

O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI

OLIIY TA'LIM, FAN VA INNOVATSIYALAR VAZIRLIGI

FARG'ONA DAVLAT UNIVERSITETI

**FarDU.
ILMIY
XABARLAR**

1995-yildan nashr etiladi
Yilda 6 marta chiqadi

5-2025
ANIQ FANLAR

**НАУЧНЫЙ
ВЕСТНИК.
ФерГУ**

Издаётся с 1995 года
Выходит 6 раз в год

С.М.Отажонов, Р.Н.Эргашев, Қ.А.Ботиров, У.Х.Маъруфова, Л.Э.Эргашева Исследование Влияния Глубоких Уровней На Фотоэлектрические Параметры Гетероструктур р-CdTe – n-CdS И р-CdTe – n-CdSe	4
М.А.Маматова, М.Ш.Юсупова Diodning volt–amper xarakteristikasi.....	10
А.А.Сапарбайев, В.Г'.Хидиров, Л.Р.Нурумбетова, З.А.Шодиева Har xil kovak tashuvchi qatlamlar yordamida perovskit quyosh elementlarning fotovoltaiк parametrlarini yaxshilash	15
С.А.Исмоилова, Ш.Ш.Шухратов Alohida ta'lim ehtiyojlariga ega o'quvchilar uchun interfaol pedagogik yondashuvlar.....	22
М.К.Юлдашев Kremniyning optik va elektr xossalari	27
А.А.Сапарбайев, Л.Р.Нурумбетова, М.Н.Акбаров Donor:Y6 faol qatlam asosidagi polimer quyosh elementlarning optik va fotovoltaiк parametrlarini tadqiq qilish	30



UO'K: 621.315.593

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГЕТЕРОСТРУКТУР p-CdTe – n-CdS И p-CdTe – n-CdSe**CHUQUR SATXLARNI p-CdTe – n-CdS VA p-CdTe – n-CdSe
GETEROSTRUKTURALARINING FOTOELEKTRIK PARAMETRLARIGA TA'SIRINI
O'RGANISH****STUDY OF THE INFLUENCE OF DEEP LEVELS ON THE PHOTOELECTRIC
PARAMETERS OF p-CdTe – n-CdS AND p-CdTe – n-CdSe HETEROSTRUCTURES****Отажонов Салим Мадрахимович¹** ¹Ферганский государственный университет, д.ф.-м.н., профессор**Эргашев Равшанбек Назирович²**²Ферганский государственный университет, старший преподаватель PhD ф.-м.н.**Ботиров Қодир Абдуллаевич³** ³Ферганский государственный университет, старший преподаватель**Маъруфова Умидахон Халикжон қизи⁴** ⁴Ферганский государственный университет, студентка 2 курса**Эргашева Лола Эркин қизи⁵** ⁵Ферганский государственный университет, студентка 2 курса**Аннотация**

В работе проведено исследование влияния глубоких примесных уровней на фотоэлектрические параметры плёночных гетероструктур p-CdTe/n-CdS и p-CdTe/n-CdSe. Рассмотрены механизмы формирования глубоких уровней в процессе осаждения и последующей термической обработки слоёв. Установлено, что присутствие глубоких уровней существенно влияет на процессы рекомбинации носителей заряда, уменьшает время жизни неосновных носителей и приводит к изменению спектральной чувствительности структур. Приведён анализ зависимости основных фотоэлектрических характеристик — фототока, фотонапряжения и квантового выхода — от плотности и энергетического положения глубоких уровней. Полученные результаты позволяют выработать рекомендации по оптимизации технологических параметров для создания высокоэффективных фотоэлектронных приборов и солнечных элементов на основе гетероструктур p-CdTe/n-CdS и p-CdTe/n-CdSe. Определено, глубокие примесные уровни в CdTe энергия активации, которых равны $E_c=1,15$ эВ.

