

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-42>

УДК 621.327

АНДРІЙЧУК ВОЛОДИМИР

Тернопільський Національний Технічний Університет імені Івана Пулюя
<https://orcid.org/0000-0001-7124-2777>
 e-mail: Andriychukva31410@gmail.com

КИЯНЧУК ТАРАС

Тернопільський Національний Технічний Університет імені Івана Пулюя
<https://orcid.org/0009-0003-1125-0187>
 e-mail: t.dezinto@gmail.com

КОСТИК ЛЮБОВ

Тернопільський Національний Технічний Університет імені Івана Пулюя
<https://orcid.org/0000-0003-3702-8210>
 e-mail: kostyklm1968@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОДІОДІВ НА ОСНОВІ НІТРИДУ ГАЛІЮ

В роботі представлені результати експериментальних вимірювань ВАХ одноквантових вузькоспектральних світлодіодів синього свічення з максимумом випромінювання при 450 нм. Вимірювання проводили в динамічному та дискретному режимі зміни напруги живлення при низькому (≤ 1 мА) і високому (20 мА) рівнях струму інжекції. Зроблено їх аналітичне представлення за допомогою функції Гауса з коефіцієнтом детермінації $R^2=0,998$. Розраховано значення диференціального опору та побудовано його залежності від напруги живлення. Визначено паралельний та послідовний опір еквівалентної схеми світлодіода.

Ключові слова: вольт-амперна характеристика, світлодіод, електрична інжекція.

ANDRIYCHUK VOLODYMYR, KYANCHUK TARAS, KOSTYK LIUBOV

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

STUDY OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF GALLIUM NITRIDE-BASED LEDs

The study of the current-voltage characteristics (I - V characteristics) of LED light sources is key in the design of power supplies with optimal efficiency and long service life. Blue LEDs based on InGaN-GaN, which are used in many lighting structures due to their high brightness, low power consumption and short transient times, were studied. The measurements were performed in dynamic and discrete modes of changing the supply voltage and at low ≤ 1 mA and high 20 mA injection current levels. The main attention is paid to the results of dynamic measurements, which made it possible to minimize changes in the heterojunction temperature due to self-heating during measurements. An analytical approximation of the experimental characteristics was made using the Gaussian function, with a coefficient of determination $R^2=0,998$. Having a mathematical representation of the I - V characteristic, the differential resistance of the diode was calculated, and its dependence on voltage was presented. Theoretical calculations are confirmed by experimental measurements at different points of the I - V characteristic both at low and at high injection levels. Based on the calculations and experimental measurements in the equivalent electrical circuit of the FYL-3014-50 mW LED, the values of the series and parallel resistances were determined. The value of the parallel resistance was taken as the differential resistance $R_p=10^5$ Ohms, determined at a voltage of $V=2,5$ V and a current injection of $I=10^{-5}$ A. The value of the series resistance was taken as the differential resistance $R_s=27$ Ohms, at a voltage of $V=3,2$ V and a current injection of 20 mA. These results can be used in the development of pulsed power supply drivers for LEDs with pulse width modulation, both narrow-spectrum and white glow with a luminescent coating based on InGaN-GaN structures.

Keywords: current-voltage characteristics, light-emitting diodes, electrical injection.

Стаття надійшла до редакції / Received 18.01.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.02.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Андрійчук Володимир? Киянчук Тарас? Костик Любов

Аналіз досліджень та публікацій

Світлодіоди стали інноваційним рішенням для систем освітлення в енергетичній галузі. Наступним кроком є пошук енергоощадних драйверів для їх живлення з відповідним діапазоном робочих напруг, що вимагає детального вивчення їх вольт-амперних характеристик (ВАХ) як нелінійних елементів кола. В роботах [1,2] приділено достатньо уваги теоретичним питанням опису р-п-переходів напівпровідникових структур. В роботі [3] розглянута модель установки, що дозволяє автоматизовано вимірювати вольт-амперні характеристики світлодіодів. Установка побудована на базі мікроконтролера STM32, ЦАП, схеми перетворення напруга – струм. Ця установка забезпечує широкий діапазон вимірювання струму – від 25 мкА до 800 мА.

