Структура и свойства облученного электронами ZnS

М.Ю. Ташметов, Б.Н. Мадаминов*, Н.Б. Исматов, Ф.К. Халлоков

Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан, Мирзо-Улугбекский район, посёлок Улугбек, Хорасан 1, 100214, Ташкент, Узбекистан

Получена 26.08.2022, revised 22.09.2022

* Corresponding author: e-mail madaminovbakhtiyar@gmail.com, Phone: +998 94 145 02 39

Кристалл ZnS облучали электронами с энергией 2 МэВ и флюенсами от 0.5×10^{17} электрон/см^2 до 1.5×10^{17} электрон/см^2. Исходная структура ZnS соответствует кубической фазе (пр.гр. F-43m), которая является стабильной при облучении флюенсами электронов до 1.5×10^{17} электрон/см^2. С увеличением флюенса электронов до 1.5×10^{17} электрон/см^2 наблюдается рост размера кристаллитов с 19.9 нм до 23.1 нм, уменьшение плотности дислокаций с 2.53×10^{11} см$^{-2}$ до 1.87×10^{11} см$^{-2}$ и изменение микронапряжения с 7.11×10^{-3} до 6.10×10^{-3}. Установлено уменьшение ширины запрещенной зоны монокристалла ZnS при облучении электронами, что связано с ростом размера кристаллитов и изменением параметра решетки. Микротвердость монокристалла ZnS увеличилась на 8% за счет роста размера нанокристаллитов в результате электронного облучения.

Ключевые слова: сульфид цинка, электронное облучение, XRD, размер кристаллитов, плотность дислокаций, микронапряжения, оптическое поглощение, ширина запрещенной зоны, микротвёрдость.

The ZnS crystal was irradiated by electron beam with an energy of 2 MeV and fluences from 0.5×10^{17} electron/cm^2 to 1.5×10^{17} electron/cm^2. The initial structure of ZnS is in line with the cubic phase (sp.gr. F-43m), which is stable when irradiated with the electron fluences up to 1.5×10^{17} electron/cm^2. An increase in the size of crystallites from 19.9 nm to 23.1 nm, a decrease in the dislocation density from 2.53×10^{11} cm^{-2} to 1.87×10^{11} cm^{-2}, and a change in microstrain from 7.11×10^{-3} to 6.10×10^{-3} are observed with an increase in the electron fluence up to 1.5×10^{17} electron/cm^2. It has been established that electron irradiation leads to decrease of the ZnS single crystal band gap which is associated with an increasing of the crystallites size and a changing of the lattice parameter. The microhardness of the ZnS single crystal increase to 8% due to the growth in the size of nanocrystallites as a result of electron irradiation.

Keywords: zinc sulfide, electron beam irradiation, XRD, size of crystallites, dislocation density, microstrain, optical absorption, band gap, microhardness.

DOI: PACS number(s): 00.00.Xx, 00.00.Xx Copyright line will be provided by the publisher

I. Введение

ZnS является полупроводником с прямой запрещенной зоной шириной от 3.5 до 3.7 эВ [1, 2], с широкими возможностями для создания различных устройств [3-7] с уникальными физическими характеристиками. Известно, что шириной запрещенной зоны в полупроводниках, в частности в ZnS, наряду с легированием, можно “управлять” и внешним воздействием (температурой, давлением, облучением ионизирующими излучениями). Изменение структуры (структурных параметров), появление дефектов [8] также могут внести изменения в ширину запрещенной зоны [9], в различные свойства.

Согласно [10], ширина запрещенной зоны в полупроводниках зависит от размера нанокристаллита, который растет с увеличением температуры обработки. Рост размера кристаллитов

