

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИМПЛАНТИРОВАННЫХ $\text{Xe}^+$ , $\text{Cu}^+$ , $\text{Ag}^+$ И ТЕРМИЧЕСКИ ОТОЖЖЕННЫХ КРИСТАЛЛОВ $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

Ибрагимова М. И., Барышев Н. С., Хайбуллин И. Б.,  
Ахмедова Ф. И., Фадеева А. П.

Установлено, что имплантация ионов серебра и меди в сочетании с диффузионным термическим отжигом позволяет управлять электрическими свойствами кристаллов  $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ . В зависимости от дозы имплантации ионов можно достичь снижения концентрации электронов вплоть до инверсии типа проводимости  $n \rightarrow p$ . Определена величина коэффициента использования ионов меди и серебра  $f=0.5 \pm 0.1$ . Показано, что в результате имплантации и диффузионного отжига кристаллов  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  наряду с акцепторными образуются и нейтральные рассеивающие центры.

В настоящее время значительное внимание уделяется вопросам ионного легирования (ИЛ) твердых растворов  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ . Большинство работ по ИЛ кристаллов  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  посвящено изучению электрофизических свойств ионно-легированных слоев и характеристик сформированных этим методом  $n$ - $p$ -переходов. Отметим также, что использование известных преимуществ метода ИЛ (таких как возможность введения строго определенного количества примеси, чистота процесса и т. д.) в сочетании с последующим диффузионным термическим отжигом (ДТО) позволяет весьма эффективно управлять электрическими и фотоэлектрическими свойствами монокристаллов  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  путем компенсации остаточных электроактивных примесей и дефектов в объеме материала [1, 2].

В данной работе представлены результаты изучения влияния имплантации ионов серебра, меди и ксенона с последующим ДТО на электрические свойства монокристаллов  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ . Выбор указанных ионов в качестве легирующих обусловлен тем, что, согласно данным [3], серебро и медь характеризуются достаточно высокими значениями коэффициентов диффузии в исследуемом материале, а ксенон, будучи электронейтральным, удобен для сравнительных экспериментов.

### Методика эксперимента

Для исследований использованы монокристаллы  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$   $n$ -типа, выращенные различными методами, с содержанием теллурида кадмия  $x=0.19-0.32$ . Состав кристаллов определялся из данных измерений коэффициента Холла в области собственной проводимости, по длинноволновой границе спектрального распределения фотопроводимости или по положению края основной полосы поглощения. Ионное легирование свежепротравленных (в 2%-м растворе брома в этиловом спирте) пластинок  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  проводилось на ускорителе ионов ИЛУ-3 при комнатной температуре в широком интервале доз  $D=10^{14}-6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ; энергия ионов  $E$  составляла 30-80 кэВ. Плотность ионного тока не превышала  $0.7 \text{ мкА/см}^2$  для предотвращения нагрева образцов в процессе ИЛ. Для однородного перераспределения внедренной примеси по всей толщине пластины и отжига радиационных дефектов (РД) проводился последующий ДТО в насыщенных парах ртути в условиях, аналогичных описанным в работе [4]. Наряду

с исследуемыми образцами отжигались также контрольные образцы, вырезанные из той же пластины. После отжига образцы шлифовались с обеих сторон абразивным порошком МЗ и обрабатывались в полирующем травителе для удаления приповерхностных слоев толщиной  $\sim 100$  мкм. С целью определения влияния РД на электрические свойства  $Cd_xHg_{1-x}Te$  были проведены эксперименты по имплантации электронейтрального ксенона с последующим ДТО в идентичных условиях. Измерения постоянной Холла  $R_H$  и электропроводности  $\sigma$  проводились методом Ван-дер-Пау при температурах 77 и 300 К. На ряде образцов были измерены температурные зависимости  $R_H$  и  $\sigma$  в интервале 4.2—300 К.

## Результаты измерений

Эксперименты по имплантации в  $Cd_xHg_{1-x}Te$  ионов ксенона с энергиями 30, 60 кэВ и дозами вплоть до  $2 \cdot 10^{16}$  см $^{-2}$  с последующим диффузионным термическим отжигом показали, что РД, возникающие в процессе ионной бомбардировки, практически полностью отжигаются и не влияют на электрические параметры кристаллов с электронным и дырочным типами проводимости. Типичные результаты представлены в таблице.

