

зняті зразки-свідки на свердловинах, в т.ч. свердловині №53, з місць, вказаних вище. Результати розрахунку швидкості корозії наведені в табл.2. Використано зразки із сталі А-106 Grade "B" і сталі Ст.20, площа поверхні зразка – 0,0011 м², для купона корозії – 0,0009 м².

Таблиця 2 – Результати розрахунку швидкості та глибини корозії металу стінок газопроводів свердловини №53 і колектора УКПГ

Вузол	Дата проведення вимірювань	Місце вимірювання	Швидкість корозії, г/м ²	Глибинний показник, мм/рік
ФЗА	21.05.03– 26.04.04	Обойма на ФЗА	0,0010	0,0011
УКПГ	06.11.03– 26.04.04	Колектор на вході	0,0010	0,0011

Дані модельного діагностування за звітний період показують, що швидкість корозії не перевищує корозійно-небезпечну межу 0,1 мм/рік. У порівнянні з попередніми значеннями не спостерігається змін швидкості корозії.

Функціональне діагностування – хімічний аналіз вмісту сірководню в природному газі. Аналіз проводиться для контролю за можливими змінами як в сторону збільшення концентрації H₂S та

прийняття відповідних заходів, так і в сторону зменшення.

Реалізація створеного регламенту моніторингу газопроводів, які транспортують природний газ із сірководнем, впровадження ефективного комплексного діагностування змін властивостей металу труб за вихідним станом при монтажі і експлуатації, оцінка корозійного стану з урахуванням внутрішньої корозії забезпечують надійність таких газопроводів і технологічного устаткування.

Для ефективного функціонування системи моніторингу необхідно розробити та впровадити методи та засоби діагностування напружено-деформованого стану трубопроводів і створити комп'ютерні банки даних.

1. ВСН 006-89. *Строительство магистральных и промышленных трубопроводов. Сварка.* 2. ВСН 12-88, ч. 1. *Строительство магистральных и промышленных трубопроводов. Контроль качества.* 3. ВСН 005-88. *Строительство промышленных стальных трубопроводов. Технология и организация.* 4. Берник З.А. *Проблеми неруйнівного контролю зварних з'єднань магістральних трубопроводів//Методи та прилади контролю якості.* – 1999, №4. – С. 20-22.

УДК 538.935

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ СТРУКТУРНИХ ДЕФЕКТІВ У ВИХІДНИХ ТА ОПРОМІНЕНИХ РЕАКТОРНИМИ НЕЙТРОНАМИ ФОСФІДО-ГАЛІЄВИХ СВІТЛОДІОДАХ

© Конорева О. В., Отлат В. Я., Пінковська М. Б., Попов В. Ю., Решетнік М. С.,
Тартачник В. П., 2006

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

Встановлено, що для червоних світлодіодів характерним є різкий розподіл домішок в межах р-п переходу, у зелених переважно лінійний. У досліджуваних структурах формується два механізми пробоя: тунельний та лавинний. Опромінення швидкими нейтронами реактора (Есер = 2 МеВ) спричиняє зростання імовірності тунельного пробоя в зелених діодах, лавинного – у червоних

Квантова ефективність твердотільних джерел світла визначається якістю р-п переходу та досконалістю структури випромінюючої області напівпровідникових елементів. Завдяки розвитку сучасної епітаксильної технології сьогодні можна вирощувати однорідні шари матеріалу з добре контрольованими товщиною, рівнем легування,

створювати багатошарові плівки різного складу та необхідного профілю та ін [1]. Водночас, незважаючи на досягнення методу, серійні прилади містять певну кількість дефектів, локалізованих як у збідненій області р-п переходу, так і в перехідних і периферійних частинах, що погіршує якість готових виробів. Ця обставина однаковою мірою стосується

як гомопереходів найпростішого типу, так і джерел когерентного випромінювання та випромінювачів складної структури з квантовими ямами [2,3]. Електричне поле відіграє визначальну роль у процесах дифузії домішок, які активно впливають на формування комплексів, приводячи до швидкої деградації електролюмінісценції [4]. Неоднорідності розподілу домішок у площині *p-n* переходу створюють умови для виникнення мікроплазмових пробоїв. Такі точкові області свічення також негативно впливають на випромінювальні характеристики джерел свічення[5].

