DOI: https://doi.org/10.31392/NZ-npu-150.2021.04
УДК 378.147:621.327.2

Вернидуб Р. М., Кириленко О. І., Мирошніченко Ю. Б., Філоненко М. М., Тартачник В. П.

ВИВЧЕННЯ ЯВИЩА ЕЛЕКТРОЛЮМІНІСЦЕНЦІЇ

Відсутність у студентів початкового етапу навчання (1-2 курс) необхідних знань із фізики напівпровідників та основ зонної теорії твердого тіла створює методичні труднощі при поясненні ефектів, дотичних до явища електролюмінесценції.

У статті запропоновано спосіб пояснення ефекту електролюмінесценції студентам початкових курсів чи пізніших етапів навчання в університетах, де фізика – не профільна дисципліна. Розуміння студентами молодших курсів механізмів випромінювальної рекомбінації, що забезпечують ефективну електролюмінесценцію в складних напівпровідникових структурах, може бути сформоване на підставі пояснень, не обтяжених громіздкими математичними розрахунками. Механізм випромінювальної рекомбінації розглянуто на прикладі роботи світлодіода найпростішої будови – епітаксійної фосфідо–галієвої діодної структури. Використана наглядна модель екситонного збудження кристала дає змогу уникнути застосування складних розрахункових співвідношень при аналізі спектрів випромінювання діода. Обґрунтовано основну вимогу щодо вибору матеріалу робочого тіла напівпровідникового джерела когерентного свічення.

Розглянуто підходи до вибору та представлення навчального матеріалу, що забезпечують виконання стандарту вищої освіти щодо формування спеціальних компетентностей та відповідних результатів навчання, зокрема здатності використовувати базові знання для розуміння фізичних процесів, бути обізнаними з питаннями прикладної фізики, матеріалознавства, хімії та відповідними технологічними процесами.

Ключові слова: *електролюмінісценція, механізм випромінювальної рекомбінації, світлодіод, p-n-перехід, рівень Фермі, ширина забороненої зони, потенціальний бар'єр, екситон.*

Відсутність у студентів початкового етапу навчання (1-2 курс) необхідних знань із фізики напівпровідників та основ зонної теорії твердого тіла створює методичні труднощі при поясненні ефектів, дотичних до явища електролюмінесценції. Зазвичай доводиться обмежуватись посиланням на закони збереження, коли енергія носія струму трансформується в енергію світлового кванта за посередництвом "центрів люмінесценції" нез'ясованої природи. Концепція інжекції неосновних носіїв струму *з p-* n -переходом дозволяє частково спростити сприйняття механізмів, які спричиняють вивільнення світла, проте в такому разі виникає необхідність громіздкого розв'язування рівняння Пуассона для p-n-переходу. Не зовсім очевидною виявляється роль саме p-n-переходу у процесі перетворення енергії джерела струму у світлову, а також існування необхідних умов для його утворення.

Тому, з нашого погляду, переходячи до аналізу головної характеристики світлодіода – випромінювальної рекомбінації, доцільно на початку коротко зупинитись на фізичних основах формування p - n -переходу та його

властивостях. Предметом аналізу може служити p-n-структура, вирощена за найпростішою технологією на базі широкозонного напівпровідника; остання умова необхідна для забезпечення випромінювання у видимій області. Компонентами виробу повинні бути добре відомі слухачам матеріали; роботу такого діода просто пояснювати, демонструвати та використовувати, скажімо, при плануванні лабораторного практикуму.

Подібним вимогам задовольняє типовий світлодіод, одержаний на основі фосфіду галію GaP – сполуки типу $A^{III}B^{V}$ із шириною забороненої зони $E_{ж} = 2{,}24\ eB$ при $300\ °К$. Широкозонність GaP дозволяє одержувати на його основі джерела некогерентного випромінювання у видимій області; непрямозонність зонної структури дає можливість аналізувати механізми прямих і непрямих оптичних переходів.

Виникнення потенціального бар'єра для основних носіїв струму на межі розділу p- і n- областей можна розглядати, як результат взаємного зміщення рівнів Фермі в p- і n- областях при наявності електричного контакту та виникнення єдиного, спільного для обох областей рівня Фермі E_F, який можна ототожнити з рівнем електронної рідини у кристалі (аналогія із законом сполучених посудин).

