

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ДЕГРАДАЦІЙНО - РЕЛАКСАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ФОСФІДО-ГАЛІЄВИХ СВІТЛОДІОДАХ

© Опилат В.Я., Тартачник В.П., Худецький М.В., Макота Ю.А., 2006
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

Описано деградаційно - релаксаційні процеси у світлодіодах GaP, зумовлені ультразвуковою обробкою. Виявлено ефект оборотності деградаційного процесу. В основі досліджуваного явища лежить формування нестабільних дислокаційних сіток. Метод ультразвукової обробки може бути застосований з метою виявлення мікрodefектів структури у напівпровідникових приладах

Відомо, що ультразвукова (УЗ) хвиля може генерувати дислокації та стимулювати їхній рух. Переміщуючись по кристалу, дислокації виконують роль стоків точкових дефектів і сприяють покращенню структури кристала.

У представленій роботі допускається, що енергія УЗ коливань використовується, як засіб впливу на структурні пошкодження зразка, з допомогою якого можна змінювати концентрацію дефектів різного типу, стимулювати реакції між дефектами та прискорювати їхній відпал. Підвищений інтерес до впливу УЗ хвилі на напівпровідникові об'єкти зумовлений можливостями використання УЗ хвилі для покращення характеристик приладів [1-4], модифікації властивостей матеріалу [5], а також специфічними реакціями кристала на ультразвукове поле – виникненням акустолумінесценції [6, 7], акуstofотопровідності [8], акустохімічних реакцій [9] тощо. В ході виконання роботи також допускається, що енергія ультразвукової хвилі використовується як засіб для зміни концентрації дислокацій у зразку з метою вивчення їхнього впливу на інтенсивність випромінювальної рекомбінації фосфіду галію.

В процесі проведення експерименту озвучення кристалів здійснювалось у неперервному режимі на частоті $\nu = 3 \div 9$ МГц, потужність коливань становила 1 Вт/см^2 , вимірювання інтенсивності електролюмінесценції проводилось при кімнатній і азотній температурах, величина робочого струму I через p - n структуру не перевищувала 20 мА і була фіксованою для кожного циклу вимірювань.

В результаті виявлено, що в процесі озвучування світлодіода інтенсивність випромінювання I монотонно зменшується (рис.1),

причому характер спаду в цілому є неекспоненційним. Деградаційну криву умовно можна розділити на дві ділянки – швидкої та повільної деградації. Перша швидка стадія падіння яскравості задовільно описується лінійною часовою залежністю, друга завершальна – ближча до експоненційної. Великі дози УЗ ($t_{\text{озв}} > 20$ годин) приводять до повного гасіння електролюмінесценції.

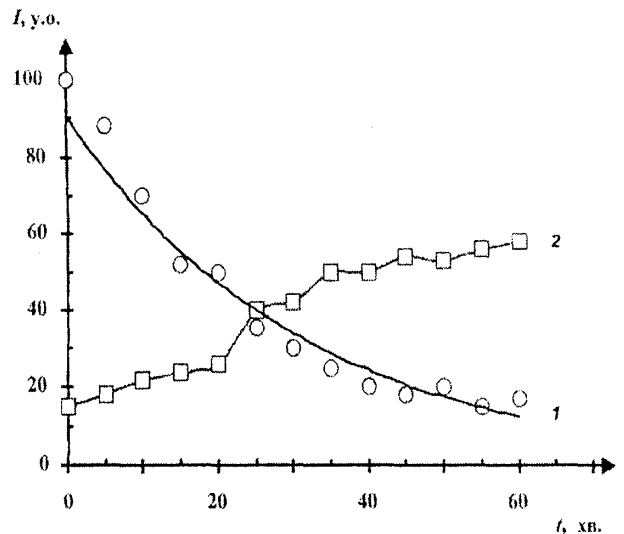


Рис.1 Залежність інтенсивності випромінювання червоного фосфідо-галієвого світлодіода від часу озвучування ($\nu = 3$ МГц, $W = 1 \text{ Вт/см}^2$) (1) та крива відновлення свічення (2)

Головною особливістю виявленого ефекту є практично повне відновлення свічення деградованого зразка через деякий час після вимкнення УЗ-генератора. При цьому час релаксації значно більший від часу озвучування і крива

релаксації, як правило, не повторює ходу деградаційної кривої, спостерігається гістерезис (рис. 1).

