

### СПЕКТР НЕЛІНІЙНОГО ПОГЛИНАННЯ *CdSe*

Куліш М.Р., доктор фізико-математичних наук, Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарева НАНУ, Київ, Україна

Малиш М.І., кандидат фізико-математичних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна

### NONLINEAR ABSORPTION SPECTRUM OF THE *CdSe*

Kulish N.R., Doctor of physical-mathematical sciences. V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Malysh M.I. Candidate of physical-mathematical sciences, National Transport University, Kyiv, Ukraine

### СПЕКТР НЕЛИНЕЙНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ *CdSe*

Кулиш Н.Р., доктор физико-математических наук, Институт физики полупроводников имени В.Є. лашкарева, НАНУ, Киев, Украина

Мальш Н.И., кандидат физико-математических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина

Спектр поглинання *CdSe* при низьких рівнях інтенсивності опромінення (область лінійної оптики) монокристалічних зразків детально вивчено (дивись, наприклад [1, 2]). Відомі також особливості залежності коефіцієнта поглинання  $K$  від інтенсивності збудження  $I_0$ , отримані на деяких окремих довжинах хвиль  $\lambda$  [дивись, наприклад, [3, 4)], що не дає повного уявлення про спектр поглинання при інтенсивностях достатніх для повного просвітлення зразків. Результати даної роботи дозволяють усунути цю прогалину.

Зразками були плоскопаралельні вюрцитні пластинчасті монокристали *CdSe* n-типу з темновим питомим ОПОРОМ 1 Ом-см з оптичною віссю, розміщеною в площині зразка. Для накачки використовувався лазер на барвинках. Тривалість імпульсів світла становила 20 нс, спектральна півширина ліній генерації 0,04 нм. Для визначення коефіцієнта поглинання вимірювались інтенсивності світла на вході  $I_0$  і виході  $I$  зразка. Стан поляризації світла відносно оптичної осі  $C$  задавався призмою Глана. В області лінійної оптики спектр поглинання крайового поглинання *CdSe* (рис. 1) вимірюється за допомогою спектрометра СДЛ-1 з використанням 100 ватної лампи розжарювання. Видно, що при зміні положення площини поляризації з  $E \perp C$  на  $E \parallel C$  спектр зсувається в короткохвильовий бік (порівняй положення кривих 1 і 2 на рис. 1). Зауважимо, що в області краю фундаментальної смуги поглинання можна виділити три ділянки. На першій з них коефіцієнт поглинання майже не залежить від енергії  $h\nu$  фотонів. На другій спостерігається експоненціальне зростання коефіцієнта поглинання, яке описується правилом Урбаха [5-7]):

$$K = K_0 \exp \left[ \frac{-\sigma(E_g - h\nu)}{kT_0} \right], \quad (1)$$

де  $K_0$ ,  $\sigma$  - константи,  $k$  - стала Больцмана,  $E_g$  - ширина забороненої зони,  $T_0$  - абсолютна температура. Правило Урбаха виконується коли  $h\nu < E_g$ . На третій ділянці зі зростанням енергії фотонів спостерігається збільшення коефіцієнта поглинання за корневим законом

$$K = K^* (h\nu - E_g)^{1/2}, \quad (2)$$

що характерно для прямих міжзонних переходів. В (2)  $K^*$  - константа.) Власне міжзонне поглинання відбувається в області енергій фотонів  $h\nu \geq E_g$ .