ZnS приводит к снижению ширины запрещенной зоны [11], а увеличение температуры обработки нанопленок способствует росту размера кристаллитов [12]. Ширина запрещенной зоны в ZnS также зависит от размера зерна образца [13] (исследованы образцы с размером зерна 400–450 нм, 600–650 нм, 950–1000 нм), а характер зависимости ширины запрещенной зоны от дозы облучения электронами с энергией 8 МэВ различен в образцах с разным размером зерен [13]. В исходном образце ZnS присутствуют точечные дефекты, соответствующие сере, цинку, а также вакансиям серы и цинка [13], однако облучение не инициирует образование новых уровней в запрещенной зоне. Облучение электронами с энергией 4.5 МэВ и дозой 35 кГр приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны в тонкой пленке ZnS с 3.10 эВ до 1.70 эВ [9]. Авторы [9] связывают такое снижение ширины запрещенной зоны с перестановкой ионов цинка и серы, о чем было сообщено и в [14]. Необходимо отметить, что в [9] определено изменение размеров кристаллитов в зависимости от дозы облучения электронами, а именно: увеличение размера кристаллитов при облучении дозой 15 кГр по сравнению с исходным, уменьшение почти в три раза при облучении дозой 25 кГр, а также увеличение на 50% при облучении дозой 35 кГр по сравнению с облучением дозой 25 кГр. Однако, отчетливая тенденция роста размера кристаллитов ZnS с увеличением температуры отжига в атмосфере азота в течение 1 часа с 300°C до 500°C установлена в [15], где размер кристал-литов растет с 27.75 нм (при 300°C) до 130.65 нм (при 500°C).

Известно, что многие физические свойства материалов зависят от структуры и структурных параметров [15]. В ZnS установлено существование кубической β-ZnS и гексагональной α-ZnS фаз [16-18]. При нормальном атмосферном давлении и температуре 1020°C низкотемпературная α-ZnS фаза переходит в β-ZnS фазу [19]. Преимущественное образование гексагональной фазы по сравнению с кубической при наличии окиси цинка и в зависимости от соотношения цинка и серы в тонкой пленке ZnS обнаружено в [20]. Авторами [20] также показано наличие двухфазного состояния с гексагональной и кубической фазами. При соотношении содержания цинка и серы до 1:2 в образце может образовываться, наряду с гексагональной фазой, и кубическая. В пленке ZnS присутствуют кубическая и гексагональная фазы, и в зависимости от температуры обработки изменяется их содержание в образце [16]. Однако установлено [21] присутствие только кубической фазы в тонкой пленке ZnS, полученной методом химического осаждения, хотя возможно регулирование структуры образующейся фазы температурой осаждения в нанопроволоках ZnS [21].

Влияние облучения (гамма лучи, электроны, протоны, нейтроны, ионы) на структуру и структурные параметры ZnS исследовано в [8, 18, 22]. При облучении электронами с энергией 400 кэВ и флюенсом от 10^{17} до 10^{19} электрон/см^2 обнаружены новые фазы, идентифицированные как ZnO и ZnO_2 [8]. Облучение ZnS, содержащего гексагональную фазу, электронами с энергией 4.5 МэВ и дозой до 35 кГр показало стабильность этой структуры к радиации [9].

Микротвердость является одной из важных физических характеристик ZnS, позволяющей определить и расширить область его применения. Одними из таких областей применения являются приборостроение, космические исследования. В [23, 24] установлено, что значение микротвердости в ZnS равно 1.65±0.03 ГПа, замещение части цинка железом (от 0 до 5 мол.% FeS) увеличивает микротвердость на 25% [24], при дальнейшем замещении до 8 мол.% микротвердость остается постоянной, а затем плавно снижается. Данные о влиянии электронного облучения на микротвердость ZnS в литературе отсутствуют.

Таким образом, из литературных данных следует, что отсутствуют комплексные систематические исследования по изучению влияния электронного облучения различных флюенсов на структуру, ширину запрещенной зоны, микротвердость и на размеры кристаллитов в кристалле ZnS.

II. Экспериментальные методы

Исследуемый кристалл ZnS с размерами 1×0.5×0.15 см выращен методом химического осаждения (CVD) [12, 25].

Элементный состав ZnS определяли на сканирующем электронном микроскопе SEM EVO MA10 (Oxford Instruments) методом энергодисперсионной спектроскопии (Carl Zeiss). Рентгеноструктурные исследования проводили на поликристаллических образцах ZnS на дифрактометре Empyrean Panalytical Series 3 с CuK_α. Данные рентгеноструктурного анализа обрабатывали ме-

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

тодом Ритвельда с помощью программы FullProf [26].

На основе полученных порошковых рентгенодифракционных данных определяли размер кристаллитов по формуле Дебая-Шеррера [27]:

$$D = K\lambda / (\beta \cos\theta) \quad (1)$$

где D – средний размер кристаллитов, K – геометрический коэффициент (0.9), λ – длина волны рентгеновского излучения (1.5406 Å), β – ширина дифракционного рефлекса на полувысоте (FWHM), θ – угол дифракции.

