

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Тиркусова Надія Володимирівна

УДК 539.216.2:539.219.1:621.382

інжекційна спектроскопія глибоких пасткових центрів у плівках телуриду кадмію

01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2002

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Сумському державному університеті
Міністерства освіти і науки України.

- Науковий керівник – кандидат фізико-математичних наук, доцент *Опанасюк Анатолій Сергійович*, Сумський державний університет, доцент кафедри загальної та експериментальної фізики
- Офіційні опоненти: – доктор фізико-математичних наук, ст. науковий співробітник *Прокопенко Ігор Васильович*, Інститут фізики напівпровідників НАН України, завідувач відділу №2
- кандидат фізико-математичних наук, доцент *Хрипунов Геннадій Семенович*, Харківський національний технічний університет “ХПТ” доцент кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліотехніки

Провідна установа – Львівський національний університет, кафедра фізики напівпровідників,
Міністерство освіти і науки України

Захист відбудеться 05.06.2002 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К
55.051.02 при Сумському державному університеті (40007, м. Суми, вул.
Римського-Корсакова, 2, корпус ЕТ, ауд. 216).
З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Сумського державного університету.
Автореферат розісланий 03.04.2002 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Лисенко О.В.

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми. Телурид кадмію є одним з найбільш перспективних матеріалів групи A_2B_6 у зв'язку з можливістю виготовлення на його основі цілого ряду високоефективних напівпровідникових пристроїв для оптоелектроніки, геліотехніки, ядерної енергетики та ін. Необхідність цілеспрямованого керування електричними та оптичними властивостями кристалів і плівок CdTe обумовила значний інтерес дослідників до вивчення дефектної структури матеріалу. Це пов'язано з тим, що рекомбінаційні центри і глибокі пастки (ГП), які завжди присутні в реальних твердих тілах, визначають основні характеристики зарядоперенесення і захоплення носіїв у цих матеріалах, а отже, і робочі параметри електронних пристроїв на їх основі.

Одним з найбільш прийнятних методів дослідження ГП у напівізолюючих матеріалах, таких, як CdTe, що поєднує в собі простоту експериментального устаткування і високу чутливість до низьких концентрацій локалізованих станів (ЛС), є метод, що базується на аналізі стаціонарних вольт-амперних характеристик (ВАХ) у режимі струмів, обмежених просторовим зарядом (СОПЗ). Однак у класичному вигляді метод ВАХ СОПЗ має ряд суттєвих недоліків, які призводять до істотного зменшення його інформативності і деякої некоректності отриманих результатів.

Поряд з цим у ряді теоретичних досліджень запропоновані підходи, які дозволяють позбавитись недоліків існуючого методу аналізу ВАХ СОПЗ та отримати більш детальну інформацію про спектр ГП у забороненій зоні (ЗЗ) матеріалу безпосередньо з експериментальних ВАХ шляхом їх диференціальної обробки (метод інжекційної спектроскопії (ІС)). Разом з тим метод ІС практично не використовується для дослідження реальних об'єктів. Залишається остаточно не розв'язаним питання коректності визначення параметрів пасток (концентрації N_t та енергетичного положення E_t) цим методом, особливо у випадку вузьких розподілів, характерних для полікристалічних матеріалів, таких, як з'єднання групи A_2B_6 та інші напівізолюючі матеріали. Тому безперечний науковий та практичний інтерес викликає застосування методу ІС для систематичного вивчення спектру ГП у плівках CdTe.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота частково виконана у рамках держбюджетної теми № 68–01.01.97–99 “Електрофізичні властивості багатошарових плівок в умовах взаємної дифузії елементів” Міністерства освіти і науки України.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є визначення енергетичного спектру ЛС, їх параметрів у полікристалічних плівках CdTe з використанням низькотемпературного (НН) та високотемпературного (ВН) наближень методу ІС та встановлення його залежності від кристалічної структури шарів.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких задач:

1. Розвинути метод визначення параметрів ЛС у напівізолюючих твердих тілах безпосередньо з експериментальних ВАХ СОПЗ на безмодельній основі, придатний для обробки ВАХ, одержаних при довільних температурах (T) вимірювання (розв'язати зворотну задачу досліджень). Визначити обмеження, роздільну здатність методу та підтвердити достовірність одержаних результатів, для чого розв'язати пряму задачу досліджень, тобто розрахувати ВАХ СОПЗ для складних розподілів пасток у 33 матеріалу.
2. Виявити вплив експериментальних факторів, параметрів ЛС, а також спрощень робочих співвідношень на коректність визначення N_t та E_t пасток цим методом. Визначити умови експериментального вимірювання ВАХ, що дозволяють знизити похибки реконструкції енергетичних розподілів пасток.
3. Провести дослідження структурних та електрофізичних особливостей плівок CdTe на неорієнтованих підкладках та встановити зв'язок між ними. Визначити фізико-технологічні умови одержання у квазізамкненому об'ємі (КЗО) високоомних шарів телуриду кадмію, у яких реалізується режим зарядоперенесення, обумовлений СОПЗ. Здійснити однозначну ідентифікацію механізму зарядоперенесення через зразки.
4. Визначити енергетичний спектр ЛС у плівках CdTe з використанням НН та ВН методу ІС. Провести дослідження залежності параметрів пасткових рівнів від умов конденсації плівок CdTe.

Плівки CdTe були вибрані як *об'єкт дослідження* у зв'язку з тим, що систематичне дослідження спектру ЛС у полікристалічних плівках CdTe в залежності від умов отримання шарів на цей час практично відсутнє.

Предметом досліджень були ЛС, які обумовлені дефектами кристалічної ґратки, у шарах CdTe та залежність їх основних параметрів від фізико-технологічних умов одержання та структурних особливостей плівок.