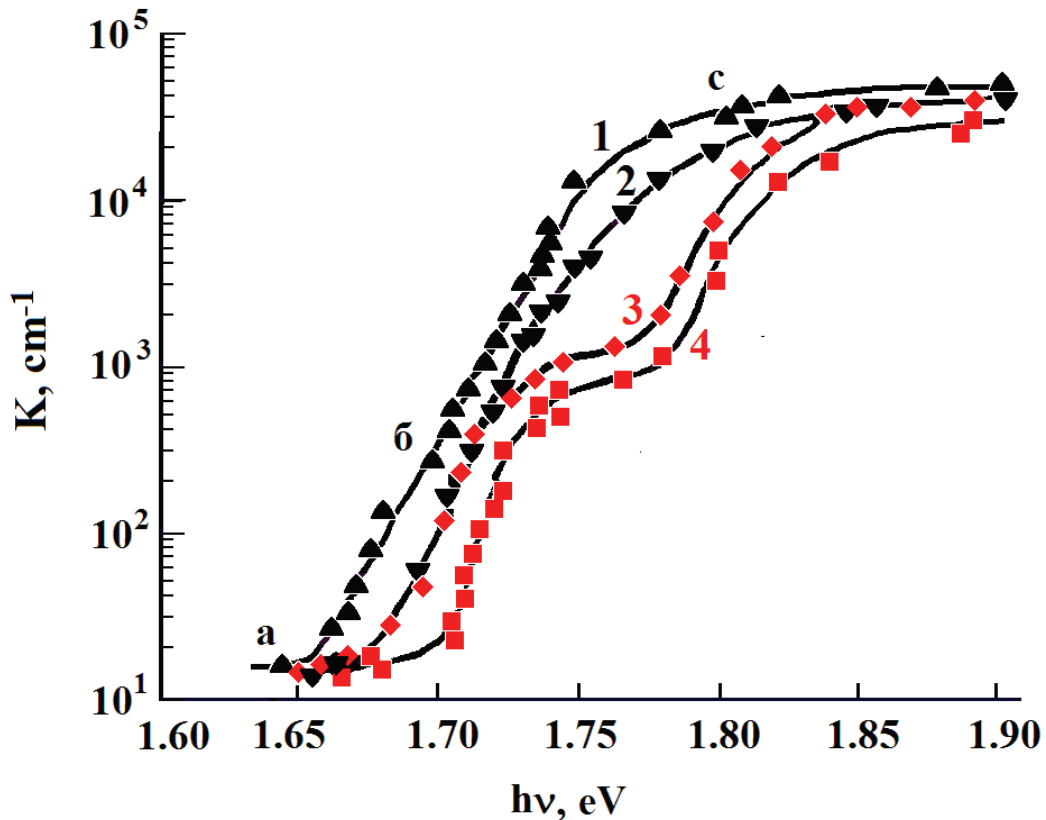


Рисунок 1 – Спектр лінійного (1, 2) і нелінійного (3, 4) поглинання *CdSe* для поляризацій  $E \perp C$  (1, 3) і  $E \parallel C$  (2, 4): а – низькочастотна ділянка, б – урбахівська ділянка, в – область міжзонних переходів.

При накачці монокристалів лазерним випромінюванням зміна пропускання з ростом інтенсивності  $I_0$  залежить від того, на якій спектральній ділянці вона спостерігається. Зокрема

на частотах, що припадають на першу ділянку, пропускання  $T$  зразків не залежить від  $I_0$  (рис. 2а) аж до порогу руйнування зразків.. Причина цього в тому, що в цій спектральній області залишкоае поглинання обумовлене розсіянням світла на великомасштабних збуреннях ґратки.

На частотах в області урбахівської частини спектра лінійного поглинання і в області міжзонних переходів спостерігалась нелінійна залежність  $T$  від  $I_0$  (рис. 2б і 2в). Всі одержані експериментальні залежності описуються рівнянням:

$$(I_0 / I^*)(T - 1) + \ln T = -K_H d, \quad (3)$$

де  $I^*$  - параметр нелінійності.

Зауважимо, що і в поляризації  $E \parallel C$  залежності  $T$  від  $I_0$  аналогічні наведеним на рис. 2. Варто відмітити, що для обох поляризацій на всіх довжинах хвиль не спостервгалось повного просвітлення зразків (рис. 2). Це свідчить про наявність залишкового поглинання в стані насичення зразків. Потрібно звернути увагу на те, що при низьких інтенсивностях світла (область лінійної оптики) існує ділянка, де пропускання не залежить від інтенсивності. Подібна ділянка існує і при високих значеннях інтенсивності світла. Skorиставшись відомими значеннями  $d$  і величинами пропускання при низьких і високих інтенсивностях знаходимо відповідно коефіцієнт поглинання  $K_H$  для області лінійної оптики і коефіцієнт поглинання  $K_B$  для стану насичення поглинання. Сукупність одержаних значень коефіцієнтів поглинання дозволяє одержати спектр крайового поглинання не лише в оласті лінійного поглинання (рис. 1, криві 1, 2), а й при насиченні поглинання

