

Федотов В.Г., Трухан В.М., Щёлковая Т.В.

ПРОЯВЛЕНИЕ ДЛИННОПЕРИОДИЧЕСКИХ МОДУЛЯЦИЙ В ПОВЕРХНОСТНОЙ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КРИСТАЛЛОВ ДИФОСФИДА КАДМИЯ

Исследован элементный состав поверхности скола кристалла CdP₂. Изучено влияние радиационного облучения на спектры фотолюминесценции. Установлено, что действие облучения на поверхностный слой улучшает качество кристалла CdP₂ и способствует проявлению в нем минизонной структуры.

Ключевые слова: радиационное облучение, оксидный слой, фотолюминесценция, минизонная структура.

Физические свойства кристалла дифосфида кадмия зависят от методов получения и, в частности, от температурных режимов выращивания [1,2]. Представляется необходимым поиск новых активных методов воздействия на кристаллы, стимулирующих возрастание фоточувствительности, расширения спектрального диапазона и управление структурной перестройкой как объёмных, так и поверхностных областей кристаллов.

Так как поверхностные свойства кристаллов CdP₂ мало исследованы, то ряд результатов исследований остается предметом дискуссий. Так, например, неясно, в каком состоянии находится избыточный фосфор на поверхности после различных видов обработки. Не совсем понятен процесс окисления CdP₂ при выдержке на воздухе, в частности, поведение кадмия при окислении.

Указанные обстоятельства обусловили одновременное исследование поверхностной фотолюминесценции и элементного состава поверхностных слоев дифосфида кадмия с помощью оже-спектроскопии после радиационного воздействия и травления в азотной кислоте.

Кристаллы дифосфида кадмия тетрагональной модификации выращивали из предварительно синтезированного CdP₂ методом статической пересублимации. С целью увеличения площади поперечного сечения кристалла, перпендикулярного его оптической оси, была усовершенствована методика выращивания путем уменьшения градиента температур между зонами испарения и конденсации [3]. Размеры выращенных монокристаллов CdP₂ составляли: длина 60 мм, диаметр поперечного сечения 19 мм.

Радиационное облучение проводили электронами с энергией 1 МэВ и γ -квантами Co⁶⁰ при температуре, близкой к комнатной. Интегральные потоки составляли $3 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$; $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$; $2 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$; $5,2 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ для электронов и $5,2 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$; $10,5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$; $2,7 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$; $6,7 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ для γ -квантов.

Облученные образцы помещали в энергоанализатор оже-электронов с продольным электрическим полем ДЖАМП-100. По оже-электронам определяли элементный состав приповерхностных слоев кристаллов и получили информацию о межатомных взаимодействиях.

Измерения фотолюминесценции проводили в диапазоне энергии 2-3 эВ при температуре 4,2 К на образцах с естественными сколами в направлении [010], облученных электронами и γ -квантами, и на образцах, протравленных в азотной кислоте.

Оже-спектр образца со свежим сколом приведен на *Рис.1(а)*, при этом экспозиция на воздухе не превышала 30 минут. Основные пики соответствуют фосфору и кадмию. На поверхности кристалла присутствует небольшое количество углерода и калия. Пики

кислорода отсутствовали, т.е окисление фосфора и кадмия на воздухе происходит медленно. Отношение высоты пиков кадмия и фосфора менялось от 0,4 до 0,5.

После длительной выдержки образца на воздухе (в течении 30 суток) и облучения их γ -квантами в оже-спектре произошло увеличение пиков углерода и появился интенсивный пик кислорода - $I(b)$. Отношение пиков кадмия и фосфора увеличилось до 1,2, что свидетельствует о значительном истощении поверхности образца фосфором. Можно предположить, что часть атомов кадмия окислилась, и на поверхности образца образовался слой ментопонита (CdO). Послойный анализ при распылении поверхности образца ионами аргона с энергией 1,5 КэВ со средней скоростью 0,3 нм/мин показал, что толщина оксидного слоя составляет 7 нм.

