

Федотов В.Г.

## ВЛИЯНИЕ МОДУЛИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ДИФОСФИДОВ ЦИНКА И КАДМИЯ

*Исследованы температурные зависимости проводимости, фотопроводимости, показателя преломления, удельного вращения плоскости поляризации кристаллов  $ZnP_2$  и  $CdP_2$  тетрагональной модификации. Обнаружено проявление модулированной структуры, характерной для исследованных материалов. Отмечается перспективность использования модулированных структур в интегральной оптике, создании чувствительных фотоприемников в ультрафиолетовой области и различных СВЧ-устройств.*

**Ключевые слова:** модулированная структура, фотопроводимость, оптическая активность, фото-э.д.с.

Кристаллы дифосфидов цинка и кадмия тетрагональной модификации относятся к новому классу объектов в физике полупроводников, отличающихся отсутствием трансляционной симметрии (при сохранении полного трехмерного порядка). Проведенные детальные рентгенографические исследования позволили обнаружить (наряду с брэгговскими рефлексами 001) рефлексы, которые являются запрещенными для основной решетки рассматриваемых кристаллов (с пространственной группой  $P4_12_12$ ).

Кроме того, вблизи узлов запрещенных рефлексов обнаружены дополнительные сателлиты ( $001 + \delta$ ) от сверхрешетки с волновым вектором модуляции ( $\vec{q} = \vec{q} \cdot \vec{c}^*$ ), расположенным вдоль оси симметрии четвертого порядка  $c^*$  [1].

В этой работе показано, что в  $\alpha - ZnP_2$  с ростом температуры параметр несоизмеримости  $\delta$  увеличивается от 0,028 (80 К) до 0,068 (385 К), причем в некоторых интервалах температуры величина  $\delta$  принимает постоянные значения. Температурная перестройка  $\delta$  имеет вид так называемой неполной «дьявольской лестницы», сопровождается проявлением «инварного эффекта». Период сверхструктуры  $d$  в  $\alpha - ZnP_2$  уменьшается от 630 Å (80 К) до 300 Å (375 К).

Найденные особенности дифосфидов цинка (и, в ряде случаев, кадмия) были теоретически объяснены в работах [2,3] на основании представлений А. Л. Корженевского [4]. В рассматриваемых кристаллах сильные связи в анион-катионных пниктогенных (фосфорных) группировках симметризируются более слабыми связями «метал-пниктоген». При этом симметрия фрагментов с сильной связью оказывается ниже симметрии всего кристалла. Отмечается также, что в гамильтониане, описывающем рассматриваемые кристаллы с симметрией  $D_4^4(D_4^8)$  содержится инвариант Лифшица, что обеспечивает флуктуационный фазовый переход с образованием естественной сверхрешетки. Возникающие длиннопериодические одномерные модулированные структуры имеют вид либо простой спирали (SS), либо поперечных (или продольных) спиновых волн (солитонные решетки).

Модуляция решетки приводит к дроблению зон кристалла на минизоны и минищели. Ширина последних сильно зависит от безразмерного параметра  $q = \frac{V_0}{\varepsilon_0}$ , где  $V_0$  – амплитуда гармонического потенциала;  $\varepsilon_0$  – характерная энергия. Приняв для дифосфида цинка

$m_0^* = 0,2m_0$  и определив изменения периода сверхрешетки по рентгенографическим исследованиям, можно оценить изменения  $\varepsilon_0$  и  $V_0$  в исследуемом интервале температур. Характерная энергия минищелей  $\varepsilon_0$  меняется в температурном интервале (80-400) К от 0,4 МэВ до 2,5 МэВ. Полагая  $V_0$  порядка КТ, имеем  $V_0 = (10-30)$  МэВ. Это дает температурно зависимый параметр  $q$ , меняющийся от нескольких единиц до нескольких десятков в указанном интервале температур.

Теоретические представления были подтверждены исследованиями края поглощения, при которых было обнаружено отклонение от правила Урбаха в целом ряде температурных областей [5,6], причиной отклонения является отмеченное выше резкое понижение симметрии кристаллов в широкой области температур.

Выполнение правила Урбаха в узких температурных областях, указывает на существование в них более высокосимметричной фазы.