В роботі [4] аналізуються вольт-амперні характеристики світлодіодів (СД) під час оптичного та електричного збудження. Показано, що ВАХ світлодіодного пристрою в першу чергу залежить від розподілу енергії носіїв заряду та не пов'язана зі способом інжекції носіїв. Проведено аналіз факторів, що впливають на ВАХ світлодіодів. Температура переходу та енергія забороненої зони E_g є основними параметрами впливу на електричні характеристики СД. Таким чином, при проведенні експериментальних досліджень ВАХ необхідно звести до мінімуму тепловий чинник самонагріву СД за допомогою імпульсного методу вимірювань.

В роботі [5] порівнюються та оцінюються вольт-амперні характеристики синіх світлодіодів на основі GaN. Дана інформація є надзвичайно важливою, оскільки ці світлодіоди використовуються в багатьох світлотехнічних структурах завдяки своїм хорошим властивостям: високій яскравості, низькому споживанню

електроенергії та малому час релаксації. Тут також розглядається структура енергетичної зони, концентрація носіїв, ефективність рекомбінації випромінювання, спектр електролюмінесценції та розподіл внутрішньої густини струму при прямій напрузі 3,5 В.

Завданням, яке ставилося перед даною роботою, було проведення експериментальних вимірювань ВАХ одноквантових вузькоспектральних СД та їх аналітичне представлення; визначення диференціального опору та побудова його залежності від напруги живлення.

Теоретичні дослідження

ВАХ різкого р-n-переходу при прямому зміщенні добре описується рівнянням Шоклі:

$$I = I_s e^{eV/kT},$$

де I_s – струм насичення при зворотній напрузі.

Для опису експериментальних ВАХ використовують рівняння:

$$I = I_s e^{eV/n_{id}kT}, \tag{1}$$

де n_{id} – коефіцієнт ідеальності ВАХ.

Для більшості вузькоспектральних СД n_{id} лежить в межах 1,3–1,7, для GaN/GaInN він може досягати 6 [1]. Такий вплив на характеристики СД можуть чинити додаткові опори, які виникають за рахунок недосконалих електричних контактів або опору базисних напівпровідників та дефектів на поверхні р-n-переходу. Виходячи із еквівалентної електричної схеми СД [6], де R_p – опір паралельний активній області переходу, а R_s – послідовний опір, вираз ВАХ при прямому зміщенні можна записати рівнянням:

$$I - \frac{(V-IR_s)}{R_p} = I_s e^{e(V-IR_s)/n_{id}kT}. \tag{2}$$

Паралельний опір СД можна оцінити по ВАХ в області низької інжекції носіїв заряду, тобто в діапазоні напруг $V < E_g/e$, коли опір активної області є великий. Тут можна знехтувати струмом через р-n-перехід, а паралельний опір можна визначити за рівнянням:

$$R_p = dV/dI. \tag{3}$$

Послідовний опір буде проявлятися в області високої інжекції, коли $V > E_g/e$, і опір активної області різко зменшиться. В цьому випадку ВАХ СД стає близькою до лінійної, і визначити послідовний опір можна за рівнянням:

$$R_s = dV/dI. \tag{4}$$

Для СД з великим паралельним опором, який має місце на початкових стадіях ВАХ, спадом напруги на послідовному опорі ($IR_s \ll V$) можна знехтувати. Для низького рівня інжекції ВАХ можна записати у вигляді:

$$I = I_s e^{eV/n_{id}kT}. \tag{5}$$

Продиференціювавши його по напрузі отримаємо вираз для диференціальної провідності СД:

$$Y_{diff} = \frac{dI}{dV} = \frac{I_s e}{n_{id}kT} e^{eV/n_{id}kT}. \tag{6}$$

Взявши $I/Y_{diff} = R_{diff}$, отримаємо залежність диференціального опору від напруги.

Аналогічно поступаємо і при високому рівні інжекції, коли опір активної області є набагато меншим ніж R_p . Визначений для даного випадку диференціальний опір буде близький до послідовного опору еквівалентної схеми СД.

Методика експерименту

Для проведення експериментальних досліджень використовували комерційно доступні одноквантові вузькоспектральні СД FYL-3014-50 мВт синього свічення з максимумом випромінювання при 450 нм. Вольт-амперні характеристики світлодіодів вимірювали у двох режимах: імпульсному та безперервному. При безперервній роботі до світлодіода прикладалась напруга від джерела постійного струму LW-K3010D. Вимірювання параметрів струму та напруги проводили за допомогою цифрового мультиметра UNI-T UT8803E. Для вимірювань ВАХ в імпульсному режимі використовували генератор Siglent SDG 1050 та осцилограф Siglent SDS 1072CML+, який працював в режимі X/Y. Робота в імпульсному режимі дозволяла мінімізувати зміну температури СД та знехтувати ефектом самонагрівання.