Базуючись на аналізі одержаних результатів та використанні опублікованої раніше інформації про нестационарні явища в досліджуваних об'єктах, розглянемо можливі механізми, котрі керують деградаційно-релаксаційними процесами.

Відомо, що УЗ обробка кристалів супроводжується виникненням у зразку точкових дефектів і дефектів лінійного типу – дислокацій [10]. Процес деградації електролюмінесценції не може бути зумовленим руйнуванням екситонів, локалізованих на комплексах Zn-O, випромінювання яких є переважаючим у спектрі GaP при 300 К, полями точкових дефектів. Дійсно, свічення діодів GaP, опромінених γ -квантами чи електронами з $E = 1$ Мев, не вдається відновити звичайними способами і доводиться застосовувати особливі режими відновлення [3], що свідчить про вплив на механізм свічення складних порушень структури. Такими дефектами є рухомі дислокації та створені ними дислокаційні сітки. Їх слід розглядати як нестационарні, нерівноважні потужні області безвипромінювальної рекомбінації, здатні мігрувати по кристалу і утворювати скупчення, відомі в літературі як джерела темних ліній (ДТЛ) і джерела темних плям (ДТП). Результати, приведені на рис.1, дають можливість визначити середню концентрацію дислокацій у кристалі у випадку озвучування та відновлення свічення, якщо кожен з цих дислокацій розглядати як лінійний дефект.

У межах відстані r_0 від дислокації швидкість безвипромінювальної дислокації вважається нескінченною. Коли виходити з однорідності та постійності рівня збудження в об'ємі напівпровідника, то для концентрації носіїв струму надлишок $n(r)$ як функції відстані від дислокації матимемо, що

$$n(r) = G\tau \left(1 - \frac{k_0 \left(\frac{r}{L}\right)}{k_0 \left(\frac{r_0}{L}\right)}\right), \text{ при } r < r_0, \quad (1)$$

$$n(r) = 0, \text{ при } r \geq r_0, \quad (2)$$

тобто поблизу дислокації. Величини G , τ , L означають відповідно швидкість генерації неосновних носіїв струму, час життя та дифузійна довжина, $k_0 \left(\frac{r}{L}\right)$ – функція Бесселя нульового порядку [11].

З іншого боку, внутрішня ефективність люмінесценції в залежності від щільності дислокацій виражається співвідношенням [11]:

$$\frac{\eta}{\eta_0} = 1 - 4\pi\rho_D \left[r_0^2 + \frac{2r_{0D}}{G} \left(\frac{dn}{dr} \right) \right], \quad (3)$$

$$L^2 = D\tau, \quad (4)$$

де D – коефіцієнт дифузії неосновних носіїв.

Комбінуючи (1) та (3), можна отримати:

$$\frac{\eta}{\eta_0} = 1 - 4\pi\rho_D L^2 \left[\text{Ln} \left(\frac{2L}{r_0} \right) - 0,58 \right]^{-1}. \quad (5)$$

Для червоних діодів L має значення, яке є меншим, ніж для зелених. Тому, як видно з (5), зелені структури є чутливішими до введення дислокацій. Результати розрахунку кількості дислокацій, що виникають під час озвучення у червоних діодах, наведені на рис.2 при значенні параметрів $r_0 = 50 \text{ \AA}$ та $L = 2 \text{ \mu m}$.

З рис. 2 видно, що часові залежності щільності дислокацій складаються з ділянок швидкого ($0 \div 20$ хвилин) озвучування та повільного зростання кількості дефектів; аналогічні відтинки можна виявити також і на кривій відновлення яскравості. Тобто на першому етапі озвучування спостерігається генерація окремих дислокацій. Із збільшенням часу обробки відбувається їхнє накопичення і наступна взаємодія з утворенням сіток.