Відповідно до поставлених задач використовувались такі *методи отримання та дослідження* зразків: конденсація плівок у КЗО, оптична та растрова мікроскопія, фрактографія, рентгеноструктурний аналіз, вимірювання темнових ВАХ та залежностей провідності (σ_0)– температура, метод ІС.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше встановлено вплив N_t , E_t , величини параметра енергетичного розупорядкування λ ГП, температури вимірювання, а також наявності у напівпровідниковому матеріалі мілких акцепторів (донорів) на вигляд ВАХ СОПЗ у випадку розподілів ЛС, що описуються функцією Гаусса. Запропоновано наближений метод побудови ВАХ для випадку, коли відомий розподіл носіїв заряду на пастках, що дозволяє розв'язувати пряму задачу досліджень у випадку основних видів енергетичних розподілів ЛС, а також їх комбінацій.
2. Запропоновано та реалізовано експериментально ВН методу ІС, що базується на розв'язанні некоректної задачі методом регуляризації Тихонова. Доведена вірогідність одержаних результатів, визначені роздільна здатність та межі застосування цього наближення.
3. З використанням методу ІС вперше одержані профілі енергетичного розподілу пасток ($h(E) = \frac{dN_t}{dE}$) у 33 полікристалічних плівок CdTe, нанесених методом КЗО на неорієнтованих підкладках. За допомогою НН та ВН методу ІС визначені параметри ГП та проведено зіставлення одержаних результатів з даними, отриманими іншими методами.
4. Встановлено, що особливості ВАХ плівок CdTe можна пояснити у припущенні присутності у 33 матеріалу спектру пасток, що описуються розподілами, близькими за формою до

гауссових, з параметром енергетичного розупорядкування, який складає $s=0,015-0,04$ eВ. Концентрація ЛС та напівширина розподілу s визначаються фізико-технологічними умовами одержання плівок, в той час як енергетичний спектр пасток – домішково-дефектною структурою матеріалу.

Практичне значення одержаних результатів.

- Запропоновано прямий експериментальний метод визначення функції $h(E)$ ЛС у напівізолюючих твердих тілах з ВАХ СОПЗ, одержаних при довільних температурах вимірювання.
- Створено програмний комплекс, який дозволяє розв'язувати пряму та зворотну задачі досліджень у випадку монополярної інжекції (МІ) носіїв у зразок. Це дало можливість реалізувати метод експериментально та забезпечити високу вірогідність одержаних результатів.
- Запропонована процедура визначення фактору спінового виродження (g) пасткових рівнів дозволяє спростити ідентифікацію ЛС у ЗЗ напівізолюючих матеріалів.
- Одержана нова інформація про кристалічну структуру та спектр пасткових рівнів у ЗЗ плівок CdTe в залежності від фізико-технологічних умов їх конденсації сприяє подальшому розвитку основ матеріалознавства з'єднань A_2B_6 і може бути використана при розробленні більш ефективних пристроїв з базовим шаром на основі полікристалічних плівок CdTe.

Особистий внесок дисертанта полягає в аналізі літературних даних, розв'язанні прямої та зворотної задач ІС, постановці та проведенні експериментів, пов'язаних з одержанням ВАХ СОПЗ, а також обробці та аналізі отриманих результатів. Дисертант особисто розробила алгоритми і склала програми. Їй належить суттєва роль в інтерпретації одержаних результатів, написанні, обговоренні матеріалів та оформленні наукових праць [1–10].

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися і представлялися на таких конференціях і семінарах: Physics and technology of thin films. VI, VIII International conference (Ivano-Frankivsk, 1997, 2001); 7-th European conference on application of surface and interface analysis (ECASIA'97) (Goteborg, 1997); Міждержавній науково-методичній конференції “Комп'ютерне моделювання” (Дніпродзержинськ, 1998); II International symposium. Ion implantation and other application of ions and electrons (Kazimir Dolni, 1998), Third international conference MPSL-99 (Sumy, 1999 p.); 12-му Міжнародному симпозіумі “Тонкіе пленки в електроніке” (Харків, 2001 p.); III Міжнародній школі-конференції “Сучасні проблеми фізики напівпровідників” (Дрогобич, 2001p.).

Публікації. Основні матеріали дисертації відображені у 23 публікаціях, 10 із яких наведено наприкінці автореферату.

Структура і зміст роботи. Робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел із 163 найменувань. Повний обсяг дисертації складає 189 сторінок, містить 40 рисунків і 15 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульована мета та визначені основні задачі дослідження, відображені новизна отриманих результатів, їх наукове, практичне значення та апробація, визначено особистий внесок здобувача.

У першому розділі проведено огляд і аналіз літературних даних з вивчення домішково-дефектної структури монокристалів та плівок CdTe. Основна увага приділяється методу дослідження ГП, що базується на аналізі ВАХ у режимі СОПЗ [1]. Показано, що цей метод завдяки своїй чутливості до низьких концентрацій пасток, можливості застосування до широкого кола твердих тіл та простоті обладнання, необхідного для його реалізації, знайшов широке використання на практиці. Разом з тим у своєму класичному вигляді метод ВАХ СОПЗ має ряд суттєвих недоліків:

- однозначна ідентифікація механізму зарядоперенесення через зразок як СОПЗ є досить

трудомісткою і, як правило, не проводиться;

- параметри пасток визначають шляхом порівняння експериментальних кривих з теоретично розрахованими для ряду модельних розподілів (пряма задача). При цьому для розрахунку теоретичних ВАХ використовуються аналітичні вирази, які дають асимптотичні наближення; вибір моделі розподілу пасток проводиться апріорно;
- метод потребує незалежного визначення ряду параметрів матеріалу, що неможливо без залучення допоміжних методів дослідження.

Принципово інший підхід розглянуто у праці [2], де запропонований метод ІС ГП, який дозволяє одержувати інформацію про параметри ЛС безпосередньо з експериментальних ВАХ СОПЗ, знятих при $T \sim 100$ К шляхом їх диференціальної обробки. Незважаючи на те, що була продемонстрована можливість використання НН методу ІС при дослідженні ГП в органічних матеріалах, де присутні розмиті за енергією розподіли пасток з дуже високою концентрацією, він залишається маловідомим і майже не застосовується на практиці. На основі аналізу літератури робиться висновок, що спектр ГП у плівках CdTe в залежності від умов їх одержання на цей час досліджено недостатньо. Метод ІС для систематичного визначення параметрів ГП у матеріалі не використовувався.

У другому розділі дисертації описуються установка для одержання зразків, методики дослідження їх структурних та електрофізичних параметрів.

Плівки CdTe на провідних неорієнтованих підкладках одержували методом КЗО у вакуумній установці ВУП –5М в широкому інтервалі температур підкладки та випарника ($T_{II}=100\text{--}550^\circ\text{C}$, $T_B=550\text{--}800^\circ\text{C}$). Використання методу конденсації у КЗО дозволяє одержувати плівки зі складом, який наближується до стехіометричного, та низьким вмістом неконтрольованих домішок. Відповідно виникає можливість при дослідженні шарів методом ВАХ досить легко реалізувати режим СОПЗ та спростити процедуру ідентифікації знайдених пасткових рівнів.

