

АНДРІЙЧУК ВОЛОДИМИР

Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя

<https://orcid.org/0000-0001-7124-2777>e-mail: Andriychukva31410@gmail.com**НАКОНЕЧНИЙ МИРОСЛАВ**

Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя

<https://orcid.org/0000-0001-5434-7729>e-mail: nakmiron1984@gmail.com**ФІЛЮК ЯРОСЛАВ**

Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя

<https://orcid.org/0000-0003-1869-4402>e-mail: filuk.slavik.91@gmail.com**КОСТИК ЛЮБОВ**

Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя

<https://orcid.org/0000-0003-3702-8210>e-mail: kostykm1968@gmail.com**ОСАДЦА ЯРОСЛАВ**

Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя

<https://orcid.org/0000-0002-0831-8561>e-mail: osadtca@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ СВІЧЕННЯ СВІТЛОДІОДНИХ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

В роботі представлені результати дослідження енергетичних та динамічних характеристик світлодіодів FYL-3014 і ARPL-1W білого свічення з колірною температурою 3000 K та 6000 K при живленні їх П-подібними імпульсами з частотою від 1 до 400 кГц. На основі спектральних та динамічних досліджень світлового потоку показано, що їх біле свічення отримане за рахунок накладання випромінювання гетероструктури InGaN-AlGaIn в синій спектральній області з максимумом 450 нм та фотолюмінофора YAG:Ce з широкою смугою в жовто-оранжевій області спектру (500-710 нм). На основі отриманих осцилограм встановлено, що наростання та спадання світлового потоку в обох смугах описується експоненціальною залежністю. Постійні часу наростання та спадання світлового потоку в жовто-оранжевій смузі фотолюмінесценції тепло-білого СД перевищують у два рази постійні часу для холодно-білого (1050 нс). Зі збільшенням частоти імпульсного живлення постійні часу наростання та спадання світлового потоку в цій смузі для обох типів СД зменшуються до 350-400 нс при 400 кГц. При зміні амплітуди імпульсів напруги та струму постійні часу наростання та спадання світлового потоку не змінюються. Найбільш енергетично сприятливий частотний діапазон імпульсного живлення світлотехнічних установок з СД FYL-3014 і ARPL-1W білого свічення від 10 до 100 кГц і заповненням від 0,3 до 0,95.

Ключові слова: світлодіод, широтно-імпульсна модуляція, енергетична ефективність, коефіцієнт затухання.

ANDRIICHUK VOLODIMIR, NAKONECHYI MYROSLAV, FILIUK YAROSLAV, KOSTYK LIUBOV, OSADTSA YAROSLAV

Ternopil I. Pulyuy National Technical University

RESEARCH OF THE KINETICS OF GLOWING OF LED LIGHT SOURCES

Among the artificial light sources, LED sources (LED) are becoming the most common. For their power supply in lighting systems, pulsed power supply with pulse width modulation is used. To ensure high energy efficiency and reliability of LED lighting devices, it is necessary to have information about the kinetics of both electrical and light pulses. Currently, this problem is not sufficiently covered in the literature. The paper presents the results of the study of the energy and dynamic characteristics of FYL-3014 and ARPL-1W white light LEDs with a color temperature of 3000 K and 6000 K when they are powered by P-shaped pulses with a frequency from 1 to 400 kHz. Based on spectral and dynamic studies of the light flow, it is shown, that their white glow is obtained due to the superimposition of the radiation of the InGaN-AlGaIn heterostructure in the blue spectral region with a maximum of 450 nm and the YAG:Ce photoluminophore with high quantum efficiency and a wide band in the yellow-orange spectral region (500-710 nm). Based on the obtained oscillograms, it was established that the rise and fall of the light flux in both bands is described by an exponential dependence. The time constants for the rise and fall of the light flux in the yellow-orange band of photoluminescence of a warm-white LED exceed twice the time constants for cold-white (1050 ns). With an increase in the frequency of pulsed power supply, the rise and fall time constants of the light flux in this band for both types of LEDs decrease to 350-400 ns at 400 kHz. When the amplitude of the voltage and current pulses changes, the rise and fall time constants of the light flux do not change. The most energetically favorable frequency range of pulsed power supply of lighting installations with FYL-3014 and ARPL-1W LEDs of white light is from 10 to 100 kHz and filling from 0.3 to 0.95.

Key words: LED, pulse width modulation, energy efficiency, attenuation coefficient.

