

М.М. Сльотов¹, О.М Сльотов¹, Г.В. Поцілуйко-Григоряк², М.П. Мазур³,
Т.М. Мазур³

Світловипромінювачі на основі GaN

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна, m.slyotov@chnu.edu.ua

²Чернівецький індустріальний фаховий коледж, Чернівці, Україна

³Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна,
tetiana.mazur@nung.edu.ua

У роботі розглядається отримання епітаксійних шарів GaN і кристалів та результати досліджень їх оптичних та люмінесцентних властивостей. Визначені параметри $\Delta_{CR} \approx 10$ меВ і $\Delta_{SO} \approx 48$ меВ зонної структури отриманих матеріалів гексагональної модифікації. Встановлено механізми основних рекомбінаційних процесів, що визначають формування випромінювання нелегованих і легованих Zn матеріалів. Встановлено роль міжзонної рекомбінації і анігіляції екситонів при формуванні випромінювання у високоенергетичному діапазоні та переходи носіїв через енергетичні стани, що формуються і утворюються власними точковими дефектами кристалічної ґратки та легуючою домішкою. Аналізується роль відповідних рекомбінаційних процесів у формуванні спектрів короткохвильового випромінювання.

Ключові слова: нітрид галію, шари і кристали, оптичні властивості, механізми випромінювальної рекомбінації.

Подано до редакції 06.12.2023; прийнято до друку 8.05.2024.

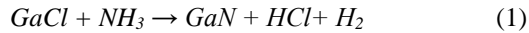
Вступ

На даний час важливим завданням у твердотільній електроніці є розширення функціональних можливостей використовуваних приладів [1-3]. У випадку світловипромінювачів актуальним постає питання вдосконалення використовуваних матеріалів. Для них необхідним є отримання високої інтенсивності випромінювання і розширення спектрального діапазону у мало опановану короткохвильову область [4,5]. Практичне використання зумовлює необхідність забезпечення стабільності отриманих параметрів, характеристик і властивостей джерел випромінювання [6,7]. До того ж, важливим є можливість їх використання при екстремальних умовах, зокрема підвищених температурах. Зазначені проблеми для гетерошарів II-VI сполук успішно вирішуються за допомогою розробки технології легування ізовалентними домішками [8,9]. Разом з тим, широке використання

знаходять інші матеріали, особливо III-V сполуки. Серед них привертають увагу нітриди III групи. На особливу увагу заслуговує нітрид галію [10]. Його прямозонність і велика ширина забороненої зони є важливою передумовою отримання високої ефективності випромінювання, яке відповідно до існуючих розробок може охоплювати саме короткохвильовий діапазон. Про це свідчать успіхи по отриманню різного типу випромінювачів на нітридах III групи [8,10]. Разом з тим, важливим питанням для GaN залишається подальше вдосконалення властивостей і встановлення факторів, які впливають на них. Встановлення зазначеного для базового GaN є важливим для розробки процесів отримання матеріалу і створення на його основі відповідних конструкцій високоефективних світловипромінювачів на короткохвильовий діапазон.

I. Об'єкти та методи досліджень

Досліджувалися властивості епітаксійних шарів і монокристалів GaN . Вони отримувалися осадженням з газової фази за хлоридно-гідридним способом [11]. Виготовлення за ним епітаксійних шарів і монокристалів проводилося у кварцовому реакторі за відповідною основною реакцією



Джерело металічного галію і підкладки лейкосапфіру (чи графіту у випадку кристалів) розташовувалися в області температурного плато відповідно до кривої її розподілу. Визначено температурні режими, за якими отримано досліджувані зразки. Встановлено, що при отриманні епітаксійних шарів і кристалів температури осадження різняться на 150-200 °С. При $T = 1150-1200$ °С отримуються прозорі, безколіорові кристали гексагональної форми довжиною до 5 мм і товщиною 1 мм, рис. 1.



Рис. 1. Фотографія кристалів нітриду галію, отримана при збільшенні $\times 20$.

Епітаксійні шари отримувалися на підкладках лейкосапфіру, орієнтованих у площині $[10\bar{1}2]$ і підготовлених за відповідною технологією для отримання структурно досконалого матеріалу. Встановлено оптимальне розташування джерел і підкладок у реакторі для отримання оптично прозорих безколіорових епішарів товщиною до 20 мкм [12].

