На основі аналізу сучасної нормативної бази сформульовані вимоги до створюваних первинних перетворювачів (фотодіодів) та досліджено характеристики існуючих фотодіодів на основі кремнію, для вимірювання енергетичних характеристик оптичного випромінення. Показано, що основний недолік існуючих фотодіодів полягає у недостатньо широкому динамічному діапазоні, який не забезпечує лінійності енергетичної характеристики в діапазоні освітленостей 0,01 - 250000 лк. Для рішення цієї проблеми, на основі світового досвіду, запропоновано збільшення площі активної (фоточутливої) області фотодіода, відвід тепла від його поверхні в разі роботи при великих освітленостях та забезпечення рівномірності чутливості фотодіоду по поверхні активної області.

УДК 535.23:628.98:
004.9:535-31:535.247

Ю. Добровольський,
канд. техн. наук,
Б. Шабашкевич,
канд. техн. наук,
В. Кузенко
НВФ «Тензор»,
м. Чернівці,
Л. Назаренко,
докт. техн. наук
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ФОТОДІОДІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЕННЯ ВИДИМОГО ДІАПАЗОНУ СПЕКТРУ

Вступ

Випромінення видимого діапазону спектру пов'язано у першу чергу із зоровим апаратом людини. Відхилення характеристик видимого випромінення від нормованих значень стає причиною різноманітних хвороб органів зору та нервової системи. Погане налаштування джерел світла стає причиною техногенних аварій.

Зазвичай для контролю потоків видимого випромінення застосовуються фотодіоди на основі кремнію. Це пов'язано із тим, що крамній має спектральний діапазон чутливості такий, що вміщає у себе видимий діапазон. Окрім того, максимум спектральної чутливості кремнію припадає саме на видимий діапазон спектра. Але основним фактором, який виділяє кремній як базовий матеріал для створення первинних перетворювачів для видимого діапазону спектру є його технологічність. Технологічні операції виготовлення кремнієвих фотодіодів відпрацьовані десятиліттями, що забезпечує високий рівень відтворюваності їх параметрів, надійності та відносно невисоку вартість у порівнянні із іншими фотодіодами на основі напівпровідникових багатокомпонентних матеріалів.

Первинні перетворювачі видимого діапазоні спектру, які застосовуються у люксметрах та фотометрах, призначені для вимірювання освітленості, яка сприймається людським оком. Зір людського ока від навколишнього світла визначається чутливістю наших очей до світла і, як правило, описується кривою чутливості (видності) ока, а також CIE (рис. 1).

