МИКРОЭЛЕКТРОНИКА, 2022, том 51, № 3, с. 163–171

ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 549.31+621.386.82

ЗАВИСИМОСТЬ РЕНТГЕНОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ $AgGaS_2$ ПО ГРАНЯМ (001) И (100) ОТ ДОЗЫ И ЖЕСТКОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2022 г.
С. М. Асадов[a], *, С. Н. Мустафаева[b], Д. Т. Гусейнов[b], К. И. Келбалиев[a], В. Ф. Лукичев[c], **

[a] *Институт катализа и неорганической химии им. М.Ф. Нагиева Национальной академии наук Азербайджана, пр. Г. Джавида, 113, Баку, AZ-1143 Азербайджан*

[b] *Институт физики Национальной академии наук Азербайджана, пр. Г. Джавида, 131, Баку, AZ-1143 Азербайджан*

[c] *Физико-технологический институт им. К.А. Валиева Российской академии наук, Нахимовский просп., 36, корп. 1, Москва, 117218 Россия*

**E-mail: salim7777@gmail.com*

***E-mail: lukichev@ftian.ru*

Поступила в редакцию 14.10.2021 г.
После доработки 10.01.2022 г.
Принята к публикации 11.01.2022 г.

Приводятся данные рентгендозиметрических характеристик монокристаллов $AgGaS_2$, выращенных методом Бриджмена–Стокбаргера (БС) по грани (001) и химических транспортных реакций (ХТР) по грани (100). Коэффициент рентгенопроводимости $AgGaS_2$ при 298 K варьируется в пределах 0.97–10.63 и 0.22–3.20 мин/Р для образцов, выращенных методами БС и ХТР соответственно, при эффективной жесткости излучения V_a = 25–50 кэВ мощностью дозы E = 0.75–78.05 Р/мин. Зависимость стационарного рентгенотока от дозы рентгеновского излучения в монокристаллах $AgGaS_2$ носит степенной характер.

Ключевые слова: выращивание монокристаллов, $AgGaS_2$, грани монокристалла, радиационный материал, рентгендозиметрические характеристики

DOI: 10.31857/S0544126922030024

1. ВВЕДЕНИЕ

Тройные соединения с общей формулой $A^{I}B^{III}C_2^{VI}$ (где A = Cu, Ag; B = Al, Ga, In, Tl и C = S, Se, Te) являются перспективными кристаллами для создания чувствительных к ионизирующему излучению полупроводниковых материалов на их основе. Анализ физических свойств тройных соединений $A^{I}B^{III}C_2^{VI}$ указывает на то, что эффект внешних воздействий на кристалл, в частности, экспонирования рентгеновским излучением, может существенно зависеть от способа синтеза, химического состава, типа и концентрации дефектов, присутствующих в решетке кристалла. Кроме того, свойства заметно зависят также от метода выращивания монокристаллов [1–6].

Среди тройных соединений кристаллы тиогаллата серебра ($AgGaS_2$) с тетрагональной сингонией занимают особое место. Интерес к исследованиям кристаллов $AgGaS_2$ связан также с расширением области их практического применения [7–11]. Например, в работе [10] приведены результаты коллоидного синтеза и фотокаталитические свойства орторомбической модификации (a = 6.577(4), b = 8.066(5) и c = 6.451(4) Å) нанокристаллов $AgGaS_2$. Показано, что запрещенная зона (E_g) орторомбического нанокристалла (2.69–2.71 эВ) и тетрагональной модификации $AgGaS_2$ (E_g = 2.687–2.71 эВ) [11] имеют близкие значения.

Возможность использования кристаллов $AgGaS_2$, в частности, в качестве датчиков излучений различного типа [7–12], делает актуальным исследование процессов, протекающих в них при различных воздействиях [13–15].

Физические свойства радиационных материалов очень чувствительны к присутствию дефектов в данных кристаллах [16–18]. Однако, до сих пор отсутствуют сравнительные данные по рентгендозиметрическим характеристикам монокристаллов $AgGaS_2$, выращенных разными методами [19–22].

Целью данной работы являлось определение закономерностей изменения рентгендозиметрических характеристик выращенных монокристал-

Таблица 1. Структурные параметры кристаллической решетки монокристаллов $AgGaS_2$, выращенных методами Бриджмена–Стокбаргера (БС) и химических транспортных реакций (ХТР)

Образец	Пр. гр.	Параметры решетки, Å		Литература
		настоящая работа		
		БС	ХТР	
$AgGaS_2$	$I\bar{4}2d$	a = 5.7571 c = 10.3110	a = 5.7572 c = 10.3036	a = 5.7572 c =10.3040 [12] a = 5.7572 c = 10.3036 [17] a = 5.7721 c = 10.2967 [21]

лов $AgGaS_2$ по основным кристаллографическим граням.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для синтеза соединения $AgGaS_2$ использовали стехиометрическое количество исходных элементарных компонентов Ag (марки ОСЧ), Ga (квалификации 5N) и S (марки ОСЧ 15-3 ТУ 6-09-2546-77). Синтез $AgGaS_2$ проводили путем сплавления исходных компонентов Ag, Ga и S в вакуумированной до 10^{-3} Па и запаянной кварцевой ампуле по методике, описанной в [7–12].

Синтез проводился в горизонтальной печи, в которой температуру повышали со скоростью 50 К/ч до 1275 К. Реакция между компонентами протекает в течение 4 ч. Индивидуальность синтезированного $AgGaS_2$ подтверждали методами дифференциально-термического анализа (ДТА; установка Jupiter STA 449 Netzsch) и рентгенофазовым анализом (РФА; дифрактометр Bruker D8 Advance). Данные ДТА указывают, что синтезированные поликристаллы $AgGaS_2$ плавятся при 1271 ± 3 К. Авторы работы [22] для температуры плавления (T_m) соединения $AgGaS_2$ приводят значение 1264 ± 3 К.

