

ОЦІНКА СТОРОННІХ ДЖЕРЕЛ ШУМУ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ШУМОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОДІОДІВ

Ю. М. Ільчук¹, А. Е. Литвин¹, Д. К. Богомолов^{1,2}, В. В. Іванова¹,
Г. Є. Монастирський¹, У. Т. Шварц²

¹ Навчально-науковий Фізико-технічний інститут

² Технологічний університет Хемніца, ФРН

Анотація

Проведено оцінку впливу сторонніх джерел шуму в схемах вимірювання шумів світлодіодів на основі стабілізованого джерела струму та фотодіоду з трансімпедансним підсилювачем.

Встановлено, що флуктуації струму СД, що задається програмованим джерелом струму LT3092, в першу чергу визначаються флуктуаціями напруги його джерела живлення.

Показано, що при кімнатній температурі фоновий фотонний шум в схемі з InGaAs фотодіодом, визначає еквівалентну потужність шуму (ЕПШ), на 4 порядки меншу, ніж ЕПШ, зумовлену внутрішніми шумами фотодіода, а для Si фотодіода, навіть з великою площею чутливого елемента 1 см^2 , є ще на два порядки меншим. Цей шум є нехтовно малим і може не враховуватись при оцінці спектру шуму сигналу світлодіоду, детектованого у вимірювальній схемі.

Ключові слова: шумові характеристики, рівноважний шум, фоновий фотонний шум

Вступ

Інтерес до вимірювання шумових характеристик світлодіодів (СД) зумовлений вимогами до якості сигналу в прецизійних застосуваннях, наприклад, біосенсориці. Крім того, шумові характеристики є чутливим інструментом для оцінки дефектності структур та ступеню старіння [1].

Очевидно, що для коректного вимірювання власне шумів світлодіодів слід врахувати вплив сторонніх джерел шуму, що не пов'язані безпосередньо із процесом вимірювання сигналу СД. Такими джерелами є джерело струму СД та фонове теплове випромінювання. Перше спричиняє флуктуації струму через світлодіод, і як результат, флуктуації потоку випромінювання. Друге — появу додаткового фотонного шуму, який є результатом флуктуацій теплового потоку фотонів від оточуючого середовища та від самого СД. Потужність цього шуму залежить як від температури, так і від спектрального діапазону чутливості ФД. Оцінка шуму джерела струму та фонового фотонного шуму є необхідним кроком у виборі стабілізованого джерела струму з одного боку та детектора випромінювання та його температурного режиму — з іншого.

В роботі ставилася за мету оцінка впливу сторонніх джерел шуму на вимірювання флуктуацій оптичного сигналу світлодіода.

1. Схема вимірювання шумів світлодіодів

Принципову схему вимірювання шумів світлодіодів представлено на Рис. 1. Вона містить стабілізоване джерело струму, що живить світлодіод, та фотодатчик для реєстрації випромінювання. Сам фотодатчик складається із фотодіоду та схеми вимірювання струму фотодіоду.

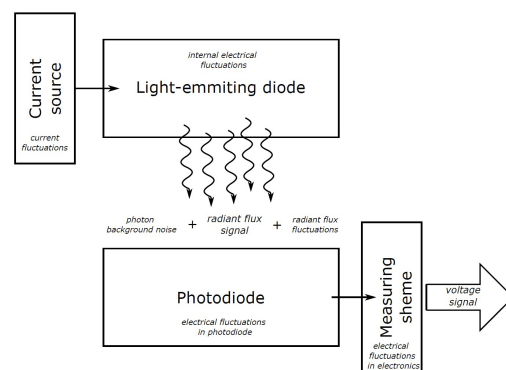


Рис. 1. Принципова схема вимірювання шумів світлодіодів

При цьому компоненти схеми вимірювання мають бути вибрані так, щоб сторонні джерела струму або спричиняли нехтовно малий вплив на флуктуації випромінювання СД, або параметри шуму, які визначаються цими компонентами, були принаймні контрольованими і передбачуваними.