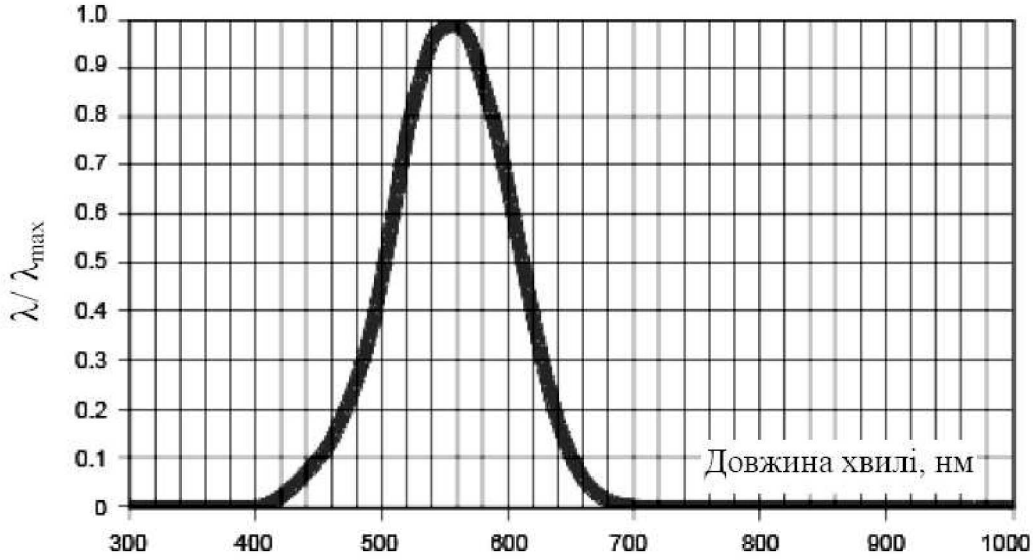

Рис. 1 - Відносна спектральна характеристика чутливості людського ока

Це показує, що людське око сліпе до довжинах хвиль в ультрафіолетовому (<380 нм) та інфрачервоній (>780 нм) частині спектра. Він також вказує, що око найбільш чутливе до зеленого світла (~ 555 нм), і менш чутливий до синього і червоного довжин хвиль. Тому використовується нормалізована версія цієї кривої чутливості для перетворення падаючої оптичної потужності (вказаний в Вт/см^2) у чутливість в одиницях, притаманних людському оку (зазначений у люксах). На довжині хвилі 555 нм, один люкс еквівалентний приблизно 0,15 мкВт/см^2 інтенсивності оптичного випромінення.

Око людини чутливе у широкому діапазоні умов освітлення. Коли світло налаштоване у темному приміщенні (це може зайняти кілька хвилин щоб стати пристосованим до цих умов), очі можуть виявити рівні освітленості до 10 лк. Типова освітленість середовищ, з якими стикаються люди в реальному житті, як правило, набагато нижча, починаючи від 0,1 люкс на відкритому повітрі в вночі, в 300 люкс для освітлення офісу, до 100000 лк при яскравому сонячному світлі. Більшість портативних пристроїв, що вимагають точного виявлення навколишньої інтенсивності світла, забезпечують вимірювання від 5 люкс до 1000 люкс [1].

Сприйняття людським оком освітленості здійснюється за логарифмічним законом (аналогічно чутливості вуха до звуків). Рівень освітленості повинен збільшитися майже в 10 разів, перш ніж око сприйме, що освітленість стала у два рази яскравіше. Ця обставина суттєво впливає на реакцію людини на світло, аж до запаморочення та втрати свідомості. За період адоптації ока до зміни потоку світлового випромінення (0,5 – 3 секунди) світло великої інтенсивності здатне викликати пошкодження зорового апарату, яке, при великих рівнях освітленості (більше 10^5 лк), може стати не оберненим і викликати захворювання органів зору та нервової системи.

Завдання дослідження

Завданням дослідження є вивчення та аналіз існуючих первинних перетворювачів, зокрема фотодіодів, для вимірювання енергетичних характеристик випромінення видимого діапазону спектру у складі люксметрів та фотометрів.

Система стандартів, яки регламентують вимоги до вимірювачів освітленості.

При створенні первинних перетворювачів, оптимізованих для роботи у

видимому діапазоні спектру оптичного випромінення слід враховувати вимоги до засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), в яких вони повинні застосовуватись, зокрема у люксметрах та фотометрах. Тому розглянемо систему стандартів, які діє у країнах СНД щодо вимог до світлового середовища, наприклад у робочій зоні.

Вимоги низки стандартів України [2], Росії [3], та Білорусі [3, 4] визначають мінімальні значення освітленості (0,2 лк) та яскравості починаючи з 0,2 кд/м^2 (яскравість освітлення доріг та будинків і вулиць місцевого значення), які потрібно контролювати.

У нормативній документації, яка діє в Україні, немає чітко сформульованих вимог до ЗВТ, призначених для вимірювання освітленості при атестації робочих місць. У ДСТУ [3] лише вказано, що люксметри повинні мати спектральну похибку, яка зумовлена ступеню корекції спектральної характеристики фотодіода під криву видності ока людини V(λ), не більше ± 10 %, в той час, коли ця похибка є лише однією із складових, що входять у величину меж основної припустимої відносної похибки вимірювання освітленості.

Зазвичай, параметри люксметрів, які використовуються для вимірювання освітленості при атестації робочих місць, а відтак і до фотодіодів, яки в них використовуються, забезпечують вимірювання освітленості в діапазоні 1–10^5 лк з межами основної припустимої відносної похибки вимірювання ± (4–10) %. Будівельні норми регламентують освітленість робочих місць від 0,2 до 5000 лк [4]. В той же час існує потреба у калібруванні джерел світла, здатних створювати освітленість до 2,5·10^5 лк з відповідними межами основної припустимої відносної похибки вимірювання.

Отже, для забезпечення потреб ринку люксметрів в Україні та країнах СНД потрібно створювати первинні перетворювачі з наступними параметрами:

- загальний спектральний діапазон вимірювань від 380 - 780 нм;
- діапазон вимірювання освітленості 10^{-1}-2·10^5 лк;
- межі допустимої основної відносної похибки вимірювання освітленості ± 5 %.