Оскільки у невиродженому матеріалі n -типу рівень Фермі E_{F_n} розташований поблизу дна c-зони, у p-типі E_{F_p} – біля вершини V – зони, то електричний контакт між двома напівпровідниками різного типу провідності неминуче призводить до виникнення потенціального бар'єра між двома областями для основних носіїв заряду (рис. 1).

Формування однозначних уявлень про механізм випромінювальної рекомбінації, який переважає у вибраних діодах, може бути доповнене коротким вступним розглядом явища екситонного збудження кристала.

Оскільки екситони малого радіуса – екситони Френкеля у напівпровідниках – не існують, варто зосередитися на властивостях екситонів великого радіуса (екситони Ваньє-Мотта) та на зв'язаних.

Тут доречно наголосити, що енергія зв'язку екситона E_{ex} – енергія воднево-подібного зв'язку електрона з діркою – мала порівняно з $kT, \text{при } T = 300\ °К$, що зумовлено великим значенням діелектричної проникності $\varepsilon \approx 13$ напівпровідників ($E_K = \frac{q^2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}$) тому, вже при кімнатній температурі вільні екситони не спостерігаються. Якщо ж фосфід галію пролегувати азотом – домішкою, ізоелектронною стосовно фосфору, електропровідність зразка не зміниться; водночас деформація періодичного поля кристала вузлом заміщення, зумовлена різницею розмірів N та P , спричинить виникнення електронної пастки.

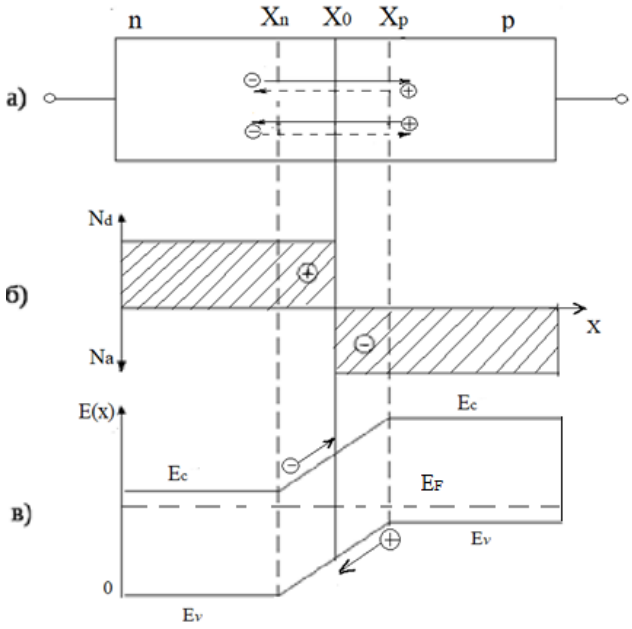

Рис. 1. Схема формування p – n переходу

а) контакт напівпровідників n – та p – типу провідності; x_n, x_p – межі збідненої області, x_0 – середина p - n – переходу (суцільними стрілками показано напрям руху основних носіїв, пунктиром - неосновних);
б) розподіл концентрацій йонізованих донорів N_d та акцепторів N_a;
в) виникнення p - n – переходу.

Заряджений негативно центр, притягуючи дірку, формує зв'язаний екситон, енергія іонізації якого значно більша від енергії вільного екситона E_{ex}. Оскільки $E_{зв.ex} > kT,$ то при $T = 300$ °К теплові коливання атомів гратки не здатні привести до іонізації, тоді екситон, рекомбінуючи, випромінює зелену лінію з $h\nu = 2{,}21$ eВ, яку видно при кімнатній температурі.

Отже, запропонований вище підхід до пояснення принципу дії напівпровідникових випромінювачів світла усуває протиріччя між усталеною точкою зору, що екситонне випромінювання – прерогатива лише низькотемпературних джерел $(4{,}2 - 77$ °К$),$ та результатами експериментальних робіт, опублікованих в останні десятиліття, де наголошується, що головний внесок у інтегральну інтенсивність створює екситонна рекомбінація.

При цьому корисно зауважити, що перевага легування активної області діода ізоелектронною домішкою N полягає у її ізовалентності стосовно атома заміщення – навіть при концентрації азоту $N \approx 10^{17}$см$^{-3}$ вона не змінює концентрацію носіїв струму у зразку. У випадку достатньо великих значень концентрації вільних носіїв струму квантовий вихід діода починає зменшуватись внаслідок негативного впливу ефекта Оже - енергія рекомбінації не виділяється у вигляді світлового кванта, а передається вільному носію, що

приводить лише до збільшення його кінетичної енергії.