Серед джерел всіх шумів, які реєструє схема ви-

мірювання, можна виділити власні і сторонні. До власних відносимо внутрішні електричні шуми СД, флуктуації інтенсивності оптичного сигналу СД, внутрішні шуми фотодетектора і схеми вимірювання струму/напруги ФД (Рис. 1). До сторонніх джерел шуму відносимо, по-перше, флуктуації струму через світлодіод [2], а по-друге, флуктуації інтенсивності світлового потоку, що зумовлені частиною теплового випромінювання від СД та оточуючого середовища, яке потрапляє в спектральний діапазон фотодетектора.

2. Шуми джерела струму через світлодіод

2.1. Флуктуації струму через СД, що живиться за схемою струмового дзеркала

Проілюструємо вплив на флуктуацій струму через СД на прикладі схеми струмового дзеркала (Рис. 2), що реалізована в керованому напругою джерелі струму [3]. Струм через СД D3 визначається за формулою:

$$i_{\text{вих}} = V_3 \frac{R_{s2}}{R_{s1} \cdot R_{s3}}$$

Неусувним джерелом шуму в лівому плечі струмового дзеркала є шум Найквіста на резисторах R_{s1} і R_{s2} та дробовий шум. Для типової робочої напруги $V_3 = 1$ В і струму в лівому плечі 500 мкА їх спектральні щільності становлять $4k_B T(1/R_{s1} + 1/R_{s2}) \approx 2 \cdot 10^{-23}$ А²/Гц і $2qi = 1.6 \cdot 10^{-22}$ А²/Гц, відповідно. В правому плечі вони мультиплікуються на фактор R_{s2}^2/R_{s1}^2 і результат становить $23 \cdot 10^{-18}$ А²/Гц, що значно більше ніж спектральна щільність дробового шуму струму 180 мА в правому плечі і шуму Найквіста на резисторі R_{s3} . Дисперсія флуктуацій струму тоді порядку $23 \cdot 10^{-18} \Delta f_{\text{еф}} \text{ А}^2$, де ефективна смуга пропускання схеми визначається найвужчою смугою пропускання схем підключення операційних підсилювачів X_1 та X_2 разом із частотами зрізу MOSFET транзисторів Q_1 та Q_3 . Для обох транзисторів ці частоти порядку 1 МГц, а найменша $\Delta f_{\text{еф}} = (R_2 C_1)^{-1} \approx 10^5$ Гц зумовлена схемою підключення операційного підсилювача X_1 . Тому флуктуації струму, обумовлені фундаментальними неусувними причинами, становлять близько $\sqrt{23 \cdot 10^{-18+5}} \approx 1.5$ мкА.

Значно більший вплив на флуктуації струму становлять флуктуації напруги V_{cc} джерела живлення схеми. Для RS-15-5, що використовувалося в [3], флуктуації напруги становили 80 мА, а отже флуктуації струму в правому плечі $80/(R_{s3} + \rho_{\text{д3}})$, де $\rho_{\text{д3}}$ — диференціальний опір СД при струмі 180 мА. Таким чином, ключовим фактором зменшення шумів струму через СД є малошумне джерело напруги у вигляді двополюсника V_3 за схемою підключення, що в ідеалі включає тільки один резистор R_{s3} (див. вставку на Рис. 1), який визначає рівень струму і «репрезентує» неусувні фундаментальні шуми. Ін-

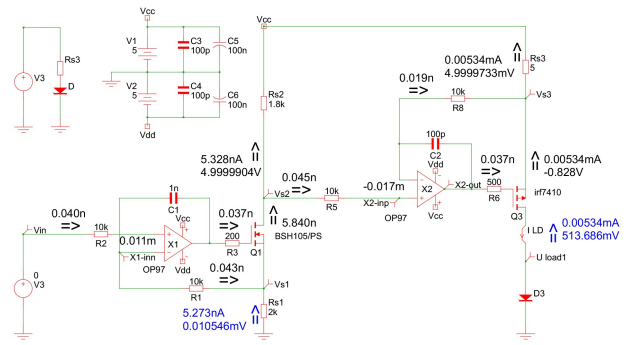


Рис. 2. Живлення СД за схемою струмового дзеркала, реалізованою в [3]. Показано симуляцію значень напруги і струму в ключових точках схеми при нульовому значенні напруги на вході керованого напругою джерела струму

ший варіант — це використання малошумного двополюсного джерела струму.

