

УДК 548.571+539.26

И. В. Мельничук, С. М. Куликовская, В. П. Кладько,
А. А. Ащеулов, Р. А. Павлов, Б. Н. Грыцюк, И. М. Раренко

РАССЕЯНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ ВБЛИЗИ K -КРАЯ ПОГЛОЩЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ γ -ОБЛУЧЕННЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ $CdSb$

В настоящей работе проведено исследование динамического рассеяния рентгеновских лучей вблизи K -края поглощения компонентов $CdSb$ в зависимости от дозы γ -облучения. Это позволило определить характер структурных изменений в исследуемых кристаллах и их влияние на оптические и кинетические свойства кристаллов.

Методика эксперимента

Образцы вырезались из монокристалла $CdSb$ стехиометрического состава с проводимостью p -типа и небольшим количеством дислокаций (порядка 10^2 см^{-2}), выращенного методом зонной перекристаллизации в направлении $[001]$ параллельно плоскости (100) . После механической шлифовки и полировки образцы подвергались γ -облучению в откачанной пирексовой ампуле на кобальтовой установке с экспозицией, обеспечивающей заданную дозу падающего излучения D . Первоначальная толщина образцов составляла около 1 мм. После облучения измерялось наиболее сильное лауэ-отражение (004) вблизи K -краев поглощения атомов Cd и Sb с помощью однокристалльного спектрометра и рентгеновской установки Дрон-0,5. Ширина щели спектрометра составляла 0,02 Å.

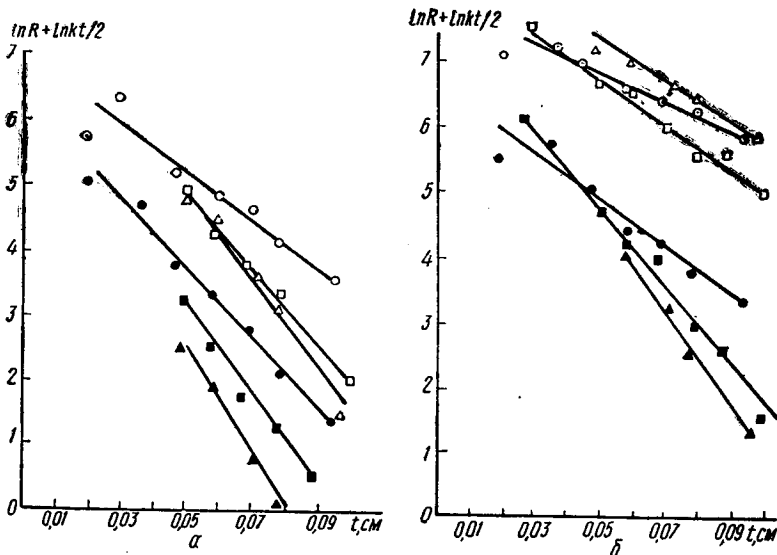
Толщина исследуемых образцов t изменялась методом последовательного стравливания. Контроль плотности дислокаций тонких (примерно 0,2 мм) образцов проводился методом рентгеновской топографии с помощью двухкристалльного спектрометра в положении Брэгга—Лауэ в MoK_{α} -излучении [1]. Интенсивность отражения R в зависимости от t измерялась вблизи K -края поглощения атомов Sb и Cd на длинах волн $\lambda_1^{Sb} = 0,395 \text{ Å}$, $\lambda_2^{Sb} = 0,416 \text{ Å}$, $\lambda_1^{Cd} = 0,454 \text{ Å}$, $\lambda_2^{Cd} = 0,475 \text{ Å}$ соответственно. На этих длинах волн влияние ширины щели спектрометра исключалось. Режим работы рентгеновской трубки подбирался с учетом исключения возможного возбуждения паразитных гармоник. Погрешность измерений не превышала 5%. Оптические и кинетические свойства исследуемых кристаллов изучались по известной методике [2—4].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

По измеренным значениям R построена зависимость $\ln R + \ln kt/2$ от t при различных значениях D (рисунок). По этим зависимостям с помощью метода наименьших квадратов с учетом реального спектрального распределения падающего на кристалл рентгеновского излучения найдены интерференционный коэффициент поглощения μ_i и коэффициент рассеяния y_i (табл. 1) [5, 6]. Указанные коэффициенты чувствительны к дефектам кристаллической решетки исследуемого кристалла. Как видно из рисунка и табл. 1, вблизи K -края поглощения атомов Sb в коротко- и длинноволновой областях рассеяния значение $\mu_{i,2}^{Sb}$ для исходного кристалла наименьшее. После облучения с $D = 10^7$ рад это значение возрастает в 1,5—2 раза, что свидетельствует о значительном увеличении плотности дефектов. Увеличение D до 10^9 рад приводит к некоторому уменьшению значения $\mu_{i,2}^{Sb}$. Такое изменение μ_i может быть объяснено либо уменьшением концентрации

точечных дефектов (плотность дислокаций не изменяется), либо их перераспределением в кристаллической решетке.