Плотность дислокаций определяли из уравнения [28]:

$$\delta = 1 / D^2 \quad (2)$$

Величина микронапряжения в кристалле ZnS рассчитывалась по уравнению Стокса-Вильсона [29]:

$$\varepsilon = \beta / (4 \tan\theta) \quad (3)$$

Облучение монокристаллического и поликристаллического ZnS проводили на ускорителе «Электроника У-003» ИЯФ АН РУз [30] с энергией электронов 2 МэВ (энергия электронов выбиралась с учетом толщины образца) и плотностью тока пучка 0.085 мкА/см^2. Облучение ZnS проводили при флюенсах электронов 0.5×10^{17}, 0.75×10^{17}, 1×10^{17} и 1.5×10^{17} электрон/см^2.

Оптическое поглощение монокристалла ZnS исследовали с помощью УФ-В спектрофотометра «Lambda-35» (Perkin Elmer) в диапазоне длин волн 190–1100 нм. Для определения ширины запрещенной зоны ZnS по спектрам поглощения в УФ-видимой области пользовались соотношением Тауца [31]:

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (4)$$

где $E_g = hc/\lambda$ – энергия оптической запрещенной зоны, h – постоянная Планка (6.626×10^{-34} Дж·с), c – скорость света (3×10^8 м/с), λ – поглощенная длина волны, α – коэффициент поглощения, $h\nu$ – энергия падающего фотона в эВ, A – постоянная крутизны края полосы.

Микротвердость монокристалла ZnS измеряли методом Виккерса на твердомере HVS-1000A, основанном на исследовании зависимости глубины проникновения алмазного индентора в кристалл от величины усилия, и определяли по [32]:

$$HV = 2F(\sin(\varphi / 2) / d^2 \quad (4)$$

где F – значение приложенной силы, d – среднее арифметическое значение диагоналей ромбической отпечатки, φ = 136° – средний угол между противоположными гранями в вершине пирамидального индентора. Измерения проводили при нагрузке 100 грамм и времени выдержки 10 с.

III. Экспериментальные результаты и обсуждение

III.1. Структурные исследования

Для получения максимально полной информации о структуре и структурных параметрах, монокристалл ZnS был измельчен и рентгеноструктурные исследования проводили с поликристаллическими образцами. Для определения структуры и структурных параметров исходного ZnS рентгенограмма обрабатывалась с помощью программы FullProf. Расчеты проведены в предположении образования, как в [18], гексагональной фазы (пр.гр. P6$_3$mc), кубической фазы (пр.гр. F-43m), а также присутствия свободных Zn, S, ZnO и ZnO_2.

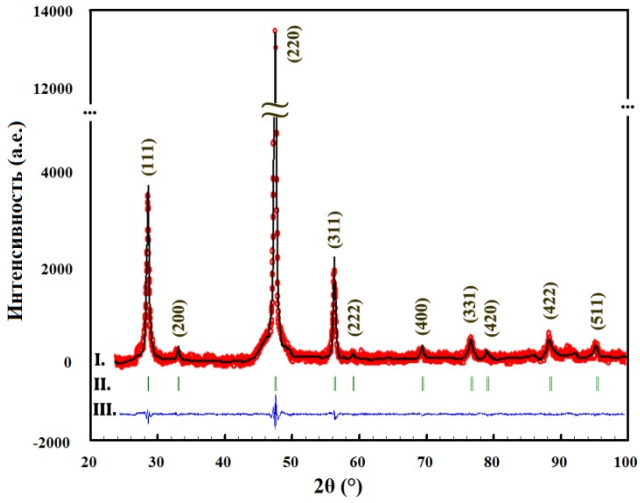


Рисунок 1. Рентгенограмма исходного кристалла ZnS. I – экспериментальные и расчетные данные; II – Брэгговские отражения; III – разностная кривая между экспериментальными и расчетными данными.

В результате расчетов (B_R=3.27; R_F=2.26; χ^2=3.68) установлено, что структура кристалла ZnS является однофазной, кубической, и описывается пространственной группой F-43m (рис. 1).

В табл. 1 приведены структурные данные, полученные в результате обработки рентгеноструктурных данных.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

Таблица 1. Рентгеноструктурные данные исходного кристалла ZnS.