Вступ. Імпульсне живлення світлодіодних джерел світла (СД) з широтною модуляцією імпульсів стало найбільш поширеним в освітлювальних системах. Це дозволяє здійснювати керування їх яскравістю, змінюючи ступінь заповнення імпульсу напруги, використовуючи уже відомі та доступні технічні засоби [1–3]. Також важливим питанням є використання СД в якості джерел світла для роботи локальних системах зв'язку від дуже короткої (<1 м) до середньої відстані (5 км), а також для моніторингу автомобільних потоків [4, 5]. Для вибору оптимальної частоти імпульсного живлення світлодіодних джерел світла необхідно мати інформацію про кінетику їх електротехнічних та світлотехнічних характеристик. Проте дана проблема в

літературних джерелах висвітлена обмежено. В роботах [6–8] представлені результати дослідження загасання випромінювання світлодіодів вузького спектру свічення, які використовувались для комутації у видимому випромінюванні. Також проведено аналіз впливу часу життя носіїв заряду на ефективність випромінювання світлодіодів. Розглянуто питання оптимізації та більш точного визначення параметрів компонентів електронних схем імпульсного живлення СД.

Дана робота є продовженням досліджень перехідних процесів в електричному колі з світлодіодами при живленні П-подібними імпульсами [9–11]. Її метою є проведення дослідження кінетики випромінювання СД білого свічення при імпульсному живленні з широтно-імпульсною модуляцією та визначення впливу частоти та амплітуди імпульсів на кінетичні та енергетичні параметри світлового потоку світлодіодів. На основі отриманих результатів визначити найбільш енергетично сприятливий та технічно доступний частотний діапазон імпульсного живлення світлотехнічних установок з даними джерелами світла. Для дослідження було взято комерційно доступні СД FYL-3014 і ARPL-1W, потужністю 1 і 3 Вт і колірною температурою 3000 К та 6000 К. Їх живлення здійснювали П-подібними імпульсами з частотою від 1 до 400 кГц з широтною модуляцією з заповненням від 0,3 до 0,95.

Експериментальна установка

Вимірювання спектральних та динамічних характеристик світлодіодів проводилися на експериментальній установці, блок-схема якої приведена на рис. 1.

Для дослідження спектрального розподілу СД та виділення окремих ділянок спектру використовували монохроматор УМ-2. Світловий імпульс вимірювався фотоприймачем (5), в якості якого використовували фотоелектронний помножувач (ФЕП) ФЕУ-85. Сигнал від ФЕП поступав на операційний підсилювач (11), який працював в режимі перетворювача струм–напруга. Керування роботою монохроматора здійснювали за допомогою ARDUINONANO (12).

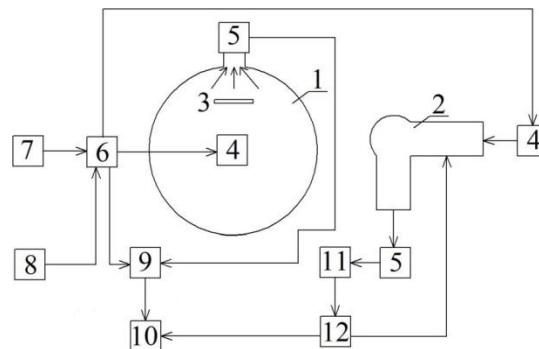


Рис. 1. Блок-схема досліджуваної установки: 1 – інтегральний фотометр; 2 – монохроматор УМ-2; 3 – екран; 4 – досліджуване джерело світла; 5 – фотоприймач; 6 – комутуючий пристрій; 7 – регульоване джерело постійної напруги SW3010D; 8 – генератор SIGLENT SDG 1050; 9 – осцилограф SEA C8-22M/1; 10 – персональний комп'ютер; 11 – перетворювач струм – напруга; 12 – блок обробки вхідних сигналів та керування роботою монохроматора УМ-2

Для дослідження енергетичних характеристик джерело світла (4) поміщалося в інтегральний фотометр (1). Електричний сигнал від фотоприймача (5) передавався на цифровий осцилограф SEAC8-22M/1 (9). Для забезпечення імпульсного живлення СД було використано регульоване джерело постійної напруги SW3010D (7), генератор сигналів SDG 1050 (8) і електронний ключ (6), який дозволяв комутувати струм до 10 А і напругу до 100 В. Це дозволяло живити джерела світла як постійним струмом, так і в імпульсному режимі з частотою імпульсів до 500 кГц з різним коефіцієнтом заповнення. Контроль струму та напруги живлення, амплітуду й тривалість імпульсів здійснювали за допомогою цифрового осцилографа SEAC8-22M/1. Обробку та збереження результатів вимірювань здійснювали за допомогою персонального комп'ютера.

Результати досліджень та їх обговорення

Дослідження кінетики наростання та спадання світлового потоку проводили для СД, в яких для одержання білого свічення використали випромінювання гетероструктури InGaN-AlGaN (450 нм) та фотолюмінофор з високою квантовою ефективністю та широкою смугою в жовто-оранжевій області спектра (500-710 нм) (рис. 2). Хімічний склад та кінетичні параметри світлодіодних люмінофорів виробники не вказують, хоча більшість із них використовують в якості люмінофора ітрій-алюмінієвий гранат, легований церієм. Максимум його випромінювання знаходиться при 550-560 нм. Модифікуючи його добавками гадолінію або галію, добиваються зміщення спектра люмінесценції в довгохвильову або короткохвильову сторону відповідно [3]. Синє свічення гетеропереходу, що збуджує свічення люмінофора, в сумі з ним дають холодно-біле або тепло-біле випромінювання. Для досягнення високого значення індексу кольоропередачі також використовують двоколірні та триколірні фотолюмінофори, але при цьому втрачається їх енергетична ефективність [3–5].