Фазовый состав и структура выращенных кристаллов определены методом порошковой рентгеновской дифракции. Параметры решетки определяли методом анализа профиля Ритвельда с использованием программного обеспечения Topas R. По данным РФА синтезированное нами соединение $AgGaS_2$ кристаллизуется в тетрагональной сингонии типа халькопирита (пространственная группа (пр. гр.) $I\bar{4}2d$) с параметрами решетки: a = = 5.757(1) Å; c = 10.311(0) Å.

Из синтезированных поликристаллов $AgGaS_2$ рост монокристалла осуществляли как методом Бриджмена–Стокбаргера (БС) [7–12], так и методом химических транспортных реакций (ХТР) [13–17, 23, 24]. В работе [24] приведены особенности реакций переноса химических компонентов в паровой фазе и выбора подходящего транспортного агента при ХТР.

При направленной кристаллизации методом БС поликристаллы $AgGaS_2$ загружали в прозрачную кварцевую ампулу роста, которую размещали в двухзонную (температурную) вертикальную печь установки для выращивания. Температурный режим в печи поддерживался с помощью высокоточного регулятора температуры ВРТ-3; градиент температуры на фронте кристаллизации в печи составлял 3 К/мм. Температуру верхней зоны (камеры) печи поднимали выше температуры плавления (T_m = 1271 ± 3 К) соединения $AgGaS_2$ и включали устройство для перемещения ампулы роста в печи. Ампула с расплавленным материалом $AgGaS_2$ опускалась вертикально вниз во вторую камеру печи и там охлаждалась со скоростью 0.5 мм/ч. После кристаллизации $AgGaS_2$ печь выключали и охлаждали до комнатной температуры вместе с образцом $AgGaS_2$.

Поликристаллы $AgGaS_2$ загружали с йодом (в качестве транспортного агента) в прозрачную кварцевую ампулу (внутренний диаметр 8 мм и длина 10 см), которую размещали в двухзонную печь выращивания методом ХТР. Ампулу нагревали в печи в течение четырех суток. Скорость переноса измеряли путем взвешивания общего количества кристаллов $AgGaS_2$, выращенных в зоне роста. Параметры, влияющие на рост монокристалла $AgGaS_2$ составляли: количество йода, M = = (0.1–6) × 10^3 г/м^3; температура источника $AgGaS_2$ была 1198–1248 К; разность температур между зоной источника и зоной роста монокристалла составляла ΔT = 25–100 К.

По данным РФА выращенные монокристаллы $AgGaS_2$, как и поликристаллы, имеют тетрагональную сингонию с аналогичными параметрами решетки (табл. 1).

Ориентацию монокристалла $AgGaS_2$ определяли с помощью измерения дифракции рентгеновских лучей при комнатной температуре. Были подтверждены грани (001) по c-оси (метод БС) и (100) a-оси (метод ХТР) монокристалла $AgGaS_2$. Соответствующие образцы $AgGaS_2$ вырезали из монокристаллического слитка параллельно этим граням.

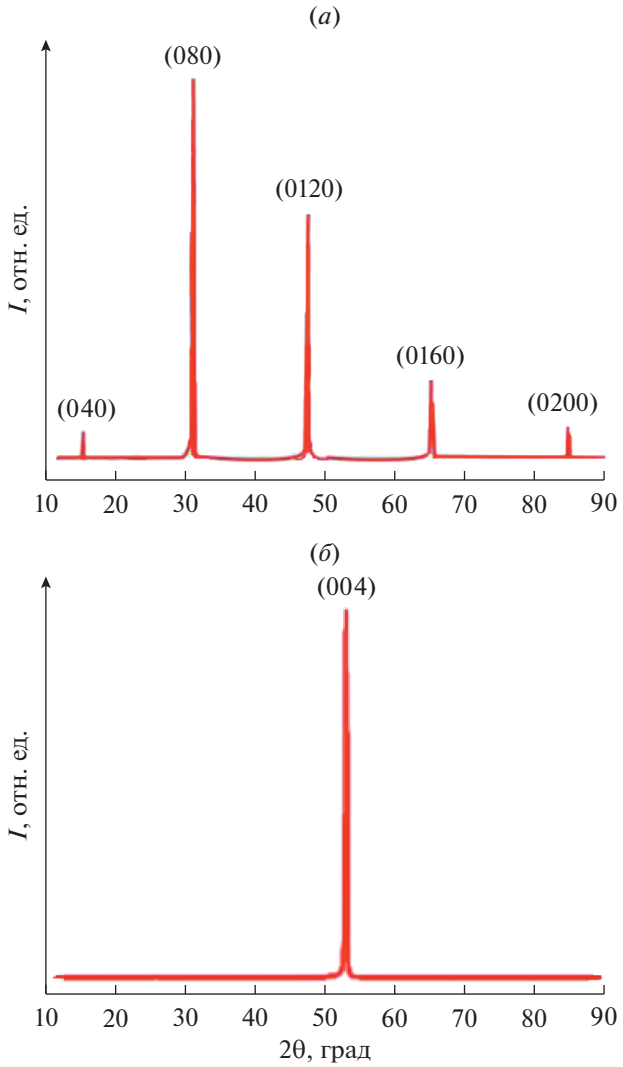

Рис. 1. Рентгенограммы монокристаллов $AgGaS_2$, выращенных методами Бриджмена–Стокбаргера (БС) (*а* – грань (001)) и химических транспортных реакций (ХТР) (*б* – грань (100)).

На рис. 1*а* и *б* показаны рентгенограммы граней (001) и (100) кристалла $AgGaS_2$ соответственно.

