РАДІАЦІЙНА ФІЗИКА
RADIATION PHYSICS

УДК 621.315.592 https://doi.org/10.15407/jnpae2021.02.143

Р. М. Вернидуб[1], О. І. Кириленко[1], О. В. Конорева[2,*], Д. П. Стратілат[2], В. П. Тартачник[2], М. М. Філоненко[1], В. В. Шлапацька[3]

[1] Національний педагогічний університет імені М. П. Драгоманова, Київ, Україна
[2] Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна
[3] Інститут фізичної хімії імені Л. В. Писаржевського НАН України, Київ

*Відповідальний автор: okskon@meta.ua

СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХІДНИХ ТА ОПРОМІНЕНИХ СВІТЛОДІОДІВ GaAsP

Досліджувались оптичні характеристики вихідних світлодіодів $GaAs_{1-x}P_x$ та опромінених електронами з $E = 2$ МеВ, $\Phi = 10^{15} \div 10^{16}$ см$^{-2}$. Проведено оцінку ширини забороненої зони твердого розчину $GaAs_{1-x}P_x$ для $x = 0{,}45$. Її зростання спричинене розігріванням носіїв полем p-n-переходу. Розраховано коефіцієнти пошкодження часу життя неосновних носіїв заряду для опромінених світлодіодів GaAsP та проаналізовано наслідки впливу радіації на експлуатаційний параметр T_1, який визначає термостійкість роботи діодів.

Ключові слова: GaAsP, світлодіод, від'ємний диференційний опір, вольт-амперні характеристики.

1. Вступ

Непряма структура зон кристала фосфіду галію, де абсолютний мінімум C_X-зони зміщений відносно максимуму V_Γ майже на край зони Бріллюена, зумовлює існування значної різниці імпульсів електрона і дірки, що не сприяє активному рекомбінаційному процесу. Використання ж твердого розчину $GaAs_{1-x}P_x$, як базового матеріалу для виготовлення якісних світлодіодів [1 - 3], дозволяє усунути цю перешкоду – при $x \approx 0{,}45$ напівпровідник стає прямозонним. Створюючи додатково центри формування зв'язаних екситонів шляхом ізоелектронного заміщення атомів P атомами N, можна досягти значного підвищення зовнішнього квантового виходу випромінювачів при температурі 300 К, оскільки глибина залягання рівня зв'язаного на атомі N екситона становить $E_N = 50 \div 150$ меВ відносно E_x [2]. Відтак саме завдяки зв'язаним екситонам можлива робота світлодіодів при кімнатних температурах.

Легування азотом лише активної області діода зводить до мінімуму вплив ефекту самопоглинання випромінювання, вирощування буферних шарів між підкладинкою та активним об'ємом зразка дозволяє уникнути шкідливого впливу дислокацій невідповідності на світловіддачу.

Широта діапазону використання світлодіодів різних видів разом із діодами GaAsP – від космічних апаратів до медицини та побутової техніки – зумовлена насамперед їхніми перевагами над іншими джерелами випромінювання. Серед них – мініатюрність, сумісність із напівпровідниковими інтегральними схемами, можливість безконтактного керування електронними об'єктами, мала ширина спектральної смуги випромінювання, тривалий строк роботи, низька собівартість та ін. Швидкодія інтегрально-оптичних перемикачів порівняно зі звичайними напівпровідниковими – незрівнянно вища ($\tau < 100$ пс). Керування інформаційними масивами за допомогою фотонів, які не взаємодіють із електромагнітними полями, забезпечує оптимальний рівень розв'язування входу з виходом і позбавляє необхідності екранування від зовнішніх перешкод [4 - 10].

Приймаючи до уваги вищенаведене, автори даної роботи основну увагу зосередили на розгляді деструктивного впливу проникної радіації на випромінювальну здатність цих джерел. Тут доречно зауважити, що результати аналізу деградаційно-відновних явищ, які стосуються електрофізичних характеристик світлодіодів GaAsP, наведено у виконаній нами роботі дещо раніше [11]; у роботі [9] виявлено зростання щільності дислокаційних сіток унаслідок уведення у зразок радіаційних дефектів, що призводить до виникнення довготривалих релаксаційних процесів.