На основі аналізу спектру електролюмінесценції досліджуваних СД широку смугу в жовто-оранжевій області було розбито на дві елементарні смуги з максимумами 560 та 628 нм (рис. 2). Тобто в даних СД виробник міг використати двоколірний люмінофор: жовтий YAG:Ce та невідомий червоний. Для

перевірки даного припущення були проведені дослідження кінетики свічення в кожній із окремих смуг, які виділяли за допомогою монохроматора. На рис. 3 та рис. 4 показані осцилограми наростання та спадання світлового потоку в виділених спектральних областях. Тут також приведені графіки $\ln(1-I/I_0)=f(t)$ та $\ln(I/I_0)=f(t)$. Із них видно, що кінетика світлового потоку описується експоненціальною залежністю, а на кривій затухання можна виділити дві складові – швидку і повільну. В табл. 1 наведені значення постійних наростання та затухання в кожній із виділених смуг при частоті імпульсів 50 кГц та амплітуді 3,4 В.

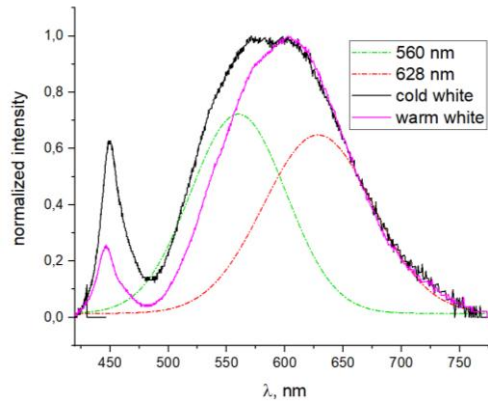


Рис. 2. Спектри свічення: 1) холодно-білого та 2) тепло-білого СД

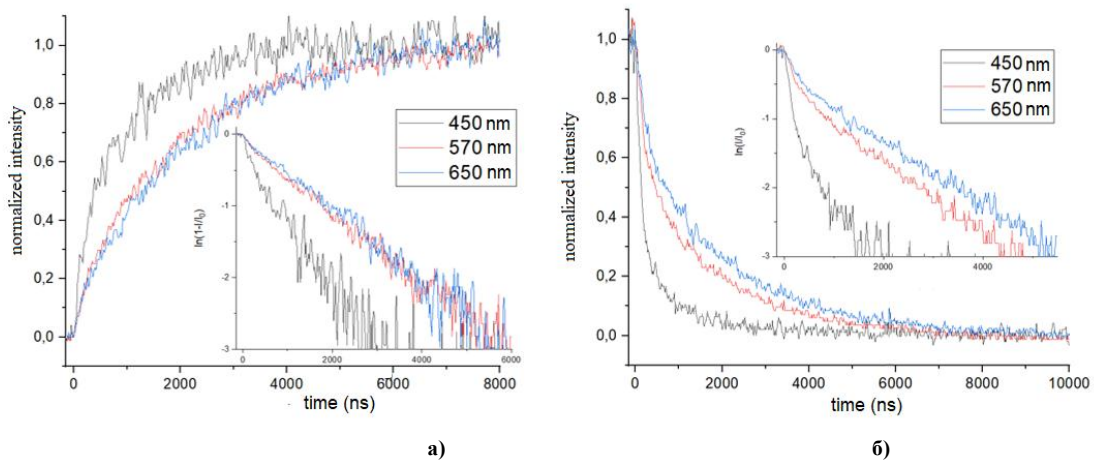


Рис. 3. Передній (а) та задній (б) фронти імпульсу світлового потоку для виділених спектральних областей тепло-білого СД ARPL-1W