Методика измерения рентгенодозиметрических характеристик монокристаллических образцов $AgGaS_2$ была аналогична описанной в работах [7–17]. Для измерения рентгенодозиметрических характеристик выращенных монокристаллов $AgGaS_2$ были приготовлены образцы, которые имели плоскопараллельную форму. Размеры образцов составляли (8 × 3 × 1) мм. В качестве источника рентгеновского излучения использовали установку типа УРС с трубкой БСВ-2 (Cu). Интенсивность рентгеновского излучения регулировали посредством вариации тока в рентгеновской трубке при каждом заданном значении ускоряющего потенциала на ней. Абсолютные значения доз рентгеновского излучения измеряли рентгендозиметром ДРГЗ-02. Изменение величины тока в монокристаллических образцах под действием рентгеновского излучения регистрировали в режиме малого нагрузочного сопротивления с помощью электрометрического усилителя типа У5-9. Все измерения проведены при T = 298 K.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из анализа рассчитанных в рамках теории функционала плотности (DFT) энергетических зон и плотности состояний (DOS) соединения $AgGaS_2$ следует, что $AgGaS_2$ является полупроводником с прямой запрещенной зоной (E_g). По проведенным DFT-расчетам ширина запрещенной зоны $AgGaS_2$ меньше, чем экспериментальное значение E_g.

Для $AgGaS_2$, например, в работе [11], приведено экспериментальное значение $E_g \approx 2.67$ эВ, которое примерно в 3 раза больше расчетного значения тетрагональной модификации $AgGaS_2$ ($E_g = 0.86$ эВ) [25]. Для $AgGaS_2$ энергетические полосы в диапазонах энергий от –13.8 до –12.0 эВ в основном состоят из 3s-состояния атомов S. В диапазоне энергий от –7.5 до –5.4 эВ энергетические полосы в основном образуются за счет Ga-4s-состояний в $AgGaS_2$. Энергетические полосы в диапазоне –5.1 до 0 эВ для $AgGaS_2$ в основном состоят из 4d-состояний атомов Ag, 3p-состояний атомов S. Наблюдается небольшой вклад состояний Ga-4p в $AgGaS_2$. Кроме того, образование нижних зон проводимости происходит из-за 4s- и 4p-состояний Ga.

Ниже приведены результаты изучения рентгенодозиметрических свойств образцов монокристаллов $AgGaS_2$, выращенных нами методами БС и ХТР. Исследуемые образцы $AgGaS_2$ проявляли высокую чувствительность к рентгеновскому излучению.

Коэффициент рентгенопроводимости, характеризующий рентгенчувствительность образца, определяли по формуле:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_E - \sigma_0}{\sigma_0 E}, \quad (1)$$

где σ_E – проводимость образца под действием рентгеновского облучения мощностью дозы E (Р/мин); σ_0 – темновая удельная проводимость образца.

Рентгенчувствительность образца определяли по формуле:

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

где $\Delta I_{E,0} = I_E - I_0$; I_E – величина тока в образце при мощности дозы рентгеновского облучения

Таблица 2. Коэффициенты рентгенопроводимости монокристаллов $AgGaS_2$ при T = 298 K, выращенных методом Бриджмена–Стокбаргера (БС) по грани (001) и химической транспортной реакцией (ХТР) по грани (100); мощность дозы (E, Р/мин), коэффициент рентгеночувствительности (K_σ, мин/Р), эффективная жесткость излучения (V_a, кэВ)

Дозиметрические характеристики монокристаллов $AgGaS_2$ по граням (001) c-оси и (100) a-оси							
E, Р/мин	K_σ, мин/Р		V_a, кэВ	E, Р/мин	K_σ, мин/Р		V_a, кэВ
	по грани (001) $AgGaS_2$; (БС)	по грани (100) $AgGaS_2$; (ХТР)			по грани (001) $AgGaS_2$; (БС)	по грани (100) $AgGaS_2$; (ХТР)	
0.75	1.33	1.33		7.0	0.97	0.57	
1.26	3.18	1.98		8.89	1.72	0.62	
1.47	4.08	2.38		12.6	1.91	0.56	
1.68	5.06	2.68		16.38	1.92	0.52	
1.82	6.87	3.02	25	20.09	2.06	0.50	40
2.03	7.88	3.20		23.8	2.07	0.46	
2.24	8.49	3.13		27.58	2.32	0.44	
2.38	9.04	3.15		31.29	2.37	0.42	
2.59	9.27	3.09		35.07	2.43	0.40	
2.73	10.63	3.11		38.78	2,46	0.37	
1.75	2.29	1.14		10.00	1.15	0.50	
2.73	2.75	1.47		13.37	1.24	0.49	
3.64	3.50	1.37		19.32	1.37	0.41	
4.62	3.57	1.30		25.34	1.54	0.36	
5.53	3.80	1.27	30	31.29	1.57	0.34	45
6.44	3.83	1.24		37.24	1.77	0.32	
7.42	4.25	1.15		43.26	1.79	0.30	
8.33	4.38	1.14		49.21	1.86	0.28	
9.31	4.46	1.07		55.23	1.88	0.27	
10.22	4.55	1.03		61.18	1.95	0.26	
3.75	1.67	0.93		13.05	1.07	0.46	
5.18	2.22	0.87		17.01	1.38	0.41	
7.0	2.54	0.79		24.64	1.41	0.34	
8.82	2.72	0.79		32.27	1.44	0.31	
10.64	2.84	0.75	35	39.9	1.60	0.29	50
12.46	2.93	0.72		47.53	1.72	0.27	
14.28	3.08	0.70		55.16	1.75	0.25	
16.1	3.15	0.68		62.79	1.74	0.24	
17.92	3.24	0.64		70.42	1.83	0.23	
19.74	3.29	0.61		78.05	1.85	0.22	

E(Р/мин); I_0 – темновой ток; U – внешнее приложенное к образцу электрическое напряжение.