Однією із складових межі допустимої основної відносної похибки вимірювання освітленості є спектральна похибка приладу. Вона визначається корекцією спектральної характеристики чутливості фотометричної головки ($S_{відн}$ (λ) ГФ) під криву видності ока людини (V (λ). Для її зменшення, як відомо, використовують відповідний світлофільтр. Тому однією з вимог до майбутнього приладу мають бути вимоги до цієї корекції. А саме: у видимому діапазоні відхилення не більше 3 %; в ультрафіолетовому діапазоні відхилення не більше 0,5 %; в інфрачервоному діапазоні відхилення не більше 0,5 %.

Первинні перетворювачі для вимірювання параметрів світлового середовища

З огляду на вимоги нормативної документації щодо фото- та радіометрії видимого діапазону спектру, на фотодіоди, які би могли бути використані для цієї мети можна сформулювати наступні вимоги:

1. Загальний спектральний діапазон вимірювань не вужче 380 - 780 нм.
2. Довжина хвилі максимуму спектральної характеристики 750 – 850 нм.
3. Інтегральна чутливість не менше 6 мА/лм, або 0,03 мкА/лк;
4. Динамічний діапазон (діапазон, в якому нелінійність енергетичної характеристики (залежність фотоструму від потужності падаючого випромінення) не менше 6 - 7 порядків.
5. Нелінійність енергетичної характеристики у динамічному діапазоні не більше 1 %.
6. Діапазон вимірювання освітленості 10^{-1}-2·10^5 лк.
7. Монохроматична чутливість на довжині хвилі λ = 0,3 мкм не менше 0,06

А/Вт.

8. Темновий струм при температурі 20 С при подачі напруги зміщення 1 В не більше 0,05 мкА. При напрузі зміщення 100 мВ – не більше 1 нА.

Виходячи з вище наведеного були проаналізовані параметри та характеристики відомих кремнієвих фотодіодів, які могли використовуються при створені ЗВТ для фото- та радіометрії видимого випромінення.

Загалом проаналізовано параметри понад 200 фотодіодів різних виробників зі всього світу. Для ретельного аналізу з них було відібрано близько 50, результати вивчення яких наведено нижче у таблиці 1. В ній прийняті наступні позначення.

А – площа фоточутливого елемента;

$I_т$ – темновий струм;

$\Delta\lambda$ - спектральний діапазон чутливості;

$S_{i\lambda}$ - монохроматична чутливість;

δE – не лінійність енергетичної характеристики.

$\delta V(\lambda)$ – спектральна похибка.

ΔE – діапазон енергетичної освітленості, в якому енергетична характеристика фотодіоду є лінійною.

Таблиця 1.

Назва, виробник, країна	А, мм^2	Іт, нА	$\Delta\lambda$, нм	$S_{i\lambda}$, А/Вт	$\delta V(\lambda)$, %	ΔE (лк)	Джерело інформації
S78686, Hamamatsu, JP	2,4х 2,8	0,02 (2В)	480-660	0,38 550нм	± 10	0,1-10000	[5]
S9219-01 Hamamatsu, JP	3.6	0.05 (2В)	380-780	0.22	± 10	0,01-1000	[6]
S9219 Hamamatsu, JP	11.3	0.5 (2В)	380-780	0.24	± 10	0,01-1000	[7]
S8265 Hamamatsu, JP	2.8	0.02 (2В)	380-780	0.3	± 10	0,01-1000	[8]
S7686 Hamamatsu, JP	2.8	0.01 (2В)	380-780	0.3	± 10	0,01-1000	[9]
S1087 Hamamatsu, JP	1.3	0.01 (2В)	380-780	0.3	± 10	0,01-1000	[10]
S1227-1010BQ Hamamatsu, JP	100	1 (2В)	190-1000	0,36	± 10	0,1-5000	[11]
S1227-1010BR Hamamatsu, JP	100	1 (2В)	190-1000	0.43	± 10	0,1-5000	[12]
S3590 Hamamatsu, JP	100	10 (70В)	340-1100	0,6	± 10	0,1-1000	[13]
VNB6061, EG&G CD (Канада)	37	5 (1В)	320-1100	0,1 365нм		1-1000	[14]
PIN10RP United Detec-or Technology, USA	100	10^3 (3В)	420-680	0,1	± 5	1-1000	[15]
PIN-10DF UDT Sensors Inc., USA	100	100 (20В)	450-950	0,15 550нм	± 7	1-5000	[16]

Продовження таблиці 1.