Сповільнення темпу деградації частково можливе також внаслідок руйнування УЗ хвилею центрів зародження дислокації – областей підвищених напружень у кристалі. Проте цей фактор на початку озвучення діодів не є основним у деградації – свіченням тому є відтворення обох ділянок після повторного навантаження зразка (рис.2).

$\rho_D \times 10^6, \text{ см}^{-2}$.

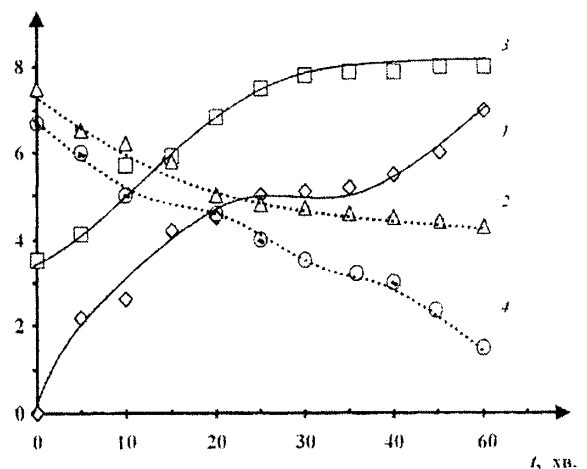


Рис. 2. Залежність щільності дислокацій у зразку від часу УЗ обробки (1,3) та релаксаційні криві (2,4)

“Швидка” ділянка на кривій відтворення інтенсивності свічення, очевидно, зумовлена рухом окремих дислокацій, як мобільніших об’єктів

порівняно з дислокаційними скупченнями чи сітками, котрі релаксують у повільному режимі.

Збільшенню інтенсивності свічення опромінених зразків сприяє також пропускання через них струму у прямому напрямку ($I_0 = 30$ мА) при кімнатній температурі (інжекційний відпал) [12].

Виявлено, що у момент введення УЗ прямий струм через p - n перехід зростає і одночасно зменшується інтенсивність свічення. Відносні зміни рівня інжекції та яскравості випромінювання не залежать від величини робочого струму через p - n перехід. Спостерігається також орієнтаційна залежність ефекту – при введенні ультразвукової хвилі з боку n області він у двічі більший, ніж при введенні звуку з боку p області структури.

Переходячи до аналізу описаних ефектів, почнемо з останнього – впливу ультразвуку на інтенсивність випромінювальної рекомбінації.

Відомо, що у п'єзонапівпровідниках, до яких відноситься і фосфід галію, проходження УЗ хвилі супроводжується виникненням п'єзополів, які можуть досягати десятків кВ/см² і котрі здатні інжектувати носії струму в активну область напівпровідника, збільшуючи чи зменшуючи інтенсивність випромінювальної рекомбінації. Величина акустоінжекційної е.р.с. лінійно залежить від потужності звуку

$$\beta_0 = -\frac{k^2 W}{j_{AD}}, \quad (6)$$

де стала $k = 5 \cdot 10^{-2}$ для сполук A^3B^5 ;

$$j_{AD} = eV_s(N_A^{-1} + N_D^{-1})^{-1}, \quad (7)$$

де V_s – швидкість звуку.

Враховуючи суттєву асиметричність використовуваних нами зразків ($n = 2 \cdot 10^{17}$ см⁻³, $p = 3 \cdot 10^{17}$), очевидно слід говорити про більшу величину акустоінжекційної е.р.с. саме в n частині збідненої області p - n переходу.

Якщо розглядати вплив акустоелектронної е.р.с. V_{ae} , яка є наслідком захоплення основних носіїв струму УЗ хвилею, можна одержати, що

$$V_{ae} = k^2 W \frac{\omega_s^2}{V_s^2} \frac{\epsilon}{4\pi e^2} \frac{d}{\mu N_d^2} = V_{\beta_0} \frac{\omega_s^2 \tau_m^n d_n}{V_s}, \quad (8)$$

де ω_s – частота звуку, τ_m^n – максвелівський час релаксації, d_n – товщина n -області.