(рис. 1, криві 3, 4) для обох поляризацій світла. Простір між кривими 1 та 3 ( $E \perp C$ ) і кривими 2 і 4 ( $E \parallel C$ ) відповідає величині та спектральній області просвітлення. З довгохвильового боку вона обмежена процесами розсіяння світла на великомасштабних збуреннях ґратки, а з короткохвильового боку - процесами стимульованого випромінювання [91], що перешкоджають заповненню нерівноважними носіями заряду екстремумів зон дозволених енергій.

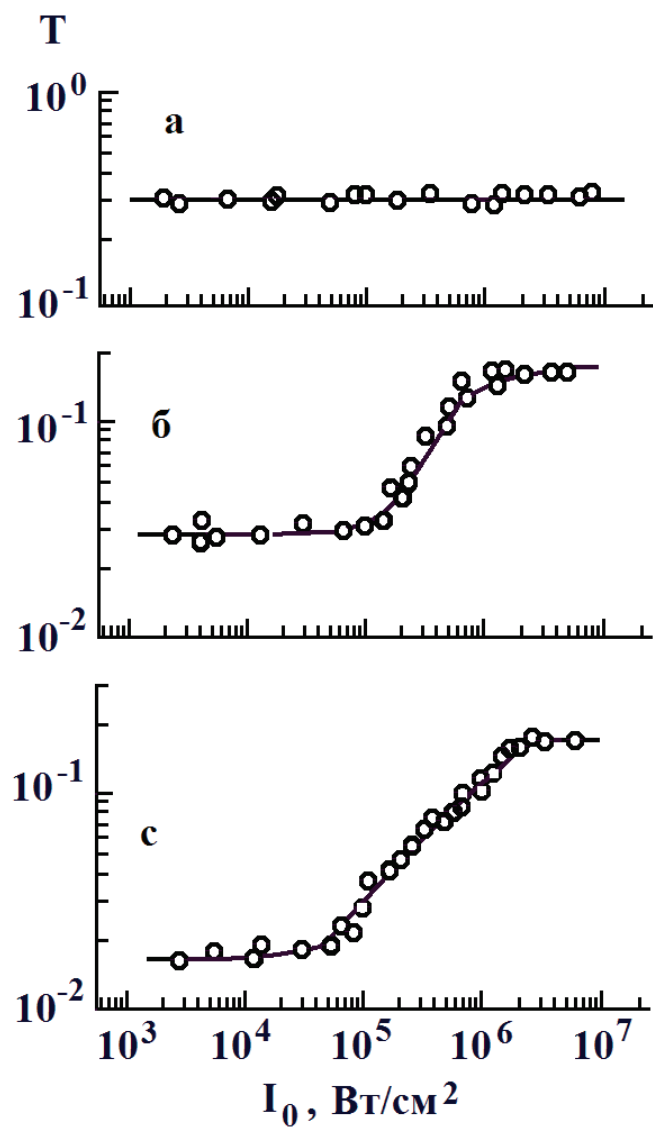


Рисунок 2 – Залежність  $T(I_0)$  в області довгохвильового хвоста поглинання (а), в області міжзонних переходів (б), урбахівській ділянці спектра (в) для поляризації  $E \perp C$ . Точки - експеримент, суцільні криві – розрахунок за формулою (3).

Потрібно відзначити дві особливості в зміні крайового поглинання при переході від стану лінійної оптики до стану насичення поглинання. Перша з них полягає в тому, що в урбахівській ділянці спектра зменшення коефіцієнта поглинання значно менше за аналогічну зміну в області міжзонних переходів. Найбільш вірогідною причиною цього є значно менша густина станів в урбахівському хвості ніж в областях дозволених енергій. Друга особливість полягає в тому що в області міжзонних переходів залишкове поглинання достатньо високе і слабо залежить від енергії квантів світла. На думку авторів причина цього полягає в відсутності просвітлення в області хвоста густини станів, сформованої коливаннями ґратки, обумовленими фонами.

