

05:07

## Рентгенодозиметрические характеристики монокристаллов $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$

© С.Н. Мустафаева,<sup>1</sup> М.М. Асадов,<sup>2</sup> Д.Т. Гусейнов<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт физики НАН Азербайджана,  
AZ-1143 Баку, Азербайджан<sup>2</sup> Институт химических проблем НАН Азербайджана,  
AZ-1143 Баку, Азербайджан  
e-mail: solmust@gmail.com

(Поступило в Редакцию 13 января 2010 г. В окончательной редакции 18 мая 2010 г.)

В результате изучения влияния легирования медью (3 mol.%) на рентгенодозиметрические характеристики монокристаллов  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  установлено, что характеристические коэффициенты рентгенопроводимости образцов  $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$  в 3–16 раз увеличиваются по сравнению с  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  при эффективной жесткости излучения  $V_a = 25\text{--}50\text{ keV}$  мощностью дозы  $E = 0.75\text{--}78.05\text{ R/min}$ . При этом инерционность характеристик образцов полностью снимается, а рабочее напряжение питания рентгенодетектора на основе  $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$  уменьшается в 5 раз. Зависимость стационарного рентгенотока в  $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$  от дозы рентгеновского излучения описывается зависимостью вида  $\Delta I_{E,0} \propto E^\alpha$ , где  $0.6 \leq \alpha \leq 1.8$ .

### Введение

Высокоомные полупроводниковые материалы, к которым относятся соединения типа  $A^{\text{II}}B^{\text{III}}C_4^{\text{VI}}$  ( $A^{\text{II}} = \text{Zn, Cd, Hg}$ ;  $B^{\text{III}} = \text{Al, Ga, In}$ ;  $C^{\text{VI}} = \text{S, Se, Te}$ ) представляют интерес в силу высокой фоточувствительности в видимой области спектра [1–7]. Это открывает перспективы практического применения указанных материалов для создания на их основе фоточувствительных структур. Представляет интерес также изучение чувствительности указанных кристаллов рентгеновской области спектра. По мере увеличения количества исследуемых материалов все более многочисленные группы рентгеночувствительных полупроводников привлекают внимание разработчиков различного рода рентгенорегистрирующих приборов и устройств.

В нашей предыдущей работе [8] были представлены результаты изучения рентгенодозиметрических свойств монокристаллов  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ . Было показано, что их коэффициент рентгеночувствительности варьируется в пределах  $2.42 \cdot 10^{-10}\text{--}2.43 \cdot 10^{-9}\text{ A} \cdot \text{min}/(\text{V} \cdot \text{R})$  при эффективной жесткости излучения  $V_a = 25\text{--}50\text{ keV}$  мощностью дозы  $E = 0.75\text{--}78.05\text{ R/min}$ .

Целью настоящей работы явилось изучение влияния легирования медью на рентгенодозиметрические характеристики монокристаллов  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ .

### Методика эксперимента

Соединение  $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$  синтезировано методом двухтемпературного синтеза сплавлением исходных элементов высокой степени чистоты (порядка или более 99.999%) в вакуумированной кварцевой ампуле. Монокристаллы  $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$  были выращены из синтезированного соединения методом химических транспортных

реакций с использованием йода в качестве носителя. Полученные этим методом монокристаллы представляли собой октаэдры с резко выраженной гранкой (размер граней достигал 6–7 mm), обладающие высокой оптической прозрачностью.

Рентгеновские исследования показали, что  $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$  кристаллизуется в кубической структуре типа нормальной шпинели ( $a = 10.79\text{ \AA}$ ). Удельное темновое сопротивление полученных монокристаллов  $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$  составляло  $\rho = 3 \cdot 10^7\text{ \Omega} \cdot \text{cm}$  при комнатной температуре. При изготовлении образцов  $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$  омические контакты к ним формировались вжиганием индия на боковые торцы. Межконтактное расстояние, куда направлялось рентгеновское излучение, составляло 0.2 cm.

Источником рентгеновского излучения служила установка типа УРС с трубкой БСВ-2 (Cu). Интенсивность рентгеновского излучения регулировалась варьированием тока в трубке при каждом заданном значении ускоряющего напряжения на ней. Абсолютные значения доз рентгеновского излучения измерены рентгенодозиметром ДРГЗ-02. Измеряемый образец располагался в рентгеновской светонепроницаемой камере. Изменение величины тока в исследуемых образцах под действием рентгеновского излучения регистрировалось в режиме малого нагрузочного сопротивления электрометрическим усилителем У5-9. Все измерения проведены при  $T = 300\text{ K}$ .