Морфологія поверхні свіжоконденсованих плівок та плівок після травлення досліджувалась за допомогою растрового (РЕМ–102) та оптичного (МІМ–7) мікроскопів. Механізм росту та товщина плівок (L) CdTe контролювались методом фрактографії. Середній розмір зерна (d) у плівках визначався методом Джефріса. Фазовий склад та значення періоду кристалічної ґратки (a) плівок CdTe визначалися методом дифрактометрії. Для визначення a матеріалу на підкладках у ненапруженому стані використовувався $\sin^2\psi$ – метод. Описана також методика дослідження темнових ВАХ багат шарових структур при різних T , а також зйомки s_0 – T залежностей.

Основним фактором, який ускладнює одержання достовірної інформації про енергетичний спектр ЛС методом ВАХ, є присутність цілого ряду механізмів зарядоперенесення, що приводять до якісно подібних залежностей густини струму (j) через структуру від прикладеної напруги (U): показникові за U ділянки, які розділені стрибками струму. Визначення механізму зарядоперенесення, який обумовлює проходження струму через зразок, проводилось за допомогою методу диференціальної спектроскопії, розвиненого у роботах Зюганова А.Н., Свечнікова С.В., Смертенко П.С. та ін. [3]. Метод дозволяє шляхом сумісного аналізу j – U , h – U та $d(lgh)/d(lgU) - U$ залежностей ($h=dlnj/dlnU$) розрізняти супутні та конкуруючі механізми зарядоперенесення у структурах, а також виділяти серед них високопольові.

Третій розділ. Дисертаційна робота складається із двох взаємозв'язаних частин. У першій розвинуто метод визначення форми функції густини розподілу ЛС у напівізолюючих твердих тілах із ВАХ СОПЗ, знятих при довільних T . У другій цей метод застосований для дослідження ГП у полікристалічних плівках CdTe. Оскільки метод є диференціальним, значна увага приділялась доведенню вірогідності одержаних експериментальних результатів. Для перевірки коректності результатів, одержаних методом ІС, була використана така процедура комп'ютерного моделювання. Для типових розподілів пасток, а

також їх комбінацій (вхідний розподіл) розв'язувалась пряма задача, тобто розраховувались теоретичні ВАХ СОПЗ. Потім їх обробляли за допомогою розвинутого методу і одержували вихідний розподіл. Збіг вхідних та вихідних енергетичних розподілів дозволяв зробити висновки відносно вірогідності реконструкції функції $h(E)$ ЛС методом ІС, а також визначити його обмеження та роздільну здатність. Відповідно третій розділ дисертації присвячений розв'язанню прямої задачі досліджень для складних розподілів пасток. У роботі для розрахунку ВАХ СОПЗ використані такі співвідношення:

$$\frac{1}{j} = \frac{1}{e\mu L} \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{e} \int_{n_{fc}}^{n_{fL}} \frac{dn_f}{n_f^2 [(n_f - n_{f0}) + (n_t - n_{t0})]} \equiv y, \quad (1)$$

$$\frac{U}{j^2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{e(e\mu)^2} \int_{n_{fc}}^{n_{fL}} \frac{dn_f}{n_f^3 [(n_f - n_{f0}) + (n_t - n_{t0})]} \equiv z, \quad (2)$$

де

$$n_f = N_{c(v)} \exp(-E_F / kT), \quad (3)$$

$$n_t = \int_{E_g} h(E) f(E - E_F) dE, \quad (4)$$

ε_0 , e – діелектрична стала та діелектрична проникність матеріалу;

e – заряд електрона; m – рухливість носіїв заряду; k – стала Больцмана; n_{fc} , n_{fL} – концентрації вільних носіїв на катоді та аноді; n_{f0} , n_f – рівноважна та загальна концентрації вільних носіїв відповідно; n_{t0} , n_t – рівноважна та загальна концентрації захоплених носіїв; $N_{c(v)}$ – ефективна густина вільних станів у зоні провідності (валентній зоні); $f(E - E_F)$ – функція Фермі–Дірака; E_F – квазірівень Фермі.

Коректність отриманих результатів перевірялась шляхом порівняння з ВАХ, розрахованими для випадку монорівня за допомогою параметричних рівнянь Ламперта [1]. Одночасно показана можливість точного розрахунку ВАХ СОПЗ для випадку розподілів пасток за енергією, що описуються однією або декількома дельта-функціями, гауссовим, експоненці-альним розподілом та їх комбінаціями.

Запропоновано наближений метод побудови ВАХ СОПЗ для випадку, коли відомий розподіл носіїв заряду на пастках. Саме у такому вигляді одержують дані при експериментальному дослідженні зразків. Метод наближеного розрахунку ВАХ базується на таких співвідношеннях:

$$U = \frac{n_s e L^2}{\varepsilon\varepsilon_0} \frac{(n_s + 2n_s' kT + n_s'' (kT)^2)^2}{(2n_s + 3n_s' kT + n_s'' (kT)^2)(n_s + n_s' kT)}, \quad (5)$$

$$j = e\mu_f \frac{U}{L} \frac{(2n_s + 3kTn_s' + n_s'' (kT)^2)}{(n_s + 2kTn_s' + n_s'' (kT)^2)}, \quad (6)$$

де n_s – повна концентрація носіїв; $n_s = n_f + n_t$; $n_s' = \frac{dn_s}{dE_F}$, $n_s'' = \frac{d^2 n_s}{(dE_F)^2}$.

Встановлено, що похибки розрахунку ВАХ даним методом навіть у випадку монорівня, коли вони максимальні, не перевищують 10% і зменшуються для інших розподілів. Слід зазначити, що при розрахунку ВАХ СОПЗ методом регіональних наближень [1] похибка досягає 70%.

Розглянуті причини, що призводять до некоректності результатів при розрахунку $j-U$

залежностей з використанням асимптотичних рівнянь. Підтверджена обмеженість степеневі апроксимації ВАХ вигляду $j - U^h$, що найбільш широко застосовується на практиці. Досліджено вплив зміни параметрів пасток, типу їх розподілу, наявності у матеріалі акцепторних центрів та температури вимірювання на вигляд ВАХ СОПЗ. Встановлено, що при збільшенні T різниця між $j-U$ залежностями, одержаними для різних вузьких розподілів пасток, зменшується. При визначених співвідношеннях параметрів ГП ці криві для деяких енергетичних розподілів ЛС стають подібними, що призводить до принципових помилок при апріорному виборі моделі.