Наведені нижче результати є продовженням запланованого циклу досліджень, присвячених вивченню радіаційної стійкості високоефективних джерел свічення. Виконана робота є доповненням робіт [9, 11] і містить додаткову інформацію, необхідну для узагальнення наслідків взаємодії швидких часток із випромінювачами, вирощеними на базі GaAsP, а також для виявлення загальної тенденції деградації їхніх як електричних, так і оптичних характеристик.

© Р. М. Вернидуб, О. І. Кириленко, О. В. Конорева, Д. П. Стратілат, В. П. Тартачник, М. М. Філоненко, В. В. Шлапацька, 2021

Стаття містить нові дані стосовно впливу радіаційних дефектів на ширину спектральних ліній випромінювання діодів GaAsP; на основі статистики Шоклі - Ріда - Холла [12 - 14] уточнено величини коефіцієнтів пошкодження часу життя для двох груп діодів: помаранчевих і жовтих. З'ясовано також, як впливає опромінення на поведінку величини T_1 – важливого для практики параметра світлодіода, який визначає термостійкість його роботи.

Одержання перелічених результатів разом із визначенням температурної залежності ширини забороненої зони E_g розчину $GaAs_{1-x}P_x$ (x = 0,45) і стало головною метою виконаної роботи.

2. Експериментальні вимірювання

Досліджувались світлодіоди, одержані на основі твердого розчину $GaAs_{1-x}P_x$, із вмістом фосфору $x = 0{,}45$ (помаранчеві) та $x = 0{,}85$ (жовті); вирощування відбувалось у заводських умовах методом епітаксії з парової фази. Як і в роботі [11], використовувались корпусовані зразки зі скляними (плоскими) вихідними вікнами та епоксидними (напівсферичними) лінзами.

До початку вимірювань скло видалялось, епоксидна смола зшліфовувалась до мінімально можливої товщини.

Опромінення електронами з $E = 2$ МеВ проводилось в імпульсному режимі на прискорювачі ИЛУ-6 зі струмом пучка електронів $I = 4$ мА за кімнатної температури. Густина потоків становила $\Phi = 10^{15} \div 10^{16}$ см$^{-2}$. Стабілізація температурного режиму здійснювалась повітряним охолодженням.

Вимірювання спектрів електролюмінесценції відбувались за допомогою автоматизованого комплексу, сконструйованого на базі монохроматора МДР-23, який дозволяв проводити вимірювання в інтервалі температур 77÷300 К та за різних рівнів інжекційного збудження. Вимірювання інтенсивності люмінесценції проводилось через 10 хв після вимкнення електронного пучка з метою уникнення впливу можливих релаксаційних ефектів.

3. Результати та обговорення

З метою надати повнішу інформацію про оптичні властивості досліджуваних об'єктів на рис. 1 ми наводимо спектри помаранчевого діода GaAsP, подібні до одержаних нами раніше в роботі [9]. Видно, що залежність інтенсивності випромінювання L від довжини хвилі λ має вигляд слабоасиметричної кривої гауссового профілю.