По формуле (1) определены значения коэффициентов рентгенопроводимости образцов монокристаллов $AgGaS_2$ (выращенных методами БС и ХТР) при различных значениях ускоряющего потенциала V_a (или эффективной жесткости излучения) на рентгеновской трубке и соответствующих дозах рентгеновского излучения.

В табл. 2 приведены значения коэффициентов рентгенопроводимости для образцов монокристаллов $AgGaS_2$ при различных дозах рентгеновского излучения (E = 0.75–78.05 Р/мин) и V_a = = 25–50 кэВ (T = 298 K). Из табл. 2 следует, что коэффициент рентгенопроводимости $AgGaS_2$ изменяется в интервале 0.97–10.63 мин/Р для образца, выращенного методом БС (грань (001)), и 0.22–3.20 мин/Р для образца, выращенного методом ХТР (грань (100)). Иными словами, значения K_σ монокристалла $AgGaS_2$, выращенного по грани (001) методом БС, в 3.3–4.4 раза превышали значения K_σ для $AgGaS_2$, выращенного по грани (100) методом ХТР.

Установлено, что значение коэффициента рентгенопроводимости монокристаллов $AgGaS_2$ резко увеличивается по мере увеличения дозы излучения при V_a = 25 кэВ. С увеличением эффективной жесткости рентгеновского излучения в монокри-

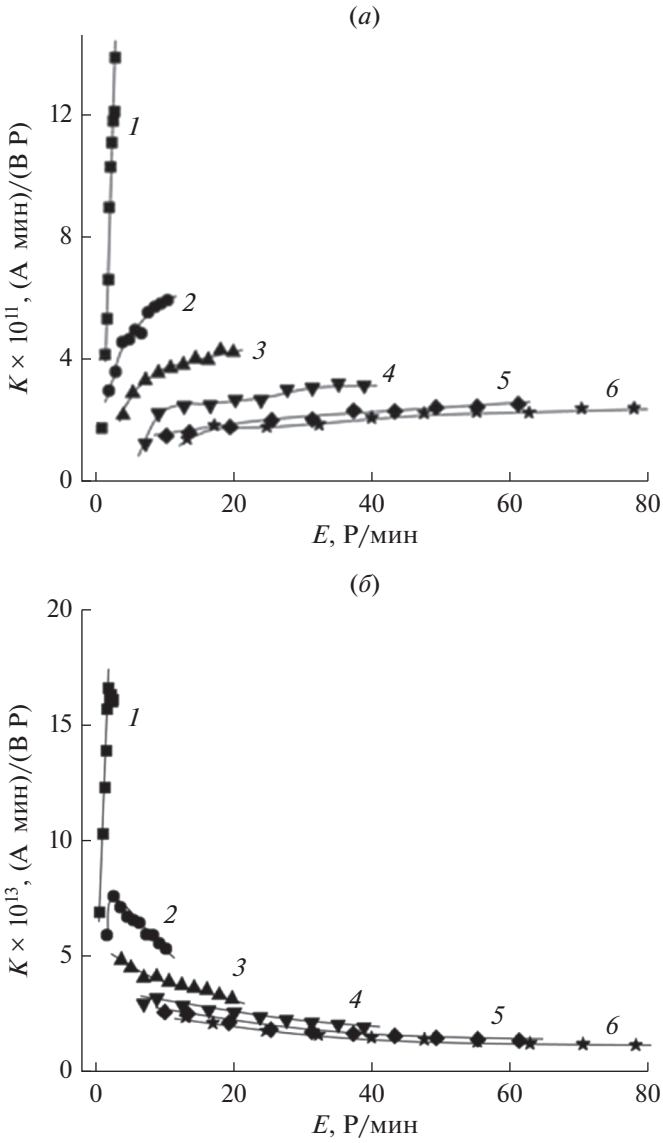

Рис. 2. Зависимости коэффициента рентгеночувствительности от мощности дозы облучения для монокристаллов $AgGaS_2$, выращенных методами БС (*а* – грань (001)) и ХТР (*б* – грань (100)) при различных ускоряющих напряжениях на рентгеновской трубке V_a, кэВ: *1* – 25; *2* – 30; *3* – 35; *4* – 40; *5* – 45; 6 – 50. T = 298 К.

сталлическом образце $AgGaS_2$ (БС по грани (001)) зависимость $K_\sigma(E)$ также была возрастающей, но более пологой и при V_a = 50 кэВ величина K_σ слабо зависела от E. В отличие от этого, в образце $AgGaS_2$ (ХТР по грани (100)) дозовые зависимости K_σ при V_a > 30 кэВ носили спадающий характер и также слабо зависели от E при V_a = 50 кэВ.

Аналогичные закономерности были получены и для дозовой зависимости коэффициента рентгеночувствительности K монокристаллов $AgGaS_2$. Значения K, вычисленные по формуле (2) при различных мощностях дозы и эффективных жесткостях рентгеновского излучения, приведены на рис. 2*а* и *б*.

