

**НАУКОВІ ТА ПРАКТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА
ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ**

УДК 681.586'31

**ВИБІР МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКОПРУЖНИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗВ'ЯЗУЮЧИХ, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В
ТЕНЗОМЕТРІЇ**

Погуляйко О.М., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

Описані існуючі методи та засоби дослідження в'язкопружних властивостей полімерних матеріалів. Наведені вимоги до технологічних і конструктивних параметрів методів та засобів вимірювання і кількісної оцінки в'язкопружних властивостей тензорезисторних зв'язуючих. Проведений порівняльний аналіз відповідних засобів та методів вимірювання

Вступ

Тензорезистори застосовуються як чутливі елементи у первинних перетворювачах сили, тиску, переміщення та інших механічних величин, похибка яких, згідно до сучасних вимог, повинна складати 0,01...0,02 %.

Такі метрологічні характеристики тензорезистора як повзучість, гістерезис, нелінійність функції перетворення цілком визначаються релаксаційними процесами, що відбуваються у шарі зв'язуючого. Але на даний час в'язкопружні властивості полімерних зв'язуючих залишаються мало-дослідженими. Відсутність необхідних відомостей про в'язкопружні властивості зв'язуючого перешкоджає покращенню метрологічних характеристик тензорезисторів, особливо малобазових [1].

Дана стаття присвячена огляду засобів та методів дослідження і кількісної оцінки в'язкопружних властивостей полімерних зв'язуючих матеріалів.

Постановка задачі

Існуючі методи та засоби вимірювання повзучості полімерних зв'язуючих зорієнтовані на визначення властивостей довготривалої міцності полімерів і, в основному, досліджують повзучість у зоні пластичних (незворотних) деформацій [2, 3, 4]. При використанні ж полімерів у якості тензорезисторних зв'язуючих специфіка їх роботи дещо інша – вони працюють у зоні малих пружних деформацій.

Закон зміни повзучості тензорезистора має експоненційний характер: найбільша величина повзучості спостерігається відразу після прикладення навантаження, після чого швидкість повзучості поступово зменшується і, досягаючи до деякого усталеного значення, вже майже не змінюється. Це пояснюється тим, що полімери являють собою високомолекулярні сполуки, що складаються з довгих ниткоподібних макромолекул, які, в свою чергу, складаються з ланок

різної малості (вузлів, витків, атомів тощо). Всі ці ланки мають власну швидкість перерозподілу просторового розміщення при навантаженні. Чим менший елемент, тим є вищою швидкість його руху у просторі. Якщо врахувати ще й існування руху цілих молекул і навіть надмолекулярних структур, то виявляється, що існує дуже широка і неперервна область часів, що характеризують реакцію полімерів на зовнішнє навантаження [5].

При навантаженні полімеру стрибкоподібним одиничним навантаженням ($\tau(t) = 0$, при $t < 0$; $\tau(t) = \tau_0$, при $t > 0$) його піддатливість $J = \frac{1}{G} = \frac{\varepsilon}{\tau}$ описується залежністю:

$$J(t) = J_m + \sum_{i=1}^k J_i \left(1 - e^{-\frac{t}{m_i}} \right), \quad (1)$$

де J_m - пружна миттєва піддатливість; J_i - піддатливість ланки i ; m_i - час запізнення ланки i .

При виборі засобів експериментальних досліджень в'язкопружних властивостей зв'язуючих слід враховувати наступні особливості їх застосування для тензорезистора:

1. Зв'язуюче, що утворює підкладку і клейовий прошарок тензорезистора являють собою трьохшарову плівку, що включає шари зв'язуюче – підкладка - зв'язуюче (повна товщина плівки не перевищує 0,06 – 0,08 мм), або тонкий клейовий шар, якщо підкладка являє собою заполімеризовану плівку, виготовлену із матеріалу зв'язуючого.

2. Деформація основного матеріалу передається на ґратку тензорезистора при навантаженні зв'язуючого на зсув, а не на розтягнення або стиснення.

3. Максимальне напруження зсуву в шарі зв'язуючого не повинно перевищувати 1,0...1,5 МН/м². Оскільки перевищення граничних напружень на зсув може привести до руйнування зв'язуючого і відшарування фольгової ґратки тензорезистора [6].

4. Пружні властивості зв'язуючих залежать від матеріалу елементів, що склеюються і від виду їх механічної обробки [7].

5. Технологічний процес формування зв'язуючого повинен якомога точніше відповідати технології виготовлення, накладці і термообробці тензорезистора.

6. Зв'язуюче повинно досліджуватись при такому характері навантаження зразка, який не був би зв'язаний з яким-небудь припущенням при переході від навантаження до напруження.

Всі вище згадані особливості необхідно враховувати при виборі та розробці спеціальних методів і засобів вимірювання в'язкопружних властивостей тензорезисторних зв'язуючих.

Методи і засоби досліджень в'язкопружних властивостей зв'язуючих

Метод випробовування на розтягнення. Сутність цього метода (рис. 1,а), який був реалізований в дослідях Х. Рорбаха та Н. Чайки, полягає у вимірюван-

ні оптичним вимірювальним приладом 2 при заданому навантаженні деформації розтягнення смуги 1, що вирізана з вільної плівки зв'язуючого.

Для визначення залежності в'язкопружних констант зв'язуючого від температури Х. Рорбах та Н. Чайка фіксували в функції температури нижчу частоту резонансних коливань балки, виготовленої з матеріалу зв'язуючого та підвішеної у вузлових точках власних коливань, що відповідають нижчій частоті.