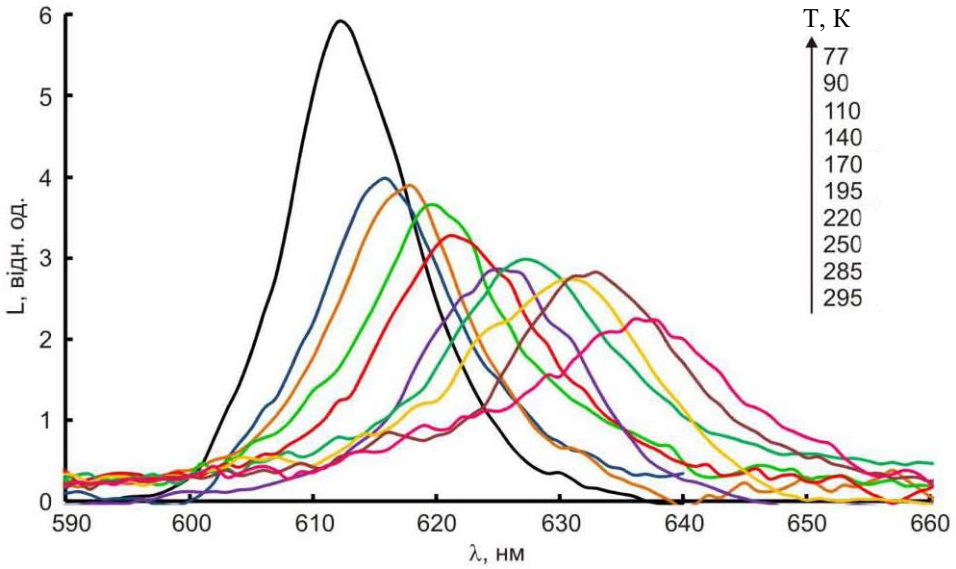

Рис. 1. Спектри випромінювання помаранчевого $GaAs_{0,55}P_{0,45}$ світлодіода, виміряні за різних температур, сила струму $I = 40$ мА. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Підвищення температури призводить до падіння інтенсивності свічення та зсуву максимуму в бік довгих хвиль.

Як згадувалось вище, рекомбінаційний процес у таких діодах забезпечується легуванням розчину GaAsP ізоелектронною домішкою азоту. Атом N, маючи менший порівняно з фосфором розмір і відповідно більшу електронегативність (3 порівняно з 1,64), є електронною пасткою, на основі якої формується зв'язаний екситон. Глибина залягання його основного рівня ($n = 1$) близька до $E_{ex} \sim 150$ меВ.

Зміна положення максимуму випромінювання з температурою – результат зміни ширини забороненої зони E_g. Оскільки для твердого розчину GaAsP $E_g(T)$ невідоме, оцінки можна провести,

виходячи зі співвідношення Варшні [2]

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T+\beta}, \qquad (1)$$

де $E_g(0)$ – ширина забороненої зони за нульової температури, α та β – параметри Варшні.

Враховуючи, що у використаних зразках $GaAs_{0,55}P_{0,45}$ вміст фосфіду галію та арсеніду галію майже однаковий, для визначення $E_g(T)_{GaAsP}$ можна скористатись середніми величинами коефіцієнтів α і β (таблиця). Тоді $\alpha_{GaAsP} = 5{,}81\cdot10^{-4}$ еВ/К, $\beta_{GaAsP} = 332$ К. Величину параметра β_{GaAsP} можна оцінити також за значеннями температури Дебая для обох матеріалів, для яких $\Theta_D^{GaAs} = 343$ К, $\Theta_D^{GaP} = 440{,}6$ К [15]; відтак $\Theta_D^{GaAsP} = 391$ К. Розбіжність оцінок, виконаних двома способами, становить менше 1 %, що підтверджує коректність використання середніх значень коефіцієнтів β^{GaP} та β^{GaAs} для твердого розчину GaAsP.

Параметри Варшні для напівпровідників GaP, GaAs [2]

Напівровідник	α (10^{-4} еВ/К)	β (К)
GaP	6,20	460
GaAs	5,41	204

Якщо величину параметра $E_g(0)$ вибрати рівною $E_g = 2{,}03$ еВ, то оскільки результати розрахунку, проведеного за формулою Варшні, добре узгоджуються з кривою температурного зсуву максимуму білякрайового екситонного випромінювання діода, залежність $h\nu_{max}(T)$ дає можливість оцінити значення E_g твердого розчину GaAsP за будь-якої температури в межах від 0 до 300 К (рис. 2).

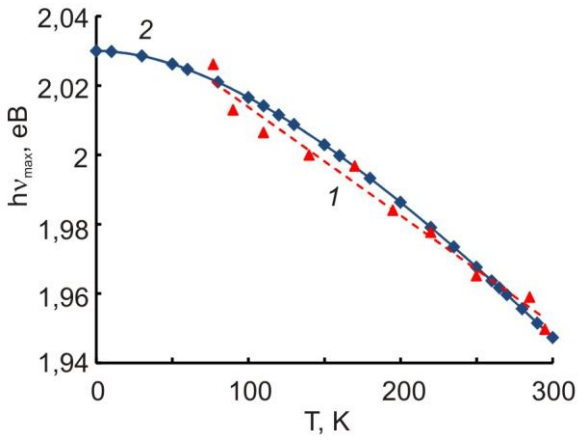

Рис. 2. Температурна залежність положення максимуму $h\nu_{max}(T)$ випромінювання помаранчевого світлодіода GaAsP у межах 77 – 300 К (*1*) та залежність $E_g(T)$ (*2*), розрахована за формулою (1). (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Відомо [16], що природна ширина спектральних ліній зумовлюється згасаючим характером коливань кожного окремого атома. Ця «радіаційна ширина» $\Delta\lambda = \frac{e^2}{3\varepsilon_0 c^2 m} = 1{,}2\cdot10^{-14}$ м є універсальною константою. Її форма описується функцією Лоренца (форм-фактор).