2.2. Флуктуації струму через СД, що живиться від двополюсного програмованого джерела струму LT3092

Програмоване джерело струму LT3092 [4] позиціонується виробником як джерело із ультранизьким шумом. Вихідний струм джерела задається формулою (Рис. 3):

$$i_{\text{out}} = i_{\text{set}} \frac{R_{\text{set}}}{R_{\text{out}}} + i_{\text{set}} \quad (1)$$

Тож i_{out} визначається виключно співвідношенням між двома резисторами $R_{\text{set}}/R_{\text{out}}$. Фундаментальним джерелом шуму є тепловий шум резисторів і дробовий шум через піни SET та OUT [4]. Оскільки $R_{\text{set}} \gg R_{\text{out}}$, домінуючий внесок в шум вносить тепловий шум Джонсона-Найквіста генерований на резисторі R_{set} . Згідно (1) дробовий шум через пін OUT повністю визначається спектральною щільністю референсного струму через пін SET (Рис. 3). Його значення практично збігається із значенням генерованого дробового шуму $2qi_{\text{set}}$.

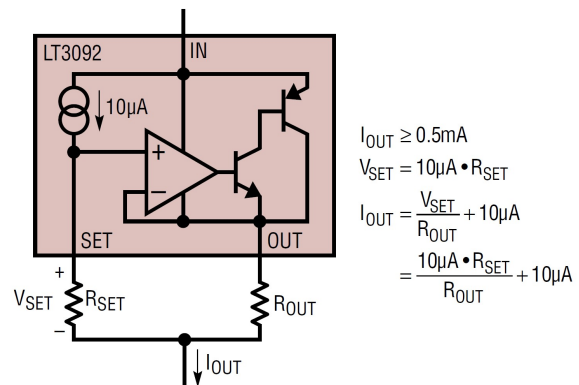


Рис. 3. Схема програмованого джерела струму LT3092

Ще одне джерело шуму визначається флуктуаціями напруги живлення джерела $V_{cc} = V_{in}$. Згідно із [4] різниця між значенням напруги на пінах IN та OUT практично не впливає на різницю потенціалів $V_{offset} = V_{out} - V_{set}$ (Рис. 3. Це і обумовлює стабільність струму i_{out} , який є монотонною функцією V_{offset} . Подамо формулу для струму i_{out} , таким чином, щоб можна було врахувати три основні джерела шуму, а саме зумовлені дробовим шумом, тепловим шумом резистора R_{set} і флуктуації напруги живлення джерела $V_{cc} = V_{in}$. Перепишемо (1) у вигляді:

$$i_{out} = \frac{V_{set} \cdot i_{out}}{R_{out} \cdot i_{out}} + i_{set} \quad (2)$$

Оскільки $i_{out} \gg i_{set}$, то тоді (2) переписеться як:

$$i_{out} = \frac{(V_{out} - V_{offset})}{V_{out}} i_{out} + i_{set} \Rightarrow \\ \Rightarrow i_{out} = i_{set} \frac{V_{out}}{V_{offset}} = i_{set} \frac{V_{set} + V_{offset}}{V_{offset}} \approx i_{set} \frac{V_{set}}{V_{offset}}$$

Тоді внаслідок незалежності дії всіх трьох джерел шуму дисперсія вихідного струму становить:

$$\sigma_{i_{out}}^2 = i_{out}^2 \left(\frac{\sigma_{i_{set}}^2}{i_{set}^2} + \frac{\sigma_{V_{set}}^2}{V_{set}^2} + \frac{\sigma_{V_{offset}}^2}{V_{offset}^2} \right) \quad (3) \\ = i_{out}^2 \left(\frac{2q\Delta f}{i_{set}} \left(1 + \frac{2k_B T}{U_{set}} \right) + \frac{\sigma_{V_{offset}}^2}{V_{offset}^2} \right)$$