Назва, виробник, країна	A, мм^2	Iт, нА	Δλ, нм	Siλ, А/Вт	δV(λ), %	ΔE, (лк)	Джерело інформації
BPX 65 Sensors Inc., USA	1	5 (20В)	450-1064	0,55 900нм	-	1-1000	[17]
BPW21 Osram, Німеччина DE	7,5	30 (5В)	440-560	4,5 нА/лк	± 10	0,01-100000	[18]
ФПУ LS521 Silicon Touch	25	0,1	380-1000	3,2	± 25	1-10000	[19]
BCS 2015G1, TDK Electro-nics, Europe	1,25x 1,2	0,01 (0,05В)	350-750	4,2 нА/лк	±20	0,5 – 10000	[20]
BS120 Sharp co., JP		0,01 (1В)	450-750	0,14 мкА/лк	±10	0,001-500	[21]
T1610P, English	7,7	5 (10В)	390-800	30 нА/лк	±10	0,1-1000	[22]
ALS - PD70-01C/TR7, Everlight Electronics Co., Ltd.	4x4	10, 5В	390-700	4,5 мкА/лк	±10	1-1000	[23]
ФД-288А,Б,В ЦКБ «Ритм», Україна	100	50	300-1050	0,3		0,1-10000	[24]
ФД-288-02 ЦКБ «Ритм», Україна	ø 7	3	400-1050	0.4		0,1-10000	[25]
ФД 307 ЦКБ «Ритм», Україна	ø 7	3	250-1000	0,3		0,1-10000	[26]
ФД "Квант" ЦКБ «Ритм», Україна	100	5	200-1050	0,2		0,1-10000	[27]
ФД-254 ЦКБ «Ритм», Україна	ø 8	1000 (0,5В)	400-1100	0,45 950 нм	±5	1-10000	[28]
ФД 337 гр.2 ЦКБ «Ритм», Україна	100	10 (10В)	400-1100	0,3 630 нм	±5	0,1-10000	[29]
УФД12 ЦКБ «Ритм», Україна	ø 14	7000 (120В)	400-1100	0,2 1060 нм	±5	1-1000	[30]
ФД "Порог" ЦКБ «Ритм», Україна	10x10	1 (10В)	400-1100	0,3 630 нм	±5	0,1-10000	[31]
ФД-25-500 НВП "БИТ", Україна	25	0,7 (0,01В)	320-1100	0,6 960 нм	±3	0,1-10000	[32]

Продовження таблиці 1.

Назва, виробник, країна	A, мм^2	Іт, нА	Δλ, нм	Siλ, А/Вт	δV(λ), %	ΔE, (лк)	Джерело інформації
ФД-18-225 НВП "БИТ", Україна	18	0,2 (0,01В)	320-1100	0,6 960 нм	±3	0,1-10000	[33]
ФД-10-100 НВП "БИТ", Україна	10х10	0,15 (0,01В)	320-1100	0,6 960 нм	±3	0,1-10000	[34]
ФД-05-25 НВП "БИТ", Україна	5х5	0,03 (0,01В	320-1100	0,6 960 нм	±3	0,1-1000	[35]
ФД-24К ОАО «Московский завод «Сапфир», Росія	Ø 10	2500 (27В)	400-1100	5 мА/лм	±10	1-1000	[36]
ФД-36 ОАО«Москов-ский завод «Сапфир», Росія	0,8 х 0,35	5 (30В)	470-1120	5,85 мА/лм	±10	1-1000	[37]
ФД 344-02 ОАО«Москов-ский завод «Сапфир», Росія	Ø 14	7 (20В)	400-1200	0,45 900 нм	±10	1-10000	[38]
КДФ-12х12-ТОХ-2 ООО «МЕРИ», Росія	110	20 (15В)	320-1100	0.40 660 нм	-	0,1-10000	[39]
КДФ-6х6- ТО8-4 ООО «МЕРИ», Росія	115	5	320-1100	0.40 660 нм	-	0,1-10000	[40]