Даний метод визначення в'язкопружних констант та їх температурних залежностей вступає в протиріччя з усіма тими вимогами, які висуваються до формування шару зв'язуючого та умовам проведення випробовувань тензометричних зв'язуючих матеріалів. Тому за результатами дослідів цим методом можна дати лише якісну оцінку в'язкопружних властивостей.

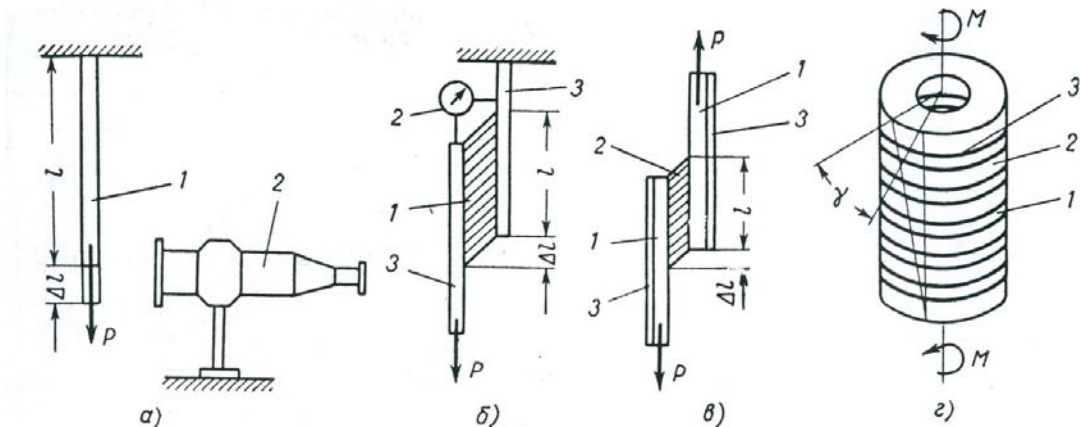


Рис. 1. Засоби дослідження в'язкопружних властивостей зв'язуючих

Механічний метод випробовування на зсув. Сутність механічного методу випробувань (рис.1,б) запропонованого Г. Хенішем полягає у визначенні при заданому (зазвичай ваговому) навантаженні деформацій зсуву шару зв'язуючого 1, сформованого між двома пластинками 3.

Деформація зсуву шару зв'язуючого (клейового прошарку) визначається по виміряній індикатором 2 величині відносного зсуву Δl рухливої та нерухливої пластин 3. Для виключення впливу на показники індикатора деформації пластин він попередньо визначав власну деформацію пластин при відсутності клейового прошарку.

Прийнятий Г. Хенішем спосіб мало може бути застосований для дослідження в'язкопружних властивостей матеріалів при підвищених температурах, не забезпечує необхідну точність вимірювання в робочому діапазоні напружень і не дозволяє здійснити автоматичну реєстрацію відносно зсуву пластин.

Оптичний метод випробовування на зсув. Сутність оптичного методу, прийнятого А. Маттінгом та К.Ф. Ханом (рис.1,в), полягає в тому, що на зовнішню поверхню пластин 1 із легкого сплаву, між якими формується шар зв'язуючого 2, наноситься оптично активне покриття 3. Деформація пластин (а отже, і зв'язуючого) визначається лазерним інтерферометром.

Використаний А. Маттіном та К.Ф. Ханом метод дослідження зв'язуючих досить складний для використання на практиці, трудомісткий при обробці результатів вимірювання, його важко застосовувати для дослідження при різних температурах і здійснювати автоматичну реєстрацію результатів вимірювання [8].

Метод випробовування на зсув-кручення. Метод запропонований Анкудіновим Д.Т. та Мамаєвим К.Н. [9] найбільше підходить для випробування тензорезисторних зв'язуючих. Оскільки сутність методу полягає у тому, що в'язкопружні властивості зв'язуючого досліджуються на зразку, деформація якого може бути перетворена в електричний сигнал та автоматично реєструватися. Зразок формується у вигляді багатошарового полого циліндричного стовпчика (рис.1, з), в якому можна послідовно чергувати шари зв'язуючого 3, основного 2 та тензочутливого 1 матеріалу. Кільця, що утворюють стовпчик, можна склеювати з повним дотриманням технологічних режимів, прийнятих для формування шарів тензометричних зв'язуючих.

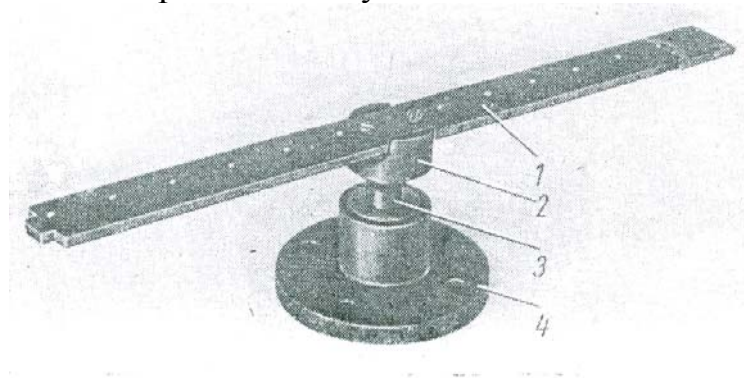


Рис. 2. Пристрій для дослідження в'язкопружних властивостей зв'язуючого

Конструкція приладу (рис.2) містить сформований у відповідності до приведеної вище технологічної схеми полого циліндричного стовпчика 3, до торців якого прикріплені нижня 4 і верхня перехідна 2 шайби. До верхньої шайби кріпиться важіль 1, через який відбувається навантаження блоку каліброваними грузами. Деформація блоку визначається за величиною розбалансу чотириплечового тензометричного моста, плечі якого утворені з відрізків константової проволочки (по дві з кожної сторони важіля), що жорстко зацімлені з одного боку.