№	Атомы	Атомные координаты			Тепловой фактор
		x	*y*	*z*	*B*
1	Zn	0.0000	0.0000	0.0000	0.49
2	S	0.2500	0.2500	0.2500	0.62

На рентгенограммах поликристалла ZnS, облученного электронами до флюенса 1.5×10^{17} электрон/см^2, присутствуют только рефлексы, соответствующие кубической фазе (пр.гр. F-43m), наблюдается смещение рефлексов в сторону больших углов рассеяния, появление или исчезновение существующих, а образования новых рефлексов не обнаружено. В табл. 2 приведены рентгеноструктурные данные ZnS, облученного флюенсом электронов 1.5×10^{17} электрон/см^2. Видно, что координаты атомов отличаются от исходных, т.е. наблюдается смещение атомов цинка по сравнению с исходным значением (табл. 1). Таким образом, в исследованных образцах ZnS, также как в [33, 34], существует только кубическая структура (пр.гр. F-43m), которая является радиационностойкой фазой. Необходимо отметить, что настоящие данные согласуются с данными [34], где кубическая структура в ZnS, имплантированном аргоном (Ar) дозой 1×10^{17} ион/см^2 и отожжённом до 500°C, является радиационно-стойкой.

Таблица 2. Рентгеноструктурные данные ZnS, облученного флюенсом электронов 1.5×10^{17} электрон/см^2.

№	Атомы	Атомные координаты			Тепловой фактор
		x	*y*	*z*	*B*
1	Zn	0.0047	0.0047	0.0047	0.71
2	S	0.2500	0.2500	0.2500	0.07

Установлено, что параметр решетки ZnS с увеличением флюенса электронов от 0.5×10^{17} до 1.50×10^{17} электрон/см^2 уменьшается с 5.4412 Å до 5.4258 Å.

Для определения размера кристаллитов, микронапряжения, плотности дислокаций и их зависимости от флюенса электронов был выбран структурный рефлекс (111) ($2\theta_Б \approx 28.39°$), так как разрешение рентгеновского дифрактометра высокое при этих углах рассеяния [35], что позволяет с высокой точностью определить значения вышеперечисленных характеристик ZnS.

Из рис. 2 видно, что размер кристаллитов растет с увеличением флюенса электронного облучения. Плотность дислокаций и микронапряжения уменьшаются соответственно от 2.53×10^{11} см$^{-2}$ до 1.87×10^{11} см$^{-2}$ и от 7.11×10^{-3} см$^{-2}$ до 6.10×10^{-3} см$^{-2}$. Плотность дислокаций в ZnS после облучения флюенсом электронов 10^{17} электрон/см^2 приблизительно такая же, как в [8], т.е. 1.65×10^{11} см$^{-2}$.

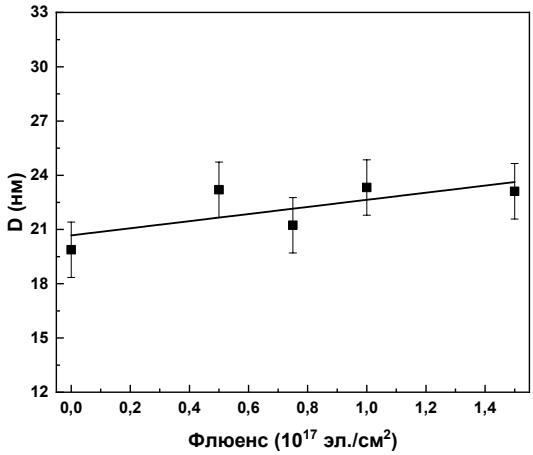


Рисунок 2. Значения размера кристаллитов ZnS при различных флюенсах.

III.2. Оптические свойства

На рис. 3 показаны результаты исследования прямой запрещенной зоны монокристаллического ZnS по спектру поглощения.