Четвертий розділ присвячений розв'язанню зворотної задачі і базується на співвідношеннях, вперше отриманих Фістером [4]:

$$z' = \frac{dz}{dy} = \frac{d(U/j^2)}{d(1/j)} = \frac{L}{e\mu n_{fL}}, \quad (7)$$

$$z'' = \frac{d^2z}{dy^2} = \frac{d}{d(1/j)} \frac{d(U/j^2)}{d(1/j)} = \frac{\rho_L L^2}{\varepsilon_0}, \quad (8)$$

де rL – величина об'ємного заряду на аноді.

Дані співвідношення зв'язують величини, які можуть бути виміряні експериментально (U , j), і ті, що визначають зарядоперенесення крізь зразок ($n_f L$, rL) у випадку МІ. З

використання похідних $\eta = \frac{d(\ln j)}{d(\ln U)}$, $\eta' = \frac{d^2(\ln j)}{d(\ln U)^2}$, $\eta'' = \frac{d^3(\ln j)}{d(\ln U)^3}$ або обернених похідних

$\gamma = \frac{d(\ln U)}{d(\ln j)}$, $\gamma' = \frac{d^2(\ln U)}{d(\ln j)^2}$, $\gamma'' = \frac{d^3(\ln U)}{d(\ln j)^3}$ ці рівняння можуть бути також подані у вигляді

$$n_f L = \frac{jL}{e\mu U} \frac{\eta}{2\eta - 1} = \frac{jL}{e\mu U} \frac{1}{2 - \gamma}, \quad (9)$$

$$E_F = kT \ln \frac{e\mu N_V}{L} + kT \ln \frac{j}{U} + kT \ln \frac{\eta}{2\eta - 1} = kT \ln \frac{e\mu N_V}{L} + kT \ln \frac{j}{U} + kT \ln \frac{1}{2 - \gamma}, \quad (10)$$

$$\frac{\rho_L}{e} = \frac{2\eta - 1}{\eta} \frac{\eta - 1}{\eta} \left[1 - \frac{\eta'}{\eta(2\eta - 1)(\eta - 1)} \right] \frac{\varepsilon_0 U}{eL^2} = [\gamma' + (2 - \gamma)(1 - \gamma)] \frac{\varepsilon_0 U}{eL^2}. \quad (11)$$

Функцію розподілу носіїв заряду, локалізованих на глибоких центрах, одержимо шляхом диференціювання співвідношення (11) за енергією:

$$\begin{aligned} \frac{1}{e} \frac{d\rho}{dE_F} &= \frac{1}{kT} \frac{\varepsilon_0 U}{eL^2} \frac{2\eta - 1}{\eta} \left\{ 1 + \frac{(3\eta - 3)\eta\eta' - \eta\eta'' + 3\eta^2}{\eta^2[(2\eta - 1)(\eta - 1) - \eta'/2]} \right\} = \\ &= \frac{1}{kT} \frac{\varepsilon_0 U}{eL^2} \left[\frac{(2\gamma - 3)\gamma' + \gamma''}{(2 - \gamma)(1 - \gamma) + \gamma'} + \gamma \right] (2 - \gamma). \end{aligned} \quad (12)$$

Ця функція пов'язана з $h(E)$ виразом

$$\frac{1}{e} \frac{d\rho}{dE_F} = \int h(E) \frac{df(E - E_F)}{d(E - E_F)}. \quad (13)$$

Спільне розв'язання рівнянь (10) – (12) дозволяє знайти енергетичний розподіл пасток у ЗЗ матеріалу безпосередньо з експериментальних ВАХ СОПЗ. Для цього необхідно визначити три похідні у кожній точці $j-U$ залежності у подвійних логарифмічних координатах. Задача зводиться до побудови згладжувального кубічного сплайна, що апроксимує експериментальні дані, диференціювання його у вузлах з подальшим знаходженням функції

$h(E)$ із згортки (4). Оскільки положення демаркаційного рівня визначається концентрацією вільних носіїв, методом ІС виявляються ЛС які в умовах фотозбудження можуть виступати як в якості пасток, так і рекомбінаційних центрів.

Задача суттєво спрощується у випадку НН, коли функцію Фермі–Дірака можна замінити на

$$h(E) \approx \frac{1}{e} \frac{d\rho}{dE_F}$$

функцію Хевісайда. У цьому випадку, тоді спільне розв'язання рівнянь (10) та (12) дозволяє одержати енергетичний розподіл ЛС. У першому підрозділі четвертого розділу розглядається розв'язання саме такої задачі.

У другому підрозділі наведені дані перевірки коректності результатів, отриманих при обробці ВАХ СОПЗ із використанням співвідношень методу ІС, поданих у різних формах.

Показано, що найбільш вірогідні результати можна отримати при застосуванні виразів, що містять похідні g , g' , g'' . Сформульовані критерії, що дозволяють знизити похибки реконструкції розподілів пасток методом ІС при його практичному застосуванні.

У третьому підрозділі розглянуто вплив експериментальних та інших факторів (зокрема T , g , нехтування омічним струмом та ін.) на коректність визначення параметрів ГП методом ІС.

При моделюванні були взяті значення параметрів і фізичних сталих, що є характерними для таких матеріалів, як Si та з'єднання A_2B_6 , A_3B_5 .

Результати порівняння вхідного та вихідного розподілів пасток, розрахованих з використанням НН методу ІС для декількох типових моделей ЛС, наведені на рис. 1. Як свідчить рисунок, при низьких T вихідні розподіли добре збігаються з вхідними. Однак при T , близьких до кімнатної, відбувається викривлення форми реконструйованих розподілів у порівнянні з вхідними. При цьому якщо фактор $g=1$, то максимуми розподілів збігаються, при $g \neq 1$ відбувається зсув енергетичного положення максимуму реконструйованого розподілу на величину $DE \approx kT \ln g$. Це зміщення при зміні T запропоновано використовувати для експериментального

Рис. 1. Густина об'ємного заряду і розподіл ЛС у 3З матеріалу: суцільна лінія – вхідний

розподіл; розрахована залежність $\frac{1}{e} \frac{d\rho}{dE_F}$: штрихпунктирна лінія – $T=100$ К, пунктирна лінія – $T=300$ К; реконструйований розподіл \cdot – $T=150$ К; \circ – $T=300$ К;

а – випадок гауссового розподілу $E_t = -0,57$ еВ, $N_t = 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $s=0,025$ еВ, $g=1$;

б – випадок подвійного експоненціального розподілу $E_t = -0,57$ еВ,

$N_t = 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $kT_c = 0,025$ еВ, $g=2$, T_c – характеристична температура

визначення фактору g ЛС. За допомогою комп'ютерного моделювання визначені оптимальні умови вимірювання, необхідні для розрахунку g , в залежності від параметрів ЛС (N_t , E_t) та моделі розподілу.