Структурна досконалість отриманих експериментально зразків досліджувалася на стандартній рентгено-дифракційній установці за відомою методикою [13,14]. За їх результатами вдосконалювався процес отримання структурно досконалого матеріалу. Для встановлення оптимальності технологічних режимів також проводилися дослідження оптичного пропускання T_ω , відбивання R_ω і фотолумінесценції N_ω . Дослідження

проводилися на комплексній експериментальній установці на основі монохроматора МДР-23 і системами синхродетектування та реєстрації оптичних сигналів фотопомножувачами на відповідний діапазон. Результати вимірів записувалися на самописцях. Для визначення тонкої структури у вимірюваних спектрах використовувався метод λ -модуляції [14,15]. Точність вимірів становила 3%. Обробка експериментальних результатів проводилася за відомими методиками [15-17].

II. Результати досліджень

Встановлено режими і отримано за вказаним широко відомим хлоридно-гідридним методом досліджувані епітаксійні шари і кристали GaN . Вони характеризуються інтенсивною фотолумінесценцією у короткохвильовій області $\Delta\lambda = 0,42 \div 0,35$ мкм. Висока ефективність їх випромінювання свідчить про оптимальність режимів росту при формуванні досконалої кристалічної структури [18]. Це підтверджується проведеними дослідженнями параметрів їх зонної структури за методами оптичного довгохвильового поглинання T_ω та відбивання R_ω . Використання методу λ -модуляції істотно збільшило чутливість досліджень, рис. 2. За отриманими результатами вимірювань їх ширина забороненої зони становить $E_g = 3,42$ еВ при 300 К і $E_g = 3,47$ еВ при 78 К.

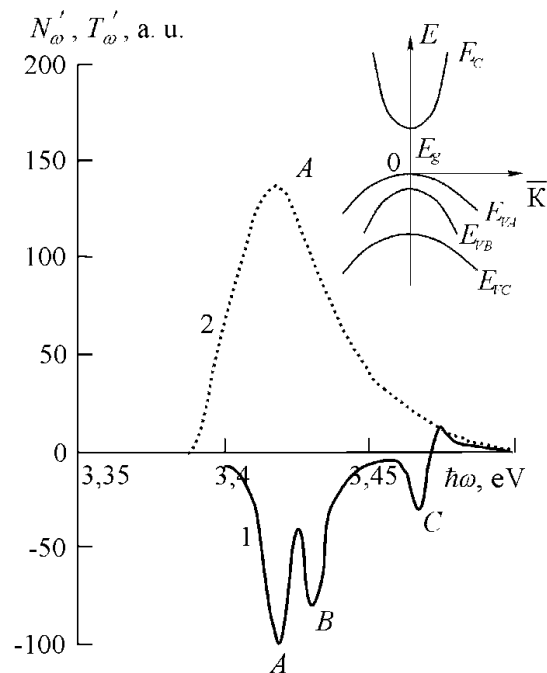


Рис. 2. Спектри λ -модульованого відбивання (1) та пропускання (2) нелегованого GaN . $T = 300$ К. На вірсі – зонна структура GaN .

Визначено базові параметри зонної структури кристалів GaN , а саме енергію розщеплення валентної зони на підзони внаслідок спин-орбітальної взаємодії Δ_{SO} та дії кристалічного поля Δ_{CR} . За отриманими диференціальними кривими встановлено їх величини

$\Delta_{SO} \approx 48$ меВ і $\Delta_{CR} \approx 10$ меВ. Встановлені параметри зонної структури свідчать про гексагональну кристалічну ґратку отриманого *GaN*.

Встановлені умови росту дозволили отримати на нелегованих плівках і кристалах *GaN* інтенсивну фотолюмінесценцію у короткохвильовій області. Зокрема, випромінювання нелегованих кристалів характеризується спектром при $\Delta\lambda = 0,355 \div 0,360$ мкм, який при 77 К описується двома складовими, рис.3.