С помощью аппроксимации экспериментальных данных определена зависимость ширины запрещенной зоны от флюенса электронов в виде $y=3.5218-0.0088x$ (рис. 4.). Значение ширины запрещенной зоны исходного ZnS, равное 3.521 эВ, отличается от результатов работы [36], где E_g=3.77 эВ, однако “ближе” к результату работы [33], в которой E_g=3.56 эВ. Такое различие, скорее всего, связано с наличием примесей, а также тем, что в [36] исследован ZnS с гексагональной, а в [33] с кубической структурой. Ширина запрещённой зоны исходного образца ZnS в [34] равна ~3.512 эВ, однако с увеличением температуры отжига (800°C) она снижается до 3.41 эВ, т.е. отжиг способствует снижению значения ширины запрещенной зоны.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

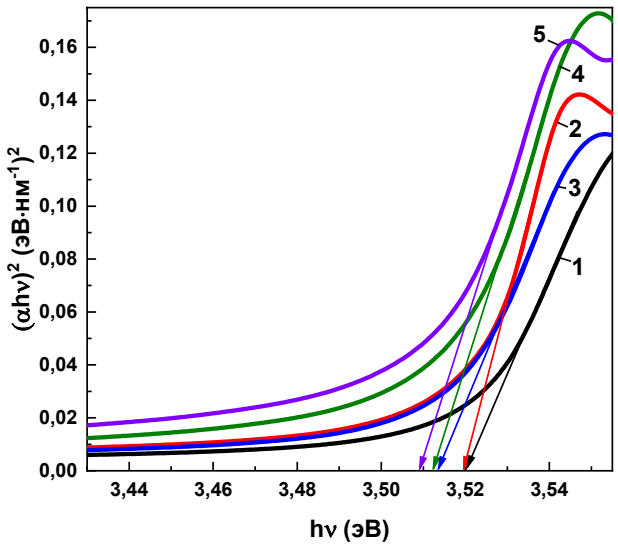


Рисунок 3. Оптическая ширина запрещенной зоны монокристалла ZnS в зисимости от энергии фотонов при различных флюенсах, электрон/см^2: 1) исходный, 2) 0.5×10^{17}, 3) 0.75×10^{17}, 4) 1×10^{17}, 5) 1.5×10^{17}.

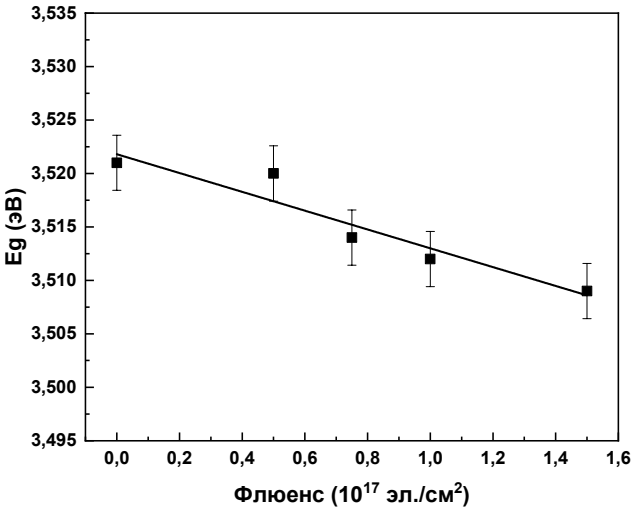


Рисунок 4. Зависимость ширины запрещенной зоны ZnS от флюенса электронного облучения.

Из рис. 4 видно, что ширина запрещенной зоны уменьшается с увеличением флюенса электронного облучения. Согласно теоретической работе [11], ширина запрещенной зоны уменьшается по мере увеличения размера наночастиц ZnS. В [11] это объяснено тем, что увеличение размера частиц (кристаллитов) приводит к уменьшению количества перекрывающихся орбиталей или энергетических уровней, а толщина полосы увеличивается. Это приведет к уменьшению ширины запрещенной зоны между валентной зоной и зоной проводимости [11]. Характер зисимости ширины запрещенной зоны от размера нанокристаллитов, установленный в настоящей работе, качественно подтверждает теоретические данные [11].

III.3. Измерение микротвердости

Полученные экспериментальные результаты микротвердости монокристалла ZnS представлены в табл. 3.

Таблица 3. Микротвердость монокристалла ZnS при нагрузке 100 грамм и облучении разными флюенсами электронов.