Оскільки більшість досліджень ЛС здійснюється при $T \approx 300$ К, виникає необхідність розробки модифікації методу ІС, яка б дозволила одержувати енергетичний розподіл пасток при будь-якій T . Ця задача розв'язана у шостому підрозділі. При довільних T функцію $h(E)$ можна знайти із згортки (4). Використовуючи співвідношення (4), (11)–(13), одержуємо інтегральне рівняння вигляду

$$\int_{E_1}^{E_2} h(E) f(E - E_F) dE = \frac{\varepsilon_0}{eL^2} [\gamma' + (2 - \gamma)(1 - \gamma)] - \frac{jL}{e\mu U} \frac{1}{(2 - \gamma)}, \quad (14)$$

яке є рівнянням Фредгольма 1-го роду і у загальному вигляді може бути записане у формі

$$Ay \equiv \int_a^b K(x, s)y(s)ds = \varphi(x), \quad c \leq x \leq d, \quad (15)$$

де $K(x, s)$, $j(x)$ – відомі функції; $y(s)$ – функція, яку необхідно визначити. Функція $K(x, s)$ – дійсна і неперервна в області $\{a \leq x \leq b; c \leq x \leq d\}$. У нашому випадку $K(x, s)$ – функція Фермі-Дірака, $y(s)$ – функція, що описує розподіл пасток за енергіями, а $j(x)$ – концентрацію носіїв на ЛС. Функція $j(x)$ у цьому випадку задається із похибками, які зумовлені експериментальними та обчислювальними факторами. Як наслідок, задача розв'язання рівняння (15) є суттєво некоректною.

Для розв'язання даної задачі використовувався метод регуляризації Тихонова. Вибір параметра регуляризації здійснювався як з використанням принципу відхилення (ПВ), так і способом визначення квазіоптимального значення параметра (КЗП). Спосіб КЗП не потребує додаткової інформації про похибку правої частини рівняння (15) і полягає в тому, що за a вибирається найменше із значень $a > 0$ $a = a_{к.о.}$ при яких реалізується локальний

мінімум функції $\Psi(\alpha) = \left\| \alpha \frac{dy}{d\alpha} \right\|_V^2$, де $n_a = a dy_a / da$ розв'язок рівняння $av_a - Av_a = Ay_a - j$.

Розрахунки свідчать, що при використанні ПВ і методу КЗП a реконструйовані функції $h(E)$ відрізняються незначно, але з точки зору практичного застосування метод КЗП a більш прийнятний, оскільки не вимагає знання величини похибки функції $j(x)$.

Деякі результати обчислень з використанням ВН наведені на рис. 2. Встановлено, що функція $h(E)$ запропонованим методом відтворюється майже точно навіть у випадку вузьких гауссових розподілів ($s = 0,015$ еВ), близьких до монорівня. Похибка у визначенні N_t складає 3–5%, у той час як E_t визначається точно. Для більш розмитих за енергією розподілів похибка визначення параметрів пасток зменшується. Слід зазначити, що у випадку використання НН монорівні реконструюються у вигляді дифузних кривих з напівшириною $\sim 3,5kT$ ($s = 0,091$ еВ при $T \sim 300$ К).

Показано, що роздільна здатність методу залежить від співвідношення E_t , N_t та s . Якщо у ЗЗ матеріалу присутні дискретні ЛС, енергія залягання яких відрізняється на $(2\epsilon_3) kT$, то вони відтворюються як розподіл складної форми. Слід зазначити, що розглянутим методом вдавалося виявити близько розташовані енергетичні рівні, які при використанні НН реконструюються як один (рис. 2 б, г).

Ще одним чинником, який знижує роздільну здатність методу для мілких пасток, є вплив вільних носіїв заряду, які завжди присутні у реальних зразках. Дозаповнення пасток цими носіями перш за все у випадку мілких рівнів дефектів може призводити до того, що методом ІС вони розрізнятися не будуть (рис. 2г). Визначена нижня межа E_{min} , яка лімітує застосування методу. Встановлено, що для CdTe при $T \sim 300$ К виявляються пастки з $E_t > 0,3$ еВ, при зниженні T ця величина зменшується.

П'ятий розділ. У перших двох підрозділах наведені результати дослідження особливості росту шарів на провідних неорієнтованих підкладках в широкому діапазоні температур конденсації. Встановлено, що спостерігається дві області T_{II} , де механізм росту плівок CdTe різний. При низьких температурах шари складаються із рівноосьових кристалітів, розмір яких не перевищує частки мкм. При $T_{II} > 350^\circ\text{C}$ ріст плівок відбувається шляхом розростання кристалів перехідного шару, орієнтованих площиною (111) паралельно поверхні плівки. У результаті плівки CdTe набувають текстури росту типу [111] і в умовах конденсації, близьких до термодинамічно рівноважних, стають практично монозернистими за товщиною. При збільшенні T_{II} d збільшується від часток мкм до десятків мкм при $L \gg 10$ мкм, d також збільшується при зростанні товщини шару.

Дослідження a у ненапруженому стані також дозволило виявити дві області температур

осадження CdTe, у яких механізм конденсації плівок є подібним. Для них характерна активаційна залежність a від оберненої температури підкладки з енергіями активації $E_{a1}=9,54 \cdot 10^{-6}$ еВ ($T_{II}=100-450^\circ\text{C}$) та $E_{a2}=1,854 \cdot 10^{-5}$ еВ ($T_{II}=450-550^\circ\text{C}$), що може бути обумовлено ревіпаруванням матеріалу та складною взаємодією CdTe з залишковими газами.