Даний метод дослідження в'язкопружних властивостей зв'язуючих найбільш повно відповідає всім вказаним вище вимогам їх формування та умовам проведення дослідів. Окрім того, цей метод дозволяє здійснити автоматичний запис кривої піддатливості і має підвищену швидкодію (роздільну здатність) вимірювання, що особливо важливо при вимірюванні в області малих часів.

Обробка результатів експериментальних досліджень

Статичний режим випробовування

За визначенням функція піддатливості отримується в результаті навантаження зразка одиничною напругою:

$$\tau(t) = 0, \text{ при } t < 0; \tau(t) = \tau \text{ при } t > 0. \quad (2)$$

Для отримання функції $J(t)$ без спотворення необхідно витримати умову (2), величина ж напруги через лінійність зв'язуючого не впливає на характер функції $J(t)$.

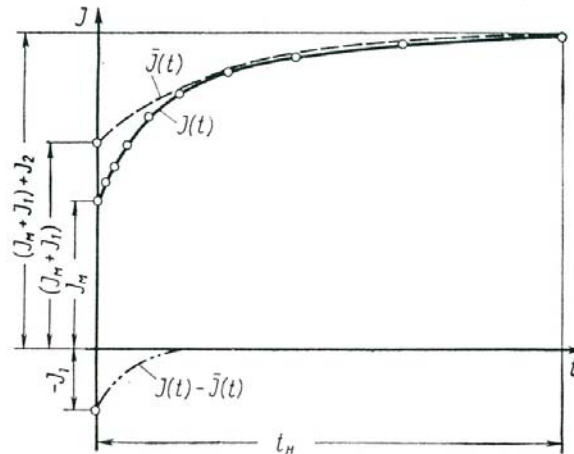


Рис. 3. Обробка експериментальної кривої піддатливості зв'язуючого за двоелементною схемою

З експериментально отриманого графіку піддатливості $J(t)$ знаходять наближений вираз функції піддатливості $J(t)$, що відповідає двоелементній схемі моделі-аналога зв'язуючого:

$$J(t) = J_m + J_1(1 - e^{-\frac{t}{m_1}}) + J_2(1 - e^{-\frac{t}{m_2}}).$$

Параметри кривої J_m , J_1 , J_2 , m_1 і m_2 . в цьому випадку зручно знаходити наступним чином. На отриманій кривій обирають 10 (20) точок, які заповнюють інтервал спостереження t_n в геометричній прогресії (рис. 3). Обирають останні 5(10) точок і по них визначають константи $(J_m + J_2)$, J_2 і m_2 із умови:

$$\min \sum_{i=6}^{10} [J(t_i) - \bar{J}(t_i)]^2,$$

де
$$\bar{J}(t) = (J_m + J_1) + J_2(1 - e^{-\frac{t}{m_2}}).$$

Потім знаходять різниці $J(t_i) - \bar{J}(t_i)$ для перших 5(10) точок. По отриманні 5 (10) різниць знаходять константи J_1 і m_1 .

Точність знаходження в'язкопружних констант і характеристик зв'язуючого тензорезистора при статичному режимі досліджень обмежена, оскільки вже під час того, як відбувається навантаження багато релаксаційних процесів встигають завершитися. Тому, щоб отримати точні характеристики зв'язуючого при малих часах існує два методи:

1) проводити статичні дослідження при різних температурах і, застосовуючи принцип температурно-часової аналогії, зміщати криві отримані при температурах нижчих за відлікову вліво за логарифмічною шкалою (в область малих часів);

2) проводити динамічні дослідження і виводити в'язкопружні константи через частоти власних коливань зв'язуючого.

Динамічний режим випробовувань. При динамічному режимі випробування досліджуваний зразок зв'язуючого, що перебуває під постійним навантаженням миттєво розвантажується. Після цього записується крива власних коливань зв'язуючого (рис. 4). Отримана внаслідок експерименту крива власних коливань блока має вигляд:

$$\varepsilon(t) = a \cdot e^{-\alpha t} + b \cdot e^{-\beta t} \cos \omega t \quad (3)$$

Коефіцієнти a, b, α, β і ω знаходять за допомогою відомих методів за експериментальною кривою власних коливань (рис. 4) [10].