У поданій роботі розглянуто результати досліджень структури перехідної області *GaP*, на вольт-амперних характеристиках (ВАХ) яких виникають ділянки з від'ємним диференціальним опором (ВДО) [5], опромінених швидкими нейтронами реактора. Проаналізовано вплив радіаційних дефектів на протікання лавинного та тунельного струмів.

Досліджено промислові фосфідо-галієві (*GaP*) діоди, створені методом подвійної рідинної епітаксії. Як підкладку використано вирощений кристал *GaP* *n*-типу провідності. У червоних діодах випромінююча область легована цинком та киснем одночасно, у зелених – основним активатором свічення була домішка азоту. Вольт-фарадні характеристики виміряно стандартним мостовим методом при 77 та 300К [5]. Вимірювання ВАХ у широкому інтервалі температур (77...300К) проводилось у імпульсному режимі пристроєм, керування яким здійснював комп'ютер. Структури опромінювалися швидкими нейтронами реактора ($E=2\text{MeV}$) при температурі, близькій до кімнатної.

Відомо, що характер розподілу домішок в області просторового заряду *p-n* переходів найпростіше визначити на основі ємнісних вимірів. Бар'єрна ємність C_b різкого асиметричного переходу зі ступеневим розподілом заряджених центрів визначається виразом

$$C_b = S \sqrt{q \epsilon_a N / 2(U + U_k)}, \quad (1)$$

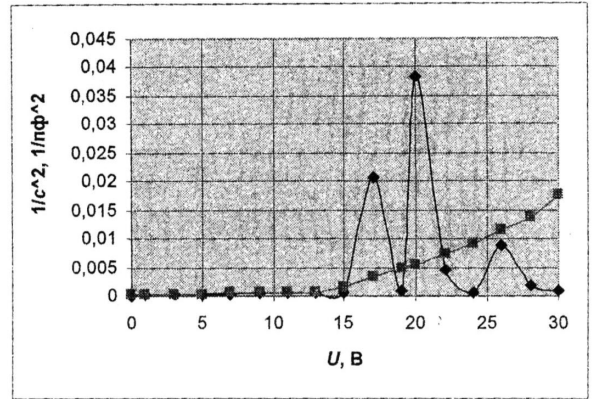
де S - площа переходу, q - заряд електрона, U - прикладена зворотна напруга; U_k - контактна різниця потенціалів, N - концентрація заряджених домішок, ϵ_a - абсолютна діелектрична проникність матеріалу.

У випадку лінійного (плавного) розподілу домішок ємність *p-n* переходу визначається так

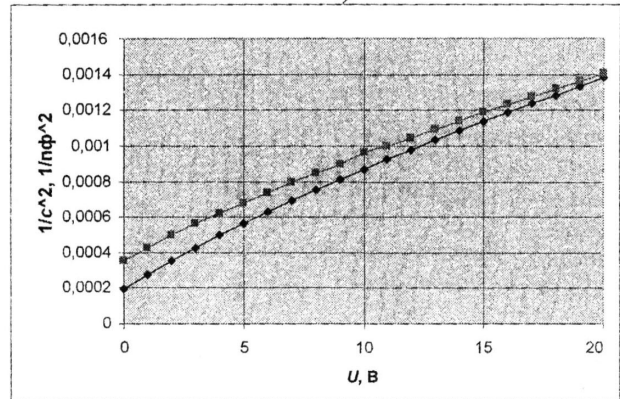
$$C_b = S^3 \sqrt{(q \alpha \epsilon^2 / 12(U + U_k))}, \quad (2)$$

де α - градієнт концентрації домішок.

На рис. 1,а,б подано результати виміру типових ємнісних характеристик обох типів діодів, зняті при азотній та кімнатній температурах.