Отже, в роботі розглянуті особливості зміни спектра крайового поглинання при переході до стану насичення поглинання.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Физика и химия соединений  $A^{II}B^{VI}$ . Под редакцией проф. С.А. Медведева М.: МИР, 1970. – С. 1–624.
2. Schaffner M., Bao X., Penzkofer A. Principal optical constants measurement of uniaxial crystal CdSe in the wavelength region between 380 and 950 nm // Applied optics. – 1982. – Vol. 31. – № 22. – P. 4546–4552.
3. Кулиш Н.Р., Малыш Н.И., Булах Б.М. Динамический эффект Бурштейна-Мосса в CdSe // Украинский физический журнал – 1990. – Т. 35, вып. 5. – С. 671–674.
4. Кулиш Н.Р., Лисица М.П., Мазниченко А.Ф., Булах Б.М. Насыщение оптического поглощения в CdSe // Физика и техника полупроводников – 1978. – Т. 12, – вып. 5. – С. 987–990.
5. Toyozawa Y. The Urbach rule and exciton-lattice interaction // Technical. Report. ISSP – 1964. – Vol. 1A(119). P. 1–68.
6. Redfield D. Electric fields of defects in solids // Physical. Review. – 1963 – Vol. 130 – № 3. – P. 914–915.
7. Dow J.D., Redfield D. Urbach rule // Physical. ReviewB. – 1972 – Vol. 5 – № 2. P. 594–599.
8. Mol A.W., Muribeca R.A., Meneses E.A. Stimulated photoluminescence of CdSe // Solid State Communication. – 1986. – Vol. 60. – № 5. – P. 423–425.

## REFERENCES

1. Fizika i himia soedinenii  $A^{II}B^{VI}$ . Pod redakcieii prof. S.A. Medvedeva. Moskva. MIR – 1970. – P. 1–624. (Rus)
2. Schaffner M., Bao X., Penzkofer A. Principal optical constants measurement of uniaxial crystal CdSe in the wavelength region between 380 and 950 nm // Applied optics. – 1982. – Vol. 31. – № 22. – P. 4546–4552.
3. Kulish N.R., Malysh N.I., Bulah B.M. Dinamixeskii effect Bursteina-Mossa v CdSe // Ukrainskii fizicheskii jurnal – 1990. – Vol. 35, – No. 5. – P. 671–674. (Rus)
4. Kulish N.R., Maznichenko A.F., Bulah B.M. Насыщение оптического поглощения в CdSe // Fizika i tehnika poluprovodnikov – 1978. – Vol. 12, – No. 5. – P. 987–990. (Rus)
5. Toyozawa Y. The Urbach rule and exciton-lattice interaction // Technical. Report. ISSP – 1964. – Vol. 1A(119). P. 1–68.
6. Redfield D. Electric fields of defects in solids // Physical. Review. – 1963 – Vol. 130 – № 3. – P. 914–915.
7. Dow J.D., Redfield D. Urbach rule // Physical. ReviewB. – 1972 – Vol. 5 – № 2. P. 594–599.
8. Mol A.W., Muribeca R.A., Meneses E.A. Stimulated photoluminescence of CdSe // Solid State Communication. – 1986. – Vol. 60. – № 5. – P. 423–425.

## РЕФЕРАТ

Куліш М.Р. Спектр нелінійного поглинання *CdSe* / М.Р. Куліш, М.І. Малиш // Вісник Національного транспортного університету. Науково-технічний збірник: в 2 ч. Ч. 1: Серія «Технічні науки». – К. : НТУ, 2014. – Вип. 29.

В статті розглянуто особливості впливу інтенсивного лазерного світла на форму краю поглинання монокристалічного *CdSe*.

Об'єкт дослідження – пластинчаті монокристали селеніду кадмія.