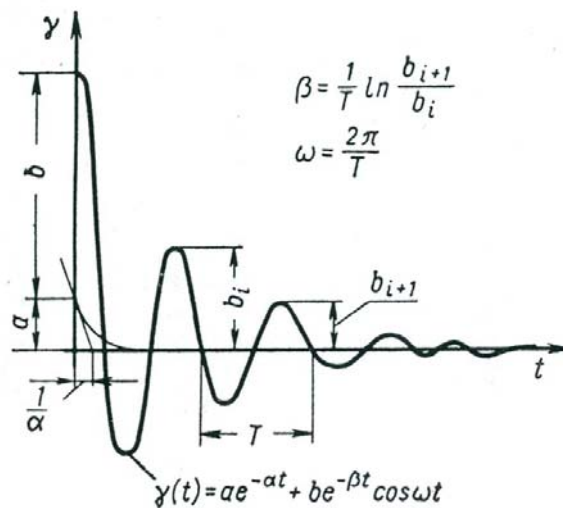


Рис. 4. Знаходження констант функції власних коливань зв'язуючого з експериментально отриманої кривої

Прирівнюючи вираз (3) в операторній формі до значення $\varepsilon(p)$ введеного з диференційного рівняння коливань зв'язуючого за нульових початкових умов при різних степенях p , отримаємо загальні вирази для знаходження в'язкопружних констант зв'язуючого через параметри експериментальної кривої власних коливань зв'язуючого:

$$G_m = \frac{1}{J_m} = \omega^2 + \beta^2 + 2\alpha\beta; \quad (4)$$

$$G_d = \frac{1}{J_d} = \frac{\alpha(\omega^2 + \beta^2)}{\alpha + 2\beta}; \quad (5)$$

$$n = \frac{1}{m} = \frac{1}{\alpha + 2\beta}; \quad (6)$$

При динамічному режимі дослідження калібрування не потрібне, оскільки постійні a і b експериментальної кривої не входять до виразів (4), (5), (6). Не потрібне також і дотримання нульової початкової умови $\varepsilon(0) = 0$. В той же час при динамічному випробуванні повинна бути забезпечена початкова умова $\dot{\varepsilon}(0) = 0$. Останнє означає, що при проведенні експериментальних досліджень необхідно звертати увагу на те, щоб крива процесу піддатливості у момент розвантаження зв'язуючого $t = 0$ була горизонтальною.

Висновки

У засобах вимірювання в'язкопружних властивостей тензорезисторних зв'язуючих повинна бути реалізованою технологічна і конструктивна можливість точного відтворення способу формування зв'язуючого та робочого навантаження зв'язуючого, так само, як у реальному тензорезисторі. Окрім цього, ці засоби вимірювання повинні бути оснащенні механоелектричними перетворювачами, які б дозволяли здійснювати безперервну автоматичну реєстрацію результатів вимірювання.

Для більш точного вимірювання в'язкопружних властивостей тензорезисторних зв'язуючих в області малих часів, де швидкість релаксації найбільша слід використовувати динамічний режим випробувань, в якому реалізована можливість миттєвого безінерційного навантаження.

Перспективним залишається питання розробки методів та засобів вимірювання в'язкопружних властивостей тензорезисторних зв'язуючих, які б дозволяли здійснювати автоматичні вимірювання і побудову графіку піддатливості $J(t)$ у широкому діапазоні часів від мікросекунд до декількох місяців.

Література

1. Игнатов А. В. Влияние вязкоупругих свойств связующего на характеристики тензорезисторов // Электротензометрия. - Л.: 1990. - С. 67-71.
2. Алфрей Т. Механические свойства полимеров. - М.: Изд-во иностр. Лит. 1952.-589 с.
3. Кузьяев І.М. Механіка та реологія полімерів. Навч. посібник. - Дніпропетровськ: УДХТУ, 2002. - 386 с.
4. Нильсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций. – Пер. с англ. П. Г. Бабаевского. - М.: Химия, 1978. – 312 с.
5. Бартнев Г.М., Зеленов Ю.В. Физика и механика полимеров: Учеб. пособие для вузов. -М.: Высш. школа, 1983. - 391 с..
6. Рабинович А.Л. Введение в механику армированных полимеров. - М.: Наука, 1970. - 482 с.
7. Петрова А.П. Семенович И.В. Поведение клеевых соединений при воздействии эксплуатационных факторов. ОНТИ, 1980. - 53 с.
8. Малкин А.Я., Аскадский А.А., Коврига В.В. Методы измерения свойств полимеров. – М: Химия, 1978. - 336 с.
9. Анкудинов Д.Т., Мамаев К.Н. Малобазные тензодатчики сопротивления.– М.: Машиностроение, 1968. - 188 с.

10. Бугаков И.И. Ползучесть полимерных материалов (Теория и применение). Монография. – М.: Наука, 1973. - 288 с.

<p>Погуляйко О.М. Выбор методов и средств измерения вязкоупругих свойств связующих, используемых в тензометрии</p> <p>В работе описаны существующие методы и средства исследования вязкоупругих свойств полимерных материалов. Приведены требования к технологическим и конструктивным параметрам методов и средств измерения и количественной оценки вязкоупругих свойств тензорезисторных связующих. На основе сравнительного анализа выбраны соответствующие методы и средства измерения.</p>	<p>Poguliaiko O.M. Choice of the methods and measuring facilities of viscoelastic properties of the glues for strain gauging</p> <p>In this paper existent methods and facilities of research of viscoelastic properties of polymeric materials are in-process described. Resulted requirement to the technological and structural parameters of methods and facilities of measuring and quantitative estimation of properties of glues for strain gauges. On the basis of comparative analysis the proper methods and measuring facilities are chosen.</p>
---	--

*Надійшла до редакції
16 квітня 2008 року*

УДК 612.315.592

ВПЛИВ ДЕФЕКТІВ СТРУКТУРИ НА ОПТИЧНЕ ПОГЛИНАННЯ У ФОСФІДІ ГАЛІЮ

¹Конорева О.В., ¹Павленко Ж.А., ¹Тартачник В.П., ²Пінковська М.Б., ¹Інститут ядерних досліджень НАН України, м. Київ, Україна; ²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

