L. A. Christel, J. F. Gibbons. J. Appl. Phys., 52, 5050 (1981).
- [2] C. R. Zeisse, R. Reedy. J. Appl. Phys., 52, 3353 (1981).
- [3] D. E. Holmes, R. G. Wilson, P. W. Yu. J. Appl. Phys., 52, 3396 (1981).
- [4] А. А. Гринсон, А. А. Гуткин, С. Г. Метревели. Зарубежная радиоэлектроника, вып. 11, 57 (1987).
- [5] В. Д. Вернер, А. А. Пшеничный, Г. И. Радауцан. Зарубежная электронная техника, 9 (267), 73 (1983).

Редактор Л. В. Шаронова

ФТП, том 27, вып. 8, 1993

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЧИСТЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ ИНДИЕМ МОНОКРИСТАЛЛОВ $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Г. В. Лашкарев, А. В. Бродовой, А. Л. Мирец, С. П. Колесник,
Г. А. Зыков, М. С. Никитин

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича Академии наук Украины,
252680, Киев, Украина

(Получено 25 декабря 1992 г. Принято к печати 15 марта 1993 г.)

В связи с разработкой приборов для инфракрасной области спектра не уменьшается интерес к твердым растворам теллурида кадмия и ртути. Однако прост-

ранственные флуктуации состава и собственных дефектов, включения второй фазы, структурные нарушения существенно влияют на свойства кристаллов $Cd_{1-x}Hg_xTe$ и на стабильность приборов, изготовленных на их основе. Увеличение однородности и стабильности свойств твердых растворов $Cd_{1-x}Hg_xTe$ может быть достигнуто введением в состав матрицы примеси индия, что приводит к повышению однородности электрофизических и диэлектрических параметров кристаллов.

В настоящей работе изучены магнитная восприимчивость (МВ), ЭПР и выполнена масс-спектрометрия монокристаллов твердых растворов $n-Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$, чистых и легированных индием. Параметры исследованных образцов представлены в таблице.

Параметры электронных образцов $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$

№ образца	Концентрация электронов при 77 К, 10^{14} см^{-3}	Концентрация индия при 4.2 К по данным МВ, 10^{19} см^{-3}	Концентрация индия по данным масс-спектрометрии, отн. ед.
1	1.8	—	—
2	1.7	—	—
3	1.2	—	—
4	6.0	3.9	34
5	1.4	1.9	15

Измерения МВ производились в диапазоне температур $4.2 \div 300$ К по методу Фарадея с помощью электронных микровесов с автматической компенсацией по методике, описанной в [1].

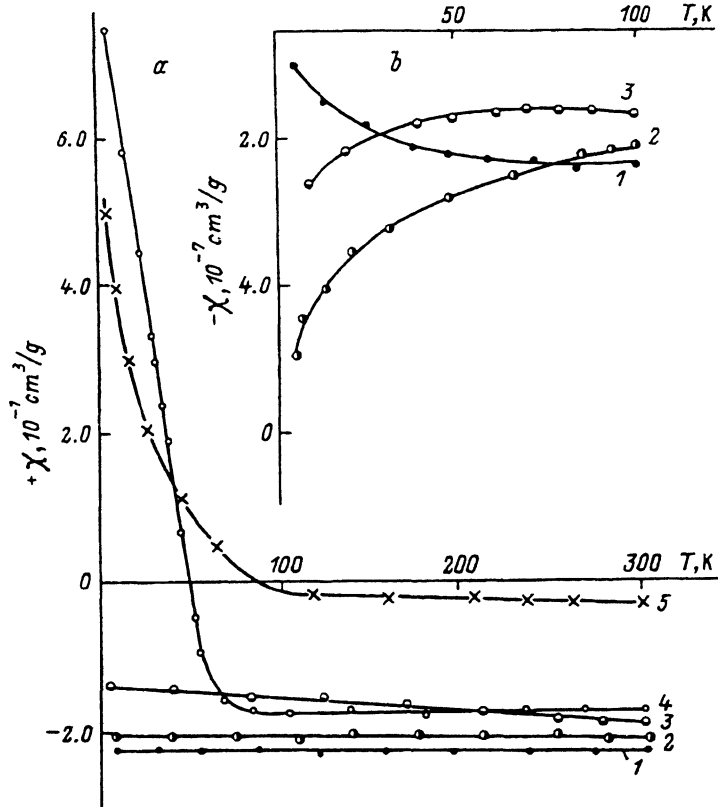
Исследования ЭПР выполнены на спектрометре с ВЧ модуляцией ($\nu_M = 100$ кГц) SE/X-2544 «Радиопан». Спектрометр был модифицирован так, что имелась возможность развертки постоянного поля H от некоторого «отрицательного» значения ($-H$) через $H = 0$ до величины ($+H$).

Монокристаллы $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$ выращивались модифицированным методом Бриджмена, затем разрезались на шайбы толщиной $1 \div 2$ мм в плоскости (111). Из шайбы вырезались образцы размером $8 \times 3 \times 0.6$ мм³, которые непосредственно перед измерениями травились полирующим травителем Вг + НВг.

На рисунке, а представлены температурные зависимости МВ серии образцов n -типа, чистых и легированных In, с различной концентрацией носителей тока. Видно, что МВ всех нелегированных образцов диамагнитна, практически не зависит от температуры, с восприимчивостью близкой к МВ кристаллической решетке $\chi_l = 1.5 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{г}$, определенной в [2]. Для кристаллов, легированных In, обнаружен существенный парамагнитный вклад, возрастающий при понижении температуры.