Аналіз спектра випромінювальної рекомбінації (рис. 2, рис. 3) у дещо спрощеному вигляді можна провести вважаючи, що він – результат накладання двох груп ліній, де перша – фононні повторення основної лінії зв'язаного екситона N; друга – азотних пар NN_n.

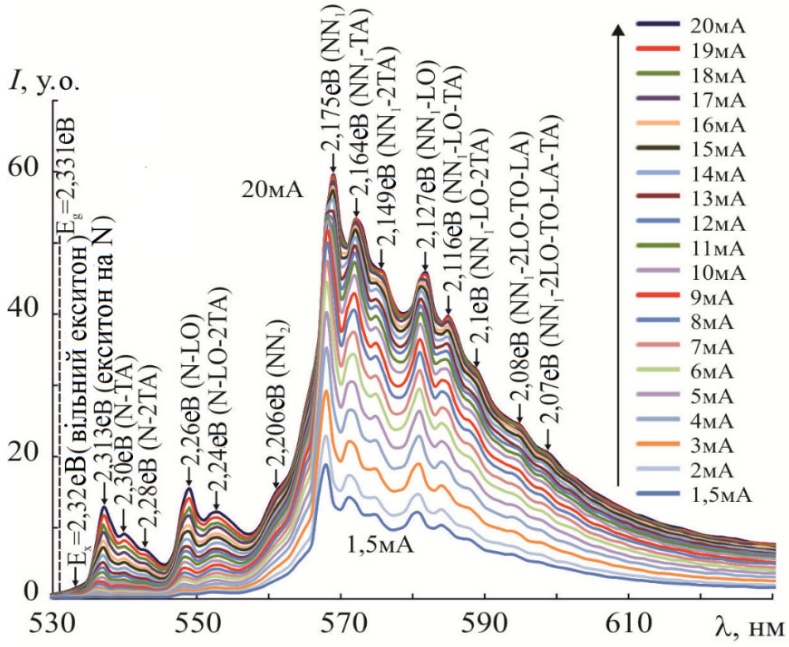

Рис. 2. Спектр випромінювання світлодіода GaP, легованого азотом (77К)

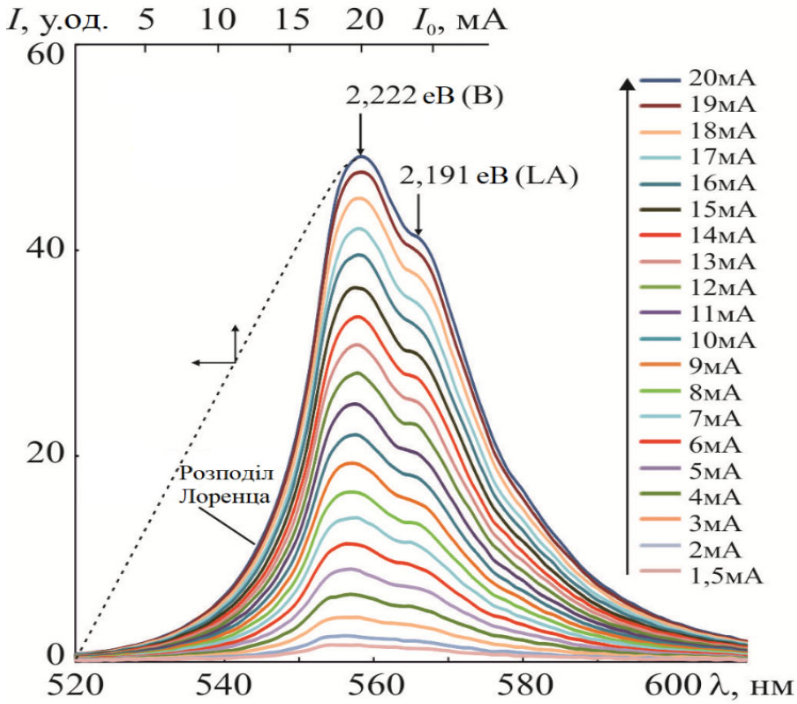

Рис. 3. Спектр зеленого діада GaP (N при 300 К)

Природа першої серії стає зрозумілою, коли зазначити, що у процесі оптичних переходів можлива як емісія коливань гратки, так і їхнє поглинання зі зміною енергії світлового кванта. Механізм виникнення групи азотних пар NN_n вимагає детальнішого розгляду.