Annotatsiya

Maqolada chuqur aralashma satxlarning p-CdTe/n-CdS va p-CdTe/n-CdSe plyonka geterostrukturalarining fotoelektrik parametrlariga ta'siri o'rganiladi. Cho'kish jarayonida chuqur satxlarni shakllantirish mexanizmlari va qatlamlarni keyingi termal ishlov berish ko'rib chiqiladi. Chuqur satxlarning mavjudligi zaryad tashuvchining rekombinatsiyasi jarayonlariga sezilarli ta'sir ko'rsatishi, ozchilik tashuvchilarning ishlash muddatini qisqartirishi va tuzilmalarning spektral sezgirligining o'zgarishiga olib kelishi aniqlandi. Asosiy fotoelektrik xarakteristikalar - fototok, fotovoltaj va kvant rentabelligining chuqur satxlarning zichligi va energiya holatiga bog'liqligi tahlili keltirilgan. Olingan natijalar p-CdTe/n-CdS va p-CdTe/n-CdSe geterostrukturalari asosida yuqori samarali fotoelektron qurilmalar va quyosh batareyalarini yaratish uchun texnologik parametrlarni optimallashtirish bo'yicha tavsiyalar ishlab chiqish imkonini beradi. Aniqlanganki, CdTe tarkibidagi chuqur aralashmalar $E_c=1,15$ eV ga teng aktivlanish energiyalariga ega.

Abstract

The paper studies the influence of deep impurity levels on the photoelectric parameters of p-CdTe/n-CdS and p-CdTe/n-CdSe film heterostructures. The mechanisms of deep level formation during deposition and subsequent thermal treatment of layers are considered. It is established that the presence of deep levels significantly affects the processes of charge carrier recombination, reduces the lifetime of minority carriers and leads to a change in the spectral sensitivity of the structures. An analysis of the dependence of the main photoelectric characteristics - photocurrent, photovoltage and

FIZIKA-TEXNIKA

quantum yield - on the density and energy position of deep levels is given. The obtained results allow us to develop recommendations for optimizing the process parameters for creating highly efficient photoelectronic devices and solar cells based on p-CdTe/n-CdS and p-CdTe/n-CdSe heterostructures. It is determined that deep impurity levels in CdTe, the activation energy of which is equal to $E_c=1.15$ eV.

Ключевые слова: гетеропереходы, солнечные элементы, p-CdTe – n-CdS, фоточувствительность, поликристаллическая пленка, рекомбинационные центры, спектральная чувствительность.

Kalit so'zlar: geterobirikmalar, quyosh elementlari, p-CdTe – n-CdS, fotosenzgirlik, polikristal plyonka, rekombinatsiya markazlari, spektral sezgirlik.

Key words: heterojunctions, solar cells, p CdTe – n CdS, photosensitivity, polycrystalline film, recombination centers, spectral sensitivity.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие фотоэлектронных приборов и солнечной энергетики в значительной степени зависит от совершенствования полупроводниковых гетероструктур, обладающих высокими фотоэлектрическими характеристиками и стабильностью работы. Среди материалов группы II-VI особый интерес представляют соединения кадмия и теллура, такие как CdTe, а также кадмий-сульфид (CdS) и кадмий-селенид (CdSe), которые широко используются в производстве тонкопленочных солнечных элементов и фотоприёмных устройств [1-7].

Гетероструктуры на основе p-CdTe/n-CdS и p-CdTe/n-CdSe обладают рядом преимуществ, включая оптимальное согласование ширины запрещённых зон, высокую степень поглощения солнечного излучения и возможность формирования качественного гетероперехода [8]. Однако эффективность их работы во многом определяется дефектным состоянием материала, в частности, наличием глубоких примесных уровней в запрещённой зоне полупроводников. Глубокие уровни могут выступать центрами рекомбинации носителей заряда, снижать время их жизни и существенно ухудшать фотоэлектрические параметры устройств, такие как фототок, фотонапряжение и коэффициент квантового выхода.

В последние годы наряду с другими полупроводниковыми приборами на основе соединений A_2B_6 возрастает интерес к технологическим и химико-физическим свойствам соединения теллурида кадмия CdTe наряду с арсенидами кремния Si и галлия в полупроводниковой технике. CdTe также является прямозонным полупроводником с оптимальным диапазоном энергий $E_g \approx 1.5$ эВ и высоким коэффициентом поглощения [9]. Благодаря этим свойствам слои CdTe могут эффективно поглощать кванты света в широком диапазоне солнечного излучения.

