

- [6] Takahashi Y. — Bull. Chem. Soc. Japan, 1972, v. 45, N 1, p. 4—7.
 [7] Смирнов И. Н., Бахтиярова М. В. Изменения электронной структуры атомов фтора в монокристаллах кремния. — ДАН СССР, 1987, т. 294, в. 3, с. 607—610.

Получено 23.01.1987
 Принято к печати 30.09.1987

ФТП, том 22, вып. 2, 1988

ВЛИЯНИЕ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПРИМЕСНОГО ГЕРМАНИЯ

Довбыш Л. Е., Попко В. И., Романов О. Г.,
 Цмоць В. М., Шубак М. И.

При исследовании радиационных дефектов (РД) в полупроводниках обычно используют ЭПР, ИК спектроскопию, измерения коэффициента Холла и проводимости. Наиболее информативным методом является ЭПР, однако при исследовании германия он малоприменим из-за присутствия парамагнитных ядер изотопа ^{71}Ge . В данной работе предпринята попытка для исследования РД в германии применить измерения коэффициента Холла, проводимости и магнитной восприимчивости (МВ).

Для исследования были взяты три серии монокристаллов Ge с различными концентрациями ртути (Hg) и сурьмы (Sb). Концентрации атомов ртути (N_{Hg}) и сурьмы (N_{Sb}) для каждой серии кристаллов приведены в таблице. Прово-

Серия	№ образца	Концентрация ртути N_{Hg} , см^{-3}	Концентрация сурьмы N_{Sb} , см^{-3}	Поток Φ , н/см 2	$\chi \cdot 10^8$, $\text{см}^3/\text{г}$	После отжига при комнатной температуре (6 месяцев) $\chi \cdot 10^8$, $\text{см}^3/\text{г}$	После отжига при $T = 80^\circ\text{C}$ $\chi \cdot 10^8$, $\text{см}^3/\text{г}$
1	1	$1.5 \cdot 10^{14}$	$1.5 \cdot 10^{13}$	—	—10.1	—10.1	—10.1
	2			$6 \cdot 10^{13}$	—10.1	—10.0	—10.0
	3			$(3 \div 3.5) \cdot 10^{14}$	—10.1	—10.1	—10.1
	4			10^{15}	—10.1	—10.1	—10.1
2	5	$2.5 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{13}$	—	—10.0	—10.1	—10.0
	6			$(3 \div 3.5) \cdot 10^{14}$	—9.9	—10.1	—10.1
	7			10^{15}	—9.7	—10.0	—10.1
8	$(2.5 \div 3) \cdot 10^{15}$	—9.7	—10.1	—10.1			
3	9	10^{16}	$3 \cdot 10^{13}$	—	—10.1	—10.1	—10.1
	10			$6 \cdot 10^{13}$	—9.1	—9.5	—10.0
	11			$(3 \div 3.5) \cdot 10^{14}$	—9.3	—9.6	—10.1
	12			10^{15}	—9.3	—9.6	—10.1
	13			$(2.5 \div 3) \cdot 10^{15}$	—9.2	—9.6	—10.1

димность и коэффициент Холла измерялись при температуре от 4.2 до 300 К. Магнитная восприимчивость измерялась методом Фарадея в магнитных полях от 0.3 до 4.0 кЭ и в температурном интервале $77 \div 300$ К. Максимальная погрешность измерения МВ не превышала 1%. Кристаллы облучались нейтронами реактора при 295 К. Измерения проводимости и коэффициента Холла проводились через 1—2 суток после облучения кристаллов, а МВ — через 2—3 недели.

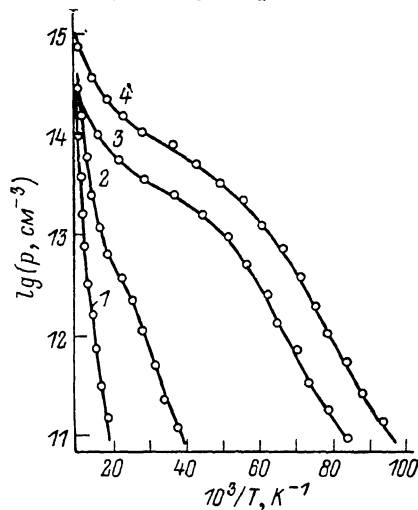
На рисунке показаны температурные зависимости концентрации дырок для кристаллов серии 1 ($N_{\text{Hg}} = 5 \cdot 10^{14}$, $N_{\text{Sb}} = 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) в исходном состоянии и после облучения. Из приведенных кривых следует, что для исходных кристаллов, т. е. до их облучения, увеличение концентрации дырок в области примес-

ной проводимости (при $T > 40$ К) связано с ионизацией первого акцепторного уровня ртути, равного $E_v + 0.09$ эВ [1], а в облученных кристаллах — с ионизацией более мелких уровней с энергиями ионизации $E_v + 0.03$ и $E_v + 0.01$ эВ.

Из приведенных зависимостей (кривые 3, 4) следует, что концентрация радиационных дефектов увеличивается линейно с увеличением дозы облучения. Действительно, концентрации равновесных носителей тока в образцах 3 и 4 при $T < 25$ К (когда можно пренебречь ионизацией атомов ртути и РД с энергией ионизации 0.03 эВ) различаются в 3.5 раза, что в точности соответствует увеличению потока нейтронов (от $3 \cdot 10^{14}$ до $1 \cdot 10^{15}$ н/см²). При потоке нейтронов $1 \cdot 10^{15}$ н/см² суммарная концентрация РД достигает величины $5 \cdot 10^{14}$ см⁻³

и сравнивается с концентрацией атомов ртути. Аналогичные результаты получены для образцов серий 2 и 3.