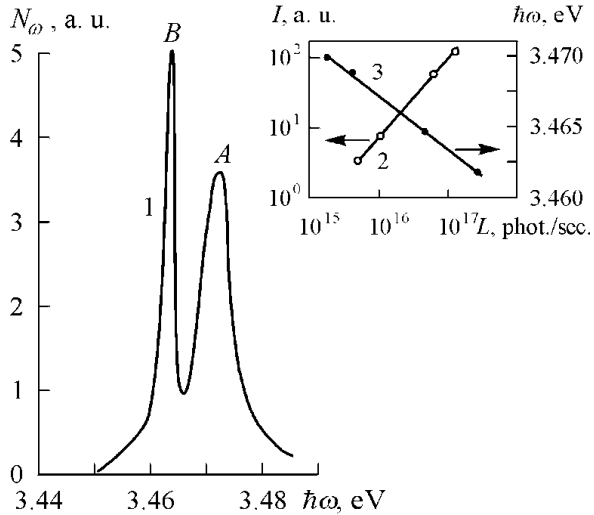


Рис. 3. Спектр випромінювання кристалів *GaN* при міжзонних *A* та екситонних *B* переходах. На врізці: залежність положення інтенсивності (2) смуги *B* та її максимуму (3) від рівня збудження *L*. *T* = 77 К.

Максимум смуги *A* припадає на енергію фотонів $\hbar\omega = 3.473$ еВ при 77 К. Положення максимуму не залежить від рівня фотозбудження *L* при зміні його величини на 3 порядки, а температурна залежність його положення аналогічна до температурної залежності ширини забороненої зони. Характер спектрального розподілу добре апроксимується теоретичним виразом для міжзонних випромінювальних переходів [19]

$$N_{\omega} = (\hbar\omega)^2 (\hbar\omega - E_g)^{1/2} \exp\left[-\frac{\hbar\omega - E_g}{kT}\right], \quad (3)$$

де *k* – стала Больцмана, *T* – температура. Таким чином, за отриманими відомостями для теоретичного представлення встановлені властивості вказують на міжзонну випромінювальну рекомбінацію, яка визначає формування випромінювання кристалів *GaN* в області енергій фотонів $\hbar\omega \geq E_g$.

Друга смуга їх випромінювання з максимумом при $\hbar\omega \leq E_g$ (3,642 еВ) характеризується наступними властивостями: 1) інтенсивність випромінювання *I* змінюється при збільшенні рівня збудження *L* за законом $I \sim L^{1.5}$; 2) максимум $\hbar\omega_m$ зміщується при зростанні *L* в область менших енергій квантів. Такі властивості притаманні екситонній фотолюмінесценції [20,21]. Дана природа випромінювання характерна для структурно досконалих матеріалів. Відповідно, її спостереження, а також наявність саме міжзонної рекомбінації,

свідчать про вдало визначені умови отримання структурно досконалих кристалів. У цілому отриманий матеріал може бути використаний при виготовленні на його основі ефективних випромінювачів на фіолетовий і ультрафіолетовий діапазони.

Зазначимо, що квантова ефективність випромінювання кристалів *GaN* становить $\eta \approx 6 \div 8\%$. Відповідний аналіз і вимірювання проводилися за відомою методикою [22,23]. Для типових кристалів *ZnS* $\eta \approx 1-3\%$, а для *ZnSe* – $\eta \approx 0,5-0,8\%$.

Встановлено, що люмінесценція нелегованих шарів *GaN* припадає на діапазон енергій фотонів $\hbar\omega = 3,1 \div 3,5$ еВ, рис. 4. Випромінювання охоплює як крайову область $\hbar\omega \geq E_g$, так і фіолетовий діапазон при $\hbar\omega < E_g$. У першому з них властивості випромінювання і кореляція експериментального спектра із розрахованою за виразом (3) кривою при $E_g = 3,42$ еВ свідчать про міжзонну випромінювальну рекомбінацію, смуга *A* на рис. 4.