У кристалі на величину Δλ накладається додаткове значне розширення за рахунок впливу оточення: взаємодія з коливаннями кристалічної ґратки та дефектами (зокрема, радіаційними).

На рис. 3 показана залежність величини напівширини лінії випромінювання $\Delta\Gamma$ вихідного та опроміненого діодів GaAsP від температури вимірювання. У вихідному зразку відчутне зростання $\Delta\Gamma$ виникає лише після $T = 200$ К; в опроміненому – значно раніше, починаючи з $T = 100$ К.

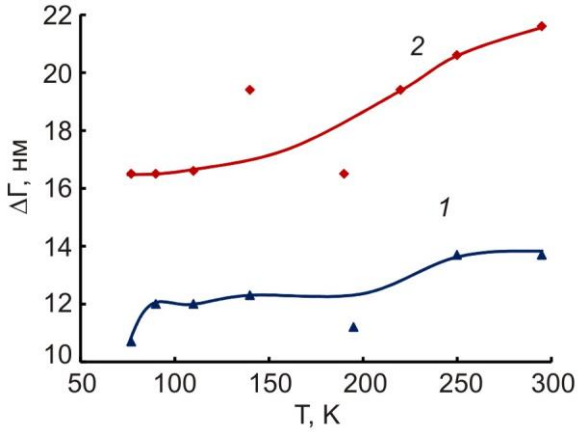

Рис. 3. Залежність ширини спектральної лінії випромінювання зразка GaAsP від температури: *1* – вихідний зразок; *2* – опромінений електронами з $E = 2$ МеВ, $\Phi = 1{,}23\cdot10^{15}$ см$^{-2}$. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

У першому випадку зростання $\Delta\Gamma$ очевидно пов'язане зі зростанням інтенсивності теплових коливань атомів ґратки; в опроміненому зразку ефект посилюється за рахунок впливу полів радіаційних дефектів.

З погляду використання світлодіодів в умовах дії проникної радіації головним критерієм їхньої придатності є радіаційна стійкість. Експерименти свідчать [17], що найчутливішим параметром до впливу опромінення є час життя τ неосновних носіїв заряду (ННЗ). Обернена величина 1/τ згідно зі статистикою Шоклі - Ріда - Холла [12 - 14] в опроміненому зразку визначається як

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_\varphi} = \frac{1}{\tau_0} + \sum_{i=1}^{m} N_{ti} F_i, \qquad (2)$$

де τ_0 – час життя ННЗ у вихідному зразку; τ_ϕ – час життя ННЗ в опроміненому зразку; N_{ti} – концентрація пасток одного виду; F_i – функція пере-

різу захвачування носіїв $\sigma_{n,p}$, температури T, надлишкової концентрації носіїв, положення рівня Фермі E_F та глибини залягання пастки E_{ti}.

У разі, коли концентрація введених дефектів пропорційна флюенсу Φ ($N_{ti} = \lambda_i \Phi$), матимемо [13]

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + \Phi \sum_{i=1}^{m} \lambda_i F_i = \frac{1}{\tau_0} + K_\tau \Phi, \qquad (3)$$

де K_τ – коефіцієнт радіаційного пошкодження часу життя неосновних носіїв заряду.

Поведінка коефіцієнта радіаційного пошкодження K_τ загалом відображає вплив опромінення на основні параметри матеріалу, перераховані вище, про що йшлося також у роботі [17].

Оскільки $\frac{\tau_0}{\tau} = \frac{L_0}{L}$ [14], то рівняння (3) подамо у вигляді $\left(\frac{L_0}{L}\right)^n - 1 = \tau_0 K_\tau \Phi$. При відомому значені τ_0 K_τ можна визначити за нахилом дозової залежності функції $\left(\frac{L_0}{L}\right)^n - 1$. Її вигляд залежить як від режиму роботи діода, так і від механізму, яким контролюється випромінювання – дифузією неосновних носіїв заряду, чи рекомбінацією в області просторового заряду [14]. Для різних випадків показник степеня дробу $\left(\frac{L_0}{L}\right)^n$ може змінюватися від 1 до 2/3. Оцінки показали, що для наших зразків значення K_τ для обох величин n відрізняються приблизно вдвічі, що становить малу величину порівняно з точністю вимірювання часу життя ННЗ τ. Тому в подальших оцінках прийнято $n = 1$.