а)



б)

Рис.1 C-V характеристика червоного (а) та зеленого (б) світло діодів *GaP*, які отримані при 300К (світла крива) та 77К (темна крива)

Видно, що графік функції $1/C^2=f(U)$ червоного діода при великих значеннях напруги, на відміну від зелених діодів, має немонотонний характер. Однак, для напруг $U < 15\text{В}$ експериментальні точки добре накладаються на пряму $(S/C)^2=f(U+U_k)$, що свідчить про різкий розподіл легуючої домішки. У випадку зеленого діода спостерігається відхилення залежності $(1/C)^2=f(U)$ від прямої (рис. 1,б). Для встановлення характеру розподілу домішки ми використали співвідношення

$$N(x) = -(C_b / \epsilon q S^2) (dC / dU)^{-1}. \quad (3)$$

Результати обробки отриманих із експерименту даних подано на рис. 2 у вигляді залежності $N(x)$. Лінійність функції $N(x)$ свідчить про існування плавного *p-n* переходу у зелених світлодіодах. Цей висновок добре узгоджується з лінійністю функції $(S/C)^3=f(U+U_k)$, визначеною за формулою (2). Величину градієнта концентрації домішки в межах області просторового заряду можна визначити за нахилом $N(x)$. Для всієї групи зелених діодів ця величина коливалась у межах значень $(2,12...8,1) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-4}$.

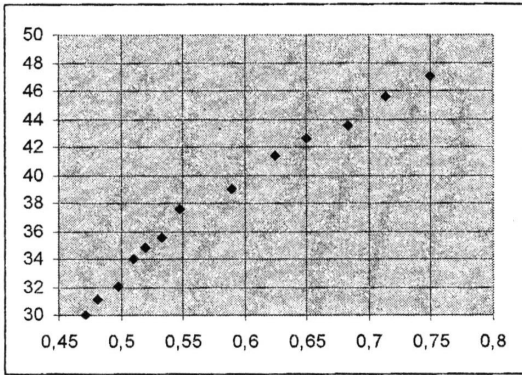


Рис. 2 Розподіл концентрації домішки у $p-n$ переході зеленого світло діода GaP

Слід відмітити, що серед зелених випромінювачів також зустрічаються зразки з нетривіальною поведінкою $(S/C)^2 = f(U + Uk)$, коли крива залежності проходила через мінімум, і тільки потім спостерігалось звичне зростання (рис. 2). Таке падіння смності $p-n$ переходу для малих зворотних напруг очевидно зумовлене існуванням локальних скупчень заряджених домішок поблизу межі переходу. Справді, при наявності таких неоднорідностей викривлення зон, спричинене зовнішнім зміщенням, повинно супроводжуватися відтіканням рухомих носіїв в глибину бази і відповідним зменшенням рівня екранування складного дефекту. Зміна його зарядового стану може стати причиною аномальної поведінки залежності $C = f(U)$. Зарядовий стан скупчень залежить від положення рівня Фермі. При зміні температури зразка від 77К до кімнатної скупчення можуть втратити заряд і не будуть впливати на смність переходу (рис. 3).

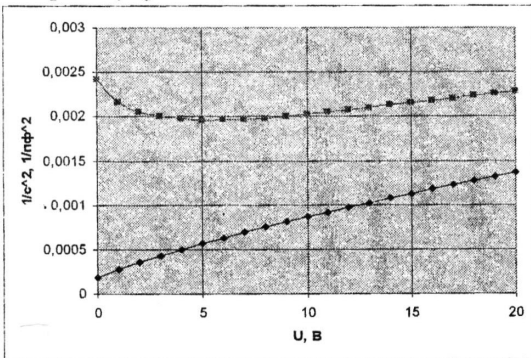


Рис. 3 $C-V$ характеристики зеленого світлодіода GaP із аномальним розподілом домішки

Поряд із смнісними вимірами певну інформацію про структуру $p-n$ переходу можна отримати з аналізу вольт-амперних характеристик. Важливою ділянкою ВАХ зворотно-зміщених переходів є область пробією, де можуть реалізуватися три механізми струмоперенесення: тепловий, лавинний і

тунельний. Роль першого незначна, оскільки об'єкт дослідження GaP – широкозонний напівпровідник, струм насичення малий, режим вимірювання – імпульсний. Відтак надалі розглядатимемо можливість впливу на розвиток пробією лише двох останніх механізмів.