Значение y_i в коротковолновой области рассеяния с увеличением D медленно возрастает. Поскольку увеличение y_i связано с увеличением концентрации точечных дефектов, можно предположить, что с увеличением D происходит увеличение концентрации дефектов, которые,



Зависимости $\ln R + \ln kt/2$ от t для кристалла CdSb вблизи К-края поглощения Sb (a) и Cd (б): ●, ○ — необлученный образец; ▲, △ — облученный с $D=10^7$ рад и ■, □ — с $D=10^9$ рад в коротко- и длинноволновой областях рассеяния соответственно; k выражено в Å^{-1} .

взаимодействуя между собой, образуют комплексные дефекты, уменьшающие поля упругих напряжений вокруг них. В длинноволновой области $y_{i_2}^{\text{Sb}}$ сначала увеличивается ($D=10^7$ рад), а затем уменьшается ($D=10^9$ рад). В этой области условие аномального прохождения рентгеновских лучей выполняется нестрого, поэтому дефекты, вносящие большие напряжения в кристалл при $D=10^7$ рад, способствуют появлению кинематической компоненты рассеяния, что, в свою очередь, приводит к увеличению $y_{i_2}^{\text{Sb}}$. Если происходит перераспределение дефектов так, что напряжение уменьшается ($D=10^9$ рад), то соответственно уменьшается кинематическая компонента, а следовательно, и $y_{i_2}^{\text{Sb}}$. К аналогичным заключениям можно прийти, анализируя значения μ_i и y_i вблизи К-края поглощения атомов Cd.

В табл. 1 приведены также результаты определения величин A и B , входящих в выражение для логарифма скачка интенсивности [5] $\ln S = At + B$. По-видимому, при рассеянии рентгеновских лучей вблизи К-края поглощения атомов Sb кинематическая компонента рассеяния на радиационных дефектах в длинноволновой области ($\lambda \gtrsim \lambda_K^{\text{Sb}}$) значительно больше, чем в коротковолновой. Поэтому с увеличением D (концентрации дефектов) $A^{\text{Sb}} = \mu_i - \mu_i$ уменьшается, а $B^{\text{Sb}} = y_i - y_i$ достигает максимума. Вблизи К-края поглощения атомов Cd влияние этой компоненты в коротковолновой области рассеяния ($\lambda \lesssim \lambda_K^{\text{Cd}}$) сильнее, чем в длинноволновой. Вследствие этого величина A^{Cd} с учетом перераспределения дефектов при увеличении D достигает максимума, а B^{Cd} уменьшается.

Таким образом, проведенные рентгеновские исследования позволяют сделать вывод, что в процессе γ -облучения происходит смещение атомов Cd и Sb из положения равновесия достаточно интенсивно. Воз-

никающие при этом дефекты взаимодействуют, образуя более или менее стабильные комплексы, которые при определенной конфигурации могут уменьшать поля упругих напряжений вокруг себя. Возможно, при этом возникают вакансионные диски и дислокационные петли в плоскости (001) с вектором Бюргерса $\mathbf{b} \parallel [001]$, т. к. они должны в данном случае оказывать наибольшее влияние на величины μ_i и y_i . Последнее предположение вытекает также из анализа электрических свойств данных кристаллов.

Таблица 1

D , рад	μ_{i_1} , см^{-1}	μ_{i_2} , см^{-1}	y_{i_1}	y_{i_2}	A , см^{-1}	B
Sb						
0	$51,9 \pm 0,3$	$33,3 \pm 1,6$	$6,30 \pm 0,01$	$6,62 \pm 0,27$	18,6	0,32
10^7	$78,0 \pm 0,4$	$64,6 \pm 1,2$	$6,42 \pm 0,03$	$7,88 \pm 0,08$	13,4	1,46
10^9	$66,2 \pm 0,8$	$57,1 \pm 0,5$	$6,50 \pm 0,12$	$7,58 \pm 0,05$	9,1	1,08
Cd						
0	$36,0 \pm 1,3$	$22,8 \pm 0,9$	$6,75 \pm 0,33$	$8,01 \pm 0,07$	13,2	1,26
10^7	$70,3 \pm 0,2$	$31,0 \pm 0,4$	$8,28 \pm 0,02$	$8,90 \pm 0,05$	39,3	0,62
10^9	$58,6 \pm 0,1$	$32,6 \pm 0,1$	$7,75 \pm 0,01$	$8,34 \pm 0,01$	26,0	0,59