Мета роботи – визначення впливу випромінювання лазерів на барвниках на форму краю фундаментальної смуги поглинання селеніду кадмія.

Метод дослідження – аналіз нелінійного пропускання пластинчатих монокристалів селеніду кадмія.

В області лінійної оптики пропускання середовища не залежить від інтенсивності світла. Встановлено, що такий стан в селеніді кадмія зберігається до значень інтенсивності  $\leq 1000$  Вт/см<sup>2</sup>. При подальшому зростанні інтенсивності накачки відбувається нелінійне збільшення пропускання з подальшим виходом до області, де пропускання не залежить від інтенсивності світла (стан насичення поглинання). Скориставшись відомою величиною товщини зразків значеннями пропускання при низких і високих рівнях накачки знаходимо коефіцієнт поглинання для різних довжин хвилі. Ці дані дозволяють визначити форму краю поглинання селеніду кадмію в області лінійної оптики і в стані насичення поглинання.

Встановлено, що в урбахівській ділянці спектру поглинання за зміну коефіцієнта поглинання відповідає лише ділянка обумовлена статичною невпрядкованістю ґратки викликаную наявністю

точкових дефектів, а не динамічною неупорядкованістю, створюваною тепловими коливаннями атомів ґратки. В області міжзонних переходів зміна коефіцієнта поглинання під дією лазерного світла обумовлена заповненням нерівноважними електронами дна зони провідності.

Результати статті дають нові знання про вплив лазерного випромінювання на властивості напівпровідників і можуть використовуватись при прогнозуванні характеристик оптичних перемикачів та оптичних трансплорантів.

Прогнозні припущення щодо розвитку об'єкта дослідження – пошук оптимальних характеристик оптичних перемикачів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: СЕЛЕНІД КАДМІЮ, НАСИЧЕННЯ ПОГЛИНАННЯ, ПРОПУСКАННЯ, ЛАЗЕР.

#### ABSTRACT

Kulich N.R., Malysh M.I. Spectrum nonlinear absorption in CdSe. Visnyk National Transport University. Scientific and Technical Collection: In Part 2. Part 1: Series «Technical sciences». – Kyiv: National Transport University, 2014. – Issue 29.

The peculiarities of the influence of intense laser light on the CdSe form of single-crystal absorption edge was investigated.

Object of study – CdSe plate crystals.

Purpose of the study – to determine the effect of the dye laser radiation intensity on form the CdSe edge of the fundamental absorption band.

The method of the study - an analysis of the nonlinear transmission plate single crystals of cadmium selenide.

In the linear optic transmission medium is independent of the light intensity. It was established that this state of CdSe kept up to intensity  $\leq 1000 \text{ W/cm}^2$ . With further increase pump intensity there is a nonlinear increasing transmission with further access to the area where the transmission does not depend on light intensity (state of absorption saturation). Using the known value of the sample thickness and values of transmittance at low and high levels intensity, we is found absorption coefficient for different wavelengths of pump. These data allow us to determine the CdSe shape of the absorption edge in the region linear optics and in saturation state.

It is found that in Urbach spectrum region change absorption occur due to filling by carriers potential pattern, which is created point defects, but not potential pattern created by thermal vibrations of the lattice atoms. In the region of interband transitions change absorption occur due to filling by the bottom of the conduction band.

Results articles provide new knowledge about the influence of laser radiation on the properties of semiconductors and can be used in predicting the characteristics of optical switches and optical transparencies.

Forecast assumptions about the object of study – the search for optimal performance optical switches.

KEY WORDS: CADMIUM SELENIDE, ABSORPTION SATURATION, TRANSMISSION, LASER.

#### РЕФЕРАТ

Кулиш Н.Р. Спектр нелинейного поглощения *CdSe* / Н.Р. Кулиш, Н.И. Малыш // Вестник Национального транспортного университета. Научно-технический сборник: в 2 ч. Ч. 1: Серия «Технические науки». – К. : НТУ, 2014. – Вып. 29.

В статье рассмотрены особенности влияния интенсивного лазерного света на форму края поглощения монокристаллического CdSe.