Величина максимального поля у $p-n$ переході може бути оцінена згідно [7] таким чином:

$$E_{\max} = \frac{z(U + Uk)}{\varepsilon_a(z - 1)} Cb, \quad (4)$$

де $z=2...3$.

На рис.4 приведено розрахований графік залежності напруженості електричного поля $E_{\max} = f(U)$. Видно, що для вказаних діодів при середньому значенні пробійної наруги $U=20\text{В}$ $E_{\max} = 1,4 \cdot 10^5 \text{ В/см}$.

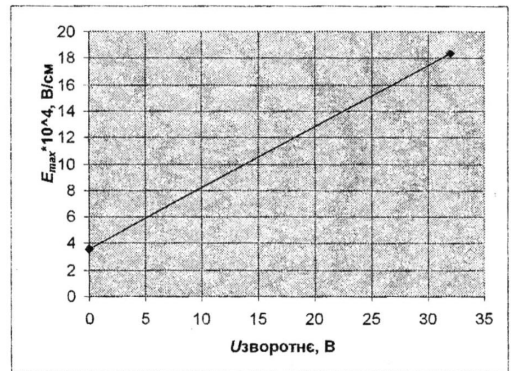


Рис. 4 Залежність максимальної величини напруженості електричного поля E_{\max} від зворотної наруги U_{zp}

З іншого боку величина напруженості поля, необхідного для розвитку лавини у плавному переході, визначається таким співвідношенням [8]:

$$E_{\max} = \frac{3}{4} (q/2\varepsilon_a)^{1/2} (a)^{1/2}, \quad (5)$$

де α – градієнт концентрації домішок.

При $\alpha = 8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-4}$ отримуємо, що $E_{\max} = 2,6 \cdot 10^5 \text{ В/см}$.

Величина напруженості поля, E_T , при якому відбувається тунельний пробій, може бути оцінена на основі величини пробійного струму, який визначають так:

$$I_T = \frac{(\sqrt{2m^*} q^2 E_T U)}{4\pi^2 \hbar^2 E_g^{1/2}} \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m^*} E_g^{3/2}}{3qE_T \hbar}\right), \quad (6)$$

де m^* – ефективна маса носія струму, E_g – ширина забороненої зони.

В результаті отримуємо, що $E_T = 1,23 \cdot 10^5 \text{ В/см}$.

Отже, при нарузі $U_{np} = 20\text{В}$ у переході формується електричне поле, цілком достатнє для протікання як лавинного, так і тунельного пробією. Який саме із них превалюватиме, можна визначити скориставшись температурною залежністю

напруги пробою. Відомо, що для тунельного механізму температурний коефіцієнт напруги пробою від'ємний, для лавинного – додатний. Тобто напруга тунельного пробою зменшується з підвищенням температури, напруга лавинного – зростає.

Для визначення внеску кожного механізму у пробій різних світлодіодів нами досліджувалось 20 структур: по 10 зелених і червоних.

Результати для вихідних та опромінених реакторними нейтронами структур показано у табл.1.

Таблиця 1 – Результати дослідження світло діодів різних структур

До опромінення			
Зелені (10)		Червоні (10)	
Тунельний механізм пробою, шт. (%)	Лавинний механізм пробою, шт. (%)	Тунельний механізм пробою, шт. (%)	Лавинний механізм пробою, шт. (%)
5 (50 %)	5 (50 %)	3 (30 %)	7 (70 %)
Після нейтронного опромінення			
6 (60%)	4 (40%)	2 (20 %)	8 (80 %)

З табл.1 видно, що до опромінення у зелених і червоних діодах може формуватися як тунельний, так і лавинний механізм пробою. В результаті нейтронного опромінення у зелених діодах ймовірність виникнення тунельного пробою зростає, у червоних – зменшується (для лавинного механізму навпаки).