В связи с этим исследование влияния глубоких уровней на фотоэлектрические свойства гетероструктур p-CdTe/n-CdS и p-CdTe/n-CdSe является актуальной научной задачей. Понимание механизмов образования и распределения глубоких примесных состояний позволяет разрабатывать методы технологического контроля и управления дефектной структурой, что открывает путь к созданию высокоэффективных и долговечных фотоэлектронных приборов.

Цель настоящей работы заключается в анализе особенностей формирования глубоких уровней и их воздействия на основные фотоэлектрические параметры гетероструктур p-CdTe/n-CdS и p-CdTe/n-CdSe, а также в определении подходов к оптимизации технологических процессов для повышения эффективности указанных устройств.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Пленки CdTe осаждались на графитовые подложки. В качестве источника CdTe использовались порошки CdTe полупроводниковой чистоты. Температура источника во время процесса варьировалась в диапазоне 850 – 950°C. Размер зерен пленки зависел от температуры подложки, при 500°C, получалась пленка размером зерен 20-30 мкм, а при 600°C – 50 мкм и более [10].

Гетеропереходы p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe изготавливались напылением в вакууме ($\sim 10^{-5}$ мм рт.ст.) слоя CdS и CdSe толщиной 1...5 мкм на поверхность базовых слоев p-CdTe. Пленки CdS и CdSe формировались при температуре подложки 250°C и 300°C соответственно. Слои CdS и CdSe легировались индием (In) непосредственно во время их

напыления. Токосъемочные контакты были получены напылением In в вакууме ($\sim 10^{-5}$ мм рт.ст.) [11].

Для гетероструктуры в качестве легирующих примесей, были выбраны нами элементы первой группы Ag и Cu. Выбор этих материалов в качестве примесей обусловлен тем что оптимальная температура диффузии Ag и Cu в CdTe, сравнительно низкая и лежит в интервале температур подложки $80 \div 300$ °С, при котором лишь можно получить пленки из CdTe наибольшими фоточувствительностью и стабильными характеристиками [5]. А также, они образуют глубокие уровни в запрещенной зоне CdTe, которые увеличивает концентрации носителей заряда и они участвуют при образовании фото ЭДС.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нагрузочная ВАХ структур p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe снята при освещении лампой накаливания с мощностью светового потока $55 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2}$, под имитатором внеатмосферного солнца (АМО) $P_{\text{в.с.}} - 139 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2}$, а также при различных интенсивностях солнечного освещения.

В таблице 1 приведены значения экспериментальных параметров и коэффициента полезного действия (η) пленочных структур при мощности солнечного излучения $60 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2}$. При этом КПД вычислен по формуле:

$$\eta = \frac{J_{\text{н}} V_{\text{н}}}{Sp}, \quad (1)$$

где $J_{\text{н}} V_{\text{н}}$ – соответственно ток и напряжение при оптимальном значении сопротивление нагрузки;

S – общая площадь структур;

P – мощность светового потока.

Как видно в таблице 1 значение коэффициента заполнения (Q) структура p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe соответственно равно 0,45 и 0,34. Довольно низкое значение коэффициента заполнения связано с большой величиной последовательного сопротивления [8]. Значение η для структур p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe при мощности солнечного излучения $60 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2}$ соответственно равно $5 \div 6$ % и $3 \div 4$ %.

Исследование зависимости $\ln I_{\text{кз}} = f(V_{\text{хх}})$ в режиме меняющейся освещенности при различных температурах показало, что прямая ветвь ВАХ структур p CdTe – n CdS подчиняется закономерности $I = I_0 \left(\frac{qV}{A_1 kT - 1} \right)$, где $A = 1,5 \div 1,7$ и $I_0 = 10^{-9} \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$.