Объект исследования – пластинчатые монокристаллы селенида кадмия.

Цель работы – определение влияния излучения лазеров на красителях на форму края фундаментальной полосы поглощения селенида кадмия.

Метод исследования – анализ нелинейного пропускания пластинчатых монокристаллов селенида кадмия.

В области линейной оптики пропускание CdSe не зависит от интенсивности света. Определено, что такое состояние в селениде кадмия сохраняется до значений интенсивности  $\leq 1000 \text{ Вт/см}^2$ . При дальнейшем возрастании интенсивности накачки происходит нелинейное увеличение пропускания с дальнейшим выходом в область, где пропускание не зависит от интенсивности света (состояние насыщения поглощения). Воспользовавшись известной величиной

толщины образцов, значениями пропускания при низких и высоких уровнях накачки, определяем коэффициент поглощения для разных длин волн. Эти данные позволяют определить форму края поглощения селенида кадмия в области линейной оптики и в состоянии насыщения поглощения.

Установлено, что в урбаховском участке спектра поглощения за изменение коэффициента поглощения отвечает только участок обусловлен статической неупорядоченностью решетки, которая вызвана наличием точечных дефектов, а не динамической неупорядоченностью, которая создана тепловыми колебаниями атомов решетки. В области междузонных переходов изменение коэффициента поглощения под действием лазерного излучения обусловлено заполнением неравновесными электронами дна зоны проводимости.

Результаты статьи дают новые знания о влиянии лазерного излучения на свойства полупроводников и могут использоваться для прогнозирования характеристик оптических переключателей и оптических трансплорантов.

Прогнозные предположения о развитии объекта исследования – поиск оптимальных характеристик оптических переключателей.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** СЕЛЕНИД КАДМИЯ, НАСЫЩЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ, ПРОПУСКАНИЕ, ЛАЗЕР.

#### АВТОРИ:

Кулиш М.Р. Доктор фізико-математичних наук, Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарева НАНУ, e-mail: n\_kulich@yahoo.com, тел. +380951027563, Україна, 03028, м. Київ, вул. Велика Китаївська 10, к. 10.

Малиш М.І., кандидат фізико-математичних наук, Національний транспортний університет, доцент кафедри фізики, e-mail: M\_Malysh@ukr.net, тел. 0508257165, Україна, 02090, м. Київ, вул. Новаторів 22 В, к. 351.

#### AUTHORS:

Kulich N.R. Doctor of physical-mathematical sciences. V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine, e-mail: n\_kulich@yahoo.com, tel. +380951027563, Ukraine, 03028, Kyiv, Velika Kitaevska str 10, of. 10.

Malysh M.I. Candidate of physical-mathematical sciences, National Transport University, associate professor department of physic, e-mail: M\_Malysh@ukr.net, tel. 0508257165, Ukraine, 02090, Kyiv, Novotoriv str. 22 B, of. 351.

#### АВТОРЫ:

Кулиш Н.Р. Доктор физико-математических наук, Институт физики полупроводников имени В.Е. Лашкарева НАНУ, e-mail: n\_kulich@yahoo.com, тел. +380951027563, Украина, 03028, м. Киев, ул. Большая Китаевская 10, к. 10.

Малыш Н.И., кандидат физико-математических наук, Национальный транспортный университет, доцент кафедры физики, e-mail: M\_Malysh@ukr.net, тел. 0508257165, Украина, 02090, г. Киев, ул. Новаторов 22 В, к. 351.

#### РЕЦЕНЗЕНТИ:

Данчук В.Д. доктор фізико-математичних наук, доцент, Національний транспортний університет, професор кафедри інформаційних і транспортних технологій, Київ, Україна.

Стрельчук В.В., доктор фізико-математичних наук, Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарева НАНУ, Київ, Україна.

#### REVIEWERS:

Danchuk V.D., doctor of physical and mathematical sciences, National transport university, professor, department of information and truck technology, Kyiv, Ukraine.

Strelchuk V.V., doctor of physical-mathematical sciences. V. Lashkaryov Institute of semiconductor physics, Kyiv, Ukraine.