Электрические параметры  $Cd_xHg_{1-x}Te \leftrightarrow Xe^+$  при 77 К до и после ИЛ и ДТО

Со- став, x	Параметры до ИЛ				Условия ИЛ		Параметры после ИЛ и ДТО					
	тип	$(1/e   R_H  ) \cdot 10^{-15}$ , см $^{-3}$		$\rho \cdot 10^2$ , Ом · см	$(  R_H  _{\sigma} \times$ $\times 10^{-4}$ , см $^2$ /В · о	$D \cdot 10^{-16}$ , см $^{-2}$	$E$ , кэВ	тип	$(1/e   R_H  ) \cdot 10^{-15}$ , см $^{-3}$		$\rho \cdot 10^2$ , Ом · см	$(  R_H  _{\sigma} \times$ $\times 10^{-4}$ , см $^2$ /В · о
		500 э	15 000 э						500 э	15 000 э		
0.255	n	5.53	5.48	2.59	4.36	1.25	30	n	5.4	5.34	2.79	4.2
0.24	n	4.34	4.37	2.85	5.05	1.25	60	n	4.56	4.53	2.82	4.8
0.21	p	12.2	14.0	92.2	0.056	1.25	30	p	11.4	13.2	86.6	0.062

На основании многочисленных экспериментов было установлено, что, варьируя дозу имплантации ионов  $Cu^+$  и  $Ag^+$  в  $n-Cd_xHg_{1-x}Te$ , можно достичь снижения концентрации электронов в исходных кристаллах вплоть до инверсии типа проводимости и получить материал как со смешанной, так и с дырочной проводимостью. Кроме того, были проведены эксперименты по ионной имплантации серебра в кристаллы  $Cd_xHg_{1-x}Te$  с исходной дырочной проводимостью. При этом происходят увеличение концентрации дырок и уменьшение величины холловской подвижности.

Для оценки степени однородности распределения имплантированных атомов серебра и меди по толщине пластин, а также коэффициента их использования на ряде образцов проведены измерения электрических параметров при 77 К при последовательном контролируемом удалении (шлифованием с обеих сторон и последующим травлением в растворе брома в этиловом спирте) поверхностных слоев. Установлено, что в пределах погрешности измерений значения электрических параметров сохраняются неизменными.

На основании результатов измерений электрических параметров был определен коэффициент использования  $f$  (доля электроактивной примеси относительно общего ее количества) имплантированных в  $Cd_xHg_{1-x}Te$  ионов серебра и меди. Для определения  $f$  были использованы данные, полученные только на тех кристаллах, которые после ИЛ и ДТО имели четко выраженную дырочную или электронную проводимость. На рис. 1 приведена зависимость концентрации носителей  $N$ , определяемой действием внедренной акцепторной примеси ( $Cu$  или  $Ag$ ), от общей концентрации внедренной примеси, равной  $D/a$  ( $a$  — толщина пластины). Из этой зависимости следует, что величина  $f$  для ионов серебра и меди равняется  $0.5 \pm 0.1$  при дозах ИЛ  $D > 10^{15}$  см $^{-2}$  (штриховая линия на рис. 1 соответствует 100%-й электрической активации внедренной примеси).

На нескольких образцах  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  до и после ионного легирования серебром или медью с последующим ДТО были проведены измерения постоянной Холла  $R_H$  и электропроводности  $\sigma$  в интервале температур 4.2—300 К. На рис. 2 приведены температурные зависимости  $R_H$  для четырех образцов. Как видно из рисунка, имплантация ионов серебра в образцы 1 и 2 с последующим отжигом привела к уменьшению концентрации электронов в области примесной проводимости. В образцах 3 и 4, имплантированных соответственно ионами серебра и меди, после ДТО произошел переход к дырочной проводимости при низких температурах. Температурные зависимости холловской подвижности электронов для образцов 1 и 2 до и после ИЛ серебром приведены на рис. 3. Из рисунка видно, что в легированных кристаллах величина