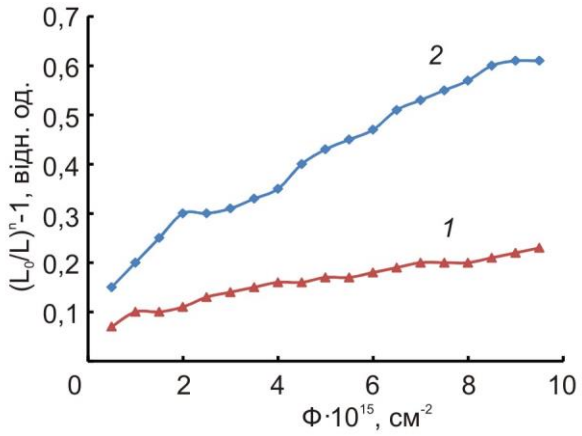

Рис. 4. Залежність функції $\left(\frac{L_0}{L}\right)^n - 1$ від дози опромінення діодів GaAsP, які випромінюють у помаранчевій (*1*) та жовтій (*2*) областях видимого спектра. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Як видно з рис. 4, величина K_τ для помаранчевого діода GaAsP є майже незмінною в межах $\Phi = 10^{15} \div 10^{16}$ см$^{-2}$. Коефіцієнти пошкодження часу життя ННЗ для обох типів діодів, одержані на основі даних рисунка, становлять $K_\tau = 1{,}6 \times \times 10^{-10}$ см^{2}с$^{-1}$ для помаранчевих та $K_\tau = 10^{-9}$ см^{2}с$^{-1}$ для жовтих діодів GaAsP при вихідному значенні часу життя ННЗ $\tau_0 = 6 \cdot 10^{-8}$ с.

Насамкінець слід розглянути вплив опромінення на ще один важливий експлуатаційний параметр, який визначає термостійкість роботи світлодіодів GaAsP – T_1.

Залежність інтенсивності випромінювання діодів від температури в області, близькій до 300 К, можна подати у вигляді [2]

$$L = L_0 \exp\left(-\frac{T - T_0}{T_1}\right), \qquad (4)$$

де зазвичай $T_0 = 300$ К – температура вимірювання; L_0 – інтенсивність свічення за $T = T_0$ (рис. 5). Тоді швидкість температурної деградації інтенсивності випромінювання

$$\frac{dL}{dT} = -\frac{L_0}{T_1} \exp\left(-\frac{T - T_0}{T_1}\right). \qquad (5)$$

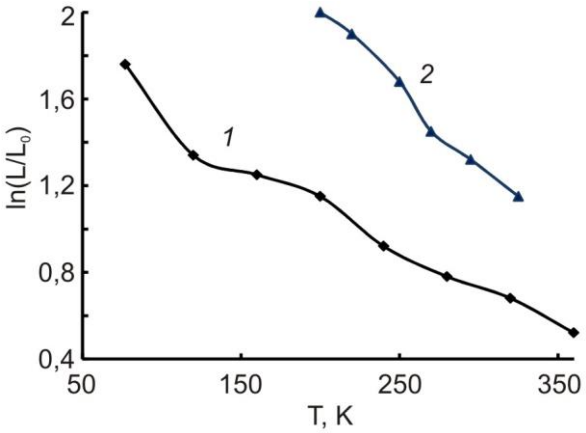

Рис. 5. Залежність нормованої інтенсивності свічення помаранчевого діода GaAsP від температури: *1* – вихідний зразок; *2* – опромінений електронами з $E = 2$ МеВ, $\Phi = 1{,}23 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Як видно, вона визначається насамперед експоненційним множником, а саме коефіцієнтом $1/T_1$. За великих T_1 падіння сповільнюється. Розрахунок дає величину $T_1^{GaAsP} = 288$ К (див. рис. 5), яка менша для синіх (InGaN/GaN, $T_1 = 1600$ К) та зелених (InGaN/GaN, $T_1 = 295$ К) світлодіодів, вирощених на основі GaN, і більша, ніж для червоних діодів InAlGaP/GaAs ($T_1 = 148$ К) [2]. Виявлено, що опромінення світлодіодів GaAsP призводить до зменшення T_1 ($T_{1опр}^{GaAsP} = 143$ К, $\Phi = 10^{16}$ см$^{-2}$, $E_e = 2$ МеВ).