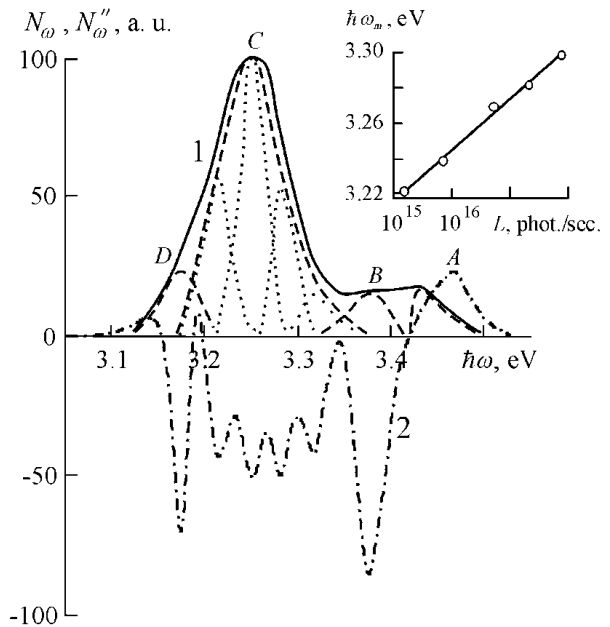


Рис. 4. Спектри звичайної N_{ω} (крива 1) і λ -модульованої N'_{ω} (крива 2) ФЛ нелегованих епітаксійних плівок *GaN* та розраховані методом Алєнцева-Фока складові, зумовлені міжзонною рекомбінацією (*A*), за участю донорних V'_N (*B*) і акцепторних V'_{Ga} (*D*) станів та їх асоціатів ($V'_N V'_{Ga}$) (*C*). На врізці – залежність положення максимуму *C*-смуги від рівня збудження.

В області $\hbar\omega \leq E_g$ інтенсивність випромінювання і його спектр вказує на переходи носіїв заряду за участю енергетичних станів. Зважаючи на відсутність легування шарів *GaN* їх утворення обумовлено власними точковими дефектами (ВТД) кристалічної ґратки. Це підтверджується проведеним наступним аналізом їх природи і відповідних властивостей.

Встановлено, що випромінювання досліджуваного нелегованого *GaN* при $\hbar\omega < E_g$ формується за участю складових *B*, *C* і *D*, рис. 4. Смуги *B* та *D* у спектрі характеризуються наступними властивостями: по-перше, їх контур симетричний і

півширина складає $\sim 1,5 kT$; по-друге, положення максимумів смуг $\hbar\omega_m$ не залежить від L в межах трьох порядків його зміни; по-третє, різниця енергій $E_g - \hbar\omega_m + kT/2$ і складає 0,045 еВ і 0,24 еВ для смуг B з $\hbar\omega_m = 3,375$ еВ і D з $\hbar\omega_m = 3,18$ еВ відповідно. Температурні залежності інтенсивності випромінювання $I(T)$ в області максимумів спектрів побудовані в координатах $\ln I$ від $1/T$ відповідно до відомого класичного виразу апроксимуються прямими у діапазоні 80-300 К. Визначені з їх нахилу значення E_T складають 0,042 еВ і 0,23 еВ для $\hbar\omega_m = 3,375$ еВ і $\hbar\omega_m = 3,18$ еВ та добре корелюють з отриманими за $E_g - \hbar\omega_m + kT/2$. Визначені властивості та аналіз їх природи вказує на донорні і акцепторні центри, які утворюються зарядженою додатною вакансією азоту V_N^+ (смуга B) і від'ємною однозарядною вакансією галію V_{Ga}^- (смуга D). Відповідно, характер випромінювання визначається переходами за моделями Ламбе-Кліка і Шена-Клазенса [23]. До того ж, для них зміна рівня збудження L не впливає на положення максимумів, що є однією з найважливіших ознак рекомбінаційних процесів за участю окремих центрів. Зазначені складові B і D у оптичних спектрах явно виявляють себе при дослідженнях за λ -модуляційною спектроскопією.

Разом з тим, домінуючою складовою у спектрі при $\hbar\omega < E_g$ є широка смуга C з $\hbar\omega_m = 3,26$ еВ. Дослідження виявили зміну положення максимуму складової C при зміні L , вставка на рис.4. Така властивість випромінювання є головною ознакою рекомбінації на донорно-акцепторних парах (ДАП). Найбільш ймовірно, що вони утворюються протилежно зарядженими центрами V_N^+ і V_{Ga}^- , розташованими на відповідних відстанях r у кристалічній ґратці. Її можливі значення встановлено за дослідженнями методом λ -модуляції, які виявили у диференціальному спектрі N'_ω за його осцилюючим характером наявність щонайменше чотирьох смуг, рис. 4. Їх максимуми розташовані при 3,33, 3,28, 3,24 і 3,21 еВ, що відповідає відстаням між партнерами ДАП V_N^+ і V_{Ga}^- 6,6, 8,1, 10,7 і 16,2 Å згідно розрахункам за моделлю Еппла-Віл'ямса-Пренера [24]. Наявність цих смуг підтверджується аналітичними розрахунками за методом Алєнцева-Фока [25].