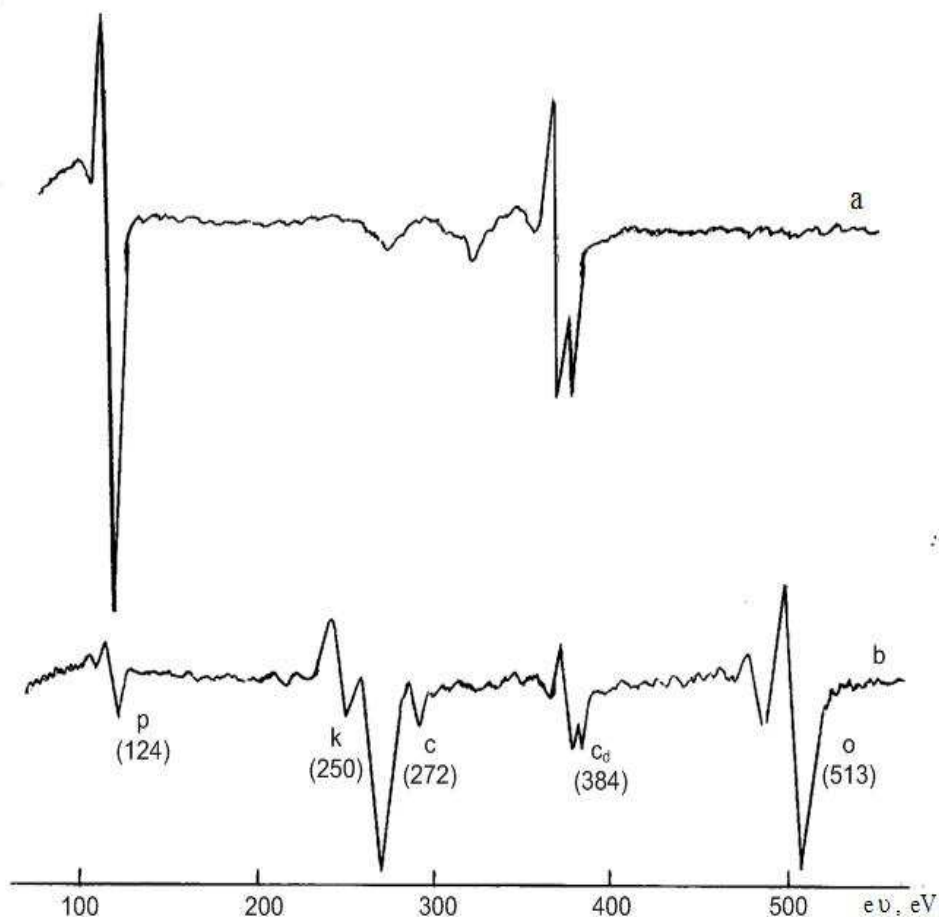


Рис. 1. Оже-спектр поверхности CdP_2 : а – свежий скол кристалла в направлении [010]; б – после длительной выдержки на воздухе и γ -облученный при $T = 300$ К.

На Рис.2 (*c,d,e,f*) представлены спектры фотолюминесценции (ФЛ) исходного образца и образца после облучения электронами. В исходном образце (*c*) фиксируется серия пиков, обнаруженных ранее [4]. В работе [4] весьма тщательно установлена экситонная природа этих пиков.

В указанной работе впервые отмечается аксиальная природа центра связанного экситона с головной линией $A_0 = 2,1343$ эВ, которая к тому же расщепляется. Остальные линии объясняются на основе модели фотонных спутников излучения экситон-примесного комплекса. В [5] предполагается, что пики при 2,126 и 2,135 эВ обусловлены излучением связанного и свободного экситонов соответственно. Предположения о природе этих пиков не очень обоснованы.

