

## ВЛИЯНИЕ $\gamma$ - ОБЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ)

Э.И.ЗУЛЬФИГАРОВ, С.И.САФАРОВА, С.А.АЛИЕВ

Сектор РИ АН Азербайджана, Институт Физики АН Азербайджана  
Баку-143, пр. Г.Джавида, 33.

*Рассмотрено влияние  $\gamma$ -облучения на электрические и гальваномагнитные свойства КРТ. Установлено, что действие электронного и  $\gamma$ -облучения идентичны, отличие сводится лишь к степени действия. Показано, что облучения  $\gamma$ -квантами кристаллов КРТ приводит к возрастанию концентрации электронов. Полагается, что источникам возникших электронов являются РД донорного типа на основе вахансий Те.*

Исследование влияние ионизирующего излучения на электрические и фотоэлектрические свойства кристаллов КРТ представляет интерес с научной и практической стороны. Практическая значимость связана с применением кристаллов КРТ в качестве приемников ИК излучения. Особый интерес вызывает исследование их в беспелевом и узкозонном состояниях.

В работах [1,2] рассмотрено влияние  $\gamma$ -облучения на электрические свойства кристаллов КРТ. Результаты в них противоречивы. В [1] указывается, что  $\gamma$ -облучения создают радиационные дефекты (РД) донорного типа, а в [2] заключается, что эти дефекты являются акцепторного типа.

Нам представляется, что такое противоречие следует из-за того, что результаты интерпретированы качественно, эксперимент проведен в узком температурном интервале, а гальваномагнитные свойства только при определенном значении  $H$ .

Монокристаллические образцы КРТ, полученные промышленным путем обладали р-типом проводимости с концентрацией  $p=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и  $p=7,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  соответственно для  $x=0,15$  и  $x=0,12$ . Однако ввиду перекрытия зон в исследованном интервале  $T$  осуществлялась смешанная проводимость.

Облучение  $\gamma$ - квантами  $^{60}\text{Co}$  проводилось при комнатной температуре до  $D=10^{19}$  рад. Образцы перед облучением подробно исследовались, во избежания геометрических эффектов контакты сохранялись. Измерения в слабых ( $60 \div 1000$  Э) магнитных полях проводились в соленоиде Гельм-Голца. Затем, для измерения при более высоких полях (до 22 кЭ), тот же кристалл вносился между полюсами другого электромагнита.

На рис.1,2 представлены зависимости коэффициента Холла от напряженности магнитного поля до и после облучения. Как видно,  $\gamma$ -облучение приводит к некоторому возрастанию

нию  $R$  во всем интервале исследованных  $H$ , независимо от температуры измерения. При комнатных температурах возрастание  $R$  и ее зависимость от  $H$  слабое. С понижением  $T$  влияние облучения растет, особенно это хорошо проявляется при слабых полях. С облучением точка инверсии  $H_0$  - знака  $R$  смещается в сторону высоких полей. На рис.1 для наглядности результаты по влиянию  $\gamma$ -облучения представлены в сопоставлении с влиянием на  $R$  электронного облучения, проведенного на идентичном образце (вырезанной рядом). Видно, что действие электронного облучения значительно сильнее, чем действие  $\gamma$ -облучения.

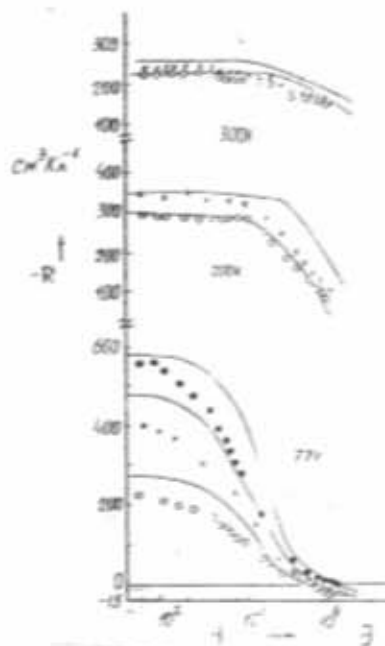


Рис.1. Полевые зависимости коэффициента Холла для образца  $\text{Cd}_{0,12}\text{Hg}_{0,88}\text{Te}$  до и после  $\gamma$ -облучения. 0-Д-0;  $x$ -Д= $10^{19}$  рад.; • - электронное облучение,  $\Phi=5,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ .

При анализе результатов по исследованию влияния электронного облучения на кинетические явления в КРТ [3] указывалось на сложность количественного определения влия-

ния облучения на параметры носителей заряда. В ней предлагается опробованная методика расчета данных, сводящаяся к привлечению данных  $R(H)$  в широком интервале  $H$  и коэффициента электропроводности. Так, на кривой  $R(H)$  можно наблюдать две характерные области: "насыщение" в слабых и сильных полях и точка инверсии знака  $R$  описываемыми:

$$eR_{H \rightarrow 0} = \frac{p\beta^2 - n}{(p\beta + n)^2} \quad (1)$$

где  $\beta = \frac{\mu_p}{\mu_n}$

В случае  $p \gg n$  инверсия знака  $R_x$  происходит при значении  $H_0(p \gg n, \beta \gg 1)$ :

$$H_0 = \frac{1}{\mu_p} \sqrt{\frac{n}{p}} \quad (2)$$

Согласно (2) смещение значения  $H_0$  с облучением в область сильных полей может быть обусловленным как уменьшением величина  $\mu_p$  и  $p$ , так и увеличением  $n$ . Поскольку в двухзонной модели влияние  $n$  на  $R_x$  наиболее существенно, то смещение  $H_0$  на право (см. рис. 1, 2) указывает на возрастание концентрации электронов при облучении.

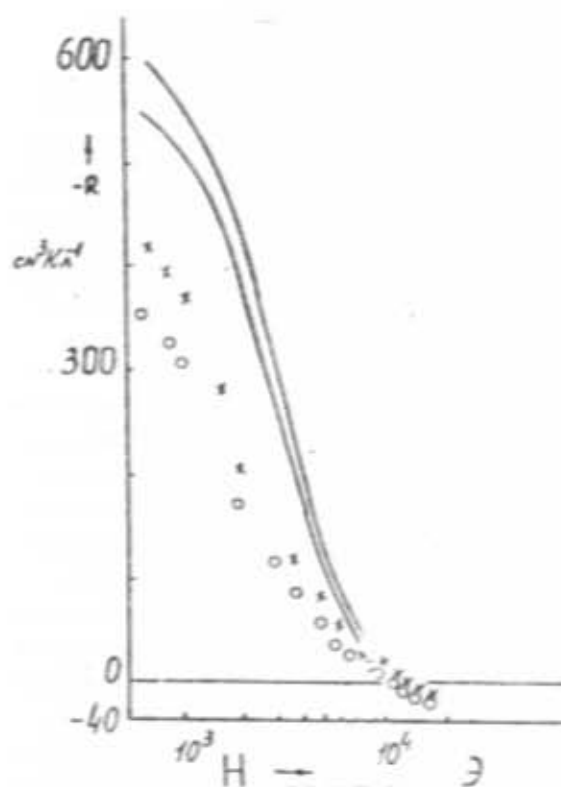


Рис. 2. Полевые зависимости коэффициента Холла для образца  $Cd_{0.15}Hg_{0.85}Te$  до и после  $\gamma$ -облучения при  $T=4,2$  К.  $\circ$ - $D=0$ ;  $\bullet$ - $D=10^{10}$  рад.

Поскольку в КРТ всегда выполняется условие  $\beta \gg 1$ , то область классически сильных полей для электронов ( $r_n \gg 1$ ) является слабой для дырок ( $r_p \ll 1$ ).

В области  $H \gg H_0$ , но  $r_p < 1$ :

$$eR_x = \frac{1}{p - 2n} \quad (3)$$

а при  $r_p > 1$

$$eR_{H \rightarrow \infty} = \frac{1}{p - n} \quad (4)$$

где  $n_i = \mu_i H$  ( $i=p, n$ ).