Експериментальні результати та їх обговорення

Вимірювання ВАХ при низькому рівні інжекції проводили коли струм в колі був ≤ 1 мА, та високому рівні, коли струм досягав 20 мА. На рис.1 приведені ці два типи експериментальних кривих, які відмічені точковими маркерами. Їх аналітичну апроксимацію було проведено за допомогою функцій Гауса:

$$I = a \cdot \exp \left[- \left(\frac{V-b}{c} \right)^2 \right], \tag{7}$$

які на рисунку представлені суцільною лінією і найкраще співпадали з експериментальними даними з коефіцієнтом детермінації $R^2=0,998$.

При низькому рівні інжекції ВАХ СД була представлена наступним аналітичним виразом:

$$I = 0,0013 \exp \left[- \left(\frac{V-2,7698}{0,0904} \right)^2 \right] \tag{8}$$

При високому рівні інжекції носіїв струму аналітичний вираз ВАХ зображений функцією:

$$I = 0,02494 \exp \left[- \left(\frac{V-3,552}{0,5544} \right)^2 \right]. \tag{9}$$

Порівнюючи ці два математичні представлення вольт-амперних характеристик СД FYL-3014, видно, що із зростанням струму інжекції зростають коефіцієнти b і c . Загальний вигляд функції не змінився.

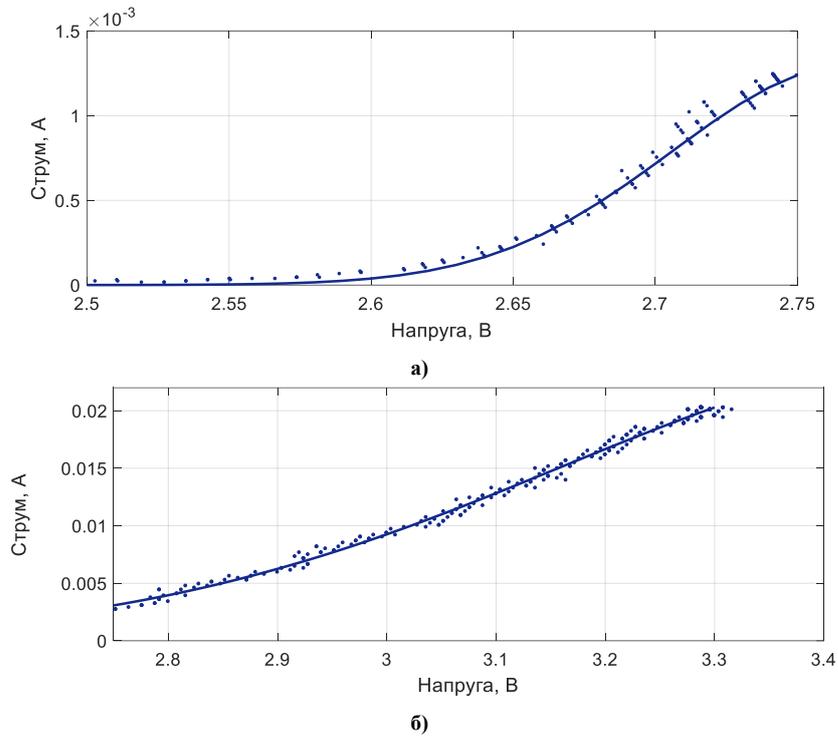


Рис. 1 Вольт-амперні характеристики світлодіодів СД FYL-3014-50 мВт синього світіння з максимумом випромінювання при 450 нм: а) низький рівень інжекції ≤ 1 мА; б) високий рівень інжекції ≤ 20 мА.