### Экспериментальные результаты

Коэффициент рентгенопроводимости, характеризующий рентгеночувствительность монокристаллических образцов, определялся по формуле как относительное

Коэффициенты рентгенопроводимости монокристаллов  $CdIn_2S_4$  и  $CdIn_2S_4(Cu)$  при  $T = 300$  К

Доза $E, R/min$	$K_\sigma, 10^{-2} \text{ min/R}$		$V_a,$ keV	Доза $E, R/min$	$K_\sigma, 10^{-2} \text{ min/R}$		$V_a,$ keV
	$CdIn_2S_4$	$CdIn_2S_4(Cu)$			$CdIn_2S_4$	$CdIn_2S_4(Cu)$	
0.75	1.15	19	25	7.0	0.93	4.5	40
1.26	1.36	28		8.89	1.11	6.3	
1.47	2.34	34		12.6	1.04	5.9	
1.68	3.07	34		16.38	1.10	5.7	
1.82	4.72	35		20.09	1.14	5.6	
2.03	5.92	35		23.8	1.17	5.5	
2.24	6.15	35		27.58	1.18	5.2	
2.38	6.49	36		31.29	1.20	4.8	
2.59	7.32	36		35.07	1.16	4.6	
2.73	7.55	36.6		38.78	1.43	4.5	
1.75	0.95	11	30	10.00	0.78	5.3	45
2.73	1.22	15		13.37	0.82	6.5	
3.64	1.37	16		19.32	0.81	5.5	
4.62	1.80	16		25.34	0.81	5.3	
5.53	2.10	16		31.29	0.80	5.1	
6.44	2.32	15.5		37.24	0.80	4.8	
7.42	2.24	14		43.26	0.83	4.4	
8.33	2.39	14		49.21	0.83	4.2	
9.31	2.50	13.6		55.23	0.82	4.0	
10.22	3.25	13		61.18	0.89	3.7	
3.75	1.33	6.6	35	13.05	0.69	4.4	50
5.18	1.28	8.4		17.01	0.81	5.5	
7.0	1.43	8.9		24.64	0.75	5.1	
8.82	1.51	9.2		32.27	0.72	4.8	
10.64	1.56	9.4		39.9	0.70	4.3	
12.46	1.60	9.0		47.53	0.71	4.2	
14.28	1.63	8.7		55.16	0.70	3.9	
16.1	1.65	8.5		62.79	0.69	3.7	
17.92	1.76	8.0		70.42	0.68	3.5	
19.74	2.10	7.6		78.05	0.68	3.3	

изменение проводимости под действием рентгеновского излучения в расчете на единицу мощности дозы

$$K_\sigma = \frac{\Delta\sigma_{E,0}}{\sigma_0 E}, \quad (1)$$

где  $\Delta\sigma_{E,0} = \sigma_E - \sigma_0$ ;  $\sigma_E$  — проводимость монокристаллического образца под действием рентгеновского облучения мощностью дозы  $E$ ,  $\sigma_0$  — темновая удельная проводимость образца при температуре 300 К.

Коэффициент рентгеночувствительности образца определяется по формуле:

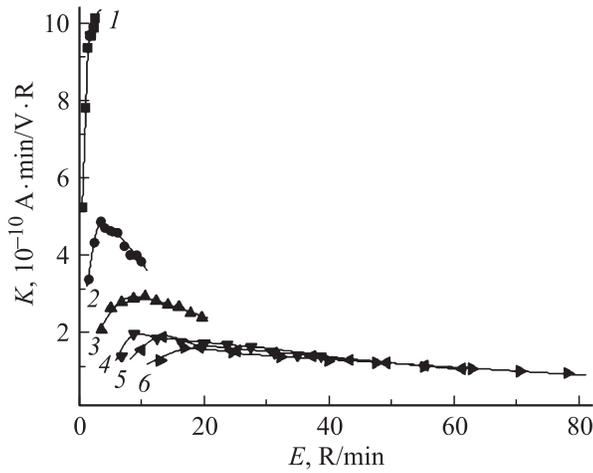
$$K = \frac{\Delta I_{E,0}}{U E}, \quad (2)$$

где  $\Delta I_{E,0} = I_E - I_0$ ;  $I_E$  — величина тока в образце при мощности дозы рентгеновского облучения  $E$ ;  $I_0$  — темновой ток;  $U$  — внешнее приложенное к образцу электрическое напряжение.