Найбільш відомий світовий виробник кремнієвих фотодіодів – японська компанія Hamamatsu пропонує велику кількість фотодіодів різноманітного призначення, загальною кількість близько 150 шт. З них для подальшого аналізу було відібрано дев'ять. Фотодіоди типу S9219-01, S9219, S8265, S7686, S1087 мають однаковий спектральний діапазон чутливості 380-780 нм, якій відповідає видимому діапазону спектру, що говорить про те, що вони призначені для вимірювання потоків саме видимого випромінення. Згадані фотодіоди мають монохроматичну чутливість на довжині хвилі 550 нм 0,2 – 0,3 А/Вт, що в цілому задовольняє вимогам та темнові струми менше 1 нА, але динамічний діапазон – нелінійність енергетичної характеристики цих фотодіодів забезпечується у діапазоні від 0,01 до 1000 лк, що не відповідає нашим вимогам – верхня межа вимірювання освітленості повинна складати $2 \cdot 10^5$ лк. Фотодіод типу S78686 має дещо ширший діапазон вимірювання освітленості – до 10000 лк. Але його спектральний діапазон чутливості «звужений» и складає 480-660 нм на відміну від потрібного 380 – 780 нм, що не відповідає вимогам.

Фотодіоди типу S1227-1010BQ, S1227-1010BR, S3590 володіють великою площею фоточутливого елементу (100 мм^2), що спрощує їх застосування у фотометрії (при площі 100 мм^2 простіше здійснювати перерахунок фотосигналів у світлові одиниці з одиниці площі). Вони мають достатньо малі значення темнових струмів, але динамічний діапазон – як і у фотодіодів розглянутих раніше, є недостатнім для виконання вимог.

Окрім того, усі фотодіоди Hamamatsu, які застосовуються у фотометрії, виготовляються таким чином, щоби їх спектральна характеристика наближалася до кривої видності ока людини, як це показано на рисунку 2 [6].

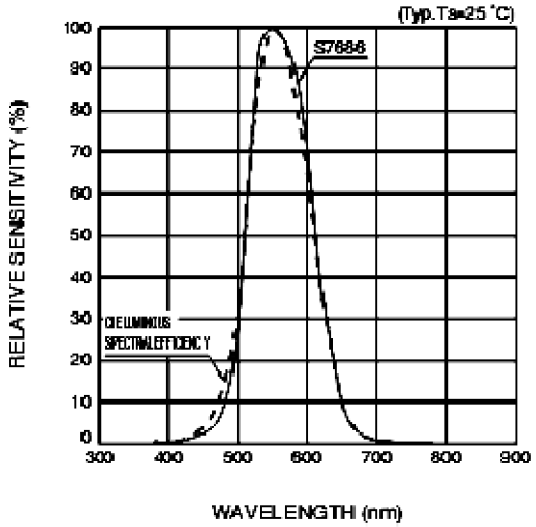

Рис. 2

Однак, при цьому, похибка спектральної корекції таких фотодіодів досягає ± 10 %, що не відповідає вище сформульованим вимогам.

Для прикладу, у міжнародних нормативних документах [41, 42] сформульовано вимоги до люксметрів, призначених для метеорологічних досліджень, згідно яких спектральна похибка не повинна перевищувати ± 2,5 %, а загальна похибка, яка складається з восьми параметрів, не повинна перевищувати ± 4,9 %.

Канадсько-американська компанія EG&G пропонує фотодіод типу VNB6061 з площею фоточутливого елементу 37 мм^2 з невеликим темновим струмом 5 нА при зміщенні 1 В та чутливістю на довжині хвилі 365 нм 0,1 А/Вт, чого цілком достатньо. Але цей фотодіод є лінійним (не лінійність не більше 1 %) лише у діапазоні освітленостей від 1 до 1000 лк, що не дозволяє використати його.

Фотодіод типу PIN10RP американської компанії United Detector Technology, також як і деякі японські фотодіоди, має площу фоточутливого елементу 100 мм^2, що, як зазначалося вище, є зручним для створення на його основі фотометричної головки, але, по при невелику спектральну похибку (±5 %) він має звужений спектральний діапазон чутливості (420-680 нм) та дуже малий динамічний діапазон (1-1000 лк).

Фотодіоди PIN-10DF та BPX 65 також американської компанії Sensors Inc. Мають як велику (100 мм^2) та к і малу (1 мм^2) площу фоточутливого елемента. Але в обох випадках темновий струм фотодіодів цієї компанії є надто великим, а динамічний діапазон складає лише три порядки на відміну від семи порядків, як вимагають вимоги.