Увеличение концентрации дырок в исследованных образцах, по-видимому, связано с переходом атомов ртути из электрически неактивного состояния в зарядаемое с образованием с вакансиями и дивакансиями комплексов акцепторного типа, энергии ионизации которых соответственно равны $E_v + 0.03$ и $E_v + 0.01$ эВ. Участие сурьмы в процессе дефектообразования при облучении



Температурные зависимости концентрации дырок для кристаллов серии 1.

1 — для исходного кристалла. Доза Φ , н/см²: 2 — $6 \cdot 10^{14}$, 3 — $3 \cdot 10^{14}$, 4 — 10^{15} . E_v , эВ: 1 — $E_v + 0.09$, 2 — $E_v + 0.03$, 3, 4 — $E_v + 0.01$.

кристаллов (в отличие от работы [1]) незначительно из-за ее малой концентрации.

Следует также учитывать возможность образования в исследуемых кристаллах в процессе их облучения реакторными нейтронами сложных комплексов типа разупорядоченных областей. Однако, поскольку величина холловской подвижности облученных и необлученных образцов серии 1 в интервале температур $10 \div 30$ К не зависит от дозы облучения и составляет $(1.4 \div 1.6) \cdot 10^5$ см²/В \times с, естественно предположить, что эти разупорядоченные области либо достаточно быстро (в течение 1–2 суток) отжигаются при комнатной температуре, либо не оказывают влияния на подвижность носителей тока в Ge(Hg) при низких температурах.

Магнитная восприимчивость как исходных необлученных, так и облученных кристаллов не зависит ни от напряженности магнитного поля, ни от температуры. Значения МВ для каждой серии кристаллов приведены в таблице. Оказалось, что значения МВ исходных кристаллов всех трех серий в пределах погрешности измерений одинаковы и равны $-10.4 \cdot 10^{-8}$ см³/г, что свидетельствует об отсутствии влияния легирующих примесей в заданных концентрациях на магнитные свойства кристаллов германия до их облучения.

При облучении кристаллов серии 1 ($N_{Hg} = 5 \cdot 10^{14}$, $N_{Sb} = 1.5 \cdot 10^{13}$ см⁻³) потоками нейтронов от $6 \cdot 10^{13}$ до 10^{15} н/см² не изменяются значения их МВ по сравнению с исходными. Однако облучение кристаллов серий 2 ($N_{Hg} = 2.5 \cdot 10^{15}$, $N_{Sb} = 3 \cdot 10^{13}$ см⁻³) и 3 ($N_{Hg} = 10^{16}$, $N_{Sb} = 3 \cdot 10^{13}$ см⁻³) приводит к уменьшению их диамагнетизма соответственно на 2–3 и 7–10 % по сравнению с исходными. Важно отметить, что при изменении потока нейтронов от $6 \cdot 10^{13}$ до $(2.5 \div 3) \times 10^{15}$ н/см² магнитная восприимчивость каждой серии кристаллов не изменяется, т. е. значения МВ всех облученных кристаллов одной серии практически равны (см. таблицу). Это свидетельствует о том, что образование парамагнитных центров в кристаллах серий 2 и 3 происходит уже при нейтронном потоке 6×10^{13} н/см².

С целью выяснения природы наблюдаемого парамагнетизма исследованных кристаллов изучалось влияние отжига на их магнитные свойства. Сначала проводился отжиг всех образцов при комнатной температуре в течение 6 месяцев. Оказалось, что значения диамагнитной восприимчивости исходных образцов всех трех серий и облученных образцов серии 1 не изменились. Магнитная восприимчивость облученных кристаллов серии 2 после отжига стала равной МВ исходного кристалла (образец 5), что свидетельствует о полном отжиге введенных РД. Диамагнитная восприимчивость облученных кристаллов серии 3 увеличилась на 3—4 %, но еще не достигла значения МВ исходного кристалла (образец 9), что свидетельствует о частичном отжиге РД.

Процессы изохронного отжига в образцах $\text{Ge}\langle\text{Hg}\rangle$ после реакторного облучения рассмотрены впервые. Изохронный отжиг кристаллов всех трех серий проводился начиная от комнатной температуры в течение 20 мин с интервалом 20 °С. Отжиг исходных кристаллов всех трех серий и облученных кристаллов серий 1 и 2 в интервале температур 20 ÷ 120 °С не привел к изменению значения их МВ, поскольку отжиг РД в этих кристаллах уже состоялся при комнатной температуре. Полный отжиг РД в кристаллах серии 3 произошел при 80 °С, что связано с развалом сложных комплексов, образующихся при облучении, и образованием вследствие большой подвижности атомов ртути [2] первоначальных комплексов. Дальнейшее увеличение температуры отжига не изменяет величины их магнитной восприимчивости. Общая картина значений МВ после полного отжига парамагнитных центров представлена в таблице.

Авторы признательны Ф. А. Зайтову за участие в обсуждении настоящей работы.

Л и т е р а т у р а

- [1] Васильева Е. Д., Емцев В. В. Процессы дефектообразования в $\text{Ge}\langle\text{Hg}\rangle$ при гамма-облучении. — ФТП, 1983, т. 17, в. 1, с. 173—176.
[2] Зайтов Ф. А., Исаев Ф. К., Горшков А. В. Дефектообразование и диффузионные процессы в некоторых полупроводниковых твердых растворах. Баку, 1984. 212 с.

Дрогобычский государственный
педагогический институт им. Ив. Франко

Получено 19.11.1986
Принято к печати 8.10.1987