При розробці драйверів імпульсного живлення СД необхідно мати інформацію про динамічні параметри СД, до яких відноситься диференціальний опір діода. Маючи математичне представлення ВАХ, було проведено розрахунок диференціального опору діода. Для цього вирази (8) і (9) продиференціювали по напрузі і отримали формули для розрахунку диференціальної провідності від напруги при низькому рівні:

$$\frac{dI}{dV} = -0,0013 \exp\left(-\left(\frac{U-2,7698}{0,0904}\right)^2\right) \left(\frac{2(U-2,7698)}{0,0082}\right), \quad (10)$$

та високому рівні інжекції:

$$\frac{dI}{dV} = -0,2499 \exp\left(-\left(\frac{U-3,552}{0,5544}\right)^2\right) \left(\frac{2(U-3,552)}{0,3074}\right). \quad (11)$$

Взявши обернені величини до виразів (10) та (11), були побудовані залежності диференціального опору СД від напруги, які приведені на рис.2.

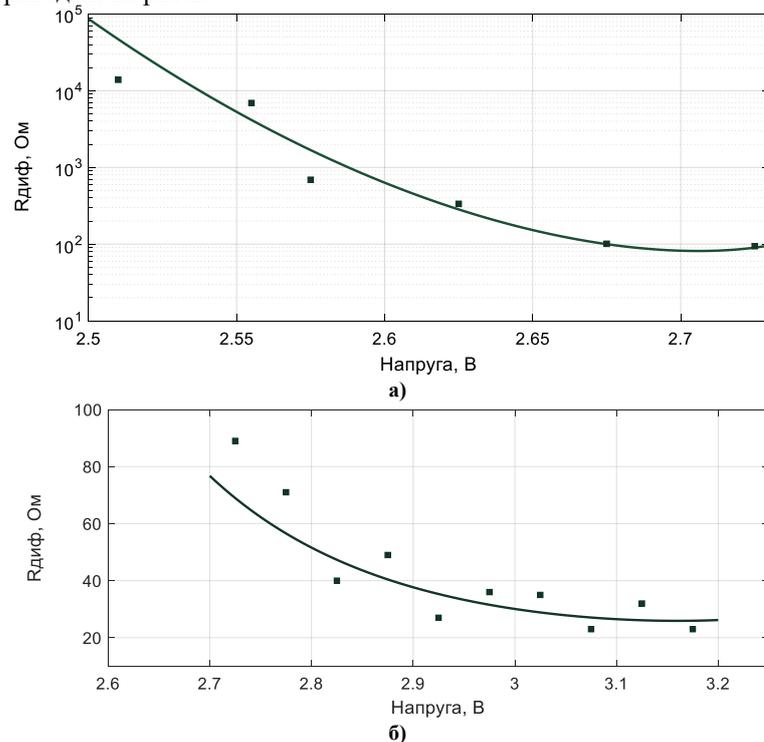


Рис. 2. Залежності диференціального опору СД FYL-3014-50 мВт від напруги при: а) низькому рівні інжекції; б) високому рівні інжекції.

Також були проведені вимірювання диференціального опору СД при різних рівнях інжекції, які на рис.2 показані квадратними маркерами. Для цього з генератора Siglent SDG 1050 на СД з послідовно включеним опором 47 Ом, подавалась постійна напруга прямого зміщення з накладеним синусоїдальним сигналом слабкого збурення амплітудою 50 мВ. Зміною постійної складової вибиралась необхідна точка ВАХ. В цій точці вимірювалися амплітудні значення струму та напруги сигналу слабкого збурення. Відношення $\Delta V/\Delta I=R_{out}$ було диференціальним опором СД в даній точці ВАХ.

На основі проведених розрахунків та експериментальних вимірювань в еквівалентній схемі СД FYL-3014-50 мВт були визначені значення послідовного та паралельного опорів. За величину паралельного опору, взято диференціальний опір $R_p=10^5$ Ом, визначений при напрузі $V=2,5$ В та струмові інжекції $I=10^{-5}$ А. За величину послідовного опору взято диференціальний опір $R_s=27$ Ом, при напрузі $V=3,2$ В та струмові інжекції 20 мА. Дана еквівалентна схема може бути використана при проектуванні драйверів імпульсного живлення з широтною модуляцією імпульсів як вузькоспектральних СД на основі InGaN-GaN, так і білого свічення з люмінесцентним покриттям.

Висновки

Проведено вимірювання ВАХ вузькоспектральних СД синього свічення на основі InGaN-GaN з максимумом випромінювання 450 нм в динамічному та дискретному режимі зміни напруги живлення. Основна увага звернута на результати динамічних вимірювань ВАХ, які дозволили звести до мінімуму зміни температури гетеропереходу за рахунок самонагрівання під час вимірювань.