На рис. 1 представлены температурные зависимости  $\Delta n$  и  $\rho$ , измеренные при  $\lambda = 630$  нм. Видны отклонения от монотонности в окрестности следующих особых температурных точек (ОТТ)  $T_c$ : 230, 310, 380 К. В исследованном интервале длин волн эти аномалии существенно не зависят от  $\lambda$ . Что касается кривых пропускания, представленных на этом же рисунке (вставка), то наблюдалось различие в  $\lambda$ , при которой проявлялись наибольшие нарушения монотонности:  $\lambda = 576$  нм в диапазоне 220–230 К;  $\lambda = 586$  нм в диапазоне 300–310 К;  $\lambda = 630$  нм в диапазоне 350–400 К. Из рис. 1 следует также, что наклон зависимости  $\Delta n$  ( $T$ ) и  $\rho$  ( $T$ ) увеличивается при  $T > 385$  К, что особенно заметно для  $\rho$  ( $T$ ).

В рентгенографических исследованиях [1] ОТТ наблюдались вблизи 240, 310, 380 К и соответствовали узким (7–8 К) областям проявления несоизмеримой фазы. С ростом температуры период модуляции сверхструктуры плавно уменьшается до 300 Å при 300 К.

Рассматриваемая модель, учитывающая влияние замороженной волны плотности дефектов на несоизмеренно модулированную структуру, близка к модели Френкеля-Конторовой. В этой модели нарушения соразмерной модуляции рассматриваются как солитоны. Температурная зависимость среднего расстояния между ближайшими солитонами имеет вид так называемой «дьявольской лестницы». В рассмотренном температурном диапазоне до 385 К проявляется «полная дьявольская лестница». При  $T > 385$  К солитонная решетка разрушается.

Резкое возрастание наклона температурной зависимости  $\rho$  при  $T > 385$  К означает, что сверхструктура приводит к существенному ослаблению оптической активности. Это может быть обусловлено «гасящим» влиянием замороженной волны плотности дефектов. Особенности в спектрах пропускания (в температурной области существования несоизмеримой фазы) также можно объяснить возникновением дополнительных электронных переходов. Эти переходы становятся разрешенными в результате сильного ангармонизма, соответствующего несоизмеримой фазе.

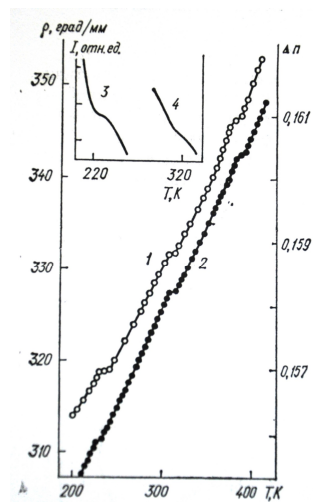


Рис. 1. Температурные зависимости оптической активности (1), дупреломления (2) кристаллов  $ZnP_2$ . На вставке – температурные зависимости пропускания при  $\lambda = 576$  нм (3),  $\lambda = 586$  нм (4)

Особенность модулированных структур (по аналогии со сверхрешетками) в том, что максимумы волновых функций для электронов и дырок сдвинуты на полпериода модуляции. Это приводит к стратификации носителей заряда вдоль оси модуляции. В результате образуются полосы (масштаба  $d/2$ ) с избытком или недостатком основных носителей ( $p^+, p^-, n^+, n^-$  – слои, p-p – переходы).

В свою очередь, это приводит к замедленной рекомбинации и позволяет объяснить большую величину конденсаторной фото-э.д.с.  $V_\phi$  и ее температурные изменения.

На рис. 2 приведена температурная зависимость  $V_\phi$ , измеренной при 500 нм в кристаллах  $ZnP_2$  с естественной поверхностью роста после травления.

Обращает на себя внимание аномальное температурное поведение  $V_\phi$  при  $T < 365$  К, переходящее в нормальное при более высоких температурах. Действительно, слабый температурный спад  $V_\phi$  при  $T > 365$  К характерен для обычного (диффузионно-дрейфового) механизма формирования  $V_\phi$ . При  $T < 365$  К наряду с этим механизмом формирования  $V_\phi$  на основной решетке появляется компонента, обусловленная модулированной структурой и противоположная ей по знаку. На том же рисунке изображена температурная зависимость проводимости  $\delta$  с перегибом в области, соответствующей участку замедления спада  $V_\phi$ . При измерениях температурной зависимости коэффициента отражения света аналогичных особенностей не замечено. В области больших длин волн ( $\lambda > 500$  нм) указанные температурные особенности формирования конденсаторной фото-э.д.с. либо вообще не проявлялись, либо были выражены крайне слабо.