Досліджувався вплив радіаційних дефектів, введених швидкими нейтронами реактора та електронами з $E = 50$ MeV на білякрайове оптичне поглинання кристалів GaP, вирощених за Чохральським і легованих Te. Виявлено зсув краю поглинання в область менших енергій квантів та зміну його нахилу. Деструкція основної смуги поглинання обумовлена зростанням інтенсивності непрямих переходів між хвостами зон

Вступ

Кристали фосфіду галію широко використовуються у приладобудуванні як у якості активних фотоелектронних пристроїв так і високочутливих термометрів, детекторів, високотемпературних діодів [1 - 3]. На їхній основі створені різноманітні перетворювачі енергії, елементи волоконно-оптичних ліній зв'язку, цифрові панелі, індикатори та ін. [4].

Ефективність роботи систем, до складу яких входять фосфідо-галієві діоди, залежить від рівня досконалості кристалів, на основі яких вони одержані.

Окремі з них, перебуваючи в полі дії проникаючої радіації (ядерні випромінювання реакторів, прискорювачі, космічне випромінювання), деградують, що змушує користувачів звертатись до пошуку способів підвищення їхньої радіаційної стійкості. Необхідною умовою забезпечення стабільності роботи прила-

дів при значних дозових навантаженнях є наявність інформації про властивості порушень структури радіаційного походження.

Принадно слід зауважити, що на сьогодні в літературі обмаль даних, які стосуються механізмів деградації характеристик матеріалу та параметрів приладів, обумовленої опроміненням швидкими частками [1-7]. Особливо це стосується пострадіаційних змін оптичного пропускання та випромінювальної здатності GaP, які є найважливішими якістьми цього напівпровідника з погляду його практичного застосування.

Метою виконаної роботи стало виявлення особливостей нагромадження і відпалу складних радіаційних дефектів, створених частками високих енергій, здатних формувати у кристалі і точкові дефекти, к і області розупорядкування.

I. Експеримент

Використовувались зразки фосфіду галію *n*-типу, вирощені методом Чохральського, товщиною 200-400 мкм і леговані Te до концентрації $n = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Телур у фосфіді галію є основною легуючою домішкою, яка при розчиненні заміщує фосфор і тому є донором. У процесі легування концентрація вільних електронів до $n = 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ лінійно зростає зі збільшенням вмісту Te у розчині; перевищення вмісту Te призводить до сублінійної залежності внаслідок утворення другої фази Ga_2Te_3 . При цьому концентрація Te зростає у напрямку вирощування епітаксійних шарів [8, 9].

Опромінення електронами з $E = 50 \text{ MeV}$ ($\Phi \approx 10^{17} \div 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) та швидкими нейтронами реактора ($\Phi = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, $\bar{E} = 1 \text{ MeV}$) відбувалось при кімнатній температурі. Ізохронний відпал в інтервалі ($50 \div 600^\circ\text{C}$) проводився з періодом 20 хв. – час протягом якого зразок знаходився у печі при постійній температурі. Вимірювання оптичного поглинання виконані при $T = 300\text{K}$.

II. Результати та обговорення

Існування хвостів густини станів (ХГС) у вихідних сильно легованих та компенсованих напівпровідниках зумовлює експоненціальне зростання коефіцієнта поглинання у білякрайової області [10]

$$\alpha(\omega) \sim \exp\left\{-\frac{\hbar(\omega_0 - \omega)}{\Delta}\right\}, \Delta = cT, c = \text{const.} \quad (1)$$

- так зване правило Урбаха.

Експериментальні залежності коефіцієнта поглинання $\alpha(h\nu)$ в області фундаментальних переходів для вихідного та опроміненого електронами з $E = 50 \text{ MeV}$ GaP *n*-типу подані на рис. 1.

Видно, що вихідному зразку властиве експоненціальне зростання $\alpha(h\nu)$ в межах $h\nu = 2,2 - 2,5 \text{ eV}$. При цьому правило Урбаха виконується у межах $2,4 - 2,5 \text{ eV}$.

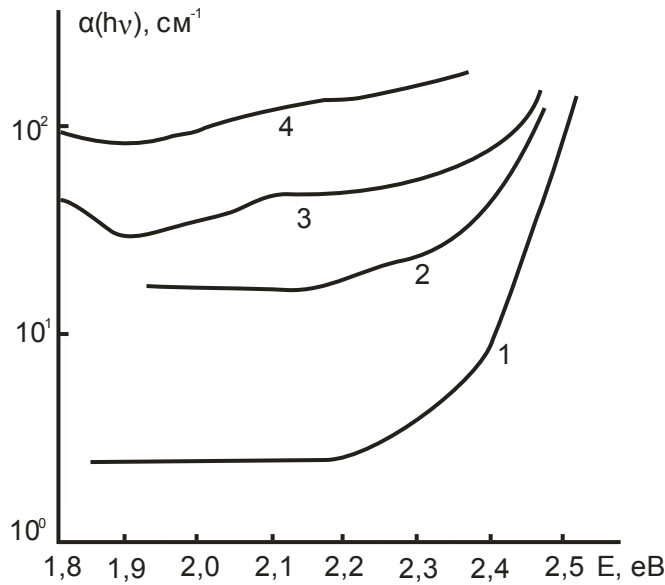


Рис.1. Залежність коефіцієнта поглинання $\alpha(h\nu)$ від енергії фотонів для кристала GaP *n*-типу (Te), опроміненого різними дозами електронів з $E=50$ MeV: 1 - вихідний зразок; 2 - $\Phi = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$; 3 - $\Phi = 10^{17} \text{ см}^{-2}$; 4 - $\Phi = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