В умовах завищених рівнів легування азотом атоми N можуть займати близькі вузли у підгратці фосфору. У випадку заміщення сусідніх атомів ––– виникає пара NN_1, глибина залягання пастки якої навіть більша, ніж глибина пастки окремого атома заміщення N. Відповідно енергія іонізації рівня NN_1 – більша від енергії рівня екситона зв'язаного на ізольованому атомі N; випромінювання такого центра добре видно при кімнатній температурі. Окрім пар NN_1 у кристалі присутні також пари з іншими відстанями між атомами азоту NN_n, що призводить до формування структури на спектральній кривій $I(\lambda)$ (рис. 2, рис. 3). Частина цих ліній є також фононними повтореннями вихідної NN_1-лінії.

Близьким до описаного може бути спосіб пояснення механізму свічення *p*-області діода. Її легування здійснюють цинком та киснем одночасно. Атоми цинку Zn та кисню O, замістивши метал Ga та неметал P – відповідно у сусідніх вузлах гратки, формують пастку, на якій зв'язується екситон з глибиною залягання $E_{Zn-O} \cong 0{,}4\ eB$.

Спектр червоного діода представлено на рис. 4 та рис. 5, відрізняється від спектра зеленого діода відсутністю тонкої структури, що є наслідком загального правила – складнішій структурі центра свічення відповідає більше число ліній у спектрі; при не досить низькій температурі вимірювання вони не розділяються. Для кращої наочності можна використати аналогію, наприклад, лінійчастих спектрів атомів та смугастих – молекулярних.

Принагідно відмітимо, що у більшості випадків студенти не можуть пояснити, чому світлодіоди – джерела саме спонтанного випромінювання і їм не властива генерація когерентних пучків.

Тому можна нагадати, що необхідною умовою функціонування кожного лазера є наявність робочого тіла та резонатора. Проте якщо для виготовлення останнього не існує як принципових, так і технічних перешкод, то використання робочого тіла у вигляді кристала GaP – непрямозонного напівпровідника з низькою ймовірністю випромінювальних переходів – неприйнятне. Мала інтенсивність світлового потоку не дозволить подолати поріг переходу у режим лазерної генерації.

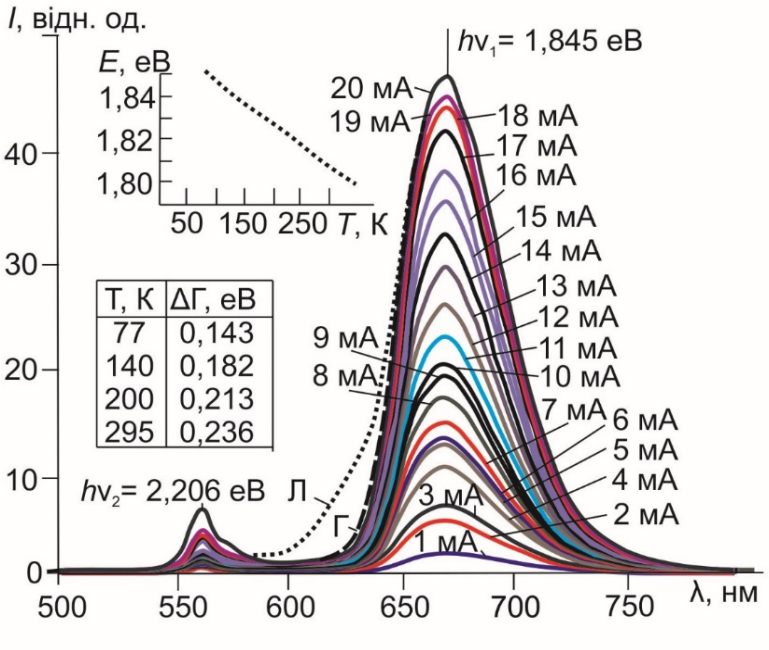

Рис. 4. Спектр випромінювання світлодіода GaP, легованого Zn, O (77 °K)