При малых потоках облучения электронами $\Phi_e \leq 10^{14} \text{ см}^{-2}$ кристаллов CdP_2 спектр ФЛ мало чем отличается от исходного, но уже при $3 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ появляется коротковолновой хвост ФЛ в диапазоне $2,14 \div 2,2$ эВ со слабой структурой новых линий (*d*), интенсивность которых возросла примерно в два раза с увеличением интегрального потока в десять раз (*e,f*).

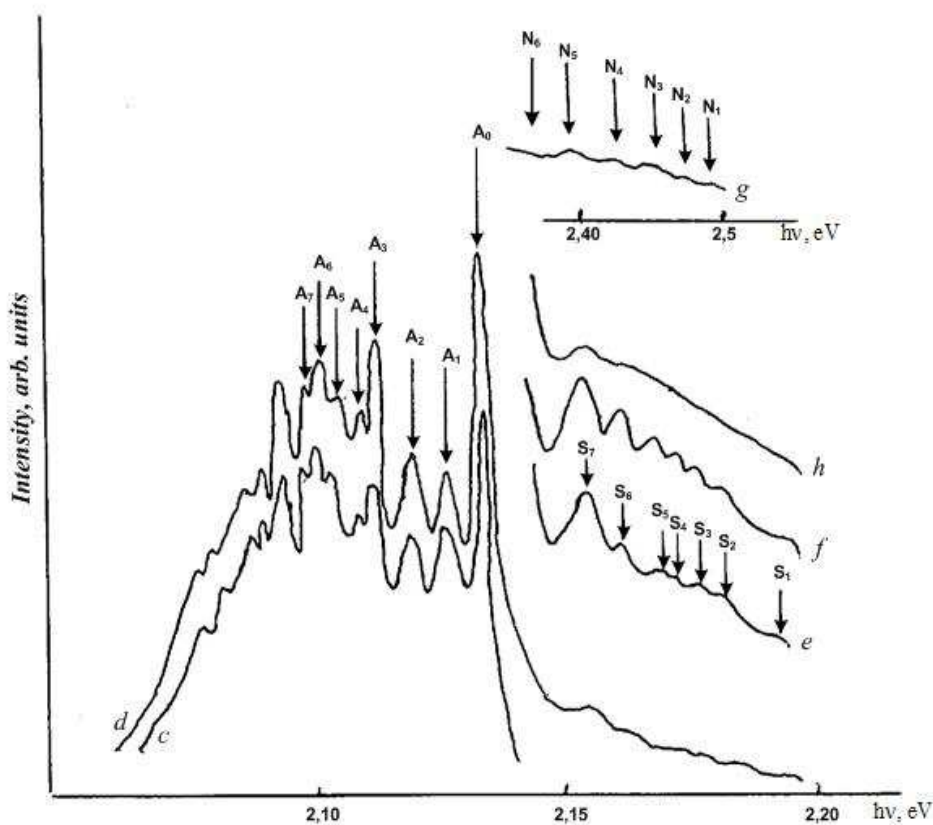


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции при $T = 4,2\text{K}$: *c* – скол в плоскости $[010]$; *d* – облученный в вакууме электронами $\Phi_e = 3 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$; *e,f* – облученные электронами $\Phi_e = 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и $\Phi_e = 3 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$; *g* – после γ -облучения; *h* – после травления.

После γ -облучения подавляется вся исходная тонкая структура. Одновременно проявляется новая размытая и асимметричная полоса в диапазоне $2,2 \div 2,5$ эВ - *Рис. 2(g)*. После травления кристаллов CdP_2 в азотной кислоте на спектрах ФЛ полоса в указанном диапазоне энергий не наблюдалась. При этом сохранялся коротковолновой хвост ФЛ в диапазоне $2,14 \div 2,2$ эВ - *Рис. 2(h)*, характерный для минизонных структур. Следует отметить, что ступенчатый спад экситонной ФЛ может также свидетельствовать о влиянии объемной минизонной структуры. Кроме того, коротковолновой “хвост” с тонкой структурой в виде нескольких ступенек наблюдался при исследовании спектров краевого поглощения кристаллов CdP_2 [6].