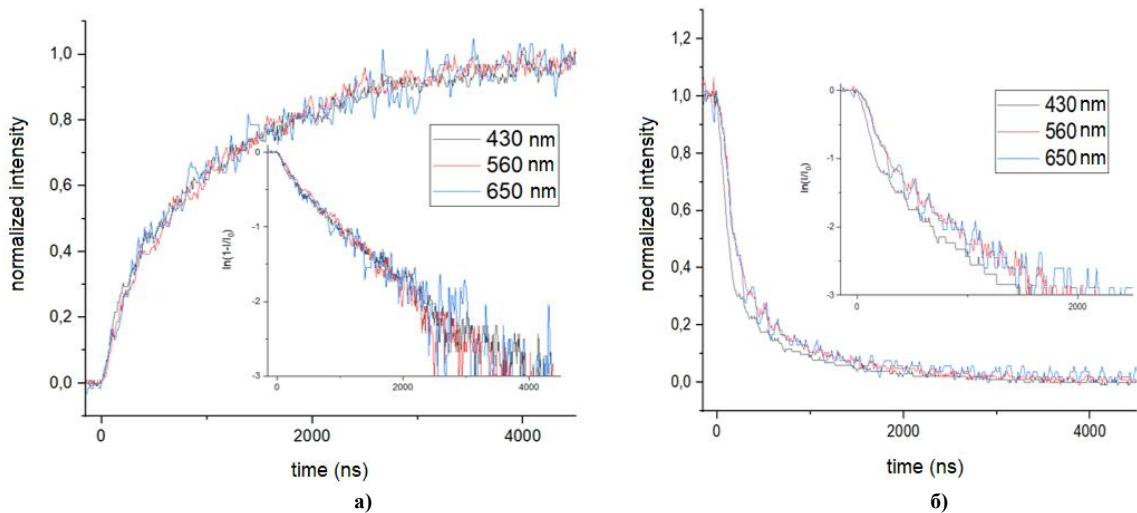


Рис. 4. Передній (а) та задній (б) фронти імпульсу світлового потоку для виділених спектральних областей холодно-білого СД ARPL-1W

Кінетика наростання світлового потоку як для синьої, так і для жовто-оранжевої смуг обох типів СД має одну складову. Постійні часу наростання світлового потоку в синій смузі для обох типів СД співпадають і змінюються в межах 1200–1250 нс. Швидкі та повільні складові в їх затуханні є дуже близькими і їх постійні часу лежать в межах 170–180 та 800–850 нс, відповідно.

Таблиця 1

Значення постійних наростання та затування в кожній із виділених смуг при частоті імпульсів 50 кГц та амплітуді 3,4 В

Тип	Довжина хвилі (нм)	спадання		наростання	
		τ_1 , (нс)	τ_2 , (нс)	τ_1 , (нс)	τ_2 , (нс)
Тепло-білий 1Вт	452	180	800	1250	
	560	500	1900	2200	
	628	500	1950	2250	
Холодно-білий 1Вт	460	170	850	1200	
	560	300	900	1200	
	628	300	950	1230	

Дослідження кінетики світлового потоку в жовто-оранжевій частині спектру 500-700 нм, яка пов'язана з одно- або двокомпонентним люмінофором, проводили у двох спектральних областях 560 ± 5 і 630 ± 10 нм, які виділялись за допомогою монохроматора. Постійні часу наростання і затування в цих смугах для обох типів СД суттєво відрізняються. Для тепло-білого СД постійні наростання світлового потоку для обох смуг співпадають і змінюються в межах 2200-2250 нс, а для холодно-білого вони теж співпадають і змінюються в межах 1200-1250 нс (рис.3,а) та (рис. 4,а)

Для обох типів СД спадання світлового потоку в обох смугах має дві складові швидку та повільну. Для тепло-білого СД постійні часу швидкої складової для обох смуг є дуже близькими і лежать в межах 500–550 нс (рис. 3,б) Те ж саме спостерігається і для холодно-білого СД, постійна їх часу знаходиться в межах 300–350 нс (рис. 4,б). Повільні складові обох смуг для тепло-білого і холодно-білого СД суттєво відрізняються – 2200–2250 та 1200–1250 нс, відповідно(рис. 3,б та 4,б)

Було виявлено, що кінетика свічення досліджуваних СД залежить від частоти імпульсного живлення. Для цього були проведені вимірювання наростання та спадання світлового потоку в усіх виділених спектральних ділянках при зміні частоти імпульсів від 1 до 400 кГц.

На рис.5 приведені частотні залежності постійної часу наростання світлового потоку для тепло-білого (а) та холодно-білого (б) СД ARPL-1W. Із зростанням частоти τ для обох смуг в жовто-оранжевій області спектру зменшується з 2250 нс при 10 кГц до 480 нс при 400 кГц для тепло-білого СД та з 1300 до 400 нс для холодно-білого СД. В синій області для обох СД τ спадає від 1250 до 450 нс.