Нами изучены также рентген-амперные характеристики монокристаллов $AgGaS_2$ (рис. 3*а* и *б*), из которых следует, что зависимость стационарного рентгенотока от дозы рентгеновского излучения носит степенной характер:

$$\Delta I_{E,0} = I_E - I_0 \sim E^{\alpha}. \quad (3)$$

Значения α для образца $AgGaS_2$ (БС) в зависимости от эффективной жесткости рентгеновского излучения составляли 2–2.5 при V_a = 25 кэВ и 1.2–1.3 при V_a = 30–50 кэВ. Т.е. рентген-ампер-

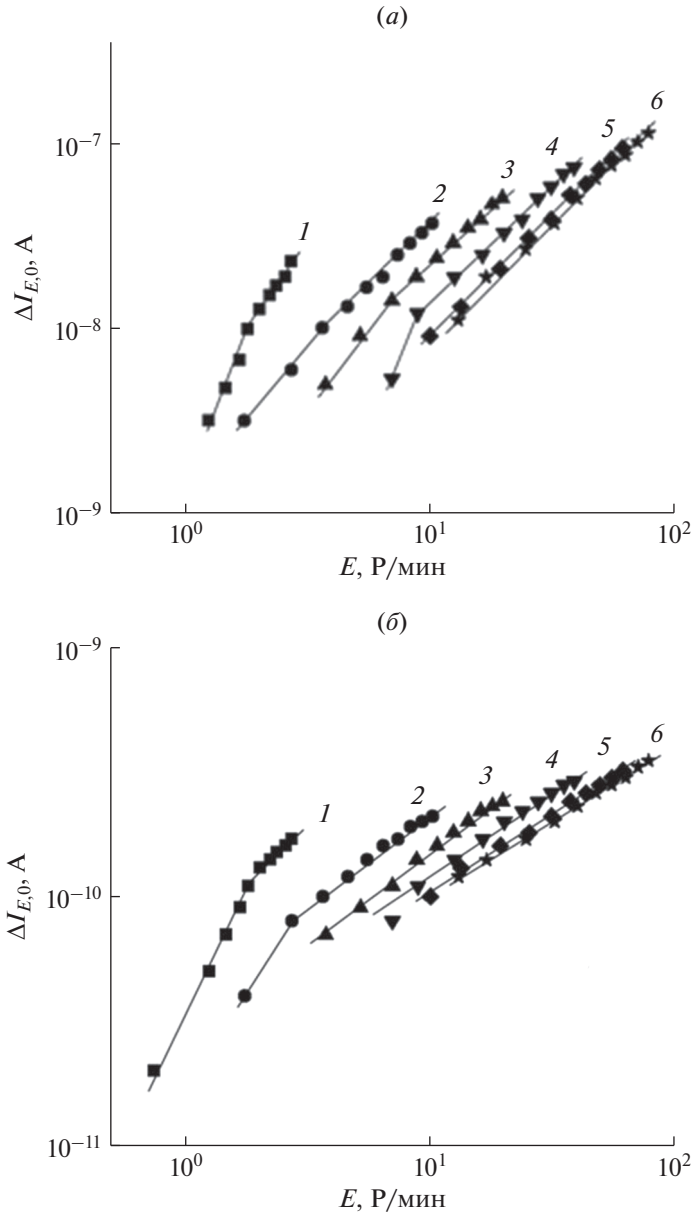

Рис. 3. Рентгенамперные характеристики монокристаллов $AgGaS_2$, выращенных методами БС (*а* – грань (001)) и ХТР (*б* – грань (100)) при различных ускоряющих напряжениях на рентгеновской трубке V_a, кэВ: *1* – 25; *2* – 30; *3* – 35; *4* – 40; *5* – 45; *6* – 50. T = 298 К.

ные характеристики этого образца $AgGaS_2$ по мере увеличения V_a стремятся к линейности ($\alpha \to 1$), что важно с практической точки зрения.

При V_a = 25 кэВ рентген-амперная характеристика монокристалла $AgGaS_2$ (ХТР) при малых дозах излучения была квадратичной, а затем значение α составляло 0.85. При сравнительно больших дозах значение показателя степени α по мере увеличения эффективной жесткости рентгеновского излучения уменьшалось до 0.6 (рис. 4).

На рис. 5 показана зависимость рентгенотока в образце $AgGaS_2$ (БС; грань (001)) от эффективной жесткости рентгеновского излучения при мощности дозы E = 10 Р/мин. Видно, что с увеличением V_a величина рентгенотока в монокристалле $AgGaS_2$ уменьшается.

Такая же спадающая зависимость от V_a была получена и для коэффициента рентгеночувствительности. Так, на рис. 6*а* и 6*б* показана зависимость $K(V_a)$ для монокристаллов $AgGaS_2$, выращенных методами Бриджмена–Стокбаргера (БС) (*а* –

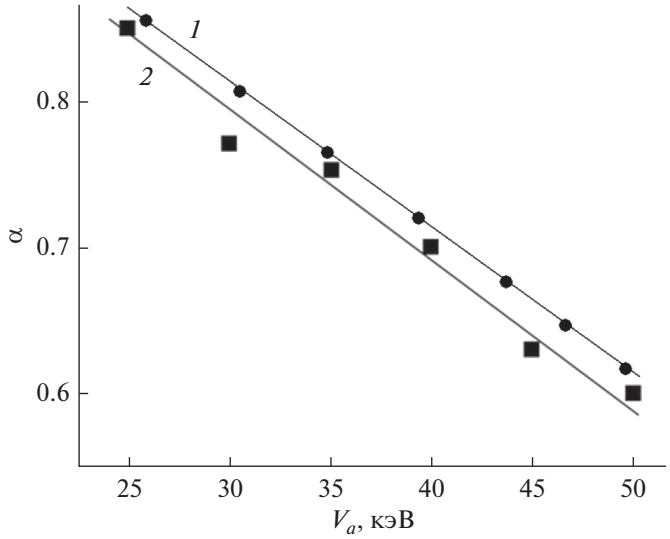

Рис. 4. Показатель степени (α) зависимости рентгенотока монокристаллов $AgGaS_2$, выращенных методами БС (кривая *1* – грань (001)) и ХТР (кривая *2* – грань (100)), от дозы облучения как функция от эффективной жесткости (V_a).