Есть основания предполагать, что полоса ФЛ в диапазоне $2,2 \div 2,5$ эВ вызвана образованием на поверхности облученного образца пленки ментопонита (CdO), ширина запрещенной зоны которого по одним данным $2,3 \div 2,4$ эВ [7], а по другим – $2,68$ эВ [8].

В качестве альтернативной модели можно рассматривать возможность проявления в фотолюминесценции CdP_2 квазидиэлектрической фазы с шириной зоны большей, чем в данном кристалле. Активация таких фаз после ионно-плазменной обработки CdP_2 отмечалась в [9].

Анализ проведенных данных позволяет представить следующую модель. В условиях объемного излучения свечение с $h\nu > E_g$ маскируется его сильным самопоглощением. В тоже время подобных ограничений не существует для чисто поверхностной люминесценции. По нашему мнению, после электронного облучения произошло восстановление сверхструктуры на поверхности кристалла CdP_2 . Улучшение поверхностной структуры после облучения впервые наблюдалась в ряде работ [10,11] и получило название поверхностно-усиленного радиационного упорядочения. Сущность этого эффекта заключается в том, что исходный поверхностный слой характеризуется определенной метастабильностью, обусловленной большой концентрацией дефектов. После облучения происходит ускорение релаксации материала к равновесному состоянию, что может приводить к радиационно-стимулированному флуктуационному фазовому переходу (ФФП).

Как известно, из-за наличия в гамильтониане рассматриваемых кристаллов инварианта Лифшеца, ФФП происходит не в однородную (полярную) фазу, а в пространственно-модулированную геликоидальную фазу с поляризацией квазиспина вдоль оси c^* . Как теоретически обосновано в [12], небольшая вариация (флуктуация) естественного угла между упорядочивающимися квазиспинами, каждый из которых связан с определенным слоевым пакетом, приводит к реализации так называемой «чертовой лестницы». В системе упорядочивающихся квазиспинов «чертова лестница» несовершенна, так как наряду с соразмерными фазами содержит также последовательность несоизмерных фаз, сопровождающихся образованием естественной сверхрешетки и минизонной структуры. Свойства их определяются одномерным гармоническим (или, по крайней мере, периодическим) потенциалом, как и в классических сверхрешетках [13].

Таким образом, на основании полученных данных можно утверждать, что радиационное облучение, особенно электронное, улучшает качество поверхности кристаллов CdP_2 . Под действием γ -облучения, по-видимому, происходит активация ментопонита CdO . При этом «хвосты» плотности состояний в слабо упорядоченном CdO могут значительно расширить коротковолновый участок спектра фото-эдс для солнечных элементов по сравнению с созданием гетеропереходов CdS-CdP_2 [14].

