

МІКРОЕЛЕКТРОННА ТА НАНОЕЛЕКТРОННА ТЕХНІКА

УДК621.3.049.771

ПАРАМЕТРИ ОПТИЧНО АКТИВНОЇ ОБЛАСТІ СВІТЛОДІОДУ ПІД ВПЛИВОМ РАДІАЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Руденко Н.М., Стужук І.І.

Світлодіоди та пристрої на основі бінарних сполучень твердих розчинів все ширше використовуються в системах різного призначення [1]. При цьому, одним з важливих факторів успішного використання світлодіодів є наявність інформації щодо змінення їх характеристик під впливом зовнішніх факторів [2] і, зокрема, під впливом радіаційного опромінювання, що обумовлює актуальність і необхідність проведення відповідних досліджень.

Випромінювання в світлодіодах з фосфіду галлія має місце в результаті рекомбінації вільних та зв'язаних екситонів вільних носіїв зі зв'язаними на донорах, акцепторах і на донорно-акцепторних парах [3]. Відомо, що електричні і електролюмінісцентні властивості світлодіодів змінюються під впливом радіаційного випромінювання внаслідок зміни співвідношення між часом життя носіїв заряду в матеріалі до і під час опромінювання, що відповідатиме змінам відповідних компонент електричного струму. Під час радіаційного опромінювання в кристалах світлодіодів відбуваються визначені процеси, а саме: при взаємодії елементарної частинки з ядрами і електронами фосфіду галію атомам надається велика кінетична енергія і вони вибиваються з вузлів кристалічних ґрат; внаслідок високої кінетичної енергії дислокованих атомів, розвивається каскад послідовних співударень, що також призводить до вибивання атомів з вузлів кристалічних ґрат. Обидва ці явища призводять до утворення дефектів кристалічних ґрат.

Кількість атомів N галію і фосфору в одиниці об'єму дорівнює

$$N = n(E_0) \cdot v(E) \cdot \Phi, \quad (1)$$

де $n(E_0)$ — кількість первинних зміщень атомів, $v(E)$ — кількість вторинних зміщень, що обумовленні одним з атомів, що зазнали первинного зміщення (первинно-зміщеного атома), Φ — інтегральний потік опромінювання (флюенс, доза).

Кількість дефектів кристалічних ґрат залежить від властивостей речовини, виду та енергії частинок, що ці дефекти спричиняють. Радіаційна стійкість речовини визначається пороговою енергією зміщення (E_d) і залежить від енергії ($E_{ат}$) утримання атому матеріалу в стабільному стані — так званої, енергії "атомізації" матеріалу, яка складається з енергії, що необ-

хідна для розривання всіх валентних зв'язків і переходу атома від зв'язаного стану з гібридизованими sp^3 – орбіталями у вузлах ґрат до вільного стану (s^2p^2), та енергії атома у міжвузлі (E_m):

$$E_d = E_{ат} + E_m, \quad (2)$$

Порогова енергія тим більша, чим міцніший зв'язок атомів в кристалічних ґратах (табл. 1). Для забезпечення можливості порівняння енергії "атомізації" різних напівпровідників, в табл. 1 наведені дані, що відповідають двом грамам атомів, а для бінарних сполучень — двом грам-молекулам.

Таблиця 1

Речовина	Енергія атомізації		Ширина забороненої зони E_g , еВ
	Ω , кДж/моль	Ω , еВ/ат	
Алмаз	1434	7,4	5,3
Карбід кремнію	1250	6,5	2,4
Кремній	938	4,8	1,12
Фосфід галію	694	3,6	2,3
Арсенід галію	607	3,1	1,4
Антимонід галію	686	3,6	0,18

Енергія E_d пов'язана з величиною постійної ґрат (a_0) та для ковалентних напівпровідників і напівпровідників з домішками іонного зв'язку може бути розрахована за емпіричною формулою [2]

$$E_d = A \cdot (1/a_0)^m, \quad (3)$$

де $A = 3,9$, $m = 4,36$.

Для сполучень A^3B^5 — $A = 0,895$; $m = 4,36$.