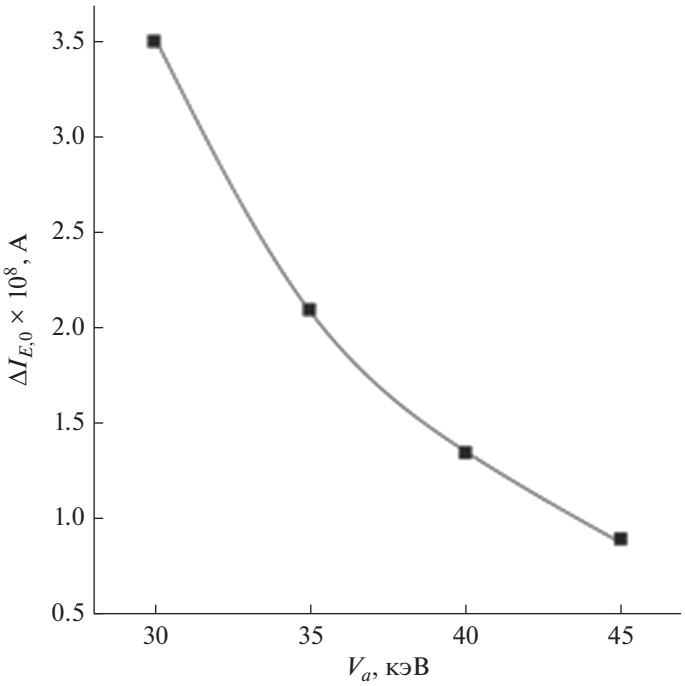

Рис. 5. Зависимость рентгенотока в монокристалле $AgGaS_2$, выращенном методом БС (грань (001)) от эффективной жесткости (V_a) рентгеновского излучения при $E = 10$ Р/мин.

грань (001)) и химических транспортных реакций (ХТР) (*б* – грань (100)) при $E = 10$ Р/мин.

Причину наблюдаемых закономерностей K (E, V_a) можно объяснить следующим образом. При малых ускоряющих потенциалах рентгенопроводимость образца $AgGaS_2$ обусловлена преимущественно поглощением излучения приповерхностным слоем. С увеличением ускоряющего потенциала повышается эффективная жесткость рентгеновского излучения, благодаря чему растет глубина его проникновения в $AgGaS_2$. Т.е. при этом происходит преимущественно поглощение-генерация свободных рентгеноносителей в объеме кристалла $AgGaS_2$ и растет доля проходящего через кристалл излучения. Вследствие этого по мере увеличения ускоряющего потенциала наблюдается уменьшение коэффициента рентгеночувствительности и ее зависимости от дозы излучения.

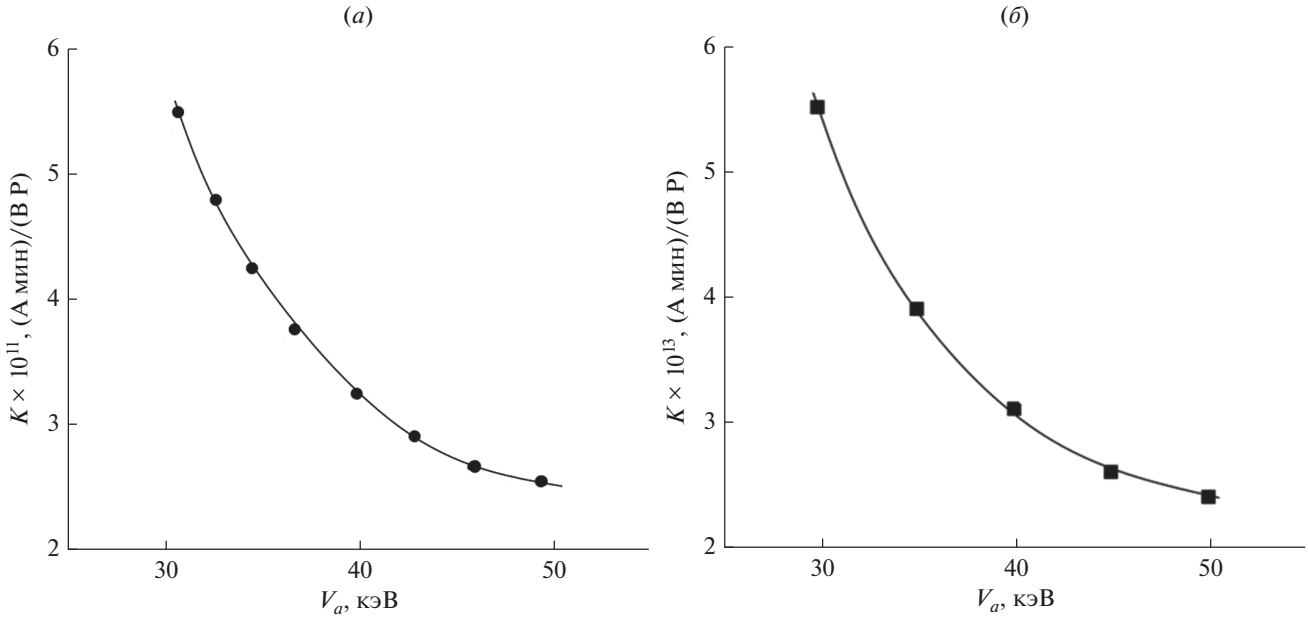

Рис. 6. Зависимость коэффициента рентгеночувствительности монокристаллов $AgGaS_2$, выращенных методами БС (*а* – грань (001)) и ХТР (*б* – грань (100)) от эффективной жесткости рентгеновского излучения дозой E = 10 Р/мин.