Воно також ще частково виконується у зразку, опроміненому до дози $\Phi = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ($E_e = 50$ MeV), при $h\nu = 2,3 - 2,4$ eV але вже при більшому значенні характеристичної енергії Δ . ($\Delta_{вих.} = 0,053$ eV, $\Delta_{опр.} = 0,081$ eV). Величина Δ , як відомо, є мірою дефектності зразка, за допомогою якої можна оцінити концентрацію порушень структури, яка впливає на оптичне поглинання [11]

$$\Delta = 2,2 \left(n_t a_B^3 \right)^{2/5} E_B; \quad (2)$$

$$n_t = \left(\frac{\Delta}{2,2 E_B} \right)^{5/2} \frac{1}{a_B^3}, \quad (3)$$

де n_t – концентрація дефектів у зразку; a_B – борівський радіус електрона у кристалі

$$a_B = \frac{\epsilon \hbar^2}{m e^2}, \quad (4)$$

який відрізняється від радіуса Бора ізолюваного атома водню наявністю діелектричної проникності ϵ матеріалу;

$$E_B = \frac{m^* e^4}{2 \epsilon^2 \hbar^2} \quad (5)$$

- енергія Бора у кристалі, виражена через ефективну масу носія у ґратці m^* і тому ϵ константою лише для даного матеріалу.

Результати оцінок n_t , проведених для опроміненого зразка GaP ($\epsilon_{\text{GaP}} = 11$, $m^* = 0,1 m$), подані на рис. 2 у вигляді графіка залежності концентрації оптично-активних центрів від дози.

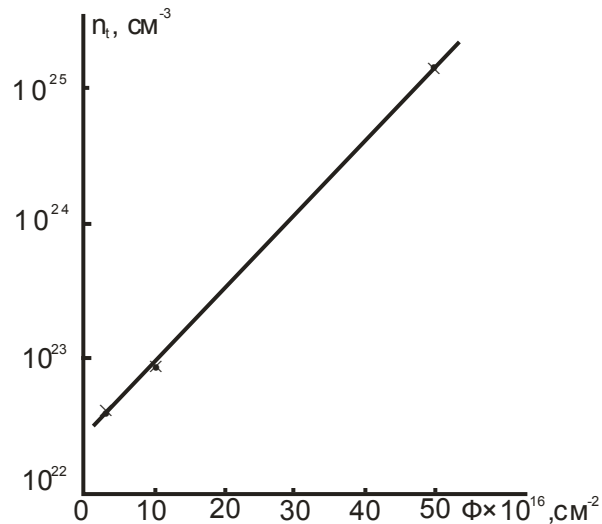


Рис.2. Дозова залежність концентрації радіаційних дефектів у зразку GaP, опромінену електронами з $E = 50 \text{ MeV}$.

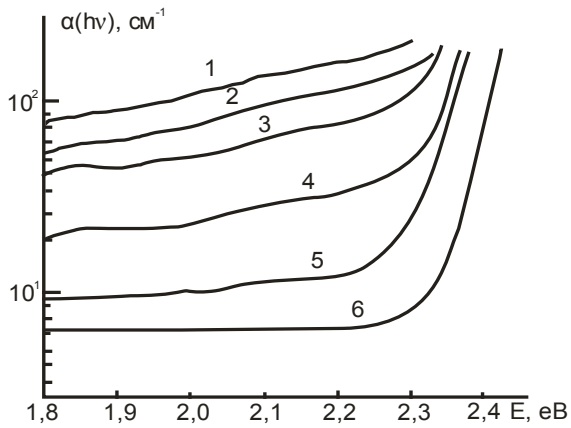
Очевидно, що вони дають завищене значення концентрації порушень структури, проте крива рис. 2 реально віддзеркалює кінетику їхнього накопичення при опроміненні. Нелінійність залежності $n_t(\Phi)$ може бути результатом утворення кластерів дефектів, здатних формувати значні внутрішні поля, які згідно з ефектом Франца-Келдиша зменшують товщину бар'єру до величини

$$d' = \frac{E_g - h\nu}{q_0 \epsilon}, \quad (6)$$

(де q_0 – заряд електрона, ϵ - напруженість електричного поля) і збільшують імовірність тунельного переходу з участю фотона.

При цьому край поглинання повинен зміщуватись у бік менших енергій, що, як видно із рис.1, якраз і має місце для кривої $\alpha(h\nu)$ зразка, опроміненого проміжною дозою електронів ($\Phi = 3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$). Подальше зростання інтегрального потоку електронів призводить до поступової деструкції краю поглинання за рахунок невертикальних переходів між хвостами зон, котрі при $\Phi \geq 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ можуть сягати середини забороненої зони. Слід зауважити також, що при наявності у зразку великомасштабних скупчень дефектів зростає роль розсіяння на них світлових квантів, що дає додатковий внесок у вимірюваний коефіцієнт поглинання.