4. Висновки

На основі використання формули Варшні та експериментальних даних одержана залежність ширини забороненої зони $GaAs_{1-x}P_x$ (x = 0,45) від температури. Показано, що $E_g(T)$ для складу $GaAs_{1-x}P_x$ (x = 0,45) добре описується співвідношенням Варшні для сполук $A^{III}B^{V}$.

Уведення радіаційних дефектів супроводжується зростанням ширини спектральних ліній, яке може бути зумовлене впливом полів радіаційних дефектів.

На основі використання дозової залежності інтенсивності свічення діода розраховано співвідношення між часом життя ННЗ вихідного та опроміненого зразків, що дало змогу визначити коефіцієнт пошкодження часу життя K_τ діодів GaAsP. Виявилось, що світлодіоди на основі GaAsP мають значно вищу радіаційну стійкість порівняно з їхніми аналогами – діодами GaP.

Установлено величину важливого для практики експлуатаційного параметра T_1, яка для GaAsP займає проміжне значення між такими ж параметрами для діодів, вирощених на основі GaN та GaAs, і становить T_1^{GaAsP} = 288 К. Опромінення спричиняє його зменшення (T_{1onp}^{GaAsP} =143 К).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. А. Берг, П. Дин. *Светодиоды* (Москва: Мир, 1979) 668 с.
2. Ф. Шуберт. *Светодиоды*. Пер. А.Е. Юнович (Москва: Физматлит, 2008) 496 с.
3. Y. Ozen et al. Characterization of Double-Junction GaAsP Two-Color LED Structure. Journal of Electronic Materials 47 (2018) 7129.
4. Г.Г. Шишкин, А.Г. Шишкин. *Электроника* (Москва: Юрайт, 2019) 703 с.
5. С.С. Вильчинская, В.М. Лисицын. *Оптические материалы и технологии* (Томск: ТПУ, 2011) 107 с.
6. В.І. Осінський та ін. Аналіз та перспективи застосування лазерних та світлодіодних джерел світла на квантово-розмірних структурах для фотомедицини. Фотобіологія і фотомедицина 1 (2010) 104.
7. В.Ф. Агекян. *Основы фотоники полупроводниковых кристаллов и наноструктур* (Санкт-Петербург: КМЦ ФФ, 2007) 133 с.
8. А.И. Сидоров. *Основы фотоники: физические принципы и методы преобразования оптических сигналов в устройствах фотоники* (Санкт-Петербург: ФГБОУ ВПО «СПб НИУ ИТМО», 2014) 148 с.
9. O.V. Konoreva et al. The influence of acoustic-dislocation interaction on intensity of the bound exciton recombination in initial and irradiated GaAsP LEDs structures. Superlattices and Microstructures 102 (2017) 88.
10. A. Stromberg et al. Heteroepitaxy of GaAsP and GaP on GaAs and Si by low pressure hydride vapor phase epitaxy. Journal of Crystal Growth 540 (2020) 125623.
11. Р.М. Вернидуб та ін. Вплив опромінення на електрофізичні параметри світлодіодів GaAsP. Ядерна фізика та енергетика 22(1) (2021) 56.
12. В.А. Холоднов. К теории рекомбинации Холла - Шокли - Рида. Физика и техника полупроводников 30 (1996) 1011.
13. А.Н. Яшин. Применимость упрощенной модели Шокли - Рида - Холла для полупроводников с различными типами дефектов. Физика и техника полупроводников 39 (2005) 1331.
14. B.H. Rose, C.E. Barnes. Proton damage effects on light emitting diodes. Journal of Applied Physics 53 (1982) 1772.
15. R. Passler. Non-Debye heat capacity formula refined and applied to GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb. AIP Advances 3 (2013) 082108.
16. В.И. Светцов, И.В. Холодков. *Физическая электроника и электронные приборы* (Иваново: ИГХТУ, 2008) 494 с.
17. R.M. Vernydub et al. Electrophysical characteristics of GaAs1-xPx LEDs irradiated by 2 MeV electrons. Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics 23 (2020) 201.