Ефективне випромінювання у синьо-фіолетовій області спектра отримується при легуванні GaN домішкою Zn . Спостерігається істотне (4 порядки) збільшення його інтенсивності і максимум спектра при енергії фотонів у $\hbar\omega = 2,95$ еВ, рис.5. Квантова ефективність набуває значення $\eta \approx 9-12\%$. Одним із пояснень такого збільшення можуть бути зміни у спектральному розподілі їх випромінювання [22].

Властивості випромінювання відповідають процесам рекомбінації за участю одного локального центра [19,21]. Зокрема, $\hbar\omega_m$ залежить лінійно від L при його зміні в межах $10^{14}-10^{18}$ фот/с. Різниця енергій $E_g - \hbar\omega_m + kT/2$ становить 0,483 еВ, що узгоджується з енергією термічної активації центра – $E_T = 0,46$ еВ. Дослідження порога інфрачервоного оптичного гасіння ФЛ внаслідок переходів носіїв заряду типу валентна зона – акцептор дає значення 0,48 еВ. Показано [26], що такий центр є акцептором і

утворюється при заміщенні галію цинком Zn_{Ga} . Відповідно, випромінювання формується внаслідок рекомбінації вільних електронів з локалізованими на акцепторах дірками. Півширина спектра випромінювання $\hbar\omega_{1/2} \sim 0,7$ еВ набагато перевищує $2kT$ при 300 К. Вона істотно збільшується при зростанні концентрації легуючої домішки Zn і L . Також зазначимо, що глибина залягання центрів Zn_{Ga} відповідає критерію $E_a > 3\hbar\omega_0$. Отримане вказує на електрон-фонову взаємодію глибоких рівнів. Як відомо [19,21,22], у цьому випадку крім основної смуги формуються складові її фонових повторень. У даному випадку вони явно спостерігаються при дослідженнях методом λ -модуляції. В спектрі другої похідної N''_ω їм відповідають еквідистантні з $\hbar\omega_0 \approx 89$ меВ смуги, крива 2 на рис.5. Відстань між ними відповідає енергії LO -фону (~ 90 меВ) в GaN . Таким чином, спектр люмінесценції шарів $GaN<Zn>$ формується при випромінюванні чотирьох і поглинанні двох LO -фононів [26]. Це пояснює широку смугу їх випромінювання.

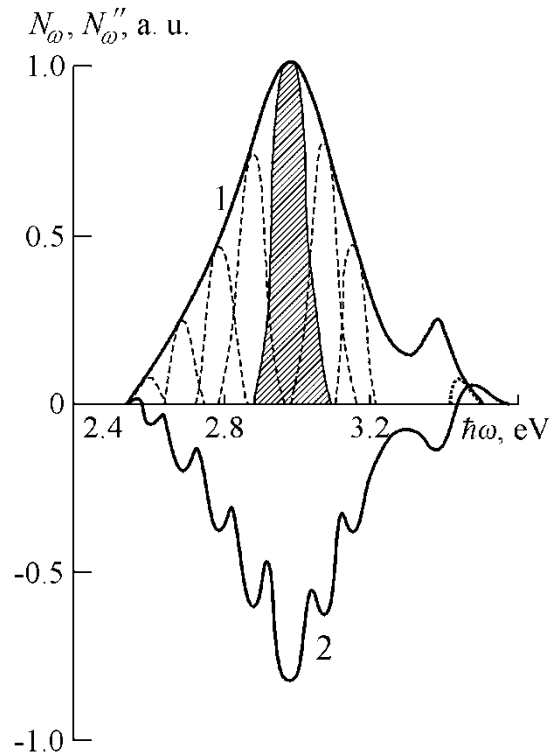


Рис. 5. Спектри звичайної (1) та λ -модульованої (2) люмінесценції шарів $GaN:Zn$, леговані до концентрації цинку 10^{18} см^{-3} . $T = 300$ К.

Збільшення температури (до 380-410 °С) незначно зменшує інтенсивність і не впливає на спектральний склад. Проведені температурні і часові вимірювання виявили стійкість і повторюваність властивостей, параметрів і характеристик шарів і кристалів GaN до дії теплового опромінення до 420 °С.