Измерения сигнала ЭПР в образцах $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$ (In) при $T = 300$ К показали наличие анизотропной линии с фактором Ланде $g = 2.183 \pm 0.001$, как мы считаем, связанной с парамагнитными ионами In^{2+} [2]. Сверхтонкое расщепление в спектрах ЭПР отсутствовало.

Если низкотемпературный парамагнетизм $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$ (In) обусловлен ионами In^{2+} со спином $S = 1/2$, то концентрация парамагнитных центров при $T = 4.2$ К имеет величину $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (см. таблицу). Измерения сигнала ЭПР в нулевом поле (методика описана в [3]) монокристаллов $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$ (In) обнаружало наличие петли гистерезиса ферромагнитной природы. При концентрации примеси индия $N_{In} \sim 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ среднее расстояние между ионами при условии их равномерного распределения составляет ~ 26 Å. Поскольку период решетки $a \sim 6.4$ Å, ионы индия находятся на расстоянии 3—4 периодов решетки. При столь низкой концентрации носителей тока обменное взаимодействие между ионами отсутствует.



Температурные зависимости магнитной восприимчивости монокристаллов $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$ чистых и легированных индием (номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице). *a* — свежеразработанные образцы $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$, *b* — образцы $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$ после старения на воздухе..

Однако при выращивании легированных кристаллов $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$ (In) вследствие неравномерного распределения магнитных ионов по образцу возможно образование в решетке магнитных комплексов, связанных между собой обменным взаимодействием. Вклад в МВ такой подсистемы должен описываться законом Кюри—Вейса $\chi_{pr}^{-1} \sim T - \Theta$, где Θ является функцией интеграла обменного взаимодействия между парамагнитными ионами индия в комплексе. Экспериментально мы наблюдаем отклонение температурного хода МВ от закона Кюри в области $T \sim 4.2 \div 80$ К. Это, по-видимому, связано с различиями в размерах комплексов (числом близлежащих ионов In^{2+}), вследствие чего интеграл обменного взаимодействия, а следовательно постоянная Вейса для различных комплексов не будет фиксированной величиной. Кроме того, при $T > \Theta$ изменяется и концентрация парамагнитных ионов, не связанных обменным взаимодействием (происходит распад комплексов).

Микровключения других фаз были обнаружены авторами работы [4] в узкощелевых твердых растворах PbTe и $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, легированных индием, где указано, что состав микровключений существенно отличается от состава матрицы основного вещества и содержит индий в качестве компоненты.

На неоднородное распределение индия в $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$ указывают также данные по масс-спектрометрии.

Для проведения локального микроанализа применялся двухканальный лазерный масс-спектрометр, позволяющий производить анализ элементного состава и

газосодержания с точностью $\sim 10^{-4}$ ат%. Оказалось, что концентрация индия на поверхности образцов при измерениях в нескольких точках различается по величине до семи раз.

Обнаружена чувствительность низкотемпературного поведения МВ к состоянию поверхности (свежетавленная и после старения на воздухе) нелегированных образцов. Так на свежетавленных кристаллах в области $T < 80$ К МВ практически не зависит от температуры (рисунок, а). Тогда как на образцах, выдержанных на воздухе около месяца, в аналогичной области температур наблюдается сильная температурная зависимость МВ с различными знаками производной (рисунок, б).

По-видимому, это связано с поверхностью монокристаллов $Cd_{1-x}Hg_xTe$, где, согласно [5], формируются области отрицательных и положительных зарядов, причем концентрация электронов в обогащенной области поверхности может увеличиваться на порядок. Последнее обязательно как окислению материала (образование проводящего окисла CdO электронного типа), так и обогащению поверхностного слоя ртутью [6]. При этом степень окисления зависит от структурного совершенства кристалла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] G. V. Lashkarev, D. F. Migley, A. D. Shevchenko, K. D. Tovstyuk. Phys. St. Sol. (b), 161, 663 (1974).
- [2] Г. В. Лашкарев, А. В. Бродовой, А. Л. Мирец, Г. А. Зыков. ФТП, 26, 145 (1992).
- [3] Н. М. Зарицкий, А. А. Кончиц, С. П. Колесник, В. А. Стефанович, О. А. Миронов, С. В. Чистяков. Препринт. Институт полупроводников АНУ. Киев (1991).
- [4] S. M. Duguzhev, A. V. Makhin, V. A. Moshnikov, A. J. Shelykh. Cryst. Res. and Techn., 25, 145 (1990).
- [5] P. Hoschl, P. Moravec, J. Frans, R. Crill, E. Belas. J. Appl. Phys., 70, 313 (1991).
- [6] Н. Н. Берченко. Автореф. докт. дис., 33. Киев (1991).

Редактор Т. А. Полянская

ФТП, том 27, вып. 8, 1993

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ВАКАНСИЙ ХАЛЬКОГЕНА В ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННОМ СУЛЬФИДЕ СВИНЦА

А. Н. Вейс

Санкт-Петербургский государственный технический университет, 195251, Санкт-Петербург, Россия

(Получено 10 марта 1993 г. Принято к печати 25 марта 1993 г.)

В настоящее время ионная имплантация достаточно широко применяется в производстве полупроводниковых приборов на основе халькогенидов свинца. Этим обусловлен интерес к изучению физических свойств ионно-имплантированных халькогенидов свинца и энергетического спектра радиационных дефектов. Среди всех халькогенидов свинца, легированных методом ионной имплантации, наиболее подробно изучен $PbTe$. В частности, при исследовании спектров коэффициента оптического поглощения $\alpha(\hbar\omega)$ было показано, что энергетический спектр радиационных дефектов в $PbTe$ состоит из двух термов: синглета E_1 и дублета E_2 [1, 2]. Сопоставление экспериментальных данных [1, 2] с результатами теоретического исследования [3] позволило предположить, что обнаруженные в