Дослідження структурних особливостей плівок CdTe дозволило встановити фізико-технологічні умови одержання у КЗО шарів зі стехіометричним складом (відповідно низьким s_0) та стовпцевою структурою, зробити висновки відносно механізму проходження струму через структуру, а також визначити деякі характеристики плівок (d , L), що необхідні для розрахунку параметрів ГП з ВАХ.

З використанням літературних джерел на основі прецизійних досліджень a матеріалу розрахована теоретична питома провідність CdTe та зіставлена з даними, одержаними експериментально. Виявлено, що складний характер залежності $s_0 - T_{II}$ обумовлений як зміною концентрації і рухливості носіїв заряду, так і зміною d у плівках і відповідно характером захоплення носіїв заряду на зерномежові стани. Максимальний опір мають шари CdTe, одержані при $T_{II}=400-500^\circ\text{C}$. У подальшому було з'ясовано, що у цих плівках реалізується механізм зарядоперенесення, обумовлений СОПЗ.

Загальні особливості ВАХ структур на базі плівок CdTe, одержаних у різних фізико-технологічних режимах конденсації, розглянуті у третьому підрозділі. Встановлено, що вигляд ВАХ визначається умовами конденсації базового матеріалу, кристалічною структурою CdTe, матеріалом підкладки і верхнього контакту. Аналіз ВАХ структур з різними контактами дозволив виявити, що плівки мають р-тип провідності, а незначне випрямлення, яке спостерігалось у сендвіч-структурах, відбувається на межі поділу плівка-підкладка.

При прямій полярності вигляд ВАХ структур на основі високотемпературних конденсатів CdTe є характерним для механізму СОПЗ. Це підтверджено незалежними методами у тому числі методом диференціальної спектроскопії [3]. Диференціальна обробка $j-U$ залежностей і спільний аналіз кривих $h-\ln U$, $\ln h-\ln U$ дозволили зафіксувати особливі точки ВАХ і розмежувати різні механізми зарядоперенесення, включаючи високопольові, контактні та об'ємні. З'ясовано, що вигляд ВАХ при зміні полярності і величини напруги можна пояснити у рамках діодної моделі за наявності високого послідовного опору діода. При низьких U струм крізь багатошарові структури обмежується збідненим шаром на межі розділення плівка CdTe – підкладка, а при високих U – об'ємним механізмом зарядоперенесення у базовому шарі.

У четвертому і п'ятому підрозділах наведені результати визначення параметрів ГП у плівках CdTe з використанням традиційного підходу та НН методу ІС, у шостому підрозділі – з використанням ВН цього методу. Типова експериментальна ВАХ та результати реконструкції форми розподілу пасток у одному із зразків ВН методу ІС наведені на рис. 3. Як свідчить рисунок, розподіли ІС, одержані при аналізі двох різних ВАХ, знятих при близьких T , добре збігаються. Для уточнення форми експериментальної функції $h(E)$, на рис. 3в нанесені розподіли, які описуються функцією Гаусса. Для досліджених плівок характерна присутність у ЗЗ розподілів пасток, за формою близьких до гауссових з малим s . Обговорюються причини, що приводять до розмиття енергетичних рівнів ІС у випадку полікристалічних плівок CdTe.

Результати розрахунку параметрів ГП за допомогою ВН методу ІС у декількох зразках наведені у таблиці 1.

Розраховані значення E_t , N_t добре корелюють з даними, наведеними у літературі для плівок з подібними структурними характеристиками. Результати досліджень також перевірялись шляхом зіставлення з даними, одержаними із s_0-T залежностей на омічній ділянці ВАХ.

Адекватність реконструкції форми енергетичних розподілів пасток та коректність визначення їх параметрів перевірялась додатково шляхом розв'язання прямої задачі. Результати зіставлення експериментальних і розрахованих ВАХ наведені на рис.3а, б. Як свідчить рисунок, криві добре збігаються, при цьому похибки розрахунків не перевищують 5%, що підтверджує вірогідність одержаних результатів

Таблиця 1

ГП, виявлені в плівках CdTe з використанням ВН методу ІС												
Номер зразка	L, мкм	TП, °С	ТВ-ТП, °С	E _t , eВ	N _t , м ⁻³	s, eВ						
1	8	470	280	0,63	4,4Ч10 ¹⁹	0,030						
2 (перше вимірювання)			19	475	200	0,61 0,45	1,7Ч10 ¹⁹	7,3Ч10 ¹⁹	0,031	0,028		
2 (друге вимірювання)			19	475	200	0,62 0,45	1,5Ч10 ¹⁹	8,1Ч10 ¹⁹	0,035	0,032		
3 (монокристалічний зразок)			11	480	180	0,62 0,52 0,41	4,6Ч10 ¹⁸	1,3Ч10 ¹⁹				
							1,1Ч10 ²⁰	0,019 0,009 0,016				
4	11	475	220	0,68 0,62 0,53	7,8Ч10 ¹⁸	1,5Ч10 ¹⁹	6,1Ч10 ¹⁹	0,023	0,023	0,027		
5	15	480	200	0,60 0,52 0,46 0,41	2,3Ч10 ¹⁸	3,6Ч10 ¹⁸	8,6Ч10 ¹⁸	1,4Ч10 ¹⁹	0,019			
									0,020 0,020 0,015			
6	26	485	220	0,61 0,56 0,52	3,6Ч10 ¹⁸	3,0Ч10 ¹⁸	7,4Ч10 ¹⁸	0,023	0,015	0,015		

Використання методу ІС дозволило одержати нову інформацію про дефектно-домішкову структуру шарів та її залежність від фізико-технологічних умов конденсації. Встановлено, що для досліджених полікристалічних плівок CdTe були характерні пастки з $E_{t1}=0,68-0,70$ eВ; $E_{t2}=0,60-0,63$ eВ; $E_{t3}=0,56-0,57$ eВ; $E_{t4}=0,51-0,53$ eВ; $E_{t5}=0,45-0,46$ eВ; $E_{t5}=0,39-0,41$ eВ та $N_t=10^{18}-10^{20}$ м⁻³, розподіли пасток за енергіями у першому наближенні можуть бути описані функціями Гаусса з $s=0,015-0,04$ eВ. Широкий спектр знайдених пасток обумовлений тим, що досліджувались ЛС у розупорядкованому перехідному шарі, який формувався біля підкладки.