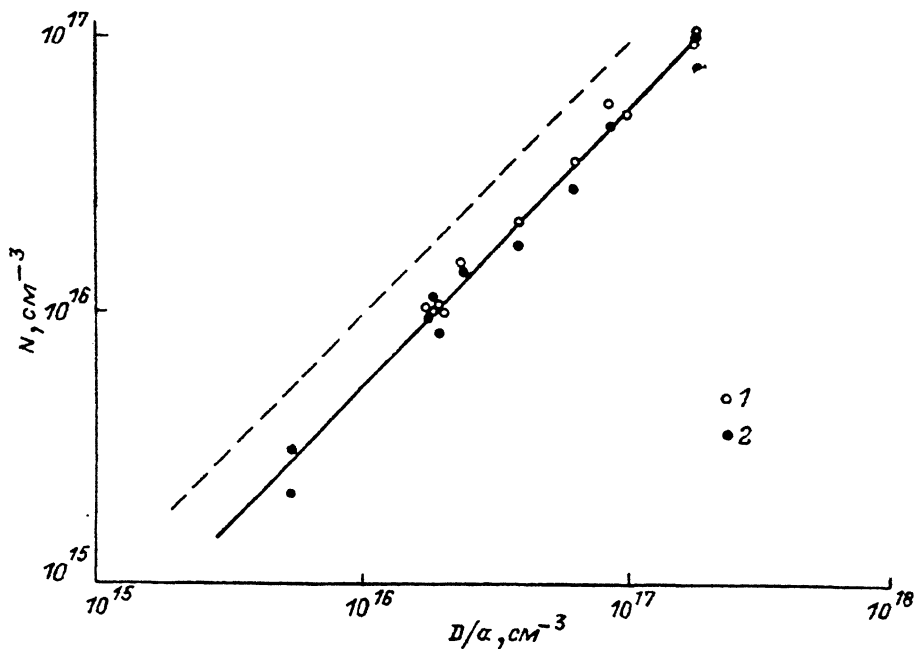


Рис. 1. Зависимость, определяющая коэффициент использования имплантированных ионов  $\text{Cu}^+$  (1) и  $\text{Ag}^+$  (2) в  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ .

холловской подвижности в области низких температур значительно меньше, чем в исходных. При температурах выше 80 К для образца 1 и выше 100 К для образца 2 зависимости  $\mu_n(T)$  до и после ионного легирования в сочетании с диффузионным термическим отжигом определяются в основном рассеянием на полярных оптических фононах [5], тогда как в низкотемпературной области преобладает рассеяние на примесных центрах.

Количественные оценки концентраций рассеивающих центров, вводимых в  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  в результате имплантации и отжига, проведены для образца 1. Электронный газ в данном образце с  $x=0.32$  и концентрациями носителей  $n_1 \approx 1.4 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> до легирования и  $n_2 \approx 7 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> после него можно считать невырожденным. Оценка концентрации ионизированных центров  $N_I$  проводилась по формуле Брукса—Херринга. При расчетах учитывался вклад в рассеяние электронов на колебаниях решетки. Температурный ход решеточной подвижности электронов  $\mu_L$  для  $\text{Cd}_{0.32}\text{Hg}_{0.68}\text{Te}$  был взят из работы [5]. Концентрация ионизированных центров в исходном образце 1 оказалась равной  $N_I = 6.5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. При вычислении величины  $N_I^{\text{ИЛ}}$  в легированном материале считалось, что в результате имплантации и диффузионного отжига вводятся однозарядные акцепторы, занимающие узлы в подрешетке металла (это согласуется с результатами работы [6] для меди). Учет в рассеянии электронов лишь введенного  $(D/a) f = 7.2 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> количества акцепторных центров не позволяет объяснить значительное снижение подвижности в области низких