Проводимость в отсутствии магнитного поля имеет вид:

$$\sigma_0 = e(p\mu_p + n\mu_n) \quad (5)$$

Таким образом, совместное решение уравнений (1-5) с использованием экспериментальных значений  $R_0$ ,  $R_x$ ,  $H_0$ ,  $\sigma_0$  позволили определить все четыре параметра носителей заряда:  $n$ ,  $\mu_n$ ,  $p$ ,  $\mu_p$  до и после  $\gamma$ -облучения. Полученные результаты представлены в таблице 1 и на рис. 3. С целью проверки достоверности полученных результатов были сопоставлены данные о  $R(H)$  с теоретическими кривыми, рассчитанными по формуле

$$eR(H) = \frac{\frac{p\mu_p^2}{1+r_p^2} - \frac{n\mu_n^2}{1+r_n^2}}{\left(\frac{p\mu_p}{1+r_p^2} - \frac{n\mu_n}{1+r_n^2}\right)^2 - \left(\frac{p\mu_p r_p}{1+r_p^2} - \frac{n\mu_n r_n}{1+r_n^2}\right)^2} \quad (6)$$

справедливой при произвольном  $H$ .

При  $\beta \ll 1$  и не слишком большом значении  $p/n$  наблюдается сильная зависимость  $R$  от  $H$ . Результаты расчета представлены на рис. 1, 2 в виде сплошных линий. Хотя в некоторых областях имеет место расхождение кривых с экспериментом, тем не менее это можно считать удовлетворительным согласием, поскольку имеются и ряд других факторов влияющих на  $R(H)$ .

Прежде, чем перейти к обсуждению результатов влияния  $\gamma$ -облучения на параметры носителей заряда, необходимо проанализировать некоторые особенности  $n(T)$  в КРТ.

Из рис. 3 видно, что при низких температурах  $n$  слабо зависит от  $T$ , в интервале 20-50 К растет по закону  $n \sim T^{3/2}$ . Такая зависимость  $n(T)$  находится в качественном согласии с моделью, предложенной [4] и развитой [5], согласно которой в беспелевом состоянии в КРТ донорные уровни вырождены с дном зоны проводимости, а акцепторные расположены в зоне проводимости. Поскольку связанных состояний электронов на донорах не существует, то все доноры ионизированы начиная с очень низких температур ( $T \ll 1$ К). Если уровень Ферми расположен ниже уровня акцепторов, который вырожден с зоной проводимости, то с возрастанием  $T$  свободные электроны захватываются акцепторами,

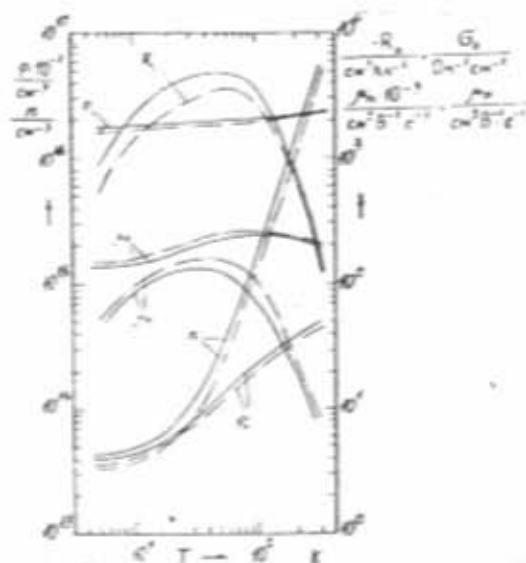


Рис.3. Температурные зависимости параметров носителей заряда в  $Cd_{0.15}Hg_{0.85}Te$  до и после  $\gamma$ -облучения. Кривые: штрих-пунктирная -  $D=0$ ; сплошная -  $D=10^{10}$  рад.

в результате чего  $n(T)$  в некотором интервале  $T$  должен проходить через минимум. При дальнейшем увеличении  $T$   $n$  растет по закону  $n \sim T^{-3/2}$ . После инверсии зон зависимость  $n(T)$  переходит в экспоненциальную форму. В [6] было показано, что при  $\Delta E_{23} > 0$  минимум на  $n(T)$  может не наблюдаться. Как видно (рис.3) экспериментальные данные о  $n(T)$  находятся в соответствии с предложенными моделями. Из данных следует, что  $\gamma$ -облучения приводит к небольшому увеличению  $n$  во всем интервале  $T$ .