Показано, що концентрація пасток з $E_{t1}=0,60-0,63$ eВ, $E_{t2}=0,51-0,53$ eВ зменшується при збільшенні температури в інтервалі $T_P=450-500$ °С. Виявлено також зменшення фактора енергетичного розупорядкування ГП при наближенні умов конденсації плівок до термодинамічно рівноважних. Запропоновані моделі, які пояснюють ці результати. З використанням літературних даних та залежностей N_t від T_P проведена ідентифікація виявлених ГП. Робиться висновок, що більшість з них пов'язана з власними дефектами та комплексами власний дефект – неконтрольована домішка. На основі одержаних результатів пояснені особливості ВАХ СОПЗ, які спостерігаються при зміні температури вимірювання.

ВИСНОВКИ

1. Виявлено вплив параметрів ГП (N_t , E_t , s , T_C) та температури вимірювання, присутності у напівізолюючому твердому тілі мілких акцепторів на вигляд ВАХ СОПЗ у випадку розподілів ЛС, що описуються кількома дельта-функціями, гауссовими, експоненціальними та більш складними розподілами. Встановлено, що у випадку вузьких за енергією розподілів, які є характерними для полікристалічних матеріалів, при збільшенні T , різниця

- між залежностями струм–напруга зменшується, що призводить до принципових помилок при апріорному виборі моделі у випадку використання традиційних методів обробки ВАХ СОПЗ. Запропоновано наближений метод побудови ВАХ СОПЗ з похибками <5% для випадку, коли відомий розподіл носіїв заряду на ГП.
2. Розвинуто прямий експериментальний метод реконструкції функції енергетичного розподілу ЛС у напівізольюючих матеріалах та визначення їх основних параметрів (N_t , E_t , g, s) з ВАХ СОПЗ, одержаних при довільних температурах вимірювання. Шляхом розв'язання прямої та зворотної задачі, у випадку МІ носіїв у зразок, доведена коректність одержаних результатів, визначена роздільна здатність та межі застосування методу ($E_t > 0,3$ еВ). Встановлено вплив експериментальних факторів, параметрів ЛС, а також спрощень робочих співвідношень на похибки у визначенні E_t та N_t пасток методом ІС. Визначено умови проведення експерименту, що дозволяють знизити похибки реконструкції розподілу пасток цим методом.
 3. Запропоновано та реалізовано експериментально ВН методу ІС, що базується на розв'язанні зворотної некоректної задачі досліджень методом регуляризації Тихонова. Показано, що визначення параметра регуляризації методом знаходження його квазіоптимального значення є найбільш ефективним, оскільки не потребує знання похибок функції $n_s(E)$.
 4. Виявлено два температурних інтервали конденсації плівок CdTe у КЗО, у яких механізми, що визначають їх особливості структури та залежність періоду ґратки матеріалу від ТП, є подібними. На основі прецизійних вимірювань періоду кристалічної ґратки матеріалу розрахована теоретична питома провідність монокристалічних шарів CdTe. Зіставлення цих результатів з даними, одержаними експериментально, дозволило встановити, що при ТП ~ 400–500°C плівки мають максимальний питомий опір, що дозволяє реалізувати у них механізм МІ.
 5. Вперше одержані енергетичні профілі розподілу пасток у 33 полікристалічних плівок CdTe, нанесених у КЗО на провідних підкладках, з використанням ВН методу ІС. Встановлено, що функція густини розподілу кожного ЛС може бути в першому наближенні описана функцією Гаусса з параметром енергетичного розупорядкування $s = 0,015–0,04$ еВ. Найбільш ймовірна глибина залягання пасток складає $E_{t1} = 0,68–0,70$ еВ; $E_{t2} = 0,60–0,63$ еВ; $E_{t3} = 0,56–0,57$ еВ; $E_{t4} = 0,51–0,53$ еВ; $E_{t5} = 0,45–0,46$ еВ; $E_{t5} = 0,39–0,41$ еВ, їх концентрація не перевищує $10^{18}–10^{20}$ м⁻³.
 6. Виявлена залежність концентрації пасток та параметра енергетичного розупорядкування від температури конденсації плівок та товщини шарів. Встановлено, що N_t та s залежать від фізико-технологічних умов одержання плівок і при наближенні умов конденсації до термодинамічно рівноважних зменшуються, а енергетичний спектр пасток визначається домішково-дефектною структурою матеріалу. Проведена ідентифікація ЛС, показано, що вони обумовлені власними дефектами та комплексами власний дефект-домішка.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ламперт М. А., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах: Пер. с англ.–М.: Мир, 1973.– 222 с.
2. Nespurek S., Sworakowski J. Use of space–charge–limited current measurements to determine the properties of energetic distributions of bulk traps // J. Appl. Phys.– 1980.– Vol.51, № 4.– P. 2098–2102.
3. Зюганов А.И., Свечников С.В. Инжекционно–контактные явления в полупроводниках. Киев: Наукова думка, 1981. – 256 с.
4. Pfister J.C. Note of interpretation of space–charge–limited currents with traps // Phys. Stat. Sol (a).– 1974.– Vol.24, № 1.– P.k15–k17.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Любчак В.О., Опанасюк А.С., Тиркусова Н.В., Харченко В.І. Метод інжекційної спектроскопії для вивчення глибоких центрів у плівках телуриду кадмію // УФЖ.–1999.– Т.44, №6.– С.741-747.
2. Опанасюк А.С., Проценко І.Ю., Тиркусова Н.В. Деякі особливості реконструкції розподілів глибоких станів методом інжекційної спектроскопії.// Журнал фізичних досліджень. - 2000.- Т.4, №2. - С.208-215.
3. Опанасюк А.С., Тиркусова Н.В., Харченко В.І., Бобров А.Н. Самосогласований дифференціальний метод інжекційної спектроскопії глибоких ловушок в полуізолюючих матеріалах // Вісник Сумського державного університету. - 1997. - N1(7). - С.131-138.
4. Опанасюк А.С., Тиркусова Н.В. Високотемпературний метод інжекційної спектроскопії глибоких пасток // Вісник Сумського державного університету. Серія: Фізика, математика, механіка. - 2000.- №17.- С.28-37.
5. Король О.Ю., Опанасюк А.С., Тиркусова Н.В., Харченко В.І. Диференційний метод розрахунку параметрів глибоких ловушок у напівізолюючих матеріалах // Математичне моделювання.- 1998.- Т.3. - С.33-37.
6. Кунченко А.Л., Опанасюк А.С., Тиркусова Н.В. Особливості дослідження глибоких пасток у напівізолюючих матеріалах методом високотемпературної інжекційної спектроскопії // 12-й Міжнародний симпозиум “Тонкі пленки в електроніці” .ISTFE-12.–Харьков:ННЦ ХФТИ.– 2001.– С.315-318.
7. Kharchenko V.I., Opnasyuk A.S., Tirkusova N.V. The investigation of the deep traps in polycrystalline films of CdTe deposited by the method of quasi-closed volume // Physics and Technology of Thin Films. VI International conference.-Ivano-Frankivsk:PU.- 1997.-С.61-62.
8. Опанасюк А.С., Тиркусова Н.В. Метод інжекційної спектроскопії локалізованих станів у напівізолюючих матеріалах // Third international conference MPSL-99.- Sumy:SSU.-1999.-С.134.
9. Зякун Д.Т., Опанасюк А.С., Тиркусова Н.В. Дослідження глибоких пасток у плівках телуриду кадмію методом високотемпературної інжекційної спектроскопії // VII International conference on the Physics and technology of thin films(ICPTTF-VIII).-Ivano-Frankovsk:PU.-2001.-Р.80–81.
10. Зякун Д.Т., Опанасюк А.С., Тиркусова Н.В. Вивчення спектру глибоких пасток у плівках телуриду кадмію методом високотемпературної інжекційної спектроскопії // III Міжнародна школа-конференція “Сучасні проблеми фізики напівпровідників”.-Дрогобич.- 2001.-С.17.