Флюенс, 10^{17} электрон/см^2	До облуч.	0.50	0.75	1.00	1.50
Микротвердость, HV	55.23	55.97	56.56	58.16	59.55

Из данных табл. 3 видно, что в результате облучения электронами до флюенса 1.5×10^{17} электрон/см^2 наблюдается увеличение микротвердости ZnS (рис. 5). С помощью аппроксимации полученных экспериментальных данных установлен характер зисимости микротвердости ZnS от флюенса электронов в виде

$$y=51.9851+3.1292e^{0.60x}.$$

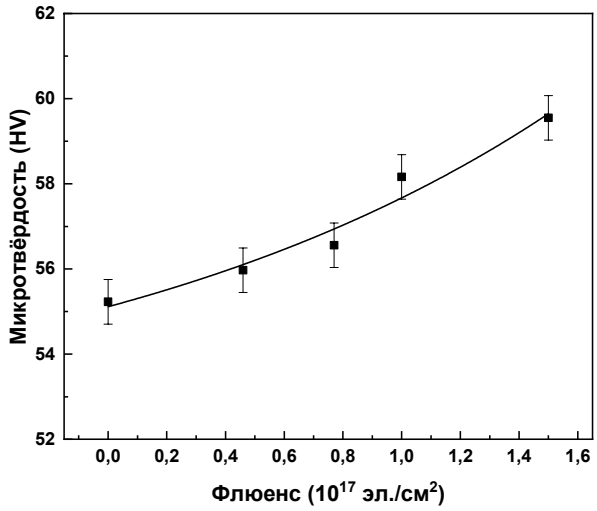


Рисунок 5. Зависимость микротвердости монокристалла ZnS от облучения различными флюенсами электронов.

Увеличение микротвердости в ZnS можно объяснить взаимодействием радиационных дефектов с дефектами, образовавшимися при выращивании ZnS (дислокации, дефекты упаковки и микродвойники) [37, 38], а также увеличением

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

размера кристаллитов, приводящим к уменьшению границ раздела кристаллитов.

Отличие величины микротвердости, определенной в настоящей работе, от результатов [24], скорее всего, связано с тем, что образцы синтезированы разными методами и отличаются по составу и содержанию примесей в образцах. Образцы ZnS в [24] синтезированы методом газового транспорта, синтез осуществлялся в течение 35 дней.

IV. Заключение

ZnS облучался электронами с энергией 2 МэВ и флюенсами от 0.5×10^{17} электрон/см^2 до 1.5×10^{17} электрон/см^2. Рентгеноструктурным исследованием исходного поликристалла ZnS установлено соответствие структуры кубической фазе (пр.гр. F-43m). При облучении флюенсами электронов до 1.5×10^{17} электрон/см^2 фазового перехода или образования новой фазы не обнаружено, только атомы цинка смещены из идеального положения.

Установлено, что размер кристаллитов растет с 19.9 нм до 23.1 нм с увеличением флюенса электронного облучения. Увеличение размера кристаллитов способствовало уменьшению связанных с ними величин, плотности дислокаций и микронапряжений, т.е. плотность дислокаций уменьшается с 2.53×10^{11} см$^{-2}$ до 1.87×10^{11} см$^{-2}$, а микронапряжение – с 7.11×10^{-3} до 6.10×10^{-3} при облучении флюенсами электронов от 0.5×10^{17} электрон/см^2 до 1.5×10^{17} электрон/см^2.

В результате облучения ширина запрещенной зоны монокристалла ZnS уменьшилась, что связано с ростом размера нанокристаллитов, изменением параметра элементарной ячейки. Также выявлено увеличение микротвердости монокристалла ZnS на 8% за счет роста размера кристаллитов в результате электронного облучения.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках программы научно-исследовательских работ Института ядерной физики АН РУз на 2020–2024 годы по теме: «Радиационно-стимулированные процессы при ядерной трансмутации легированного монокристаллического кремния». Авторы благодарят сотрудников уникального научного объекта «Электроника У-003» за поддержку и содействие в проведении экспериментов.

Метаданные

Structure and properties of ZnS irradiated by electrons

M.Yu. Tashmetov, B.N. Madaminov, N.B. Ismatov, F.K. Khalokov

Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Mirzo Ulugbek district, Ulugbek township, Khorasan 1, 100214, Tashkent, Uzbekistan

The ZnS crystal was irradiated by electron beam with an energy of 2 MeV and fluences from 0.5×10^{17} electron/cm^2 to 1.5×10^{17} electron/cm^2. The initial structure of ZnS is in line with the cubic phase (sp.gr. F-43m), which is stable when irradiated with the electron fluences up to 1.5×10^{17} electron/cm^2. An increase in the size of crystallites from 19.9 nm to 23.1 nm, a decrease in the dislocation density from 2.53×10^{11} cm^{-2} to 1.87×10^{11} cm^{-2}, and a change in microstrain from 7.11×10^{-3} to 6.10×10^{-3} are observed with an increase in the electron fluence up to 1.5×10^{17} electron/cm^2. It has been established that electron irradiation leads to decrease of the ZnS single crystal band gap which is associated with an increasing of the crystallites size and a changing of the lattice parameter. The microhardness of the ZnS single crystal increase to 8% due to the growth in the size of nanocrystallites as a result of electron irradiation.