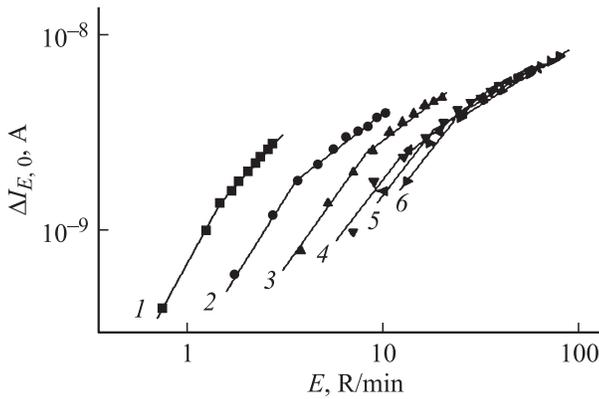
Полученные из экспериментов значения коэффициентов рентгенопроводимости  $K_\sigma$  монокристаллов  $CdIn_2S_4(Cu)$  при различных значениях ускоряющего

потенциала ( $V_a$ ) на трубке и соответствующих дозах рентгеновского излучения приведены в таблице. Здесь для сравнения приведены значения  $K_\sigma$  нелегированного монокристалла  $CdIn_2S_4$  [8]. Из таблицы видно, что значения  $K_\sigma$  для  $CdIn_2S_4(Cu)$  значительно превышают значения  $K_\sigma$  для  $CdIn_2S_4$ .

На рис. 1 представлены зависимости рассчитанного по формуле (2) коэффициента рентгеночувствительности ( $K$ ) от мощности дозы рентгеновского излучения для монокристалла  $CdIn_2S_4(Cu)$  при 300 К и  $U = 1$  В. Как видно из рис. 1 рентгеночувствительность монокристалла  $CdIn_2S_4(Cu)$  варьируется в пределах  $10^{-10} - 10^{-9} \text{ A} \cdot \text{min}/(\text{V} \cdot \text{R})$ . Анализ полученных результатов показал, что зависимость  $K(E)$  в  $CdIn_2S_4(Cu)$  при малых дозах облучения — возрастающая. Наиболее крутая зависимость  $K(E)$  имела место в узком интервале мощности дозы  $E = 0.75 - 2.73 \text{ R/min}$  при  $V_a = 25 \text{ keV}$  (рис. 1, кривая 1). Возрастающий ход кривых 2–6 по мере увеличения мощности дозы сменялся спадом при определенном значении  $E$ . При малых значениях мощности дозы зависимость коэффициента рентгеночувствительности монокристалла  $CdIn_2S_4(Cu)$  от эффективной



**Рис. 1.** Дозовые зависимости коэффициентов рентгеночувствительности монокристалла  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  (3 mol.% Cu) при различных ускоряющих напряжениях на трубке  $V_a$ , keV: 1 — 25; 2 — 30; 3 — 35; 4 — 40; 5 — 45; 6 — 50.  $U = 1$  В;  $T = 300$  К.



**Рис. 2.** Рентген-амперные характеристики монокристалла  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  (3 mol.% Cu) при различной жесткости рентгеновского излучения  $V_a$ , keV: 1 — 25; 2 — 30; 3 — 35; 4 — 40; 5 — 45; 6 — 50.

жесткости рентгеновского излучения  $K(V_a)$  носила спадающий характер, а при  $E > 30$  R/min коэффициент  $K$  практически не зависел от  $V_a$ .

На рис. 2 приведены рентген-амперные характеристики монокристалла  $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$  при различных значениях жесткости рентгеновского излучения. С увеличением  $V_a$  значение рентгенотока в образце уменьшалось при всех мощностях дозы  $E$ .

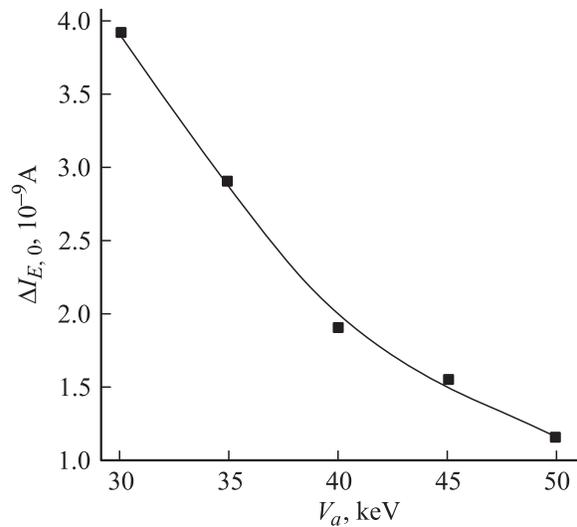
На рис. 3 показана зависимость рентгенотока в  $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$  от жесткости рентгеновского излучения при  $E = 10$  R/min. Видно, что по мере увеличения  $V_a$  от 30 до 50 keV величина  $\Delta I_{E,0}$  уменьшается примерно в 4 раза.