Обращает на себя внимание тот факт, что дополнительная концентрация электронов, возникающая в результате  $\gamma$ -облучения от  $T$  зависит примерно также, как и концентрация электронов проводимости до облучения. Этот факт обсуждается в работе [3] при анализе результатов по влиянию электронного облучения на  $n(T)$ . Дело в том, что при облучении кристаллов КРТ концентрация наведенных электронов при относительно высоких температурах ( $T \geq 200$  К) порядка  $\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Казалось, что с понижением  $T$  они не должны исчезнуть, поскольку донорные примеси ионизированы при самых низких  $T$  и следовательно, концентрации электронов при  $T \sim 4,2$  К до и после облучения должны сильно различаться. Однако, на эксперименте отношение концентрации электронов до и после облучения не меняется вплоть до 4,2 К. Этот факт в [3] объясняется тем, что в исходных образцах концентрация акцепторных примесей значительно (на несколько порядков) превышает концентрацию доноров. Это приводит к дополнительной локализации наведенных электронов на акцепторных состояниях, что косвенно подтверждается и отклонением расчетных кривых от экспериментальных результатов. Поскольку

действие электронного и  $\gamma$ -облучения отличается лишь количественно (см. рис.1) то это рассуждение можно отнести и случаю  $\gamma$ -облучения.

Температурные зависимости подвижности позволяют утверждать, что в интервале 4,2-40 К носители заряда рассеиваются в основном на ионизированных примесях, а с повышением  $T$  сказывается и рассеяние на фононах.  $\gamma$ -облучение не изменяет характер рассеяния, оно лишь незначительно увеличивает концентрацию положительно заряженных ионов.

На первый взгляд парадоксальным является то, что с действием  $\gamma$ -облучения коэффициент Холла  $R_H$ , имеющий отрицательный знак, растет, а расчет показывает на возрастание концентрации электронов. Дело в том, что часто на основании данных  $R_0$  в слабых полях в смешанной или собственной области проводимости оценивают концентрацию высокоподвижных носителей заряда, приблизительно считая

$$R_0 \approx \frac{A_r}{en} \quad (7)$$

$A_r$  - учитывает механизм рассеяния на  $p$ .

Однако, как было показано в [3] и в настоящей работе, совместное решение уравнений (1-5) показывает, что в беспелевых и узкозонных полупроводниках с высокой подвижностью электронов и  $p \gg n$  концентрацию электронов нельзя вычислять по формуле (7). Расчеты показывают, что несмотря на возрастания  $R$  с дозой облучения значение  $N_0$ ,  $\sigma_0$ ,  $R_H$  таковы, что истинная концентрация электронов при  $\gamma$ -облучении возрастает. Такая зависимость  $n$  и  $R_0$  объясняется тем, что в полуметаллах и узкозонных полупроводниках, несмотря на малую концентрацию электронов, в слабых магнитных полях  $R$  показывает отрицательный знак, но вследствие влияния дырок на  $R_0$ , его величина не может достигнуть такого большого значения, которое определяло бы  $n$ . По мере возрастания концентрации  $n$  происходит увеличение  $R_0$ . Этот процесс происходит до тех пор, пока не удовлетворяется условие  $p_{\text{эф}} \approx p_{\text{д}}$ . Поскольку подвижности носителей заряда не очень сильно изменяются, то условие  $p_{\text{эф}} \approx p_{\text{д}}$  достигается благодаря возрастанию  $n$ . Поэтому по мере увеличения  $n$   $R_0$  возрастает, достигает определенного значения, затем с дальнейшим ростом  $n$   $R_0$  начинает уменьшаться, т.е. с ростом  $n$   $R_0$  должен проходить через максимум. Несмотря на все эти сложности многие авторы и сейчас прибегают таким грубым оценкам концентрации и подвижности носителей заряда. В обычных условиях (особенно в широкозонных полупроводниках) для оценки концентрации это не приводит к большой погрешности, однако в таких принципиальных случаях, когда необходимо по изменению  $R$  под действием облучения или ка-

ких-нибудь других внешних воздействий, делается заключение о РД, зонной структуре и др. физических параметрах необходимо рассчитать концентрации более корректно. Нам представляется, что расхождение выводов встречаемое в литературе о влиянии  $\gamma$ -облучения на кристаллы КРТ связаны именно подобной оценкой концентрации.