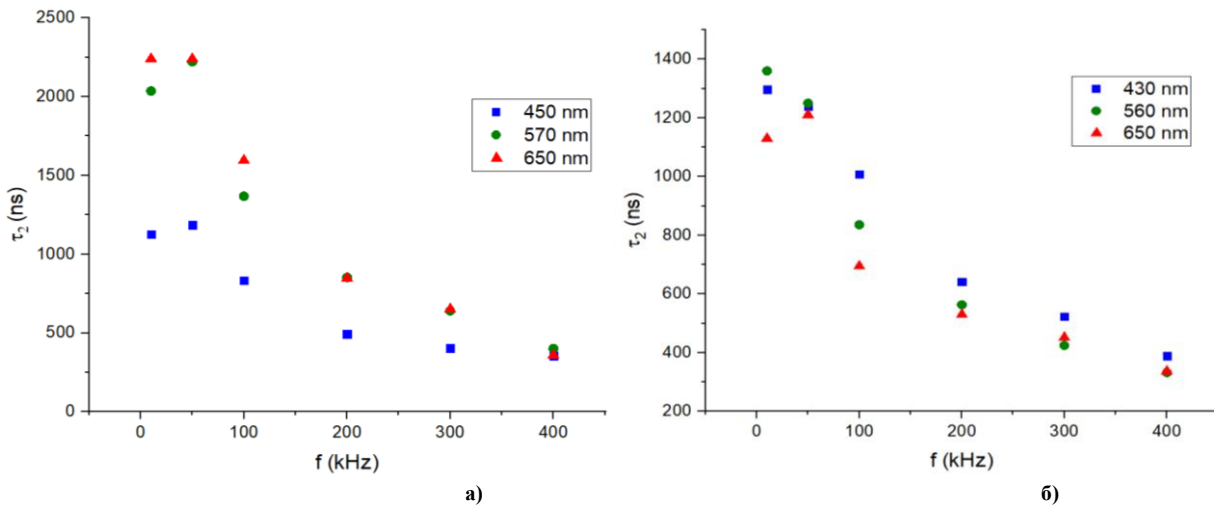


Рис. 5. Частотні залежності постійної часу наростання світлового потоку тепло-білого (а) та холодно-білого (б) СД ARPL-1W

Частотні залежності спадання світлового потоку для обох типів світлодіодів приведені на рис. 6 та рис. 7. Стала часу спадання повільної складової для обох виділених смуг при збільшенні частоти від 10 до 400 кГц зменшується з 2050 до 450 нс для тепло-білого та з 1050 до 400 нс для холодно-білого СД. Постійна швидкої складової теж спадає із ростом частоти з 550-600 до 200-230 нс для тепло-білого та з 300-320 до 180-200 нс для холодно-білого СД. В синій області спектру τ повільної складової із збільшенням частоти зменшується від 850 до 500 нс для тепло-білого СД та від 1050 до 400 нс для холодно-білого. Зміна постійної спадання швидкої складової для обох типів СД є дуже близькою і відбувається в межах від 180 до 120 нс.

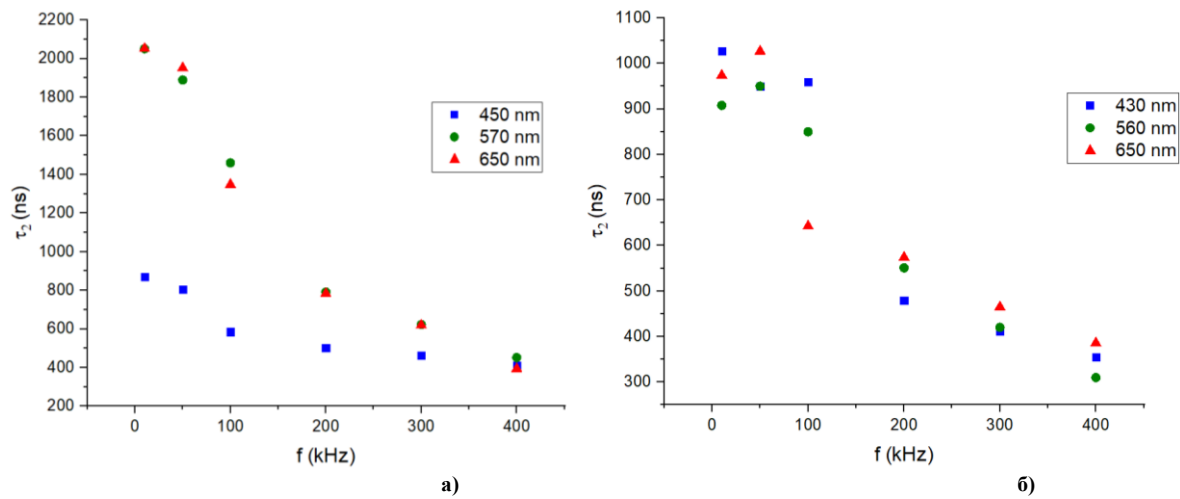


Рис. 6. Частотні залежності постійної часу спадання повільної складової світлового потоку тепло-білого (а) та холодно-білого (б) СД ARPL-1W