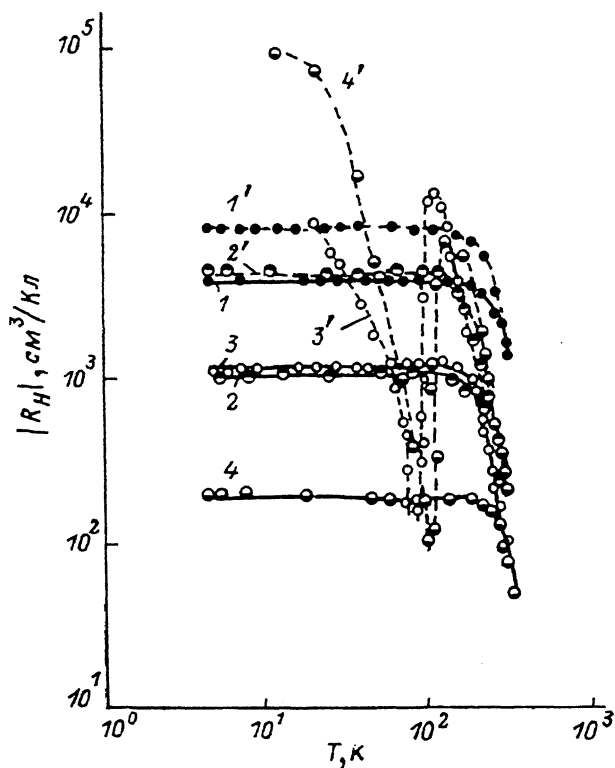


Рис. 2. Температурные зависимости постоянной Холла до (сплошные линии) и после ИЛ и ДТО (штриховые) для четырех образцов  $Cd_xHg_{1-x}Te$  (1-4), облученных разными дозами  $Ag^+$  (1'-3') и  $Cu^+$  (4').  
 Доза облучения,  $см^{-2}$ : 1' -  $1.87 \cdot 10^{14}$ , 2' -  $5.6 \cdot 10^{14}$ , 3' -  $1.2 \cdot 10^{15}$ , 4' -  $3.7 \cdot 10^{15}$ .  $x$ : 1' - 0.32, 2' - 0.3, 3' - 0.216, 4' - 0.214.

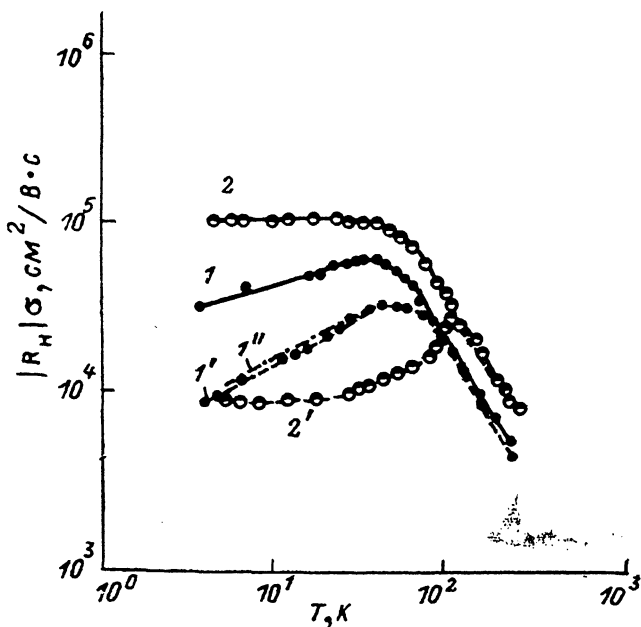


Рис. 3. Температурные зависимости подвижности электронов для образцов 1, 2 до (сплошные линии) и после ИЛ серебром и ДТО (штриховые).  
 Штрихпунктирная линия 1'' - расчетная зависимость  $\mu_n$  для образца 1 после ИЛ и ДТО.

температур. Поэтому было сделано предположение, что в результате данной обработки образуются также нейтральные рассеивающие центры. На наличие нейтральных центров в исследованных образцах указывает более слабое изменение подвижности электронов с температурой, чем при одном только рассеянии их на ионизированных центрах (рис. 3). Концентрация нейтральных рассеивающих центров  $N_N$  оценивалась по формуле Эргинсоа. Вычисления показали, что для образца 1 величина  $N_N$  составляет  $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  при соответствующей подвижности  $\mu_N \approx 5 \cdot 10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . На рис. 3 приведена расчетная температурная зависимость подвижности электронов  $\mu_n$ , которая хорошо согласуется с экспериментальной кривой для образца 1, имплантированного серебром, при температурах  $\leq 40 \text{ К}$ , что подтверждает высказанное выше предположение.

Таким образом, в результате данных исследований показано, что ионная имплантация акцепторных примесей  $\text{Cu}^+$  и  $\text{Ag}^+$  в  $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  в сочетании с диффузионным термическим отжигом дает возможность управлять электрическими свойствами в объеме материала.

#### Список литературы

- [1] Барышев Н. С., Ибрагимова М. И., Хайбуллин И. Б. // Матер. VII Всес. симп. по полупроводникам с узкой запрещенной зоной и полуметаллам. Львов, 1986. Ч. I. С. 54—56.
- [2] Ибрагимова М. И., Ахмедова Ф. И., Барышев Н. С., Хайбуллин И. Б. // Матер. Всес. семинара по проблеме «Физика и химия полупроводников». Павлодар, 1987. С. 78—81.
- [3] Johnson E. S., Schmit J. L. // J. Electron. Mater. 1977. V. 6. N 1. P. 25—38.
- [4] Ryssel H., Lang G., Biersack J. P., Müller K., Krüger W. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1980. V. ED-27. N 1. P. 58—62.
- [5] Scott W. // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. N 3. P. 1055—1062.
- [6] Vidyantath H. R. // J. Electrochem. Soc. 1981. V. 128. N 12. P. 2609—2619.

Казанский  
физико-технический  
институт КФ АН СССР

Получена 12.01.1989  
Принята к печати 9.03.1989