Keywords: zinc sulfide, electron beam irradiation, XRD, size of crystallites, dislocation density, microstrain, optical absorption, band gap, microhardness.

Литература (References)

[1] K. Priya, V.K. Ashith, Gowrish K. Rao, Ganesh Sanjeev. Ceramics International **43**, 13, 10487 (2017).
[2] P.P. Hankare, P.A. Chate, D.J. Sathe, A.A. Patil. Applied Surface Science **256**, 1, 81 (2009).
[3] Xiaosheng Fang, Tianyou Zhai, Ujjal K. Gautam, Liang Li, Limin Wu, Yoshio Bando, Dmitri Golberg. Progress in Materials Science **56**, 2, 175 (2011).
[4] T. Ben Nasr, N. Kamoun, C. Guasch. Materials Chemistry and Physics **96**, 1, 84 (2006).
[5] Liangyan Chen, Daoli Zhang, Qian Chen. Proceedings of the 1-st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (Zhuhai, China, p. 599, January 18-21 (2006).
[6] N. Sounderya, Y.Zhang. Recent Patents on Biomedical Engineering **1**, 34 (2008).
[7] J. Jasieniak, J. Pacifico, R. Signorini, A. Chiasera, M. Ferrari, A. Martucci, P. Mulvaney. Adv. Funct. Mater. **17**, 1654 (2007).
[8] Yu.Yu. Loginov, A.V. Brilkov, A.V. Mozjerin. Fizika Tverdogo Tela **58**, 12, 2380 (2016).
[9] H.D. Dhaygude, S.K. Shinde, M.V. Takale, G.M. Lohar, M.C. Rath, V.J. Fulari. Ceramics International **42**, 8, 10159 (2016).