Тут $\sigma_{i_{set}}^2 = 2qi_{set}$, а $\sigma_{V_{set}}^2 = 4k_B T R_{set}$ відповідно, q — елементарний заряд електрону, Δf_{ef} — ефективна ширина смуги пропускання приладу, що вимірює шуми або ширина смуги флуктуацій вихідного струму LT3092, залежно від того, що є меншим. Остання не наводиться в [4] в явному вигляді, проте судячи із даних для спектральної ширини шумів референсного джерела, її можна прийняти рівною 100 кГц, $U_{set} = qV_{set} \approx U_{out} = qR_{out}i_{out} = 1$ еВ для $i_{out} \approx i_{source} = 100$ мА.

Перші два члени в виразі (3) відповідають природним неусувним шумам і для наведених параметрів та температурі 20 °С ($k_B T = 26$ меВ) дають значення $\sigma_{i_{out}}^2 = (5.7$ мкА)². Через вище на 2 порядки значення мультиплікативного фактору $R_{set}/R_{out} \gg R_{s2}/R_{s1}$, це значення більше, ніж для першої схеми.

Зауважимо, що флуктуації фундаментальних шумів фактично пропорційні вихідному струму оскільки відношення $2k_B T/U_{set} \ll 1$ для всіх можливих значень вихідного струму джерела.

Для оцінки впливу останнього члена в (3) було використано симуляцію в пакеті LTspice [5] залежності V_{offset} від вхідної напруги V_{in} . Перша залежить від останньої лінійно $V_{offset} = \alpha V_{in} + \beta$ із коефіцієнтом $\alpha = 2.5$ мкВ/В. Взяти, як і для попереднього випадку, флуктуації напруги 80 мА, отримаємо значення флуктуації $\delta V_{offset} = 0.2$ мкВ. Значення $V_{offset} = 150$ мкВ, якому відповідає струм джерела 100 мА можна отримати із залежності (Рис. 4). Корисно порівняти внески в дисперсію фундаменталь-

них шумів і шуму, що привноситься джерелом живлення, порівнявши члени в дужках. Перший, фундаментальний за наведених вище параметрів дає значення $3.36 \cdot 10^{-9}$, другий, зумовлений флуктуаціями напруги джерела живлення, в свою чергу дає $1.77 \cdot 10^{-6}$. Внесок останнього суттєво менший, ніж для першої схеми. Проте, вже для джерела напруги із флуктуаціями менше 5мВ, внески від обох складових шуму стануть порівняні.

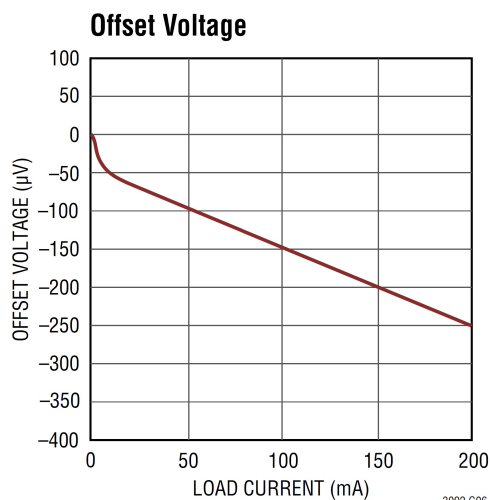


Рис. 4. Значення V_{offset} як функція вихідного струму джерела [4]

Слід зазначити, що дисперсія фундаментальних шумів може бути зменшена шунтуванням ємкістю C_{set} резистора R_{set} так, щоб зменшити $\Delta f_{ef} \propto (R_{set} C_{set})^{-1}$ до бажаного рівня. Так, зменшення Δf_{ef} до 1 кГц, має спричинити зменшення флуктуацій джонсонівського і дробового шуму в 10 разів. При цьому флуктуації джерела живлення також мають бути зменшені в 10 разів і за наведених параметрів становити приблизно 0.5 мВ, що не є унікальною і недосяжною вимогою.