У структур p CdTe – n CdSe зависимость $\ln I_{\text{кз}} = f(V_{\text{хх}})$ в условиях меняющейся описывается двумя экспоненциальными участками:

$$I = I_{01} \exp \left(\frac{qV}{A_1 kT} \right) + I_{02} \exp \left(\frac{qV}{A_2 kT} \right) \quad (2)$$

где $A_1 \approx 2$, $I_{01} \approx 10^{-4} \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$, $A_2 \approx 15$, $I_{02} \approx 10^{-6} \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$.

Таблица 1

Эксплуатационные параметры структур	p CdTe – n CdS	p CdTe – n CdSe
$I_0, \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$	10^{-9}	10^{-8}
A	$1,7 \div 2$	$1,5 \div 1,7$
$I_{\text{кз}}, \frac{\text{мА}}{\text{см}^2}$	$13 \div 15$	$6 \div 7$
$V_{\text{хх}}, \text{мВ}$	$600 \div 700$	$350 \div 400$
θ	$0,4 \div 0,45$	$0,35 \div 0,4$
$\eta, \%$	$5 \div 6$	$3 \div 4$

Проведенные оценки предэкспоненциального множителя показывают, что в структуре p CdTe – n CdSe при малых уровнях освещенности ток ограничивается рекомбинацией в слое объемного заряда. А при высоких уровнях освещенности в структуре p CdTe – n CdS и

FIZIKA-TEKNIKA

p CdTe – n CdSe в ток начинают вносить свой вклад диффузионные токи неосновных неравновесных носителей.

При высоких температурах ($T \geq 375$ K) первый участок в зависимости $\ln I_{\text{КЗ}} = f(V_{\text{ХХ}})$ (для p CdTe – n CdSe) исчезает, второй участок простирается на весь диапазон измеряемого тока и напряжения.

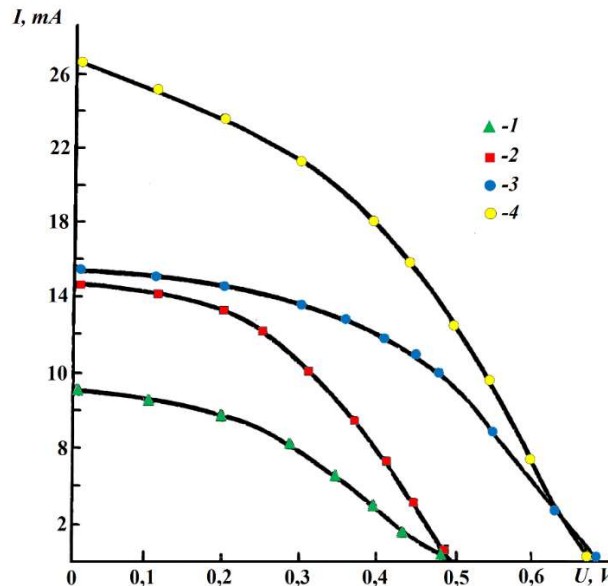


Рис.1. Нагрузочная ВАХ пленочной структуры p CdTe – n CdS (3,4) и p CdTe – n CdSe (1,2) при освещении W – лампой накаливания (1,3) и источником внеатмосферного солнца (2,4) с мощностью 55 и $139 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2}$.

Следует отметить, что термоциклирование улучшает на природу перехода структуры p CdTe – n CdS и тем самым улучшается вольт амперные характеристики. Это является одним из важнейших преимуществ структуры p CdTe – n CdS перед пленочными элементами на основе системы p Cu_{2-x}S – n CdS и p Cu_{2-x}Te – n CdTe.

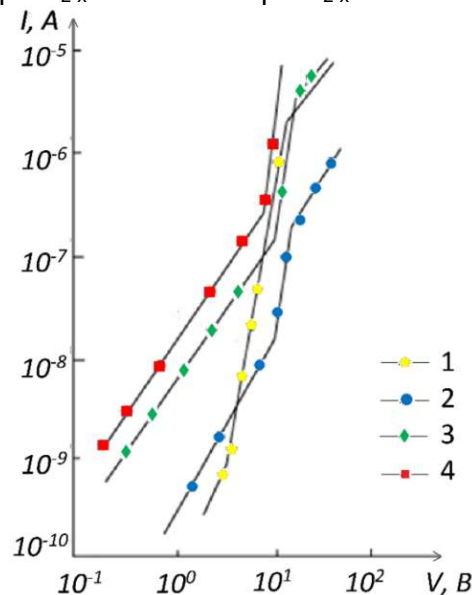


Рис.2. Обратные ветви ВАХ гетероперехода p CdTe – n CdS при различных температурах, К: 1-302, 2-338, 3-358, 4-376