При всех значениях  $V_a$  рентген-амперные характеристики монокристалла  $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$  описывались степенным законом  $\Delta I_{E,0} \propto E^\alpha$ . Зависимости  $\Delta I_{E,0}(E)$  состояли

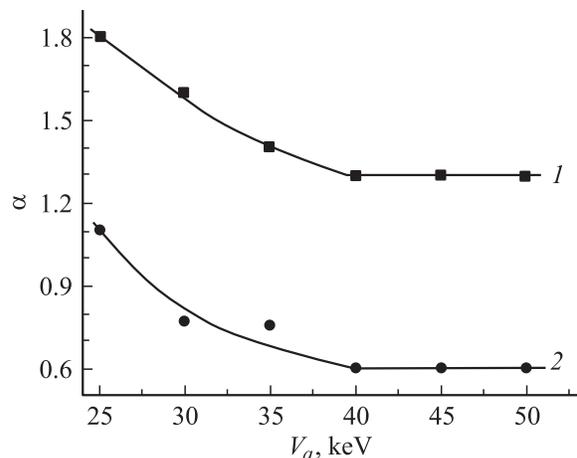
из двух участков с различными наклонами. При малых уровнях рентгенотока наблюдался более крутой рост  $\Delta I_{E,0}$  по мере увеличения  $E$ .

На рис. 4 показаны зависимости показателя степени  $\alpha$  от ускоряющего потенциала на трубке при малых (кривая 1) и высоких уровнях рентгенотока (кривая 2) в образце  $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$ . Видно, что при низких уровнях рентгенотока значение  $\alpha$  меняется от 1.8 до 1.3, а при более высоких уровнях рентгенотока — от 1.1 до 0.6, т.е. наклон зависимостей  $\Delta I_{E,0}(E)$  уменьшается по мере увеличения ускоряющего потенциала на трубке.

При изучении рентгено-дозиметрических характеристик нелегированных монокристаллов  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  было обнаружено, что при отключении рентгеновского излучения уровень темнового тока в образце устанавливался не сразу, а через 5–6 min [8]. Легированные монокристаллы



**Рис. 3.** Зависимость рентгенотока в монокристалле  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  (3 mol.% Cu) от жесткости рентгеновского излучения мощностью дозы  $E = 10$  R/min.



**Рис. 4.** Зависимости  $\alpha(V_a)$  при низких (1) и высоких (2) уровнях рентгенотока в монокристалле  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  (3 mol.% Cu).

$\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$  выгодно отличались от нелегированных  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  в том плане, что в них не было обнаружено релаксации рентгенотока со временем. В них при отключении рентгеновского излучения темновой ток устанавливался практически сразу.

## Заключение

Сравнительный анализ полученных результатов показывает, что хотя монокристаллы  $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$  по коэффициенту рентгеночувствительности ( $K$ ) примерно в 2 раза уступают монокристаллу  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$ , но их характеристические коэффициенты рентгенопроводимости ( $K_\sigma$ ) в 3–16 раз выше. Кроме того, если рабочее напряжение питания рентгendetектора на основе  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  составляло 24 В/см, то для  $\text{CdIn}_2\text{S}_4\langle\text{Cu}\rangle$  было достаточно прикладывать 5 В/см.

Таким образом, можно утверждать, что легированные медью (3 mol.%) монокристаллы  $\text{CdIn}_2\text{S}_4$  являются высокочувствительными в рентгеновской области спектра и могут быть использованы для создания на их основе неохлаждаемых и практически безынерционных рентгendetекторов с малой потребляемой мощностью.

## Список литературы

- [1] Георгобиани А.Н., Радауцан С.И., Тигиняну И.М. // ФТП. 1985. Т. 19. Вып. 2. С. 193–212.
- [2] Fan L., Guo R. // J. Phys. Chem. C. 2008. Vol. 112. N 29. P. 10 700–10 706.
- [3] Rajpure K.Y., Mathe V.L., and Bhosale C.H. // Bull. Mater. Sci. 1999. Vol. 22. N 5. P. 927–931.
- [4] Лаврентьев А.А., Сафонцева Н.Ю., Дубейко В.А. // ФТТ. 2000. Т. 41. Вып. 11. С. 1992–1995.
- [5] Mustafaeva S.N., Guseynov D.T. // Fizika. 2009. Vol. 15. N 3. P. 20–22.
- [6] Seki Y., Endo S., Irie T. // Jpn. J. Appl. Phys. 1980. N 19. P. 1667–1674.
- [7] Рудь В.Ю., Рудь Ю.В., Вайполин А.А., Боднарь И.В., Fernelius N. // ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 11. С. 1321–1328.
- [8] Мустафаева С.Н., Асадов М.М., Гусейнов Д.Т. .. Перспективные материалы. 2010. № 1. С. 45–48.