Висновки

Таким чином, епітаксійні півки і кристали GaN із стабільними параметрами і характеристиками можуть

бути отримані хлоридно-гідридним методом. За ним формується досконала гексагональна гратка, зонна структура якої описується параметрами $E_g = 3,42$ еВ, $\Delta_{CR} \approx 10$ меВ і $\Delta_{SO} \approx 48$ меВ. Люмінесценція базових нелегованих матеріалів визначається ефективною міжзонною рекомбінацією, а для кристалів також випромінюванням екситонів при $T = 78$ К. Для нелегованих шарів при $\hbar\omega < E_g$ формується широка смуга $\hbar\omega_m = 3,26$ еВ, складові якої визначаються процесами рекомбінації через локальні донорні і акцепторні центри та на донорно-акцепторних парах. Вони утворюються зарядженими додатньо вакансіями азоту V_N^+ зарядженими від'ємно однозарядними вакансіями галію V_{Ga}^- . Випромінювання нелегованих плівок GaN характеризується високою квантовою ефективністю $\eta = 6-8\%$. При заміщенні галію цинком Zn_{Ga} отримується $\eta \approx 9-12\%$ внаслідок утворення глибоких акцепторів. Відповідно, випромінювання обумовлено рекомбінацією вільних електронів з локалізованими на акцепторах дірками. При цьому рекомбінація носіїв супроводжується

електрон-фононою взаємодією утворених глибоких рівнів. Випромінювальні процеси характеризуються стійкістю і повторюваністю властивостей, параметрів і характеристик до дії теплового опромінення до 420°C .

Сльотов М.М. – професор, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри оптики та видавничо-поліграфічної справи;

Сльотов О.М. – доктор технічних наук, асистент кафедри електроніки та енергетики;

Поцілуйко-Григоряк Г.В. – викладач Чернівецького індустріального фахового коледжу;

Мазур М.П. – доцент, кандидат фізико-математичних наук, директор Інституту архітектури, будівництва та енергетики;

Мазур Т.М. – доктор філософії, доцент кафедри фізико-математичних наук.

- [1] A. Sadao, Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors. (New Jersey: Wiley, 2009).
- [2] T. Mazur, M. Mazur, M. Halushchak, *Surface-Barrier CdTe Diodes for Photovoltaics*, Journal of Nano- and Electronic Physics, 15(2), 02004-1 (2023); [https://doi.org/10.21272/jnep.15\(2\).02006](https://doi.org/10.21272/jnep.15(2).02006).
- [3] V.B. Kopei, O.R. Onysko, V.G. Panchuk, *Component-oriented acausal modeling of the dynamical systems in Python language on the example of the model of the sucker rod string*, PeerJ Computer Science, 5:e227 (2019); <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.227>.
- [4] M. Slyotov, A. Slyotov, *The sources of radiation in the short-wave range on the basis of II-VI heterolayers*, Journal IAPGOS, 4(4), (2018).
- [5] B. Dzundza, O. Kostyuk & T. Mazur, *Software and Hardware Complex for Study of Photoelectric Properties of Semiconductor Structures*, 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, 635 (2019); <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783544>.
- [6] B. Naidych, T. Parashchuk, I. Yaremyi, M. Moyseyenko, O. Kostyuk, O. Voznyak, ... & L. Nykyruy, *Structural and thermodynamic properties of Pb-Cd-Te thin films: Experimental study and DFT analysis*, Journal of Electronic Materials, 50, 580 (2021); <https://doi.org/10.1007/s11664-020-08561-5>.
- [7] H. Nykyforchyn, V. Kyryliv, O. Maksymiv, V. Kochubei, R. Boyko, V. Dovhunyk, *Wear resistance of the surface nanocrystalline structure under an action of diethyleneglycol medium*, Applied Nanoscience, 9(5), 1085 (2019); <https://doi.org/10.1007/s13204-018-0690-3>.
- [8] Харків, МОНУ.- -396 С. Е. І. Chernyakov, Yu. P. Machekhin, M. P. Kukhtin, Optoelectronics. (Kharkov, MONU, 396, 2015).
- [9] Mazur T.M., Prokopiv V.V., Slyotov M.M., Mazur M.P., Kinzerska O.V., Slyotov O.M. Optical properties of CdTe doped Ca. Physics and chemistry of solid state. 21(1), 52 (2020); <https://doi.org/10.15330/pcss.21.1.52-56>.
- [10] O. Ermakov Applied optoelectronics. (M.: Tekhnosfera, 416, 2004).
- [11] A.I. Kurnosov, V.V. Yudin, Technology of production of semiconductor devices and integrated circuits. (M.: Higher school, 368, 1986).
- [12] M.M. Slyotov, O.M. Slyotov, *Preparation and luminescent properties of zinc sulfoselenide thin films*, Physics and Chemistry of Solid State. 20(4), 354 (2019).
- [13] Yu.V. Vorobiev, V.I. Dobrovolsky, V.I. Stryha, Semiconductor research methods. (Vyshcha schola: Kyiv, 232, 1988).
- [14] T. Mazur, M. Slyotov, M. Mazur, V. Prokopiv, O. Kinzerska, O. Slyotov, *Features of the cadmium chalcogenide substrates with surface nanostructure*, Materials Today: Proceedings. 35(4), 661 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.112>.
- [15] V. Kyryliv, O. Maksymiv, V. Gurey, I. Hurey, Y. Kyryliv, O. Zvirko, *The mode deformation effect on surface nanocrystalline structure formation and wear resistance of steel 41Cr4*, Coatings. 12(2), 249 (2023); <https://doi.org/10.3390/coatings13020249>.
- [16] V. Kopei, O. Onysko, C. Barz, P. Dašić, V. Panchuk, *Designing a multi-agent plm system for threaded connections using the principle of isomorphism of regularities of complex systems*, Machines, 11(2), 263 (2023); <https://doi.org/10.3390/machines11020263>.