З метою визначення порогової енергії E_d для різних напівпровідникових структур були проведені відповідні експериментальні дослідження. Порівняння отриманих експериментальних результатів зі значеннями E_d , що розраховані за формулами (2), (3), наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Матеріал	a_0 , мкм	E_d , еВ	E_d , еВ	E_d , еВ
		формула (2)	формула (3)	дані експерименту
<i>Si</i>	0,53	15,7	16,2	13 — 20
<i>GaAs</i>	0,565	20,7	12,1	9 — 25
<i>SiC</i> (3C)	0,436	30,0	30,8	54

З наведених даних видно, що порогові енергії зміщення для кремнію і арсеніду галію приблизно однакові (і близькі до пороговою енергією зміщення для фосфіду галію). В той же час для карбіду кремнію порогова енергія зміщення вища в 2...4 рази.

Зважаючи на те, що порогова енергія визначає концентрацію як пер-

винних, так і вторинних радіаційних дефектів, залежність радіаційної стійкості напівпровідника від порогової енергії матиме суттєво нелінійний характер. Оцінювання показують, що щільність вторинних радіаційних дефектів в арсеніді і фосфіді галію не суттєво відрізняються від їх концентрації у кремнії, тоді як в карбіді кремнію кількість дефектів при фіксованій дозі опромінювання (фіксованому флюенсі) приблизно на два порядки нижча. Саме це і визначає підвищену радіаційну стійкість карбиду кремнію і, відповідно, світлодіодів (як і інших виробів) на його основі у порівнянні з бінарними сполученнями і твердими розчинами A^3B^5 .

Первинні та вторинні радіаційні дефекти, як правило, утворюють пари Френеля, тобто вакансії і дислоковані атоми фосфору і галію мають підвищену енергію і більшу рухливість. Внаслідок цього вони нестійкі і під час опромінювання вже при кімнатній температурі утворюють стійкі комплексні сполучення: дівакансії, асоціації вакансій з донорами (телуrom і сіркою), акцепторами, ізоелектронними пастками (азотом), киснем, а також утворюють антиструктурні дефекти атомів галію у вузлах ґрат фосфору та атомів фосфору у вузлах ґрат галію. Вони можуть виконувати роль центрів рекомбінації, захвату електронів і дірок. Такі, центри рекомбінації носіїв називають випромінюваними центрами рекомбінації, а процес рекомбінації носіїв на цих центрах — випромінюваною рекомбінацією. Під впливом високоенергетичних нейтронів і протонів поруч з точковими дефектами утворюються мікрodefекти, як правило, кластери або асоціації кластерів, що містять руйновані або невпорядковані центральні області, а також дислокації і мікротріщини, які слугують ефективними центрами захвату. В результаті кластери набувають заряду, що за знаком відповідає заряду основних носіїв, а питомий опір матеріалу в околі кластеру підвищується.

Таким чином, опромінювання матеріалу призводить до зміни процесів рекомбінації носіїв, тобто до зміни часу життя цих носіїв. При цьому розділяють рекомбінацію носіїв, яка відбувається в матеріалі при наявності і відсутності радіаційного опромінювання. Тобто виділяють випромінювану і невипромінювану рекомбінації. Відповідно виділяють випромінюваний і невипромінюваний час життя носіїв, розуміючи їх рекомбінацію на центрах відповідного походження. Саме співвідношення значень випромінюваного і невипромінюваного часу життя носіїв заряду у матеріалах та сполученнях використовують для характеристики їх стійкості до радіаційного випромінювання.

Для аналізу вплив радіаційного випромінювання на випромінюваний і невипромінюваний час життя носіїв скористаємось співвідношеннями [3]

$$\tau_{0R}^{-1} = \sigma_R \cdot v_T \cdot N_R; \quad \tau_{0N}^{-1} = \sigma_N \cdot v_T \cdot N_N,$$

де τ_{0R} , τ_{0N} — випромінюваний і невипромінюваний час життя відповідно;

σ_R, σ_N — переріз захвату носія заряду центрами випромінюваної і невивпромінюваної рекомбінації відповідно; v_T — теплова швидкість носіїв.

Рекомбінація носіїв відбувається різними каналами. При цьому швидкість загальної, повної рекомбінації носіїв можна визначити як додатак швидкостей рекомбінації носіїв за різними каналами, що призводить до інтегрального часу життя носіїв $\tau_0^{-1} = \tau_{0R}^{-1} + \tau_{0N}^{-1}$.