Представлені ВАХ при низькому рівні інжекції, коли струм в колі був ≤ 1 мА та високому рівні, коли струм досягав 20 мА. Зроблено їх аналітичну апроксимацію за допомогою функції Гауса з коефіцієнтом детермінації $R^2=0,998$. Порівнюючи ці два математичні представлення вольт-амперних характеристик СД FYL-3014, видно, що із зростанням струму інжекції зростають коефіцієнти b і c . Загальний вигляд функції не змінюється.

На основі математичного представлення ВАХ проведено розрахунок диференціального опору світлодіода та представлено його залежності від напруги. Теоретичні розрахунки підтверджені експериментальними вимірюваннями динамічного опору як при низькому, так і при високому рівнях інжекції носіїв струму.

За результатами розрахунків та експериментальних вимірювань в еквівалентній схемі СД синього свічення на основі InGaN-GaN з максимумом випромінювання 450 нм визначені значення послідовного $R_s=27$ Ом та паралельного $R_p=10^5$ Ом опорів, які можуть бути використані при проектуванні драйверів імпульсного живлення з широтною модуляцією імпульсів як вузькоспектральних СД, так і СД білого свічення з люмінесцентним покриттям.

Література

1. Schubert E. F. Light-Emitting Diodes. E. Fred Schubert. 2018. 672 p. URL: https://books.google.com.ua/books/about/Light_Emitting_Diodes_4th_Edition_2023.html?id=WE2zEAAAQBAJ&redir_esc=y
2. Бондаренко І.М., Бородін О.В., Галат О.Б., Карнаушенко В.П. Твердотільна електроніка: навч. посібник для студентів ЗВО.– Харків: ХНУРЕ, 2020. – 236 с. URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/c30b9f71-8f79-476d-b433-086f954a10bb/content>
3. Гуменюк Д. В. Установка для автоматизованого вимірювання вольт-амперних характеристик / Електронна та Акустична Інженерія, 2019. Вип. 2. №. 4. С. 39–45. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/e53451fe-e89e-4489-b631-778a7e4db871/content>
4. Wen Jing. Current–voltage characteristics of light-emitting diodes under optical and electrical excitation / Wen Jing, Wen Yumei, Li Ping and Li Lian // Journal of Semiconductors, 2011. Vol. 32. No. 8. DOI: <https://10.1088/1674-4926/32/8/084004>
5. Huilong Bian. Simulation Study on Optical Properties of GaN-based Blue LED / Huilong Bian, Taiping Han, Xiaoming Gu // Mechanical Engineering Science, 2023, Vol. 5. No.2. P.17-22, 2023. DOI: <https://10.33142/mes.v5i2.12718>
6. Андрійчук В.А. Дослідження перехідних процесів в електричному колі з світлодіодами / Андрійчук В.А., Костик Л.М., Філюк Я.О., Наконечний М.С. // Технічна електродинаміка, 2024. № 2. С. 87–93. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.087>

References

1. Schubert E. F. Light-Emitting Diodes. E. Fred Schubert. 2018. 672 p.
2. Bondarenko I.M., Borodin O.V., Halat O.B., Karnaushenko V.P. Solid-state electronics: a textbook for students of higher education institutions.– Kharkiv: KhNURE, 2020. – 236 с.
3. Humeniuk D. V. Installation for automated measurement of current-voltage characteristics / Electronic and Acoustic Engineering, 2019. Vol. 2. No. 4. Pp. 39–45.
4. Wen Jing. Current–voltage characteristics of light-emitting diodes under optical and electrical excitation / Wen Jing, Wen Yumei, Li Ping and Li Lian // Journal of Semiconductors, 2011. Vol. 32. No. 8. DOI: <https://10.1088/1674-4926/32/8/084004>
5. Huilong Bian. Simulation Study on Optical Properties of GaN-based Blue LED / Huilong Bian, Taiping Han, Xiaoming Gu // Mechanical Engineering Science, 2023, Vol. 5. No.2. P.17-22, 2023. DOI: <https://10.33142/mes.v5i2.12718>
6. Andriychuk V.A. Research of transient processes in an electric circuit with a LED / V.A. Andriychuk, L.M. Kostyk, Y.O. Filiuk, M.S. Nakonechnyi // Technical Electrodynamics. –2024. –Issue2. –P.87-93. –DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.087>