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

[10] J.P. Borah, K.C. Sarma. Acta Physica Polonica A **114**, No.4, 713 (2008).
[11] M. Singh, M. Goyal, K. Devlal. Journal of Taibah University for Science **12**, 4, 470 (2018).
[12] V.G. Sirkin. CVD-metod. Ximicheskoye parofaznoye osajdeniye (Nauka, Moskva, 2000).
[13] K. Priyaa, Gowrish K. Raoa, V.K. Ashitha, Ganesh Sanjeevb, Vijay Pal Vermac, Vikash Chandra Petwalc, Jishnu Dwivedic. Ceramics International **45**, 2, 2576 (2019).
[14] P. Raghu, K. Naveen, C.S. Mrudula, S. Ganesh, J. Shailaja, H.M. Manesh. Journal of Nano- and Electronic Physics **6**, 4, 04007(4pp) (2014).
[15] Fran Kurnia, Yun Hau Ng, Yiming Tang, Rose Amal, Nagarajan Valanoor, Judy N. Hart. Crystal Growth Design **16**, 5, 2461 (2016).
[16] K. Ben Bacha, N. Bitri, H. Bouzouita. Optik **127**, 5, 3100 (2016).
[17] B.M. Caruta. Focus on Nanomaterials Research. (Nova Science Publishers, Inc., New York, 47, 2006).
[18] Baodan Liu, Yoshio Bando, Mingsheng Wang, Chunyi Zhi, Xiaosheng Fang, Chengchun Tang, Masanori Mitome, Dmitri Golberg. Journal of Applied Physics **106**, 034302 (2009).
[19] E.T. Allin, J.L. Crenshew. American Journal of Science **34**, 341 (1912).
[20] N. Poornima, Anjaly Jose, C. Sudha Kartha, K.P. Vijayakumar. Energy Procedia **15**, 347 (2012).
[21] X.M. Meng, J. Liu, Y. Jiang, W.W. Chen, C.S. Lee, I. Bello, S.T. Lee. Chemical Physics Letters **382**, 3-4, 434 (2003).
[22] R.K. Dutta, U.C. Bind, J.B.M. Krishna, A.K. Sinha, G.S. Taki. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry **302**, 819 (2014).
[23] V.O. Osadchiy, E.G. Osadchiy, D.A. Chareyev. Messbauerovskiye spektri i mikrotverdost jelezosoderjaщix sfaleritov. Sbornik tezisov dokladov XVII Vserossiyskoye soveshaniye po eksperimentalnoy mineralogii (Sosnovka-Novosibirsk, 7–9 sentyabrya 2015).
[24] V.O. Osadchiy. Termodinamicheskiye i Fizicheskiye Svoystva Tverdogo Rastvora Sfalerita. Avtoreferat dissertatsii na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata geologo-mineralogicheskix nauk (Moskva, 2018).
[25] Hugh O. Pierson. Handbook of Chemical Vapor Deposition, (Noyes Publications, New York, 1999).
[26] Carvajal J. Rodríguez. Short Reference Guide of the Full Prof. Program, Version 3.5, (CEA-CNRS, Paris, 1997).
[27] A.L. Patterson. Physical Review **56**, 10, 978 (1939).
[28] M. Hassan, S. Younas, F. Sher, S.S. Husain, S. Riaz, S. Naseem. Applied Physics A **123**, 352, 1 (2017).
[29] R.N. Bhargava, D. Gallagher, X. Hong, A. Nurmikko. Physical Review Letters **72**, 416 (1994).
[30] M.Yu. Tashmetov, N.B. Ismatov, R.P. Saidov, Sh.M. Makhkamov, Problems of Atomic Science and Technology **5**(111), 91 (2017).
[31] P.Y. Yu, & M. Cardona. Fundamentals of Semiconductors (Springer, Berlin, 1996).
[32] ISO 6507-1:2005 Metallic materials. Vickers hardness test. Part 1: Test method.
[33] E. Yücel, Y. Yücel. Journal of Materials Science: Materials in Electronics **26**, 196 (2015).
[34] Shuwen Xue. Ceramics International **39**, 6, 6577 (2013).
[35] D. Balzar, N. Audebrand, M.R. Daymond, A. Fitch, A. Hewat, J.I. Langford, A. Le Bail, D. Louër, O. Masson, C.N. McCowan, N.C. Popa, P.W. Stephens, B.H. Toby. Journal of Applied Crystallography **37**, (6), 911 (2004).
[36] H.C. Ong and R.P.H. Chang. Applied Physics Letters **79**, 3612 (2001).
[37] P.D. Braun, Yu.Yu. Loginov, U.M. Stobbs, K.Dj. Xamfreys. Fizika Tverdogo Tela **38**, 1, 284 (1996).
[38] Z.Q. Fang, Gary C. Farlow, B. Claflin, David C. Look, D.S. Green. Journal of Applied Physics **105**, 123704 (2009).

Электронлар билан нурлантирилган ZnS нинг тузилиши ва хоссалари

М.Ю. Ташметов, Б.Н. Мадаминов, Н.Б. Исматов, Ф.К. Халлоков

Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси Ядро физикаси институти, Мирзо-Улуғбек тумани, Улуғбек посёлкаси, Хуросон 1, 100214, Тошкент, Ўзбекистон

ZnS кристалли 2 МэВ энергияли 0.5×10^{17} электрон/см^2 дан 1.5×10^{17} электрон/см^2 гача флюенс электронлар билан нурлантирилди. ZnS кристаллининг бошланғич структураси куб фазага (фазовий гуруҳи F-43m) мос келади ва бу структура 1.5×10^{17} электрон/см^2 флюенсгача бўлган электронлар билан нурлантирилганда ҳам ўзгармайди. Электрон флюенсининг 1.5×10^{17} электрон/см^2 гача ортиши билан кристаллитлар ўлчамининг 20 нм дан 22.5 нм гача ортиши, дислокация зичлигининг 2.5×10^{11} см$^{-2}$ дан 1.8×10^{11} см$^{-2}$ гача камайиши, микрокучланишнинг эса 7×10^{-3} дан 6×10^{-3} га ўзгариши аниқланди. Электронлар билан нурлантириш натижасида ZnS нинг кристаллитлари ўлчамининг ортиши ҳисобига тақиқланган зона кенглигининг камайиши ва микроқаттиқлигининг ортиши аниқланди.

Калит сўзлар: рух сульфиди, электрон нурланиш, XRD, кристаллит ўлчами, дислокация зичлиги, микрокучланиш, оптик ютилиш, тақиқланган зона кенглиги, микроқаттиқлик.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.