Ізохронний відпал радіаційних дефектів у GaP, опромінену нейтронами реактора ($\Phi = 3 \cdot 10^{16} \text{ н/см}^2$), проводився в інтервалі температур від кімнатної до $600 \text{ }^\circ\text{C}$. На рис. 3 показані залежності $\alpha(h\nu)$ для опроміненого зразка, відпаленого при різних температурах та вихідного. Після $T_{\text{відп.}} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ у зразку ще присутня значна частина невідпалених дефектів, проте подальше підвищення температури кристала було небажаним, через виникнення у ньому термодфектів, які різко погіршують однорідність зразка [12]. Правило Урбаха можна вважати застосовним для вихідного при $600 \text{ }^\circ\text{C}$ зразка в межах $h\nu = 2,3 - 2,4 \text{ eV}$.



Ри

с.3. Відновлення коефіцієнта поглинання $\alpha(h\nu)$ зразка GaP, опроміненого нейтронами реактора ($\Phi = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) в процесі ізохронного відпалу: 1 - опромінений; 2 – 200 °C; 3 – 300 °C; 4 – 500 °C; 5 – 600 °C; 6- вихідний.

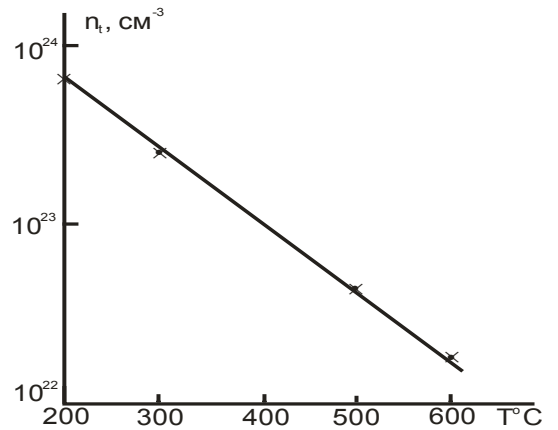


Рис.4. Залежність концентрації дефектів, які впливають на фундаментальне поглинання зразка GaP, від температури відпалу.

Розрахована за співвідношенням (3) концентрація пошкоджень, які впливають на поглинання, є експоненційною функцією температури відпалу (рис. 4). Запишемо рівняння дифузії (II закон Фіка) для випадку, коли концентрація дифундуючого компонента C рівна концентрації дефектів у зразку n_t

$$D\nabla^2 n_t = \frac{\partial n_t}{\partial t} \quad (7)$$

Коефіцієнт дифузії – $D = \gamma a^2 \nu$ визначається через постійну ґратки a ; γ – числовий коефіцієнт, що залежить від геометрії ґратки та розташування сусідніх дефектів; ν – частота перескакування дефекта, яка, як відомо, визначається рівнянням Арреніуса:

$$\nu = \nu_0 e^{-\frac{E_A}{kT}}, \quad (8)$$

де $\nu_0 = 10^{13} \text{ с}^{-1}$ – частота коливань атомів проникнення. Отже, температурна залежність D – експоненційна із енергією активації E_A .

Нехай у зразку існують області стоків радіаційних дефектів з адсорбуючими поверхнями, де $n_t = 0$. Тоді для окремої області можна записати ряд функцій, для яких по всій області

$$\nabla^2 \varphi_i(r) + \lambda_i \varphi_i(r) = 0 \quad (9)$$

На границях – $\varphi_i = 0$. λ_i – константи, що визначаються формою та розміром області, причому $\lambda_0 < \lambda_1 < \lambda_2 < \dots$

Функції $\varphi_i(r)$ – взаємно ортогональні. Розв'язок попереднього рівняння для φ_i можна шукати у вигляді суми [13]

$$C(r, t) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i \varphi_i(r) e^{-\lambda_i D t} \quad (10)$$

Дійсно, підставивши один із доданків у диференціальне рівняння для $\varphi_i(r)$, одержимо тотожність.

Як видно з розв'язку, концентрація дефектів у кожній точці r зменшується, як сума експоненційно спадних функцій. При великих часах спостереження t можна вважати, що члени високого порядку з великими λ будуть зникати швидше. Тому

$$C(r, t) \cong a_0 \varphi_0 e^{-\lambda_0 D t} \quad (11)$$

Одержана рівність описує реакцію першого порядку, тобто таку, коли

$$\frac{dn_t}{dt} = -kn_t; \quad k = \lambda_0 D \quad (12)$$

В загальному випадку швидкість зміни концентрації дефектів може бути подана, як

$$\frac{dn_t}{dt} = -K_0 \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right) f(n_t) \quad (13)$$

де K_0 – постійна, $f(n_t)$ – функція, що визначає порядок реакції між дефектами.

При ізохронному відпалі температура змінюється лінійно з часом $T = at + T_0$; $dT = adt$, тоді

$$\frac{d(n_t)}{dT} = \text{const}_1 \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right) f(n_t). \quad (14)$$

У нашому випадку $n_t = n_0 e^{-AT}$, тоді

$$f(n_t) = \text{const}_2 \exp\left(\frac{E_A}{kT}\right) \exp(-AT). \quad (15)$$

Порядок реакції описується складною функцією температури. Це означає що в межах 600 °С не існує єдиного механізму відпалу. Винятком може бути хіба що початок процесу відновлення $\alpha(h\nu)$: ізотермічний відпал електропровідності, проведений при 130 °С і 145 °С дозволив визначити його енергію активації, $E_A = 1,5$ еВ, яка властива відпалу точкових порушень структури. При вищих температурах відновлення параметрів опромінених кристалів не може обмежуватись лише дифузійними процесами, вирішальну роль у відпалі починають відігравати розпад складних дефектів типу областей розупорядкування, та й виникнення якісно інших, внаслідок взаємодії елементарних, зміна конфігурації первинно введених, виникнення високотемпературних комплексів із домішками та ін. Сукупність всіх означених механізмів і обумовлює існування складної функціональної залежності $f(n_t)$, яка визначає порядок реакції відпалу.