Залежність V_{ae} від ω_s є параболічною. На практиці ефект миттєвої дії на яскравість свічення не залежить від потужності УЗ хвилі та її частоти.

Отже, спостережуваний ефект зменшення інтенсивності свічення при збільшенні струму через p - n перехід у момент ввімкнення УЗ зумовлений іншим фактором і причину його виникнення необхідно, очевидно, шукати у самому механізмі рекомбінаційного випромінювання фосфідо-галієвих світло діодів. Дійсно, так як природа цього

випромінювання – екситонна, то дія УЗ зводиться до руйнування екситонів в полі УЗ хвилі. Цей розпад і породжує падіння інтенсивності рекомбінації з одночасним збільшенням кількості вільних носіїв струму, тобто у кінцевому підсумку, величини сили струму через зразок.

Як було відмічено, при УЗ обробці зменшення інтенсивності свічення у діодах GaP не може бути зумовлене введенням лише точкових дефектів. Дійсно, згідно [5] їхній відпал починається лише при 150°C (перша стадія відпалу 150÷180°C відповідає міграції V_p , друга – при 250÷300 °C і пов'язана з рухом V_{Ga} до стоків). Але, як видно з рис. 1, процеси відновлення свічення в обробленому УЗ зразку фосфіду галію ефективно протікають вже при 300 К. Очевидно, що дислокації, приведені в рух УЗ хвилею, переміщуючись по кристалу, поглинають певну кількість дефектів, котрі служать безвипромінювальними центрами.

Відновлення свічення опроміненого зразка при пропусканні через нього струму найімовірніше зумовлене переміщенням заряджених дефектів в області p - n переходу структури під впливом зовнішнього поля. У поєднанні з дією акустичної хвилі інжекційний відпал може служити ефективним засобом для очищення кристалів від безвипромінювальних центрів і підвищення квантового виходу свічення.

Підсумовуючи результати проведених досліджень, у першу чергу відмітимо, що у представленій роботі описаний ефект, який полягає в оборотності деградаційного процесу у зразку фосфіду галію обробленому УЗ хвилею. В його основі лежить рух дислокацій по кристалу з наступним утворенням дислокаційних сіток. Такі складні дефекти у GaP при кімнатній температурі є термодинамічно нерівноважними і проявляються як потужні поля безвипромінювальної рекомбінації.

Виявлено також, що УЗ хвиля, проходячи через кристал, руйнує неоднорідності, на яких зароджуються мікроплазми. Отже, метод ультразвукової обробки може бути успішно застосованим для покращення випромінювальних якостей p - n структур, котрі містять підвищену концентрацію дефектів, в тому числі і для кристалів, опромінених швидкими частинками.

1.Здебський А.П., Корчняя В.А., Торчинская Т.В., Шейнкман М.К. Стимулированное ультразвуком изменение электрических и люминесцентных характеристик $InGaAs: Si$ – диодов // Письма в ЖТФ. – Т. 12, вып. 2, 1986. – С. 76-81. 2. Заверюхин Б.Н., Кривчик В.Д., Мушинов Р.А., Шамагдиев М.К. Особенности ультразвукового воздействия на $Si(Li)$ -детекторы с неравномерным распределением электрического поля // ФТП. – Т. 20, вып. 3, 1986. –

С. 525-528. 3. Вернидуб Р. М. Радіаційні дефекти у фосфіді галію та фосфіді індію і вплив ультразвуку на їхні властивості: Дис. канд. фіз.-мат. наук: 01.04.10. – Луцьк, 1996. – 223 с. 4. Акульник В.Г., Дякин В.В., Лысенко В.Н., Родионов В.Е. Влияние ультразвука на фотоэлектрические характеристики тонкопленочных электролюмине-сцентных структур // ЖТФ. – Т. 59, вып. 10, 1989. – С. 156-158. 5. Здебский А.П., Остапенко С.С., Савчук А. И., Шейнкман М.К. Стимулированное ультразвуковыми колебаниями преобразование люминесцентных и акустических характеристик монокристаллов CdS // Письма в ЖТФ. – Т. 10 вып. 20, 1984. – С. 1243-1247. 6. Островский И.В. Собственно-дефектный механизм акустолюминесценции кристаллов // Письма в ЖЭТФ. – Т. 34, вып. 8, 1981. – С. 462-466. 7.