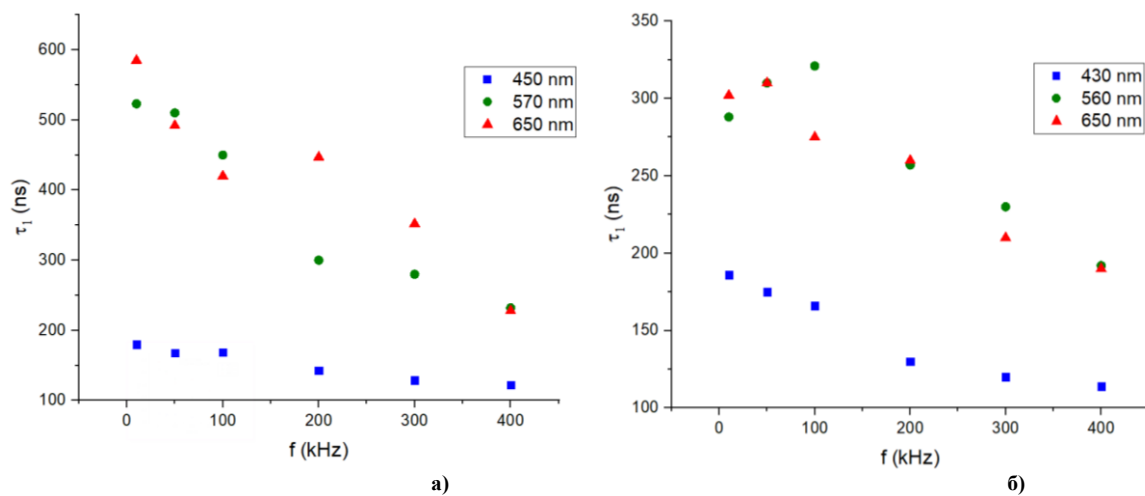


Рис. 7. Частотні залежності постійної часу спадання швидкої складової світлового потоку тепло-білого (а) та холодно-білого (б) СД ARPL-1W

Були проведені експериментальні дослідження впливу амплітуди імпульсів напруги та струму на кінетику свідчення досліджуваних СД. На рис. 8 та рис. 9 наведені залежності постійної часу наростання та спадання світлового потоку СД від амплітуди імпульсів напруги та струму. У жовто-оранжевій області для тепло-білого СД τ наростання світлового потоку у вибраних спектральних областях із збільшенням амплітуди імпульсів напруги та струму змінюється в межах 2200 ± 100 нс, а для смуги в синій області – в межах 1150 ± 50 нс (рис. 8,а). Для холодно-білого СД із зростанням амплітуди імпульсів τ наростання світлового потоку майже не міняється, хоча відносний розкид експериментальних даних є більший 1220 ± 80 нс (рис. 8,б).

Постійна часу повільної складової спадання світлового потоку в жовто-оранжевій області для тепло-білого СД змінюється в межах 1900 ± 100 нс, а в синій області 800 ± 50 нс. Для холодно-білого СД як в синій, так і в жовто-оранжевій частині спектру вона зростає від 850 ± 50 до 1020 ± 50 нс (рис. 9).

З аналізу кінетики світлового потоку у двох виділених спектральних смугах 560 та 628 нм, отриманих в результаті розкладання жовто-оранжевої смуги тепло-білого та холодно-білого СД, і його поведінки із зміною частоти імпульсного живлення та амплітуди імпульсів можна стверджувати, що в білих СД типу FYL-3014 і ARPL-1W виробник використав однокомпонентний люмінофор YAG:Ce. Зміщення максимуму його свідчення в короткохвильову область спектру, що має місце для холодно-білого СД, досягалося внесенням Ga і підбиранням значення x в $Y_3Al_{5-x}Ga_xO_{12}:Ce$.

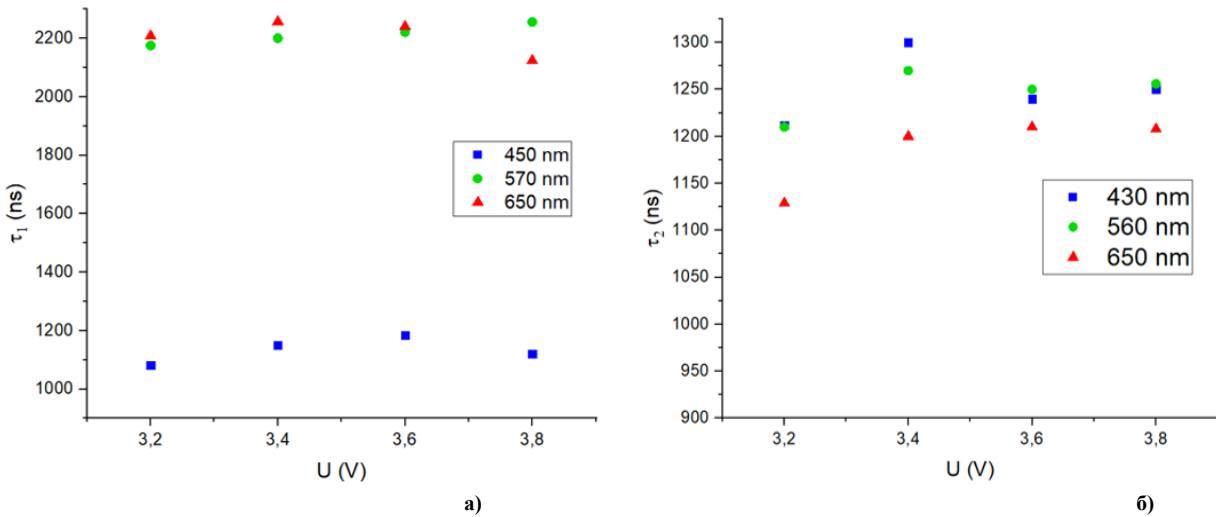


Рис. 8. Залежність постійної часу наростання світлового потоку від амплітуди імпульсів напруги та струму тепло-білого (а) та холодно-білого (б) СД.