Далее, для модулированных структур характерно проявление нелинейности кинетических свойств, в частности, возникновение отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) – электрической бистабильности. В работе [3] была представлена статическая вольтамперная характеристика (ВАХ) S-типа, для одной полярности, измеренной в направлении оси z кристалла  $ZnP_2$  тетрагональной модификации.

На рис.3 представлены три динамические ВАХ для трех частот 100 Гц, 1000 Гц и 2000 Гц, скопированных с экрана осциллографа. Обращает внимание, что область ОДС с ростом частоты остается неизменно равной 9 В, после которой ВАХ снова имеет положительный участок. Электрическая бистабильность сохраняется и при высоких частотах  $\sim 10^6$  Гц.

Наблюдалось также повышение фоточувствительности пороговых датчиков видимого и ультрафиолетового излучения, изготовленных на основе  $CdP_2$ . Причиной повышения является замедленная рекомбинация, а также образование дополнительного барьера на границе поверхностного слоя (с разрушенной сверхструктурой) и объемной сверхрешетки.

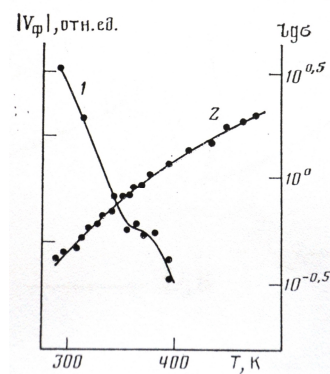


Рис.2. Температурная зависимость  $V_\phi$  (1) и проводимость (2) в  $\alpha - ZnP_2$  с травленной поверхностью

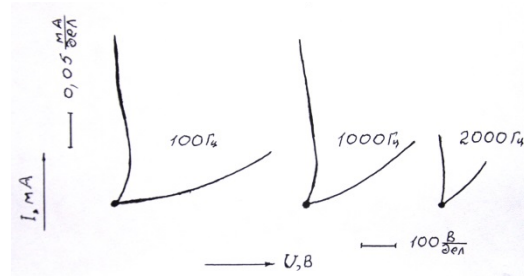


Рис. 3. Динамические вольтамперные характеристики кристалла  $\alpha - ZnP_2$  для трех частот 100 Гц, 1000 Гц и 2000 Гц

В таблице 1 приведены параметры фоточувствительного элемента на основе монокристалла CdP<sub>2</sub>.

Таблица 1

1	Спектральная чувствительность $\lambda$ , мкм	0,24 – 0,62
2	Максимум спектральной характеристики $\lambda_{\max}$ , мкм	0,56
3	Токовая чувствительность $si_{\max}$ при $\lambda_{\max}$ , А/Вт	0,36
4	Токовая чувствительность в интервале длин волн 0,24-0,4 мкм, А/Вт	0,025
5	Пороговая чувствительность $P_{\text{пор}}$ при $\lambda = 0,3$ мкм, Вт/Гц <sup>1/2</sup>	10 <sup>-14</sup>
6	Постоянная времени $\tau$ , с	10 <sup>-4</sup>
7	Темновое сопротивление $R_m$ , Ом	10 <sup>9</sup>
8	Рабочее напряжение $U$ , В	2
9	Освещаемая поверхность, мм <sup>2</sup>	5