Вважатимемо, що під час опромінювання змінюється лише невивпромінюваний час життя, тобто вважатимемо, що опромінюванням лише вводяться додаткові центри невивпромінюваної рекомбінації. Інакше кажучи, вважатимемо, що опромінювання матеріалу не призводить до появи центрів рекомбінації нової фізичної природи, а лише збільшує кількість вже наявних центрів рекомбінації. Тоді час життя змінюватиметься як

$$\tau_N = \sigma_N \cdot v_T \cdot N_N + \sigma_{NI} \cdot v_T \cdot N_{NI} = \tau_{0N}^{-1} + \sigma_{NI} \cdot v_T \cdot C_I \cdot \Phi,$$

де N_{NI} — концентрація центрів введених опромінюванням, причому $N_{NI} = C_I \cdot \Phi$; Φ — флюенс опромінювання; C_I — константа, що характеризує кількість центрів, які індукуються опромінюванням.

Зважаючи на те, що швидкості рекомбінації носіїв через центри рекомбінації, які початково присутні в матеріалі і індукуються опромінюванням, додаються, загальний випромінюваний час можна подати як

$$\tau_N^{-1} = \tau_{0N}^{-1} + \tau_{NI}^{-1} = \tau_{0N}^{-1} + \sigma_{NI} \cdot v_T \cdot C_I \cdot \Phi = \tau_{0N}^{-1} + K_\tau \cdot \Phi, \quad (4)$$

де $K_\tau = \sigma_{NI} \cdot v_T \cdot C_I$ — константа, що характеризує "чутливість" часу життя носіїв до радіаційного випромінювання; цю константу за звичай називають константою "пошкодження" (деградації, зміни) часу життя носіїв.

Множення лівої та правої частини (4) на τ_{0N} призводить до співвідношення, яке характеризує зміну часу життя носіїв заряду, що спричиняється дією радіаційного випромінювання, а саме

$$\frac{\tau_{0N}}{\tau_N} = 1 + \tau_{0N} \cdot K_\tau \cdot \Phi \quad (5)$$

Зважаючи на прийняті припущення щодо природи утворення нових центрів рекомбінації носіїв, співвідношення (5) можна трактувати, як зміну інтегрального часу життя носіїв до (τ) і після (τ_0) радіаційного опромінювання:

$$\frac{\tau_0}{\tau} = 1 + \tau_0 \cdot K_\tau \cdot \Phi$$

Отримані співвідношення дозволяють аналізувати зміни часу життя носіїв заряду в напівпровідникових матеріалах, а отже придатні для аналізу деградації останніх під впливом радіаційного опромінювання.

В подальшому передбачається використати отримані результати під час проведення експериментальних досліджень з впливу радіаційного випромінювання на характеристики світлодіодів.

Автор висловлює подяку адміністрації та співробітникам лабораторії фізики напівпровідників Московської державної академії приладобудування й інформатики та особисто д.т.н., проф. Рижікову І.В. за надання можливості проведення експериментальних досліджень та обговорення отриманих результатів.

Література

1. Коган Л.М. Современное состояние полупроводниковых излучающих диодов // Электронные компоненты. — 2000. — №2. — С. 22 - 27.
2. Никифоров С.Г. Почему светодиоды не всегда работают так, как хотят их производители? // Компоненты и технологии. — 2005. — № 7 — С. 16 – 24.
3. Bergh A. Dean P. Light-emitting diodes // Clarendon Press. Oxford. — 1976. — 686 p.

Руденко Н.М., Стужук І.І. Параметри оптично активної області світлодіоду під впливом радіаційного випромінювання. Надані розрахункові співвідношення, що визначають зміни часу життя носіїв в напівпровідникових матеріалах під впливом радіаційного опромінення.

Ключові слова: світлодіоди, радіоактивна стійкість світлодіодів

Руденко Н.Н., Стужук И.И. Параметры оптически активной области светодиода под воздействием радиационного излучения. Получены расчетные соотношения, определяющие изменение времени жизни носителей в полупроводниковых материалах под воздействием радиации.

Ключевые слова: светодиоды, радиоактивная стойкость светодиодов

Rudenko N.N., Stuguk I.I. Optical active area light-diodes parameters under influence of radiating radiation. The ratio determining change of the carrier life time in semi-conductor materials under influence of radiation are received

Key words: light-emitting diodes, radioactivity stability semiconductor