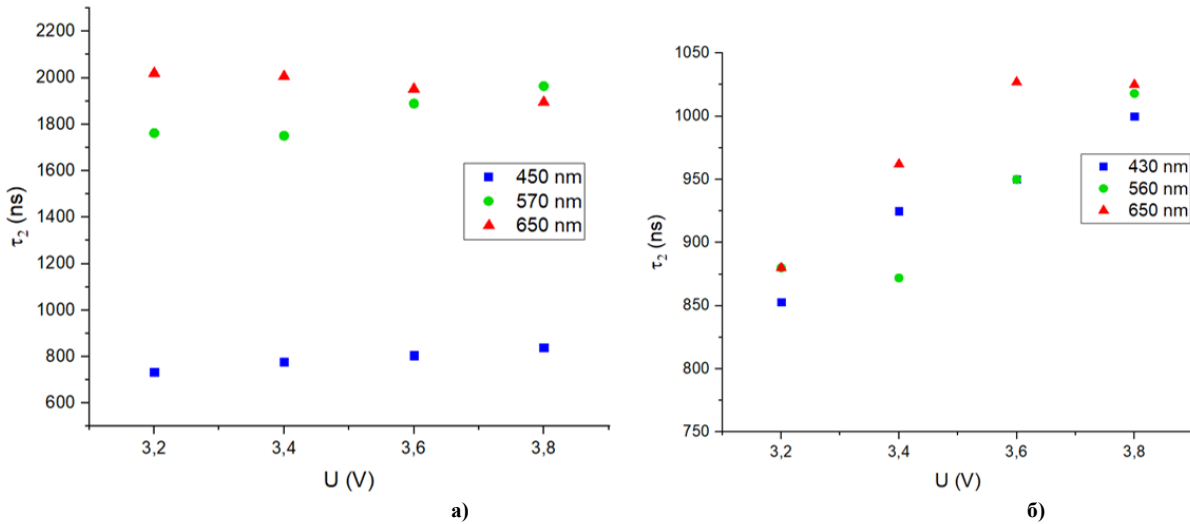


Рис. 9. Залежність постійної часу спадання світлового потоку від амплітуди імпульсів напруги та струму тепло-білого (а) та холодно-білого (б) СД

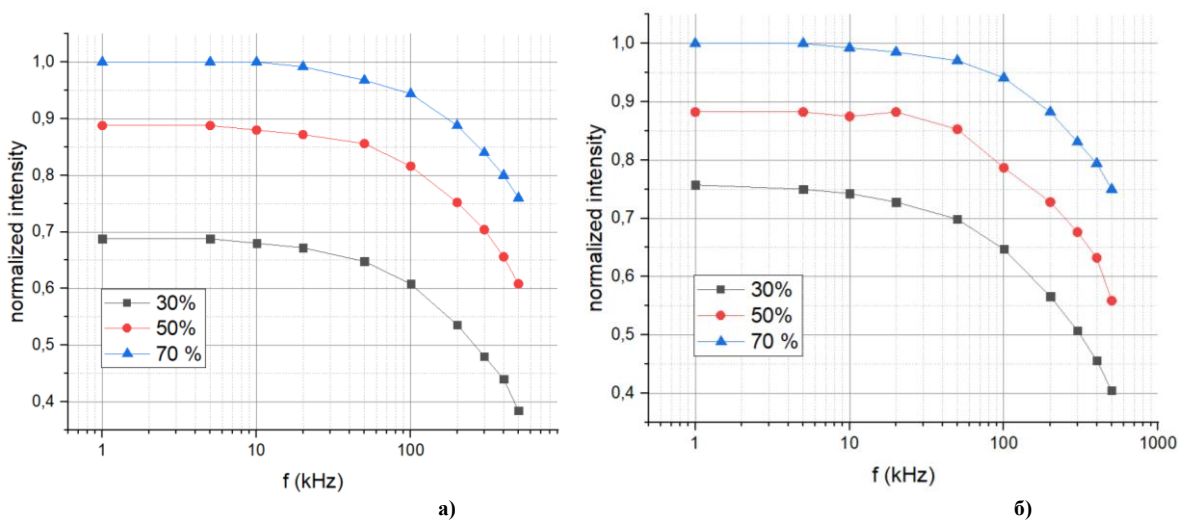


Рис. 10. Залежність світлового потоку а) тепло-білого та б) холодно-білого СД від частоти та ступеня заповнення імпульсів