Отжиг образцов, произведенной при 300 К показал, что действие  $\gamma$ -облучения в течение 20-30 суток исчезает. При повышении температуры отжига время исчезновения РД сильно уменьшалось. Так при 400 К она становилась меньше одного часа. Полагаем, что источником наведенных электронов так же как и при электронном облучении, является РД донорного типа.

Таблица 1.

Параметры носителей заряда образцов  $Cd_xHg_{1-x}Te$  ( $x=0,12 \pm 0,15$ ),  $\sigma_0$  ( $Om^{-1} cm^{-1}$ ),  $R_x$  ( $cm^3 K^{-1}$ ),  $n \cdot 10^{-14}$  ( $cm^{-3}$ ),  $\mu_n \cdot 10^{-4}$  ( $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot c^{-1}$ ),  $p \cdot 10^{-17}$  ( $cm^{-3}$ ),  $\mu_p$  ( $cm^2 V^{-1} c^{-1}$ ).

x	T, K	D рад	$N_0$ кЭ	$\sigma_0$	$R_x$	n	$\mu_n$	p	$\mu_p$
0,12		0	5,5	20	11	0,74	9,2	5,7	210
	77	$10^{10}$	6,5	14	12	0,78	8,0	5	185
		0	30	22,7	9	15,0	2,6	6,8	155
	200	$10^{10}$	36	20	11,5	17	2,0	5,5	140
		0	72	26,4	8	57	1,3	7,5	122
	300	$10^{10}$	78	28	8,5	60	1,3	7,0	121
0,15		0	11	-	40				
	4,2	$10^{10}$	11,5	-	38				
		0	12,6	-	37				
	20	$10^{10}$	15,0	-	34				
		0	19,5	-	32				
	77	$10^{10}$	24	-	32				
		0	90	-	31				
200	$10^{10}$	95	-	31					

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.В.Горшков, Ф.К.Исаев, Ф.А.Зайтов. УФЖ, 1982, т.12, № 7, с.517-518.
2. А.В.Власенко, В.В.Горбунов, А.В.Любченко, УФЖ, 1984, т.29, № 3, с. 423-428.
3. S.A.Aliev, R.I.Salim-zade, E.I.Zulfigarov, T.G.Gadzhiev. S.Radiation Effects 1988, v.106, p.203-208.
4. С.Т.Еlliott, J.S.Spain. Sol. State Commun. 1970, v.8, № 24, p.2063-2066.
5. Б.Л.Гельмонт, М.И.Дьяканов. ЖЭТФ, 1972, т.62, № 2, с.713-723.
6. М.А.Мехтиев, В.А.Калина. Изв. АН Азерб.ССР, ФТМН, 1982, №2, с.68-72.

E.I.ZULFIGAROV, S.I.SAFAROVA, S.A.ALIEV

$Cd_xHg_{1-x}Te$  BƏRK MƏHLULLU KRİSTALLARIN ELEKTRİK VƏ QALVONOMAQNİT XASSƏLƏRİNƏ  $\gamma$ -ŞÜALARIN TƏSİRİ

KRT bərk məhlullu kristalların elektrik və qalvanomaqnit xassələrinə  $\gamma$ -şüaların təsiri baxılmışdır. Göstərilir ki,  $\gamma$ -şüaların təsiri ilə KRT kristalında donor tipli defektlər yaranır.

E.I.ZULFIGAROV, S.I.SAFAROVA, S.A.ALIEV

EFFECT OF  $\gamma$ -IRRADIATION ON ELECTRICAL AND GALVANOMAGNETIC PROPERTIES IN  $Cd_xHg_{1-x}Te$

The effect of  $\gamma$ -irradiation on electrical and galvanomagnetic properties in  $Cd_xHg_{1-x}Te$  ( $x=0,12 ; 0,15$ ) has been studied.

The results confirm the conclusion that under  $\gamma$ -irradiation of the  $Cd_xHg_{1-x}Te$  crystals the donor-type defects are formed.