R. M. Vernydub[1], O. I. Kyrylenko[1], O. V. Konoreva[2,*], D. P. Stratilat[2], V. P. Tartachnyk[2], M. M. Filonenko[1], V. V. Shlapatska[3]

[1] *National Pedagogical Dragomanov University, Kyiv, Ukraine*
[2] *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*
[3] *L.V. Pisarzhevski Physical Chemistry Institute, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

*Corresponding author: okskon@meta.ua

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF INITIAL AND IRRADIATED GaAsP LEDs

The optical characteristics of the $GaAs_{1-x}P_x$ output LEDs and LEDs irradiated with electrons with E = 2 MeV, $\Phi = 10^{15} \div 10^{16}$ cm^{-2} were studied. The width of the band gap of the $GaAs_{1-x}P_x$ (x = 0.45) solid solution was estimated. Its growth is caused by the heating of carriers by the field of the p-n junction. The damage coefficients of the lifetime of minority charge carriers for irradiated GaAsP LEDs have been calculated and the consequences of exposure to radiation on the operational parameter T_1, which determines the thermal stability of the diodes, have been analyzed.

Keywords: GaAsP, light emitting diode (LED), negative differential resistance, current-voltage characteristics.

REFERENCES

1. A. Bergh, P. Dean. *Light-Emitting Diodes* (Oxford: Clarendon Press, 1976) 591 p.
2. F. Schubert. LEDs. Translated by A.E. Yunovich (Moskva: Fizmatlit, 2008) 496 p. (Rus)
3. Y. Ozen et al. Characterization of Double-Junction GaAsP Two-Color LED Structure. Journal of Electronic Materials 47 (2018) 7129.
4. G.G. Shishkin, A.G. Shishkin. *Electronics* (Moskva: Yurayt, 2019) 703 p. (Rus)
5. S.S. Vilchinskaya, V.M. Lisitsyn. *Optical Materials and Technologies* (Tomsk: TPU, 2011) 107 p. (Rus)
6. V.I. Osinskiy et al. Analysis and prospects of application of laser and light diode sources of radiation on quantum-sizes structures for photomedicine. Photobiology and Photomedicine 1 (2010) 104. (Ukr)
7. V.F. Agekyan. *Fundamentals of Photonics of Semiconductor Crystals and Nanostructures* (St. Petersburg: KMTs FF, 2007) 133 p. (Rus)
8. A.I. Sidorov. *Fundamentals of Photonics: Physical Principles and Methods for Converting Optical Signals in Photonic Devices* (St. Petersburg: FGBOU VPO “SPb NRU ITMO”, 2014) 148 p. (Rus)
9. O.V. Konoreva et al. The influence of acoustic-dislocation interaction on intensity of the bound exciton recombination in initial and irradiated GaAsP LEDs structures. Superlattices and Microstructures 102 (2017) 88.
10. A. Stromberg et al. Heteroepitaxy of GaAsP and GaP on GaAs and Si by low pressure hydride vapor phase epitaxy. Journal of Crystal Growth 540 (2020) 125623.
11. R.M. Vernydub et al. Influence of radiation on the electrophysical parameters of GaAsP LEDs. Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy) 22(1) (2021) 56. (Ukr)
12. V.A. Kholodnov. To the theory of Hall-Shockley-Reed recombination. Physics and Technics of Semiconductors 30 (1996) 1011. (Rus)
13. A.N. Yashin. Applicability of a simplified Shockley–Read–Hall model for semiconductors with different defect types. Physics and Technics of Semiconductors 39 (2005) 1331. (Rus)
14. B.H. Rose, C.E. Barnes. Proton damage effects on light emitting diodes. Journal of Applied Physics 53 (1982) 1772.
15. R. Passler. Non-Debye heat capacity formula refined and applied to GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb. AIP Advances 3 (2013) 082108.
16. V.I. Svettsov, I.V. Kholodkov. *Physical Electronics and Electronic Devices* (Ivanovo: IGKhTU, 2008) 494 p. (Rus)
17. R.M. Vernydub et al. Electrophysical characteristics of GaAs1-xPx LEDs irradiated by 2 MeV electrons. Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics 23 (2020) 201.

Надійшла/Received 01.02.2021