В доповнення до досліджень кінетики свічення вибраних СД було проведено дослідження зміни величини світлового потоку від частоти імпульсів та ступеня їх заповнення. Починаючи від 1кГц і до 10 кГц світловий потік не змінював свого значення. Це добре корелює із постійною часу наростання. Менших змін світловий потік СД зазнає при заповненні 70%, ніж при 50 та 30%. При підвищенні частоти імпульсів до 100

кГц і заповненні 70% потік спадає на 5%, тоді як при 50 та 30% він спадає на 10%. Таким чином, на основі аналізу кінетики свічення білих СД типу FYL-3014 і ARPL-1W та частотної залежності їх світлового потоку випливає, що найбільш енергетично сприятливим частотним діапазоном їх імпульсного живлення є діапазон 10–100 кГц. Застосування запропонованих режимів дозволить наблизити час експлуатації елементів схем ШІМ живлення до часу експлуатації головного елемента схеми – світлодіода.

Висновки. На основі спектральних та динамічних досліджень світлового потоку СД FYL-3014 і ARPL-1W показано, що їх біле свічення отримане за рахунок накладання власного випромінювання гетероструктури InGaN-AlGaIn в синій спектральній області з максимумом 450 нм та фотолюмінофора YAG:Ce з високою квантовою ефективністю та широкою смугою в жовто-оранжевій області спектра (500–710 нм).

Наростання та спадання світлового потоку описується експоненціальною залежністю. Постійна часу наростання та спадання світлового потоку в жовто-оранжевій смузі фотолюмінесценції тепло-білого СД перевищує у два рази постійну часу для холодно-білого (1050 нс). Зі збільшенням частоти імпульсного живлення постійна часу наростання та спадання світлового потоку в цій смузі для обох типів СД зменшується до 350–400 нс при 400 кГц.

Кінетичні параметри світлового потоку в синій смузі залишаються однаковими для обох типів СД. Зі збільшенням частоти імпульсів постійна часу наростання та спадання світлового потоку зменшується в однаковій мірі для обох типів СД.

Із зміною амплітуди імпульсів напруги та струму постійні часу наростання та спадання світлового потоку у жовто-оранжевій та синій спектральній області для обох типів світлодіодів залишаються постійними в межах розкиду експериментальних результатів вимірювань.

Найбільш енергетично сприятливий та технічно доступний частотний діапазон імпульсного живлення світлотехнічних установок з джерелами світла FYL-3014 і ARPL-1W тепло-білого та холодно-білого свічення є діапазон від 10 до 100 кГц заповненням від 0,3 до 0,95.

References

1. Narendran N., Gu Y., Freyssonier J.P. Solid-state lighting: failure analysis of white LEDs. *J. Cryst. Growth*. 2004. 268, No 3-4. P. 449–456. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2004.04.071>.
2. Baumgartner H. *Metrology for III-V optosemiconductors*, Dissertation. Espoo: Aalto University, 2017.
3. Hegedüs J., Hantos G., Poppe A. Lifetime modelling issues of power light emitting diodes. *Energies*. 2020. 13, No 13. P. 3370. <https://doi.org/10.3390/en13133370>.
4. Schubert E. *Light-Emitting Diodes* (2nd ed.). Cambridge University Press, 2006. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511790546>.
5. Rehman S.U., Ullah S., Chong P.H.J. Visible light communication: A system perspective – overview and challenges. *Sensors*. 2019. 19, No 5. P. 1153. <https://doi.org/10.3390/s19051153>.
6. Holly Haggart J.I., Ghataora S.S., Trinito V. Study of the luminescence decay of a semipolar green light-emitting diode for visible light communications by time-resolved electro-luminescence. *ACS Photonics*. 2022. 9, No 7. P. 2378–2384. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.2c00414>.
7. Meng X., Wang L., Hao Z. et al. Study on efficiency droop in InGaIn/GaN light-emitting diodes based on differential carrier lifetime analysis. *Appl. Phys. Lett.* 2016. 1
8. Aeloiza E., Kim J.-H., Enjeti P., Ruminot P. A real time method to estimate electrolytic capacitor condition in PWM adjustable speed drives and uninterruptible power supplies. 2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference, Dresden, Germany, 2005. P. 2867–2872. <https://doi.org/10.1109/PESC.2005.1582040>.
9. Andriichuk V., Nakonechnyi M., Osadtsa, Ya., Filiuk Ya. Study of LED light sources in the case of pulsed power supply. *Technical electro-dynamics*. 2021. No 1. P. 68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.01.068>.
10. Andriichuk V.A., Nakonechnyi M.S., Filiuk Ya.O. Kinetics of narrow-spectrum LED glow under pulsed power. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2023. V. 26, No 2. P. 230–235.
11. Andriichuk Volodimir, Nakonechnyi Myroslav, Filiuk Yaroslav, Osadtsa Yaroslav, Xinzhong Gao. Kinetics of leds white lighting under pulse power supply. ICAAEIT 2021, 15-17 December 2021. Tern.: TNTU, Zhytomyr «Publishing house „Book-Druk“» LLC, 2021. P. 33–39.