III. Висновки

Встановлено, що опромінення кристалів фосфіду галію електронами з $E = 50$ МеВ та нейтронами реактора призводить до зміни нахилу кривої $\alpha(h\nu)$ та зсуву фундаментальної смуги поглинання у бік менших енергій квантів. Зміна нахилу $\alpha(h\nu)$ обумовлена зростанням хвостів густини станів і підкоряється правилу Урбаха. Відпал радіаційних дефектів протікає в межах 100-600 °С.

Випромінювальна рекомбінація – основний характеристичний параметр світлодіодних GaP структур. Накопичення інформації про структурні дефекти сприяє збільшенню квантового виходу світлодіодів. Результати проведених досліджень розширюють перспективу наукових розробок, спрямованих на підвищення ефективності контролюючих пристроїв неруйнівного контролю.

Література

1. E. Ju Brailovskij, N.E. Yrigorian, Y. Eritzian. Optical properties of electron-irradiated gallium phosphides // *Phys. Stat. Sol. A*, 62 (2), 1980. - P. 649 – 655.
2. T. Endo, Y. Nakanishi, T. Wada. Optical absorption and modification of band edges in irradiated GaP // *Jap. J. Appl. Phys.*, 21 (11), 1982. - P.1619 - 1627.
3. Брайловский Е.Ю., Осташко Н.И., Тартачник В.П., Шаховцов В.И. Влияние точечных радиационных дефектов на околосреднее оптическое поглощение кристаллов GaP, облученных частицами высоких энергий // *Укр. Физ. Журн.* - 1981. - 26 (6). - С. 973 – 977.
4. Кудин А.П., Манжара В.С., Тартачник В.П. Особенности поглощения света кристаллами GaP, облученных частицами высоких энергий // *Укр. Физ. Журн.* - 1985. - 30 (7). – С. 986-990.
5. Д.Б. Гоер, А.А. Колб, А.Н. Крупкин. Краевое и околосреднее поглощение в кристаллах легированного фосфида галлия при облучении высокоэнергетическими электронами // *Укр. физ. журн.* - 1989. - 34 (5). – С. 682 - 686.
6. M. Palezewska, J. Jasinski, K. Korona, M. Kaminska. Antisite defects created in neutron irradiated GaP crystals // *J. Appl. Phys.*, 78(6), 1995. – P. 3680 - 3685.
7. Кудін А., Манжара В., Литовченко П., Тартачник В. Хвости густини станів в опромінену фосфіді галію // *Фізичний збірник НТШ*. - 2002. – 5. – С. 30-34.
8. Андреев В.М., Долгинов Л.М., Третьяков Д.Н. Жидкосная эпитаксия в технологи полупроводниковых приборов. - М.: Советское радио, 1975. – 328 с.
9. R.D. Sudlow, A. Mottram, A.R. Peaker. Dopinggradients in layers of gallium phosphide grown by liquid epitaxy // *J. Mater. Science*, 7(1), 1975. – P.168 - 172.
10. Ж. Панков. Оптические процессы в полупроводниках. - М.: Мир, 1973. - 456 с.
11. В.А. Бонч-Бруевич, И.П. Звягин, Р. Кайпер, А.Г. Миронов. Электронная теория неупорядоченных полупроводников. - М.: Наука, 1981. – 383 с.
12. Опилат В.Я., Литовченко П.Г., Куц В.И., Тартачник В.П. Возникновение сложных дефектов у кристаллах фосфида галлия при радиационной обработке // *Укр. физ. журн.* - 1991.36 (5). – С. 776 - 778.
13. Дж. Динс, Дж. Винйард. Радиационные эффекты в твердых телах. -М. Иностранная литература, 1960. – 244 с.

<p>Конорева, О.В. Павленко Ж.А., Пинковская М.Б., Тартачник В.П. Влияние дефектов структуры на оптическое поглощение у GaP Исследовалось влияние радиационных дефектов, введенных быстрыми нейтронами реактора и электронами с $E = 50 \text{ MeV}$ на околосреднее оптическое поглощение кристаллов GaP, выращенных за Чохральским и легированных Te. Обнаружен сдвиг края поглощения в область меньших энергий квантов и изменение его наклона. Деструкция основной полосы поглощения обусловлена ростом интенсивности не прямых переходов между хвостами зон.</p>	<p>Konoreva O., Pavlenko Zh., Pinkovs'ka M., Tartachnyk V. Influence of the structure defects on optical absorption in gallium phosphide Influence of radiation defects, induced with reactor's fast neutrons ($E = 1 \text{ MeV}$) and electrons ($E = 50 \text{ MeV}$) on near edge absorption of CZ GaP crystals doped by Te. It was found the shift of the absorption edge toward the less quant energy region and the absorption curve slope change. The destruction of the main absorption band is caused by the increase of the intensity of indirect transitions among zones' tails.</p>
--	---

*Надійшла до редакції
11 червня 2009 року*