Островский И.В., Коротченков О.А. Механизмы акустолюминесценции твердых тел // ФТТ. – Т. 25, вып.10, 1983. – С. 2936-2940. 8. Островский И.В., Коротченков О.А. Акустофотопроводимость кристаллов ZnS // ФТТ. – Т. 25, вып.1, 1983. – С. 259-261. 9. Громашевский В.Л., Дякин В.В., Сальков Е.А. и др. Акустохимические реакции в сульфиде кадмия // УФЖ. – Т. 29, № 4, 1984. – С. 550-554. 10. Островский И.В. Акустолюминесценция и дефекты кристаллов. – К.: Вища школа, 1993. – 224 с. 11. Watson G.N. Theory of Bessel Functions.- Cambridg: Univ. Press. – 1966. – P. 120. 12. Гончарук О.М., Кудін А.П., Куц В.І., та ін. Особливості деградації електролюмінесцентного випромінювання фосфіді галію, спричиненої ультразвуком // УФЖ. – Т. 42, № 10, 1997. – С. 1267-1270

УДК 622.691.4.002.5

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВЗАЄМОДІЇ АКУСТИЧНОГО ПОЛЯ ІЗ ТРІЩИНОЮ В ПРУЖНОМУ МЕТАЛІЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

© Лютак І. З., 2006

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Запропонована математична модель обчислення структури акустичного поля відбитого від країв тріщини в металі. Проведено моделювання отриманих теоретичних досліджень

Постійний розвиток транспортної та машинобудівної галузей, які інтенсивно використовують для своєї мети металічні конструкції, ставлять нові вимоги до якості обладнання. Існуючі методи неруйнівного контролю (НК) з метою виявлення дефектів не забезпечують високу надійність та продуктивність роботи у експлуатаційних умовах. Швидкість проведення НК, надійність та повнота отриманих результатів щодо виявлення таких дефектів, як тріщини, каверни, розшарування мають важливе значення. Тому актуальною залишається задача розробки нового методу НК.

Для цього потрібно розробити математичну модель, щоб описувала взаємодію акустичного поля з тріщиною, за допомогою якої можна оцінити форму та розміри дефектів.

При взаємодії акустичної хвилі в пружному середовищі із тріщиною хвильове поле розділюється на поле падаючої хвилі u_i , та відбитої хвилі u_r , де $i = 1, 2, 3$ – індекс напрямків координатних осей. Як

результат взаємодії акустичних коливань з тріщиною остання стає джерелом випромінювання.

Для оцінки такої взаємодії акустичного поля скористаємось таким рівнянням руху елементарного об'єму пружного середовища [1]:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho F_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}, \quad (1)$$

де σ_{ij} – компоненти напружень; x_j – координатні осі декартової системи координат; ρ – густина пружного середовища; F_i – вектор сил; t – час, $u_i = u_{i1} + u_{i2}$; $j = 1, 2, 3$ – індекс напрямків координатних осей.

Недоліком (1) є відсутність розділення змінних, які б окремо описували акустичне поле в часі та просторі. Розділення змінних дає можливість більш детального фізичного пояснення процесів, що мають місце в пружному середовищі в околі країв тріщини при взаємодії із акустичними хвилями.

Для того, щоб математично описати взаємодію країв тріщини (переміщення їх окремо в часі та просторовому положенні) по відношенню до збурюючих зусиль акустичними хвилями, можна