АНОТАЦІЯ

Тиркусова Н.В. Інжекційна спектроскопія глибоких пасткових центрів у плівках телуриду кадмію .–Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.–Сумський державний університет, Суми – 2002.

У дисертації розвинуто прямий експериментальний метод визначення функції енергетичного розподілу локалізованих станів (ЛС) у напівізолюючих твердих тілах з ВАХ струмів, обмежених просторовим зарядом, одержаних при довільних температурах. Він базується на розв'язанні рівняння Фредгольма 1-го роду методом регуляризації Тихонова.

Метод застосований для вивчення спектру ЛС у полікристалічних плівках CdTe, одержаних у квазізамкненому об'ємі на провідних підкладках. У забороненій зоні матеріалу виявлено ряд пасток, що описуються розподілами, близькими до гауссових, і параметром енергетичного

розупорядкування $s=0,015-0,04$ eВ з найбільш імовірною глибиною залягання $E_{t1}=0,68-0,70$ eВ; $E_{t2}=0,60-0,63$ eВ; $E_{t3}=0,56-0,57$ eВ; $E_{t4}=0,51-0,53$ eВ; $E_{t5}=0,45-0,46$ eВ; $E_{t6}=0,39-0,40$ eВ та концентрацією $N_t=10^{18}-10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Показано, що N_t і s розподілу залежать від фізико-технологічних умов одержання плівок, а енергетичний спектр визначається домішково-дефектною структурою матеріалу.

Ключові слова: полікристалічні плівки CdTe; струми, обмежені просторовим зарядом; глибокі пастки.

Аннотация

Тыркусова Н.В. Инжекционная спектроскопия глубоких ловушечных центров в пленках теллурида кадмия .–Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела.–Сумский государственный университет, Сумы–2002.

В диссертации развит прямой экспериментальный метод определения функции энергетического распределения локализованных состояний (ЛС) в полужолирующих твердых телах из вольт-амперных характеристик токов, ограниченных пространственным зарядом, полученных при произвольных температурах измерения. Метод базируется на решении уравнения Фредгольма 1-го рода методом регуляризации Тихонова, при этом выбор параметра регуляризации осуществлялся как с использованием принципа невязки, так и способом определения квазиоптимального значения параметра.

Метод применен для систематического изучения спектра глубоких ловушек в поликристаллических пленках CdTe, полученных в квазизамкнутом объеме на проводящих подложках. В запрещенной зоне материала выявлен ряд ловушек, которые описываются распределениями, близкими к гауссовым, и параметром энергетического разупорядочения $s=0,015-0,04$ eВ. Наиболее вероятная глубина залегания ЛС составляет $E_{t1}=0,68-0,70$ eВ; $E_{t2}=0,60-0,63$ eВ; $E_{t3}=0,56-0,57$ eВ; $E_{t4}=0,51-0,53$ eВ; $E_{t5}=0,45-0,46$ eВ; $E_{t6}=0,39-0,40$ eВ, в то время как концентрация не превышает $N_t=10^{18}-10^{19} \text{ м}^{-3}$. Исследована корреляция между параметрами ЛС и структурой слоев. Проведена идентификация выявленных ЛС.

Показано, что концентрация и полуширина распределения зависят от физико-технологических условий полученных пленок, в то время как энергетический спектр ловушек определяется примесно-дефектной структурой материала.

Ключевые слова: поликристаллические пленки CdTe; токи, ограниченные пространственным зарядом; глубокие ловушки.

ABSTRACT

Tirkusova N.V.–Injection spectroscopy of deep trap centers in cadmium telluride films.–Manuscript.

Thesis for candidate's degree of physical and mathematical sciences by specialty 01.04.07 – Physics state solid.– Sumy State University, Sumy–2002

The dissertation provides the direct experimental method to determine the localized state energy distribution function for semiconductive solid materials based on space-charge-limited current-voltage characteristics. The current-voltage characteristics would be obtained under the random temperatures. Tikhonov regularization method was used to solve Fredholm 1st rank equation.

The method developed in this research was used for the study of deep traps in CdTe poly-crystal

films obtained in quasi-closed-tube on the conductive substrate. In the bend gap of the material, some traps were traced that can be described by the close to Gaussian distribution parameters as well as by the parameter of energy disorder $s=0,015-0,04$ eB. The most probable depth of the localized states is $E_{t1}=0,68-0,70$ eB; $E_{t2}=0,60-0,63$ eB; $E_{t3}=0,56-0,57$ eB; $E_{t4}=0,51-0,53$ eB; $E_{t5}=0,45-0,46$ eB; $E_{t6}=0,39-0,40$ eB, while the concentration is not higher than $N_t=10^{18}-10^{19} \text{ m}^{-3}$.

The research shows that N_t and s depend on the physical and technological conditions of the obtained films, while the energy of the traps depends on the impurity-defective material structure.

Keywords: CdTe poly-crystal films; space-charge-limited currents; deep traps.