Таким чином, як видно з результатів ємнісних вимірювань, так і вимірювання ВАХ, зелені діоди порівняно із червоними є досконалішими з точки зору рівномірності розподілу домішок у області просторового заряду та наявності скупчень дефектів структури.

Створені нейтронами порушення структури – області розупорядкування – можуть слугувати проміжною ланкою при зона-зонному тунелюванні у зелених діодах, а також сприяти виникненню так званих тунельних „проколів” у місцевих звуженнях забороненої зони. Про можливість такого ефекту повідомлялося у роботі [10]. Якраз виникнення таких локальних „проколів” може зумовлювати збільшення тунельної складової зворотного струму у досконалих зелених діодах. У випадку зменшення ймовірності тунелювання при нейтронному опроміненні спостерігалось в окремих діодах, ефект очевидно слід віднести за рахунок різкого зростання числа лавинних пробойів у діодах з підвищеною концентрацією власних порушень структури. Така можливість зумовлена зростанням рівня компенсації матеріалу при опроміненні та відповідним збільшенням амплітуди флуктуацій ширини забороненої зони напівпровідника, що є основною

причиною виникнення локальних внутрішніх електричних полів.

Таким чином вказані вище дослідження електричних параметрів зелених та червоних світлодіодів показали, що червоні світлодіоди характеризуються різким розподілом домішок в околі *p-n* переходу, зелені – лінійним розподілом, причому порівняно з червоними зелені діоди є досконалішими.

На пробійній частині ВАХ обох типів діодів реалізуються два механізми пробою: лавинний і тунельний. Причому у червоних діодів лавинний пробій виникає з більшою ймовірністю (у 70 % приладів) порівняно з тунельним механізмом. Опромінення діодів швидкими нейтронами реактора веде до зростання ймовірності тунельного пробою у зелених діодах; у червоних діодах – зростає ймовірність лавинного пробою. Вплив опромінення на зелені діоди можна пояснити формуванням додаткових локальних центрів тунелювання. У червоних світлодіодах відбувається збільшення амплітуди внутрішніх електричних полів внаслідок компенсації електропровідності радіаційними дефектами.

1. Алферов Ж.И. Двойные гетероструктуры: концепция и применение. – УФН, т. 172, № 9, 2002. – С. 1068-1086.
2. Koichi Okamoto, Shiego Fugita, Yoichi Kawakami et al. Sub-microscopic transient lens spectroscopy of InGaN/GaN quantum wells// Phys. Stat. Sol. (b), V. 240, No.2, 2003. – P. 368-371.
3. H.-J. Kang, R. G. Choi and Y. B. Hahn. Effect of dopant concentration on the break-down voltage in InGaN/GaN multiple-quantum-well light emitting diodes// Jour. of Korean Physical Society, V. 45, No. 4, 2004. – P. 1056-1059.
4. K. Zdansky, J. Zavadil and D. Nohavica. Degradation of commercial high-brightness GaP:N green light emitting diodes// Journ. Appl. Phys., V.83, No 12, 1998. – P. 7678-7684.
5. Булярский С. В., Сержкин Ю. Н., Ионычев В. К. Статистическая задержка пробоя микроплазмы в фосфидгаллиевых *p-n* переходах// ФТП, Т.33, вып. 11, 1999. – С. 1345-1349.
6. Берман Л. С. Емкостные методы исследования полупроводников. Л.: Наука, 1972. – 104с.
7. Берман Л. С. Определение электрического поля *p-n* перехода из емкостных измерений//ФТП, вып. 3, 1970. – С. 609-611.
8. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Ч. 1. – М.: Мир, 1984. – 453с.
9. Litovchenko P., Bisello D., Opilat V. et al/ Some features of current-voltage characteristics of irradiated GaP light diodes// Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Research, A.552, 2005. – P. 93-97.
10. Гусятников В.Н., Раеда М. Э. Влияние флуктуаций концентрации на высоту и туннельную прозрачность барьера //ФТП, Т. 18, вып. 6, 1984. – С. 1077-1084.