3. Фоновий фотонний шум

Оцінка фонового фотонного шуму ФД [6] здійснювалась на основі розрахунку флуктуацій фонового випромінювання як випромінювання від абсолютно чорного тіла (АЧТ) при заданій температурі T (кімнатній 300 К та температурі розігрітого світлодіоду 390 К). Для детектування сигналу інфрачервоного СД з довжиною хвилі 940 нм можуть використовуватись як ФД на основі InGaAs PIN структури, чутливість $\mathfrak{R}(\lambda)$ яких лежить в інтервалі 0.8 ... 1.7 мкм, так і ФД на Si PIN, що чутливі у діапазоні 0.32 ... 1.1 мкм. За приклад взято моделі виробника Thorlabs серії PDB4xxC [7] та PDAPC2 [8], чутливість яких наведена на Рис. 5 та Рис. 6 відповідно.

Оскільки флуктуації потоку фотонів від АЧТ при кімнатній температурі для довжин хвиль, менших 25 мкм, підпорядковуються статистиці Пуассона, то дисперсія $\langle \Delta N^2 \rangle$ дорівнює середньому числу фотонів $\langle N \rangle$, тобто $\langle \Delta N^2 \rangle = \langle N \rangle$. Тому флуктуація чи-

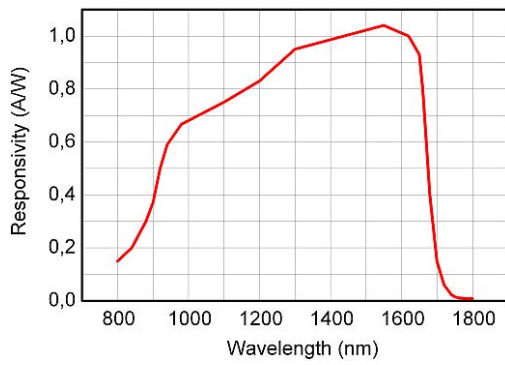


Рис. 5. Характеристика чутливості ФД PDB4xxC на основі InGaAs

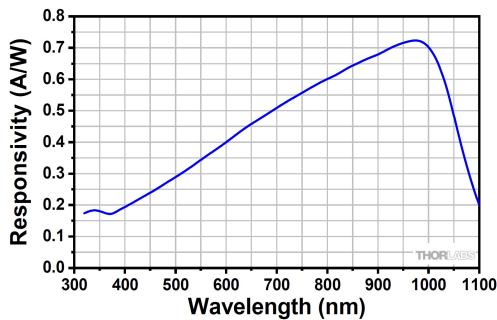


Рис. 6. Характеристика чутливості ФД PDAPC2 на основі Si

сла фотонів рівноважного теплового випромінювання дорівнює середньому числу фотонів на одиницю площі в одиниці спектрального інтервалу:

$$N(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^4} \cdot \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right)^{-1}$$

де λ — довжина хвилі, c — швидкість світла, k_B — стала Больцмана.

Тоді відповідний фотострум від потоку фотонів фонового випромінювання визначатиметься як:

$$\begin{aligned} I_{BG} &= A_{PD} \cdot q \int_{\Delta\lambda} \eta N(\lambda, T) d\lambda = \\ &= A_{PD} \int_{\Delta\lambda} \frac{hc}{\lambda} N(\lambda, T) \mathfrak{R}(\lambda) d\lambda \end{aligned}$$

оскільки квантова ефективність є залежною від λ і може бути подана через спектральну струмову чутливість $\mathfrak{R}(\lambda)$ певного ФД як $\eta = hc\mathfrak{R}(\lambda)/\lambda q$. Тут A_{PD} — площа чутливого елемента ФД, η — квантова ефективність ФД, інтегрування здійснюється по спектральному діапазону чутливості ФД $\Delta\lambda$.

Статистична природа флуктуацій фонового випромінювання викликає дробовий шум фотоструму, таким чином спектральна щільність потужності фонового фотонного шуму і середнє квадратичне значення визначаються, відповідно:

$$S_{BG} = 2qI_{BG}, \quad \langle i_{BG}^2 \rangle = 2qI_{BG}\Delta f$$

де Δf — ширина смуги підсилюючого тракту ФД. Остаточоно:

$$\langle i_{BG}^2 \rangle = 2qA_{PD}\Delta f \int_{\Delta\lambda} \frac{hc}{\lambda} N(\lambda, T) \mathfrak{R}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

Вираз (4) демонструє пропорційність фотонного шуму корню квадратному з площі та ширини смуги пропускання.