Таблица 2

D , рад	$\rho \cdot 10^{-15}$, см^{-3}	μ_{33}^* , $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	μ_{22}^* , $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	μ_{33}^* , $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	μ_{22}^* , $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	r
	100 К			300 К		
0	1,95	2500	3700	91	162	1,55
10^7	2,30	2300	3600	102	234	2,35
10^9	1,9	2800	1950	251	282	1,80

Таблица 3

D , рад	$\Delta\alpha$, $\text{мкВ} \cdot \text{град}^{-1}$						
	$T=200$ К	280	300	320	340	360	380
0	54	121	177	198	233	230	224
10^7	132	175	190	248	236	218	210
10^9	62	64	66	67	68	68	68

В табл. 2 приведены значения подвижностей μ носителей электрического тока при 100 и 300 К. Видно, что с увеличением D при 100 К в направлении [001] μ уменьшается. При этом концентрация носителей тока остается неизменной ($\rho \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$), что свидетельствует о возникновении при облучении равного числа противоположно заряженных дефектов. Видно, что в направлениях [010] и [001] с увеличением D происходит изменение анизотропии подвижности μ_{33}/μ_{22} .

Как известно [3], от анизотропии подвижности зависит поперечная термо-эдс кристалла $\Delta\alpha$. В табл. 3 приведены значения $\Delta\alpha$ при различных температурах и D . Как видно, облучение кристалла с $D=10^7$ рад приводит к некоторому смещению максимума температурной зависимости $\Delta\alpha$ и к его увеличению. При $D=10^9$ рад наблюдается резкое уменьшение $\Delta\alpha$ вследствие уменьшения анизотропии подвижности носителей в области собственной проводимости. Следует отметить, что вы-

бренные нами кристаллы проявляют аномальные электрические свойства, для объяснения которых необходимы дополнительные исследования. В табл. 4 приведены коэффициенты поглощения α при различных значениях энергий и доз облучения, откуда следует, что γ -облучение практически не влияет на значение α и что радиационные дефекты в данном случае имеют достаточно малую протяженность.

Таблица 4

D , рад	α , см^{-1}										
	$h\nu=0,40$ эВ	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49	0,50
0	0,40	0,40	0,95	1,30	6,36	9,00	11,1	16,0	20,3	37,5	52,1
10^7	0,39	0,40	0,96	1,30	6,35	9,00	11,1	15,9	20,5	37,5	52,0
10^9	0,40	0,40	0,94	1,25	6,30	9,10	11,0	16,1	20,1	37,5	52,0

Из проведенных исследований следует также, что методом динамического рассеяния рентгеновских лучей можно изучать структурные изменения в процессе облучения монокристаллов CdSb. Облучение приводит к изменениям некоторых кинетических параметров кристалла, в частности подвижностей носителей тока и их анизотропии. В пределах исследуемых доз облучения CdSb радиационно устойчив, что важно при его использовании в ИК-технике.

Следует отметить, что процессы дефектообразования при γ -облучении CdSb довольно сложны и многообразны. В настоящей работе они затронуты только в пределах, необходимых для объяснения полученного результата. По-видимому, предстоит еще определить поверхностные и ориентационные эффекты, а также вероятность образования конкретных дефектов при облучении.

SUMMARY. The dependence of dynamic X-ray dispersion near the K -absorption edge of CdSb components on γ -irradiation dose is investigated using a one-crystal spectrometer. It is found from variation of interference absorption and dispersion coefficients that γ -irradiation produces an extensive formation of defects and their consequent redistribution resulting in dislocation loops and vacancy discs which affect transport and optical properties in a different way.

1. Мельничук И. В., Раранский Н. Д., Раренко И. М. Исследование дефектов структуры монокристаллов CdSb.— УФЖ, 1973, 18, 9, 1544—1545.
2. Товстюк К. Д., Борець О. М. Графічний метод визначення оптичних констант напівпровідників за допомогою вимірювання пропускання.— УФЖ, 1962, 7, 12, 1285—1291.
3. Ащеулов А. А., Пилат И. М., Раренко И. М. Влияние условий теплообмена на вольтваттную чувствительность анизотропных термоэлементов.— Физ. электрон., 1981, 21, 68—72.
4. Ащеулов А. А., Семизоров А. Ф., Раренко И. М. Влияние состояния поверхности на поперечную термо-эдс в антимониде кадмия.— В кн.: Тепловые приемники излучения: Материалы II Всесоюз. семинара ТПИ, Москва, 25—27 февр. 1980 г. Л., 1981, 67.
5. Melnichouk I. V., Nikulitsa V. G., Rarenko I. M. Anomalous transmission of X-rays in CdSb single crystals.— Phys. status solidi. A, 1974, 25, 2, K173—K176.
6. Рассеяние рентгеновских лучей вблизи K -края поглощения компонентов CdSb / И. В. Мельничук, А. Л. Манакина-Жук, В. П. Кладько и др.— УФЖ, 1981, 26, 4, 615—618.