- [17] I. V. Horichok, L. I. Nykyruy, T. O. Parashchuk, S. D. Bardashevskaya, & M. P. Pylyponuk, *Thermodynamics of defect subsystem in zinc telluride crystals*, Modern Physics Letters B, 30(16), 1650172, (2016); <https://doi.org/10.1142/S0217984916501724>.
- [18] M. Cardona, *Modulation spectroscopy*. (M.: Mir, 416, 1972).
- [19] V.P. Gribkovsky, *The theory of absorption and emission of light in semiconductors* (Science and technology, Minsk, 464, 1975).
- [20] Koh Era, D.W. Langer, *Luminescence of ZnSe near the band edge under strong laser light excitation*, J. Luminescence. 1-2, 514 (1970).
- [21] M. Fox, *Optical Properties of Solids*. (Oxford, New York, 396, 2010).
- [22] M. Slyotov, T. Mazur, V. Prokopiv, O. Slyotov, M. Mazur, *Sources of optical radiation based on ZnTe/ZnSe/ZnS heterostructures*, Materials Today: Proceedings, 62, 5763 (2022); <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.476>.
- [23] A.N. Georgobiani and M.K. Sheinkman, *Physics of A2B6 compounds* (M. Mir, 320, 1986).
- [24] P. Yu, M. Cardona, *Fundamentals of semiconductor physics* (M. Fizmatlit, 560, 2002).
- [25] Gavrilenko V.I, Grekhov A.M., Korbutyak D.V., Litovchenko V.G. *Optical properties of semiconductors*. Directory (Naukova Dumka, Kyiv, 608, 1987).
- [26] W.A. Melton, J.I. Pankove, *GaN growth on sapphire*, J. Cryst. Growth, 178, 168 (1997).

М.М. Slyotov¹, О.М. Slyotov¹, H.V. Potsiluiko-Hryhoriak², М.П. Mazur³,
Т.М. Mazur³

GaN based light emitters

¹*Yuri Fedkovich Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, m.slyotov@chnu.edu.ua*

²*Chernivtsi Industrial Professional College, Chernivtsi, Ukraine*

³*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas Ivano-Frankivsk, Ukraine, tetiana.mazur@nung.edu.ua*

The article discusses the preparation of epitaxial layers and GaN crystals, as well as the results of studies of their optical and luminescent properties. The parameters of the band structure of the resulting hexagonal modification materials $\Delta_{CR} \approx 10$ meV and $\Delta_{SO} \approx 48$ meV were determined. The mechanisms of the main recombination processes that determine the formation of radiation from undoped and Zn-doped materials have been established. The role of interband recombination and annihilation of excitons in the formation of radiation in the high-energy region and transitions of carriers through energy states that are formed and created by intrinsic point defects of the crystal lattice and dopant has been established. The role of response recombination processes in the formation of short-wave radiation spectra is analyzed.

Keywords: gallium nitride, layers and crystals, optical properties, mechanisms of radiative recombination.