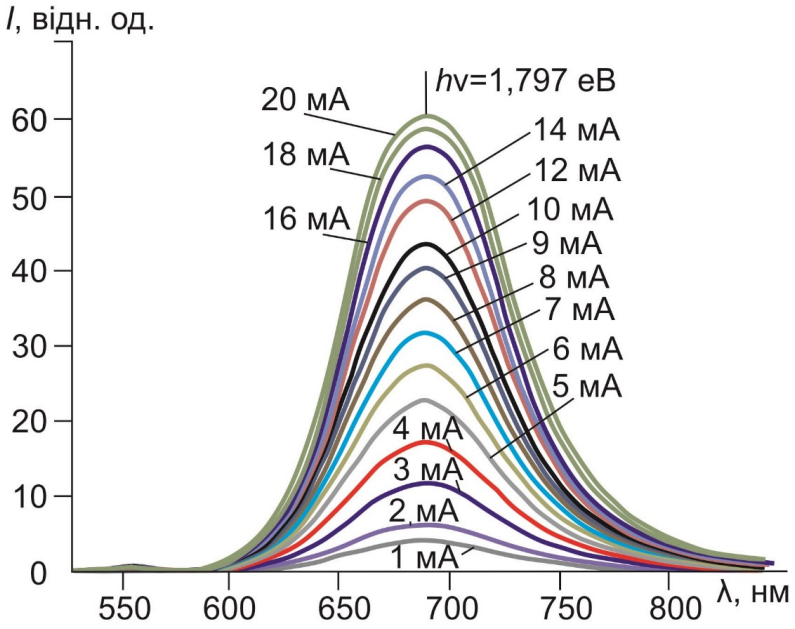

Рис. 5. Спектр червоного діада GaP (Zn, O) при 300 °K

На відміну від кристалів GaP використання прямозонного напівпровідника – арсеніду галія $GaAs$ дозволяє одержувати ефективні інфрачервоні лазери ($h\nu = 1{,}4\ eB$); перспективним лазерним матеріалом у видимій області є твердий розчин $GaP - GaAs\ (\sim 40\%\ GaP$ та $\sim 60\%\ GaAs)$.

Отже, розуміння студентами молодших курсів механізмів випромінювальної рекомбінації, що забезпечують ефективну електролюмінесценцію в складних напівпровідникових структурах, може бути сформоване на підставі пояснень, не обтяжених громіздкими математичними розрахунками. Механізм випромінювальної рекомбінації розглянуто на прикладі роботи світлодіода найпростішої будови – епітаксійної фосфідо-галієвої діодної структури. А використання наглядної моделі екситонного збудження кристала дозволяє уникнути застосування складних розрахункових співвідношень при аналізі спектрів випромінювання діода. Обґрунтовані підходи до вибору та представлення навчального матеріалу забезпечують виконання стандарту вищої освіти щодо формування спеціальних компетентностей та відповідних результатів навчання, зокрема здатності використовувати базові знання для розуміння фізичних процесів, бути обізнаними з питаннями прикладної фізики, матеріалознавства, хімії та відповідними технологічними процесами.

Використана література:

1. Берг А., Дин П. Светлодиоды. Москва : Мир, 1979. 687 с.
2. Шуберт Ф. Светлодиоды. 2008. 500 с.
3. Панков. Оптические процессы в полупроводниках. Москва : Мир, 1973. 392 с.
4. Гонтарук О. М., Конорєва О. В., Литовченко М. В., Малий Є. В., Петренко І. В., Пінковська М. Б., Тартачник В. П. Особливості електрооптичних характеристик світлодіодів GaP в умовах високих рівнів інжекції. *Ядерна фізика та енергетика.* 2015, Т. 16, № 3. С. 238-241.
5. Konoreva O. V., Litovchnko M. V., Malyi Ye. V., Petrenko I. V., Pinkovska M. B., Tartachnyk V. P., Shlapatska V. V. Degradation of electrooptical characteristics of serial GaP light-emitting diodes, caused by fast electrons. *Semicoductor Physics, Quantum Electronics and optoelectronics – 2015.* V. 18. № 3. p. 312-316
6. Петренко І. В., Конорєва О. В., Малий Є. В., Пинковская М. Б., Тартачник В. П. Особенности электрофизических характеристик исходных и облучённых светлодиодов GaP. *Взаимодействие излучений с твёрдым телом* : 11-я Межд. конф. Минск, Беларусь – 2015. С. 113-115.
7. Конорєва О. В., Малий Є. В., Оліх Я. М., Петренко І. В., Пінковська М. Б., Радкевич О. І., Тартачник В. П. Особливості екситонного випромінювання червоних фосфід – галієвих світло діодів. *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології – 2016.* Т. 13. № 1. С. 41-48.
8. Konoreva O. V., Olich Ya. M., Pinkovska M. B., Radkevych O. I., Taetachnyk V. P., Sclapatska V. V. The influence of acoustic – dislocation on intensity of the lound exiton recombination on initial and irradiated $GaAsP$ structuris. *Supperlatices and Microstructures – 2017.* V. 102. P. 88-93.