Нами изучена также кинетика рентгенотока в образцах $AgGaS_2$. Обнаружено, что при отключении рентгеновского излучения уровень темнового тока в образцах $AgGaS_2$ устанавливался почти сразу. Это создает возможности использования монокристаллов $AgGaS_2$ в качестве активных элементов безинерционных рентгендетекторов с высоким коэффициентом рентгеночувствительности и не требующих охлаждения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что коэффициент рентгеночувствительности монокристалла $AgGaS_2$ по грани (001) варьируется в пределах 1.3×10^{-11}–1.4×10^{-10} (А мин)/(В Р) для образцов, выращенных методом Бриджмена–Стокбаргера (БС), и 1.16×10^{-13}–1.66×10^{-12}(А мин)/(В Р) для образцов $AgGaS_2$, выращенных по грани (100) методом химических транспортных реакций (ХТР) при эффективной жесткости излучения V_a = 25–50 кэВ мощностью дозы E = 0.75–78.05 Р/мин при 298 К. Зависимость стационарного рентгенотока от дозы рентгеновского излучения в этих образцах $AgGaS_2$ носит степенной характер: $\Delta I_{E,0} \sim E^{\alpha}$. Рентгенамперные характеристики $AgGaS_2$ по мере увеличения V_a стремились к линейности (где показатель степени $\alpha \to 1$). Для образцов $AgGaS_2$, полученных методом ХТР (грань (100)), показатель степени α по мере увеличения V_a уменьшался от 2 до 0.6. Образцы $AgGaS_2$, выращенные методом БС (грань (001)), имеют более высокие рентгенодозиметрические коэффициенты по сравнению с коэффициентами $AgGaS_2$, полученных методом ХТР.

Работа выполнена при поддержке Фонда развития науки при Президенте Азербайджанской Республики (гранты № EIF-BGM-3-BRFTF-2+/2017-15/05/1-M-13 и № EIF-BGM-4-RFTF-1/2017-21/05/1-M-07), а также гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № Az_a2018).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мустафаева С.Н., Асадов М.М., Гусейнов Д.Т.* Рентгенодозиметрические характеристики монокристаллов $CdIn_2S_4\langle Cu\rangle$ // Журн. технической физики. 2011. Т. 81. № 1. С. 144–147. [*Mustafaeva S.N., Asadov M.M. Guseynov D.T.* X-ray dosimetric characteristics of $CdIn_2S_4\langle Cu\rangle$ single crystals // Technical Physics. 2011. V. 56. № 1. P. 139–142. https://doi.org/10.1134/S1063784211010178]
2. *Mustafaeva S.N., Asadov M.M., Guseinov D.T.* X-ray dosimetry of copper-doped $CdGa_2S_4$ single crystals // Journal Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. 2012. V. 15. № 4. P. 358–359.
3. *Мустафаева С.Н., Асадов М.М., Гусейнов Д.Т.* Рентгеноэлектрические свойства кристаллов $CdIn_2S_4\langle Fe\rangle$ // Неорганические Материалы. 2013. Т. 49. № 7. С. 689–692. [*Mustafaeva S.N., Asadov M.M., Guseinov D.T.* X-Ray Induced Conductivity of $CdIn_2S_4\langle Fe\rangle$ Crystals // Inorganic Materials. 2013. V. 49.

№ 7. P. 643–646.
https://doi.org/10.1134/S0020168513070121]

4. *Mustafaeva S.N., Asadov M.M., Guseinov D.T.* Enhancing Roentgensensitivity of Gold-Doped $CdIn_2S_4$ Thiospinel for X-ray Detection Applications // J. Materials. 2015. Article ID 956013. 4 pages.
https://doi.org/10.1155/ 2015/956013

5. *Мустафаева С.Н., Асадов М.М., Гусейнов Д.Т.* Рентгеноэлектрические свойства монокристалла $CdIn_2S_4$ // Перспективные материалы. 2010. № 1. С. 45–48. [*Mustafaeva S.N., Asadov M.M., Guseinov D.T.* X-ray induced conductivity of single-crystal $CdIn_2S_4$ // Perspekt. Mater. 2010. № 1. P. 45–48].

6. *Мустафаева С.Н., Асадов М.М., Гусейнов Д.Т.* Рентгенодозиметрические свойства монокристалла $CdGa_2S_4$, выращенного из газовой фазы // Неорганические материалы. 2010. Т. 46. № 6. С. 663–665. [*Mustafaeva S.N., Asadov M.M., Guseinov D.T.* X-ray dosimetric properties of vapor-grown $CdGa_2S_4$ single crystals // Inorganic Materials. 2010. V. 46. № 6. P. 587–589. https://doi.org/10.1134/S002016851006004X].

7. *Асадов М.М., Мустафаева С.Н.* Рентгендозиметрия монокристалла $AgGaS_2$ // Известия Российской Академии наук. Серия Физическая. 2015. Т. 79. № 9. С. 1259–1262. [*Asadov M.M., Mustafaeva S.N.* X-ray Dosimetry of an $AgGaS_2$ Single Crystal // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2015. V. 79. № 9. P. 1113–1117.
https://doi.org/10.3103/S106287381509004X].

8. *Асадов С.М., Мустафаева С.Н., Гусейнов Д.Т.* Рентгендозиметрические характеристики монокристалла $AgGaS_2$, полученного методом химических транспортных реакций // Неорганические материалы. 2017. Т. 53. № 5. С. 457–462. [*Asadov S.M., Mustafaeva S.N., Guseinov D.T.* X-Ray Dosimetric Characteristics of $AgGaS_2$ Single Crystals Grown by Chemical Vapor Transport // Inorganic Materials. 2017. V. 53. № 5. P. 457–461.
https://doi.org/10.1134/S0020168517050028].