ЛИТЕРАТУРА

1. *В.М. Трухан, А.У. Шелег, И.В. Фекешгази, Т.В. Голякевич.* Способ получения монокристаллов дифосфида кадмия тетрагональной модификации: пат. 11194 Респ. Беларусь, МПК8 С 30 В 23/00/; заявитель ГО НПЦ НАН Беларуси по материаловедению.–№а20060467; заявл. 18.05.06; опубл. 30.10.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.– 2008.–№ 5 (64). – С. 105.
2. *Fedotov V.G., Bychkov A.G., Karlikov D.N. et al.* Temperature studies of optical properties of cadmium diphosphides crystals/Phys. Stat.sol. (a). – 1983. – Vol.76. – p. 121-126.
3. *Трухан, В.М.* Монография. Фосфиды, арсениды цинка и кадмия / С.Ф. Маренкин, В.М. Трухан. – Минск, Изд-во А.Н. Вараксин, 2010. – 224 с.
4. *Сырбу Н.Н.* Оптоэлектронные свойства соединений A^2B^5 . – Кишинев: Штиинца, 1983.
5. *Вавилов В.С., Коваль В.С., Негрий В.Д. и др.* Примесная фотолюминесценция CdP_2 /ФТП.– 1972. – Т.6, № 6. – с.1142-1143.
6. *Зуев В.А., Лавриненко Н.Ю., Мельников А.А., Федотов В.Г.* Аномалии края поглощения в CdP_2 /УФЖ. – 1990. – Т.35, № 12. – с. 1804-1806.
7. *Родо М.* Полупроводниковые материалы. Пер. с франц. М. «Металлургия», 1971.
8. *Битюцкая Л.А., Литвин А.Т., Червина Е.С.*// Тезисы докл. XII Всесоюзн. координац. совещ. «Материаловедение полупроводниковых соединений группы A^2B^5 », Черновцы, 5-8 окт. 1990 г., с. 85.
9. *Милославский В.К., Шкляревский О.Н.* Физика и техника полупроводников. – 1971. – Т.5. – с. 926.

10. Зувев В.А., Саченко А.В. Толыго К.Б. Неравновесные приповерхностные процессы в полупроводниках и полупроводниковых приборах. – М.: Сов. Радио, 1997.
11. Дмитрук Н.Л. // Фундаментальные вопросы ионной имплантации: материалы III Всесоюзн. Школы, Алма-Ата, 17-23 июня 1985: Наука, 1987. с. 60-81.
12. Корженевский А.Л. О критическом поведении кристаллов без центра инверсии / ФТТ. – 1981. – Т.23, №1 – с. 77-85.
13. Силин А.П. Полупроводниковые сверхрешетки /УФН. – 1985. – Т.147, №3. – с. 485-522.
14. Губанова А.А., Крысков У.А., Матвиец М.В. и др. // Тезисы докл.VIII Всесоюз.координац.совещ. Материаловедение полупроводниковых соединений группы A^2B^5 », Черновцы, 5-8 окт. 1990 г., с. 39-40.

Федотов В.Г., Трухан В.М., Щолкова Т.В.

ПРОЯВ ДОВГОПЕРІОДИЧНИХ МОДУЛЯЦІЙ У ПОВЕРХНЕВІЙ ФОТОЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ КРИСТАЛІВ ДІФОСФІДА КАДМІЮ

Досліджено елементний склад поверхні сколу кристала CdP_2 . Вивчено вплив радіаційного опромінення на спектри фотолюмінесценції. Встановлено, що дія опромінення на поверхневий шар кристала CdP_2 покращує якість кристала і сприяє прояву в ньому мін зонної структури.

Ключові слова: *радіаційне опромінення, оксидний шар, фотолюмінесценція, мінізонна структура.*

Fedotov V., Truhan V., Shchelkova T.

THE DISPLAY OF LONG-PERIOD MODULATIONS IN SURFACE PHOTOLUMINESCENCE OF PHOSPHIDE CRYSTALS OF CADMIUM

Elemental composition of crystal cleavage CdP_2 was investigated. Influence of radiation exposure on photoluminescence spectra was studied. The author found improving effect of radiation on surface layer, conducive to displaying miniband structure.

Key words: *radiation exposure, oxide layer, photoluminescence, miniband structure.*

УДК 629.78

Загорулько А.Н., Меланченко А.Г.

МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

В статье предложена обобщенная методика создания системы автономного управления полетом (САУП), обеспечивающая простоту проектирования системы, надежность реализации и полноту ее проверок.

Ключевые слова: *космический аппарат, управление полетом, автономность, отказоустойчивость.*

Введение

Решение проблем разработки и создания САУП невозможно без методологического аппарата, обеспечивающего простоту проектирования системы, надежность реализации и полноту ее проверок. Большинство существующих методик относятся к автоматизации процессов. В автоматизированных процессах рутинные ручные процессы просто замещаются