References:

[1] Berg A., Din P. Svetlodiody. Moskva : Mir, 1979. 687 s.

[2] Shubert F. Svetlodiody. 2008. 500 s.

[3] Pankov. Opticheskie processy v poluprovodnikah. Moskva : Mir, 1973. 392 s.

[4] Hontaruk O. M., Konorieva O. V., Lytovchenko M. V., Malyi Ye. V., Petrenko I. V., Pinkovska M. B., Tartachnyk V. P. Osoblyvosti elektrooptychnykh kharakterystyk svitlodiodiv GaP v umovakh vysokykh rivniv inzhektsii. *Yaderna fizyka ta enerhetyka.* 2015, T. 16, № 3. S. 238-241.

[5] Konoreva O. V., Litovchnko M. V., Malyi Ye. V., Petrenko I. V., Pinkovska M. B., Tartachnyk V. P., Shlapatska V. V. Degradation of electrooptical characteristics of serial GaP light-emitting diodes, caused by fast electrons. *Semicoductor Physics, Quantum Electronics and optoelectronics – 2015.* V. 18. № 3. p. 312-316

[6] Petrenko I. V., Konoryeva O. V., Malij Ye. V., Pinkovskaya M. B., Tartachnik V. P. Osobennosti elektrofizicheskih harakteristik ishodnyh i obluchyonnyh svetlodiodov GaP. *Vzaimodejstvie izluchenij s tvyordym telom :* 11-ya Mezhd. konf. Minsk, Belarus – 2015. S. 113-115.

[7] Konorieva O. V., Malyi Ye. V., Olikh Ya. M., Petrenko I. V., Pinkovska M. B., Radkevych O. I., Tartachnyk V. P. Osoblyvosti eksytonnoho vyprominiuvannia chervonykh fosfid – haliievykh svitlo diodiv. *Sensorna elektronika i mikrosystemni tekhnolohii – 2016.* T. 13. № 1. S. 41-48.

[8] Konoreva O. V., Olich Ya. M., Pinkovska M. B., Radkevych O. I., Taetachnyk V. P., Sclapatska V. V. The influence of acoustic – dislocation on intensity of the lound exiton recombination on initial and irradiated $GaAsP$ structuris. *Supperlatices and Microstructures – 2017.* V. 102. P. 88-93.

Вернидуб Р. М., Кириленко Е. И., Мирошниченко Ю. Б., Филоненко Н. Н., Тартачник В. П. Изучение явления електролюминисценции.

Отсутствие у студентов начального этапа обучения (1-2 курс) необходимых знаний по физике полупроводников и основ зонной теории твердого тела создает методические трудности при объяснении эффектов, касающихся явления электролюминесценции.

В статье предложен способ объяснения эффекта электролюминесценции студентам начальных курсов, или более поздних этапов обучения в университетах, где физика – не профильная дисциплина. Понимание студентами младших курсов механизмов излучательной рекомбинации, которые обеспечивают эффективную электролюминесценцию в сложных полупроводниковых структурах, может быть сформировано на основании объяснений, не обремененных громоздкими математическими расчетами. Механизм излучательной рекомбинации рассмотрен на примере работы светодиода простого строения – эпитаксиальной фосфид-галлиевой диодной структуры. Использованная наглядная модель экситонного возбуждения кристалла позволяет избежать применения сложных расчетных соотношений при анализе спектров излучения диода. Обосновано основное требование по выбору материала рабочего тела полупроводникового источника когерентного свечение.

Рассмотрены подходы к выбору и представлению учебного материала, которые обеспечивают выполнение стандарта высшего образования по формированию специальных компетенций и соответствующих результатов обучения, в частности способности использовать базовые знания для понимания физических процессов, разбираться с вопросами прикладной физики, материаловедения, химии и соответствующими технологическими процессами.