На рис.2 приведены нагрузочные ВАХ солнечного элемента на основе гетероперехода p CdTe – n CdS (кривая 1) и p CdTe – n CdSe (кривая 2). При интенсивности солнечного излучения $\sim 60 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2}$ солнечного элемента на основе гетероперехода p CdTe – n

CdS имели следующие характеристики: $V_{xx} \approx 0,65\text{В}$ $I_{кз} \approx 14 \frac{\text{мА}}{\text{см}^2}$, коэффициент заполнения нагрузочной характеристики 0,4, КПД 5...6%. При таких условиях солнечного элемента на основе гетероперехода р CdTe – n CdSe обладали меньшими показателями: $I_{кз} \approx 13 \frac{\text{мА}}{\text{см}^2}$, $V_{xx} \approx 0,5\text{В}$, коэффициент заполнения 0,45, КПД 3...4% [9, 10].

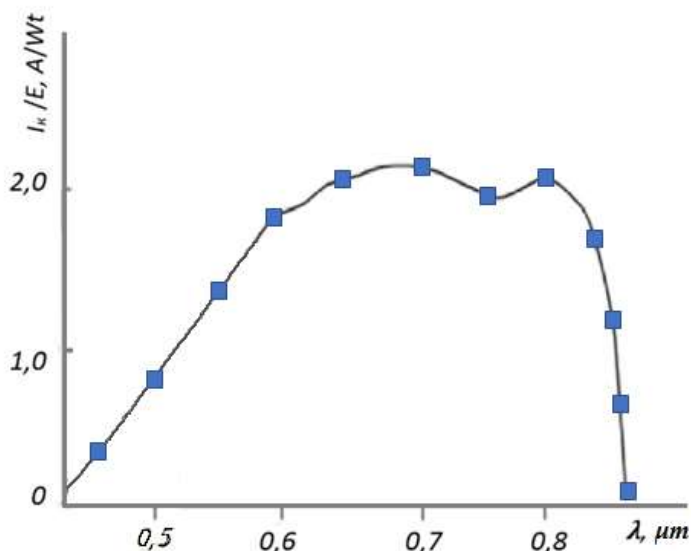


Рис. 3. Спектральное распределение фоточувствительности структуры р CdTe – n CdSe

Спектральная область чувствительности солнечного элемента со структурой CdTe – CdS ограничена значениями длины волны 0,52 и 0,85 мкм, причем в диапазоне 0,58...0,81 мкм кривая чувствительности имеет плоскую форму (рис.3) [11,12]. Спектральные положения коротковолновой и длинноволновой границ области чувствительности определяется значениями ширины – запрещенных зон, соответственно CdTe и CdS и не зависят от напряжения смещения, которое влияет на эффективность собирания носителей заряда. Еще одна особенность этих элементов состоит в том, что разделение носителей происходит не на границе раздела CdS и CdTe, а в глубине слоя CdTe, на расстоянии от его поверхности, равном нескольким микрометрам, что связано с образованием слоя в результате диффузии свободного атома кадмия в р-CdTe [13, 14].

При введении легирующего агента Ag и Cu в пленке CdTe спектральная область чувствительности солнечного элемента на основе структуры CdTe – CdSe лежит в диапазоне 0,40...0,80 мкм (рис. 3). Это свидетельствует о том, что Ag и Cu образует в CdTe глубокие уровни энергии активации, которых равны $E_c=1,15$ эВ. они будут участвовать при образовании фото – ЭДС. Однако коэффициент собирания носителя заряда в коротковолновой части спектра меньше чем в длинноволновой, что свидетельствует о малой диффузионной длине носителей CdSe.

ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Таким образом, по полученным экспериментальным результатам можно судить, созданные гетероструктуры на основе р CdTe – n CdS и CdTe – n CdSe существенно снижает влияние поверхностной рекомбинации на фоточувствительности и расширяется спектральное распределение фоточувствительности от 0,4 мкм до 0,9 мкм. При введении легирующего агента Ag и Cu образует в запрещенной зоне CdTe глубокие уровни, которые участвуют фото ЭДС, при этом фоточувствительность простирается в ближе ИК области.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuddus, Abdul & Ismail, Abu Bakar Md & Hossain, Jaker. (2021). Design of a highly efficient CdTe-based dual-heterojunction solar cell with 44% predicted efficiency. Solar Energy. 221. 488-501. 10.1016/j.solener.2021.04.062. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X21003625>
2. Bing Ren, Jijun Zhang, Meiyong Liao, Jian Huang, Liwen Sang, Yasuo Koide, and Linjun Wang. High-performance visible to near-infrared photodetectors by using (Cd,Zn)Te single crystal. Vol. 27, No. 6 | 18 Mar 2019 | OPTICS EXPRESS 8935/ <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-27-6-8935&id=407310>

FIZIKA-TEXNIKA

3. Dirin D.N. Synthesis and optical properties of colloidal CdTe/CdSe and CdTe/CdS nanocrystals based on CdTe tetrapods. / "Fundamental materials science and nanomaterials" / Lomonosov Moscow State University, Faculty of Materials Sciences, Moscow, Russia 2009.
<http://www.lssm.inorg.chem.msu.ru/pDirin.html>
4. S. Otajonov, T. Ahmedov, Ya. Usmonov, M. Khalilov, N. Yunusov. Optical properties of polycrystalline films of lead telluride with distributed stoichiometry // Journal of Physics: Conference Series 1889 (2), 022052.
5. E. Gaubas, T. Ceponis, D. Dobrovolskas, J. Mickevicius, N. Alimov, S. Otajonov. Study of polycrystalline CdTe films by contact and contactless pulsed photo-ionization spectroscopy // J. Thin Solid films 660 June 2018 pp. 231-235. Doi
6. Roman B. Vasilev, Dmitriy N. Dirin, Aleksandr Mixaylovich Gaskov. Effect of Temperature on the Growth of Colloidal CdTe Nanotetrapods. Mendeleev messages. Volume 19 Issue 3, May–June 2009, pages 126–127.
7. T. Okamoto, A. Yamada, M. Konagai, Optical and electrical characterizations of highly efficient CdTe thin film solar cells, Thin Solid Films 387 (2001) 6-10.
8. NE Alimov, JV Vaitkus, SM Otajonov, K Botirov. Investigation of the surface recombination rate in polycrystalline films from the A6B6 compound by the MW-PC method. Journal of Physics: Conference Series 2388 (1), 012006. DOI 10.1088/1742-6596/2388/1/012006
9. T Akhmedov, SM Otazhonov, MM Khalilov. INVESTIGATION OF THE FREQUENCY DEPENDENCE OF THE RESISTANCE OF PbTe FILMS. International Journal of Advance Scientific Research 2 (12), 149-155.
10. SM Otajonov, RN Ergashev. Photoelectric properties of solar cells based on pCdTe-nCdS and pCdTe-nCdSe heterostructures. Journal of Physics: Conference Series 2388 (1), 012062. DOI 10.1088/1742-6596/2388/1/012062
11. SM Otazhonov, RN Ergashev. Influence of thickness and temperature on photoelectric properties of p-CdTe-nCdS and pCdTe-CdSe heterostructures. Journal of Physics: Conference Series 2388 (1), 012001. DOI 10.1088/1742-6596/2388/1/012001
12. Sergei S. Bubenov, Alexander A. Vinokurov, Dulat H. Daurenbekov, Sergey G. Dorofeev, Kirill A. Cherednichenko, Asset Zh. Kainarbay, Turlybek N. Nurakhmetov. Chelation of Zn Cations as a Method for Their Replacement by Mn, Fe, Co in ZnSe Nanocrystals. Physica status solidi 2023. 19 October 2022 <https://doi.org/10.1002/pssa.202200556>