Из таблицы видно, что данный фоточувствительный элемент обладает высоким быстродействием и высокой пороговой чувствительностью в ультрафиолетовом диапазоне спектра.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке различных оптоэлектронных устройств, в частности для разработки соответствующих оптических линий задержки, модуляторов, дефлекторов, датчиков температуры, устройств для передачи информации вдоль поверхности в системах интегральной оптики и различных СВЧ-устройствах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шелег А. У., Зарецкий В. В. Исследование последовательности фазовых переходов соизмеримая-несоизмеримая-соизмеримая фаза в  $\alpha - \text{ZnP}_2$  рентгенографическим методом / письма ЖЭТФ. – 1982. Т. 39. – вып.4. – с. 166-169.
2. Чуйко Г. П. Вибронные методы и расщепление вырожденных зон симметрии  $\Gamma_5$  в тетрагональных кристаллах  $\text{A}_2\text{B}_5$  / УФЖ. – 1986. – Т. 31. №2. – с.244-246.
3. Федотов В. Г., Трухан В. М., Шелковая Т. В. Модель длиннопериодических модуляций в тетрагональном дифосфиде цинка / Неорганические материалы, 013. – Т. 49, № 11. – с.1153-1156.
4. Корженевский А. Л. О критическом поведении кристаллов без центра инверсии / ФТТ. – 1981. – Т. 23, № 1. – с. 77-85.
5. Зуев В. А., Лавриненко Н. Ю., Мельников А. А., Федотов В. Г. Особенности края поглощения в  $\alpha - \text{ZnP}_2$  / Укр. физ. журн. 1990. – Т. 35, № 3. – с. 346-349.
6. Зуев В. А., Лавриненко Н. Ю., Мельников А. А., Федотов В. Г. Аномалии края поглощения в  $\text{CdP}_2$  / Укр. физ. журн., 1990. – Т. 35, № 12. – с. 1804-1806.

**Федотов В.Г.**

#### **ВПЛИВ МОДУЛЬОВАНОЇ СТРУКТУРИ НА ЕЛЕКТРИЧНІ, ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ТА ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КРИСТАЛІВ ДИФОСФІДІВ ЦИНКУ І КАДМІЮ**

*Досліджені температурні залежності провідності, фотопровідності, показника заломлення, питомого обертання площини поляризації кристалів  $\text{ZnP}_2$  та  $\text{CdP}_2$  тетрагональної модифікації. Виявлено прояв модульованої структури, характерної для досліджених матеріалів. Відзначається перспективність використання модульованих*

---

---

структур в інтегральній оптиці, створенні чутливих фотоприймачів в ультрафіолетовій області та різних НВЧ-пристроїв.

**Ключові слова:** модульована структура, фотопровідність, оптична активність, фото-е.р.с.

**Fedotov V.**

**THE INFLUENCE OF MODULATED STRUCTURE ON ELECTRIC, PHOTOELECTRIC AND OPTICAL PROPERTIES DIPHOSPHIDE CRYSTALS OF ZINC AND CADMIUM.**

*Temperature dependences conductivity, photoconductivity, indicator refraction and specific rotary plane polarization of crystals  $ZnP_2$  and  $CdP_2$  tetragonal modification were investigated.*

*Modulated structure characteristic for investigated materials was discovered. Perspective of use modulated structures in integral optic, creation sensitive photoelement manifest in ultraviolet and various UHF-devices.*

**Keywords:** modulated structure, photoconductivity, optical activity, photo-e.m. f.

УДК 519.876

**Кривець Т.О., Овчарук В.О.**

**ДОСЛІДЖЕННЯ СІТЬОВОЇ ТРАНСПОРТНОЇ МОДЕЛІ  
ДЛЯ УПРАВЛІННЯ КОНТЕЙНЕРНИМИ ПЕРЕВЕЗЕННЯМИ  
НА МОРСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ**

*Робота присвячена аналізу використання сітьової транспортної моделі для задачі оперативного управління контейнерними перевезеннями на морській лінії у випадку великої розмірності задачі. Розроблена математична модель та проведений аналіз задачі оптимального планування перевезень контейнерів на прикладі чотирьох портів показали, що для розв'язку таких задач ефективно використовувати сітьові транспортні моделі.*

**Ключові слова:** математична модель, контейнерні перевезення.

**Постановка проблеми.** Задачі управління контейнерним парком на морській лінії можна сформулювати як задачі транспортного типу, точніше, як сітьові транспортні задачі, що дає можливість використати для їх розв'язку сучасні в цій галузі спеціальні методи лінійного програмування. На відміну від стандартних методів лінійного програмування, ці методи більш ефективні при розв'язанні задач оперативного управління великої розмірності в реальному масштабі часу.

**Аналіз попередніх досліджень.** У роботах [1,2,3] відзначалось, що оптимальна організація перевезень порожніх контейнерів як одна з найважливіших задач управління контейнерними перевезеннями дозволяє не тільки скоротити загальний парк контейнерів на морській замкненій лінії, але також веде до успішного виконання планів перевезень в кінцевих і проміжних портах лінії, що були складені заздалегідь. Для таких задач розроблена математична модель, яка сформульована як задача лінійного програмування загального виду.