Ключевые слова: *электролюминесценция, механизм излучательной рекомбинации, светодиод, p-n-переход, уровень Ферми, ширина запрещенной зоны, потенциальный барьер, экситон.*

Vernydub R., Kyrylenko O., Myroshnichenko Yu., Filonenko N., Tartachnyk V. Study of the phenomenon of electroluminescence.

The lack of students of the initial stage of study (1-2 course) the necessary knowledge of semiconductor physics and the basics of band theory of solids creates methodological difficulties in explaining the effects related to the phenomenon of electroluminescence.

The article proposes a way of explaining the effect of electroluminescence first-year students, or later stages of study at universities, where physics is not a core discipline. Undergraduate students' understanding of the mechanisms of radiative recombination that provide effective electroluminescence in complex semiconductor structures can be formed on the basis of explanations that are not burdened by cumbersome mathematical calculations. The mechanism of radiative recombination is considered in the example of the operation of a LED of a simple structure – an epitaxial phosphide-gallium diode structure. The used illustrative model of exciton excitation of the crystal makes it possible to avoid the use of complex calculated relations in the analysis of the emission spectra of the diode. The main requirement for the choice of the material of the working fluid of a semiconductor source of coherent luminescence has been substantiated.

Approaches to the selection and presentation of educational material that meet the standard of

higher education for the formation of special competencies and relevant learning outcomes, including the ability to use basic knowledge to understand physical processes, be familiar with applied physics, materials science, chemistry and related processes.

Keywords: *electroluminescence, radiative recombination mechanism, light-emitting diode, p-n-junction, Fermi level, bandgap, potential barrier, exciton.*

DOI: https://doi.org/10.31392/NZ-npu-150.2021.05
УДК 378.091.3:81:908

Вітченко А. Ю., Платонова Т. О.

ВИКОРИСТАННЯ ВЕБ-КВЕСТ ТЕХНОЛОГІЇ НА СЕМІНАРСЬКИХ ЗАНЯТТЯХ З ЛІНГВОКРАЇНОЗНАВСТВА У ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Перед системою освіти постають виклики, пов'язані з тотальною доступність інформації, діджиталізацією освітнього процесу, впровадженням дистанційного навчання. Відбувається переосмислення цілей навчання, у сучасному світі пріоритетом виступає здатність працювати з великим потоком інформації, знаходити, аналізувати, групувати, інтерпретувати та робити власні висновки. Однією з технологій, яка основані на використанні новітніх технічних засобів та мережі Інтернет, вчить знаходити необхідну інформацію, систематизувати її та вирішувати поставленні задачі, є веб-квест технологія.

У статті теоретично обґрунтовано та практично перевірено ефективність використання вебквест технології на семінарських заняттях з дисципліни Лінгвокраїнознавство у закладах вищої освіти. Подано визначення поняття "веб-квест" різними дослідниками. Розкрито сутність веб-квест технології, проаналізовано переваги використання веб-квестів на семінарських заняттях з Лінгвокраїнознавства, розглянуто структурні елементи веб-квестів. Виокремлено основні етапи впровадження веб-квестів, наведено приклад використання веб-квестів на семінарських заняттях з дисципліни Лінгвокраїнознавство у закладах вищої освіти.

Доведено, що використання веб-квестів дає змогу актуалізувати лінгвокраїнознавчу лексику у процесі аналізу й обговорення поставлених завдань, відпрацьовувати практичні вміння будувати монологічні висловлювання, брати участь у діалогах, підвищувати інтерес до вивчення англійської мови, формувати навички як самостійної роботи так і роботи у команді, виховувати толерантне ставлення до культури іншого народу.

Ключові слова: *веб-квест, веб-квест технологія, структурні елементи веб-квесту, основні етапи впровадження веб-квестів, Лінгвокраїнознавство, заклади вищої освіти.*

Перед системою освіти постають виклики пов'язані з тотальною доступність інформації, діджиталізацією освітнього процесу, впровадженням дистанційного навчання. Відбувається переосмислення цілей навчання, у сучасному світі пріоритетом виступає здатність працювати з великим потоком інформації, знаходити, аналізувати, групувати, інтерпретувати та робити власні висновки. Одна з технологій, яка основані на використанні новітніх технічних засобів та мережі Інтернет, вчить знаходити необхідну інформацію, систематизувати її та вирішувати поставленні задачі є веб-квест технологія.

Теоретичні основи порушеної проблем набули висвітлення у працях