За фоновим шумом може бути оцінена еквівалентна потужність шуму (ЕПШ, Noise equivalent power, NEP) — мінімальна потужність випромінювання, яка викликає сигнал, рівний шумовому в одиничній смугі ФД. Значення ЕПШ, зумовлене фоновим фотонним шумом, розраховується за формулою

$$NEP_{BG} = \frac{\langle i_{BG}^2 \rangle^{1/2}}{\langle \mathfrak{R}(\lambda) \rangle \sqrt{\Delta f_1}} \quad (5)$$

де $\Delta f_1 = 10$ МГц. Зменшення ЕПШ можна досягти шляхом охолодження, діафрагмування — зменшення кута поля зору ФД, зменшення площі чутливої ділянки [6].

Оцінки параметрів фонового фотонного шуму проводились для PIN фотодіодів, з трансімпедансними підсилювачами, чутливих для випромінювання СД з $\lambda = 940$ нм виробника ThorLabs: на InGaAs серії PDB4xxC та PDAPC2 на Si. Зауважимо, що площа чутливого елемента першої серії ФД на 3 порядки менша за площу вибраного Si ФД. Значення Δf , імпеданс підсилювача Z_{TIG} були взяті з відповідних даташитів [7, 8]. Значення шумової напруги розраховувались як $u_{BG} = Z_{TIG} \cdot \sqrt{\langle i_{BG}^2 \rangle}$. Результати обрахунків подані у Табл. 1.

Аналіз розрахунків показує, що фоновий фотонний шум спричиняє флуктуації вихідної напруги PDB4xxC ФД на 3 порядки вищі, ніж для ФД PDAPC2, попри суттєво менший розмір A_{PD} . Зростання температури фону на 90 К збільшує їх майже на 2 порядки.

Однак оцінка ЕПШ за потужністю фонового випромінювання від АЧТ в заданому спектральному діапазоні для розглянутих фотодіодів показала, що для серії PDB4xxC $NEP_{BG} = 1.64 \cdot 10^{-4}$ пВт/ $\sqrt{\Gamma}$ ц при $T = 300$ К, що на 4 порядків менше порівняно з наданими виробником мінімальною $NEP = 3.6$ пВт/ $\sqrt{\Gamma}$ ц, приведеною до смуги пропускання 10 МГц. Це означає, що зовнішній фотонний шум не вноситиме значимих похибок в оцінку оптичного шуму СД з використанням у вимірювальній схемі InGaAs ФД, без охолодження або діафрагмування, оскільки внутрішні шуми ФД значно переважають фотонний. Для Si ФД PDAPC2 з великою площею чутливого елемента NEP_{BG} виявилась ще на 2 порядки меншою ($7.34 \cdot 10^{-6}$ пВт/ $\sqrt{\Gamma}$ ц при $T = 300$ К і $1.31 \cdot 10^{-3}$ пВт/ $\sqrt{\Gamma}$ ц при $T = 390$ К). Порівняння з наданим виробником мінімальним значенням $NEP = 71.7$ пВт/ $\sqrt{\Gamma}$ ц для цього фотодіода дозволяє нехтувати тепловим фоновим випромінюванням при оцінці шумів СД.