9. *Асадов С.М., Мустафаева С.Н., Гусейнов Д.Т., Келбалиев К.И.* Зависимость рентгенодозиметрических характеристик монокристаллов $AgGaS_{2x}Se_{2-2x}$ от состава // Журнал технической физики. 2018. Т. 88. Вып. 4. С. 561–565. [*Asadov S.M., Mustafaeva S.N., Guseinov D.T., Kelbaliev K.I.* Dependence of the X-Ray Dosimetric Parameters of $AgGaS_{2x}Se_{2-2x}$ Single Crystals on Their Composition // Technical Physics. 2018. V. 63. № 4. P. 546–550.
https://doi:10.1134/S1063784218040047]

10. *Fan C.-M., Regulacio M.D., Ye C., Lim S.H., Zheng Y., Xu Q.-H., Xu A.-W., Han M.-Y.* Colloidal synthesis and photocatalytic properties of orthorhombic $AgGaS_2$ nanocrystals // Chemical Communications. 2014. V. 50. № 54. P. 7128–7131.
https://doi.org/10.1039/c4cc01778a

11. *Jang J.S., Borse P.H., Lee J.S., Choi S.H., Kim H.G.* Indium induced band gap tailoring in $AgGa_{1-x}In_xS_2$ chalcopyrite structure for visible light photocatalysis // The J. Chemical Physics. 2008. V. 128. № 15. P. 154717–6.
https://doi.org/10.1063/1.2900984

12. *Wu J., Huang W., Liu H., He Zhiyu C., Baojun Z., Shifu Z., Beijun L., Yuxing Z., Xiaonan Z.* Investigation on Thermal Properties and Crystal Growth of Nonlinear Optical Crystal $AgGaS_2$ and $AgGaGeS_4$. Crystal Growth & Design. 2020. acs.cgd.0c00018. P. 2–49.
https://doi.org/10.1021/acs.cgd.0c00018

13. *Zhang Y., Wang R., Kang, Z., Qu Li., Jiang Y., Gao J.-Y., Andreev Y.M., Lanskii G.V., Kokh K.A., Morozov A.N., Shaiduko A.V., Zuev V.V.* $AgGaS_2$- and Al doped GaSe crystals for IR applications // Opt. Commun. 2011. V. 284. P. 1677–1681.
https://doi.org/10.1016/j.optcom.2010.11.067

14. *Route R.H., Felgelson R.S., Raumakers R.J., Choy M.M.* Elimination of optical scattering defects in $AgGaS_2$ and $AgGaSe_2$ // J. Cryst. Growth. 1976. V. 33. № 2. P. 239–245.
https://doi.org/10.1016/0022-0248(76)90049-X

15. *Fan Y.X., Eckardt R.C., Byer R.L., Route R.K., Feigelson R.S.* $AgGaS_2$ infrared parametric oscillator // Applied Physics Letters. 1984. V. 45. № 4. 313–315.
https://doi.org/10.1063/1.95275

16. *Was G.S.* Fundamentals of Radiation Materials Science. Metals and Alloys. Second Edition. Springer. Science + Business Media N.Y. 2017. 1014 p. ISBN: 978-1-4939-3438-6

17. *Abrahams S.C., Bernstein J.L.* Crystal structure of piezoelectric nonlinear-optic $AgGaS_2$ // The Journal of Chemical Physics. 1973. V. 59. № 4. P. 1625–1629.
https://doi.org/10.1063/1.1680242

18. *Marceddu M., Anedda A., Carbonaro C.M., Chiriu D., Corpino R., Ricci P.C.* Donor-Acceptor Pairs and Excitons Recombinations in $AgGaS_2$ // Appl. Surf. Sci. 2006. V. 253. P. 300–305.
https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.06.002

19. *Noda Y., Kurasawa T., Sugai N., Furukawa Y.* Growth of $AgGaS_2$ single crystals by chemical transport reaction // J. Cryst. Growth. 1990. V. 99. P. 757–761.
https://doi.org/10.1016/S0022-0248(08)80021-8

20. *Noda Y., Kurasawa T., Furukawa Y.* Growth of $AgGaS_2$ single crystals by chemical transport with halogen // J. Cryst. Growth. 1991. V. 115. P. 802–806.
https://doi.org/10.1016/0022-0248(91)90849-Z

21. *Prabukanthan P., Dhanasekaran R.* Stoichiometric single crystal growth of $AgGaS_2$ by iodine transport method and characterization // Cryst. Res. Technol. 2008. V. 43. № 12. P. 1292–1296.
https://doi.org/10.1002/crat.200800055

22. *Mochizuki K., Masumoto K.* Melting point of $AgGaS_2$ // J. Cryst. Growth. 1989. V. 98. P. 855–856.
https://doi.org/10.1016/0022-0248(89)90329-1

23. *Schmidt P., Binnewies M., Glaum R., Schmidt M.* Chemical Vapor Transport Reactions–Methods, Materials, Modeling. Edited by Sukarno O.F. In: Advanced Topics on Crystal Growth. Open access peer-reviewed. 2013. Chapter 9. P. 227–305. ISBN: 978-953-51-6307-7.
https://doi.org/10.5772/46151

24. *Binnewies M., Schmidt M., Schmidt P.* Chemical Vapor Transport Reactions – Arguments for Choosing a Suitable Transport Agent // Z. Anorg. Allg. Chem. 2017. V. 643. P. 1295–1311.
https://doi.org/10.1002/zaac.201700055

25. *Purohit M., Meena S.K., Alpa Dashora A., Ahuj B.L.* Bandgap Engineering of $AgGaS_2$ for Optoelectronic Devices: First-Principles Computational Technique. In A. Kalam, K.R. Niazi, A. Soni, S.A. Siddiqui, A. Mundra. Editors. Intelligent Computing Techniques for Smart Energy Systems. Proceedings of ICTSES 2018. Springer Nature Singapore PteLtd. 2020. ISBN 978-981-15-0213-2. P. 67–74.