Таблиця 1. Обраховані параметри для ФД PDB4xxC та PDAC2 за різних температур

	InGaAs-based				Si-based	
	PDB410C		PDB440C		PDAPC2	
	$T = 300 \text{ K}$	$T = 390 \text{ K}$	$T = 300 \text{ K}$	$T = 390 \text{ K}$	$T = 300 \text{ K}$	$T = 390 \text{ K}$
A_{PD} , мм ²	$7.07 \cdot 10^{-2}$		$7.07 \cdot 10^{-2}$		100	
I_{BG} , пА	$5.09 \cdot 10^{-2}$	49.7	$5.09 \cdot 10^{-2}$	49.7	$4.07 \cdot 10^{-5}$	1.29
S_{BG} , пА ² /Гц	$1.63 \cdot 10^{-8}$	$1.59 \cdot 10^{-5}$	$1.63 \cdot 10^{-8}$	$1.59 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-11}$	$4.13 \cdot 10^{-7}$
Δf , МГц	100		15		11	
$\langle i_{BG}^2 \rangle$, пА ²	1.63	$1.59 \cdot 10^3$	0.245	$2.39 \cdot 10^2$	$1.43 \cdot 10^{-4}$	4.54
Z_{TIG} , пВ/пА	$50 \cdot 10^3$		$51 \cdot 10^3$		$1.51 \cdot 10^3$	
u_{BG} , мВ	$6.39 \cdot 10^{-2}$	1.99	$2.52 \cdot 10^{-2}$	0.79	$1.81 \cdot 10^{-5}$	$3.22 \cdot 10^{-3}$
NEP_{BG} , пВт/ $\sqrt{\text{Гц}}$	$1.64 \cdot 10^{-4}$	$5.12 \cdot 10^{-3}$	$1.64 \cdot 10^{-4}$	$5.12 \cdot 10^{-3}$	$7.34 \cdot 10^{-6}$	$1.31 \cdot 10^{-3}$

4. Висновки

Оцінка сторонніх джерел шуму в принциповій схемі вимірювання власних шумів СД показала, що:

- Флуктуації струму СД, що задається програмованим джерелом LT3092, в першу чергу визначаються джерелом напруги живлення. Теплові і дробові шуми компонентів джерела струму не є визначальними.
- Фундаментальні шуми можуть бути суттєво зменшені за рахунок звуження ефективної ширини смуги пропускання, флуктуації напруги джерела живлення менше, ніж 1 мВ можуть забезпечити рівень шуму струму LT3092 одного порядку із тепловими і дробовими.
- Фоновий фотонний шум при $T = 300 \text{ K}$ є нехтовно малим як для серії PDB4xxC фотодіодів на InGaAs, так і для PDAPC2 фотодіода на Si, спектральні чутливості кожного з яких дозволяють детектувати випромінювання інфрачервоних СД на $\lambda = 940 \text{ нм}$.
- Для чутливого у видимому діапазоні кремнієвого ФД PDAPC2, попри більшу площу чутливого елемента (на три порядки), флуктуації вихідної напруги через фоновий фотонний шум на 3 порядки менше, ніж у ФД PDB4xxC на InGaAs, чутливого в ближній інфрачервоній області. Це робить використання PDAPC2 більш доцільним для дослідження власних шумів СД на $\lambda = 940 \text{ нм}$.

Перелік використаних джерел

1. Review of Low-Frequency Noise Properties of High-Power White LEDs during Long-Term Aging /

V. Palenskis, J. Matukas, J. Glemza, S. Pralgauskaitė // Materials (Basel). — 2021. — Vol. 15, no. 1. — P. 13.

2. Schiller R., Horvath A. Generalized Johnson–Nyquist noise: white noise of temperature and pressure at the nanoscale // Physical Chemistry Chemical Physics. — 2011. — Vol. 13, no. 20. — P. 9281–9284.

3. Indirect Estimation of Thermal Regime of Operation of Power LEDs / G. Monastyrsky, V. Ivanova, D. Humeniuk, S. Bekh // 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). — 2022. — С. 119–123.

4. Analog Devices, Inc. LT3092 Data Sheet. — 2020. — [Онлайн; доступно 11.05.2023]. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/lt3092.pdf>.

5. Analog Devices, Inc. LTspice. — [Онлайн; доступно 11.05.2023]. <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>.

6. Сизов Ф. Ф. Фотоелектроника для систем видення в невидимих частках спектра. — Академпериодика, 2008. — С. 459.

7. Thorlabs, Inc. PDB4xx Series, Operation Manual. — 2021. — [Онлайн; доступно 11.05.2023]. <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PDB460C>.

8. Thorlabs, Inc. PDAPC2 Si Switchable Gain Photodetector, User Guide. — 2021. — [Онлайн; доступно 11.05.2023]. <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PDAPC2>.