Фотодіод BPW21 німецької компанії Osram відрізняється, на відміну від багатьох інших, достатнім динамічним діапазоном (сім порядків), алс має всликий темновий струм та велику спектральну похибку, не кажучи про звужений спектральний діапазон чутливості.

Фотоприймальний пристрій (ФПП) LS521 тайванської компанії Silicon Touch Technology Inc. характеризується низьким рівнем шуму, високою чутливістю, має перетворювач з двопровідним SMBus послідовним інтерфейсом для перетворення освітленості у цифровий код. Пристрій поєднує фотодіод, транс-опір підсилювача і 8 бітів аналого-цифрового перетворювача (АЦП) в одній мікросхемі, щоб забезпечити висвітлення інформації щодо ефективного 8-бітного динамічного діапазону. Цифровий вихід прямо пропорційний навколишньої освітленності. ФПП LS521 характеризується відповідність кривої видності ока людини (CIE) із максимумом чутливості на довжині хвилі 555 нм, як це показано на рисунку 3 [19].

Але, як видно з рисунку 3 та з паспортних даних на цей ФПП, його спектральна похибка досягає 25 %, а динамічний діапазон, по при 8-розрядному запасі АЦП, не перевищує чотири порядки (1 – 10000 лк). Що не дає змоги застосувати цей ФПП у розробці потрібних ЗВТ.

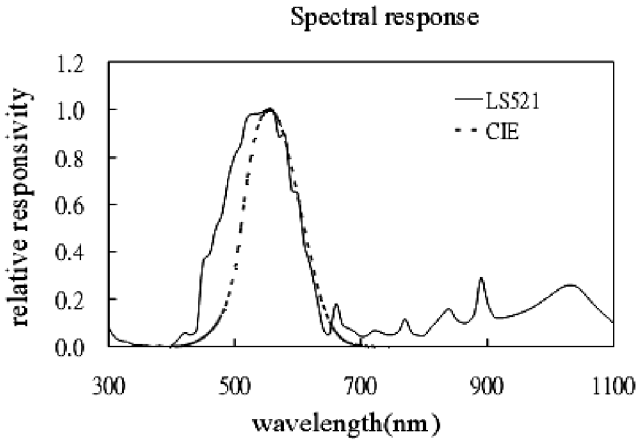

Рис. 3 [56]

Фотодіод BCS 2015G1 європейської компанії TDK Electronics по при гарну чутливість, темновий струм та спектральний діапазон, має лине п'ять порядків динамічного діапазону і велике значення спектральної похибки - до 20 %.

Фотодіод BS120 компанії Sharp co. (Японія) відрізняється малими зворотними струмами, шістьма порядками динамічного діапазону, але і звуженим спектральним діапазоном та великою (до 10 %) спектральною похибкою.

T1610P – фотодіод сумісної британсько–корейської компанії, як і більшість вже розглянутих фотоприймачів, має велике значення спектральної похибки та вузький динамічний діапазон (0,1-1000 лк).

Аналогічна проблема з фотодіодом ALS - PD70-01C/TR7 компанії Everlight Electronics Co., Ltd. По при достатньому спектральному діапазоні чутливості, цей фотодіод не може бути використаний через велике значення темнового струму, недостатній динамічний діапазон та велику спектральну похибку.

Група фотодіодів українського виробництва (ВАТ «ЦКБ «Ритм») типу ФД-288, Квант та ФД 337 свого часу розроблялись як фотометричні прилади і мають досить високі метрологічні параметри, але їх динамічного діапазону, як і у випадку попередньо розглянутих фотодіодів, не вистачає для забезпечення вимог ЗВТ. Теж стосується фотодіодів типу «Порог», які як і ФД-288 мають площу фоточутливого елементу 100 мм^2, але лише п'ять порядків динамічного діапазону. Спектральна похибка згаданих фотодіодів хоча і менша ніж у закордонних аналогів (± 5 %), але є недостатньою для забезпечення загальної похибки вимірювання приладу так само у ± 5 %.

Російська фотодіодна продукція представлена фотодіодами Московського заводу «Сапфір» типу ФД-24К, ФД-36 та ФД 344-02. Їх спектральні діапазон чутливості починається з 400 нм, що обмежує їх застосування у фотометрії, оскільки, як вказувалось вище, спектральний діапазон вимірювання люксметра повинен починатись з 380 нм. Окрім того, їх динамічний діапазон складає всього три порядки. Тут згадані фотодіоди, особливо ФД-24К згадуються через те, що ці фотодіоди є ветеранами фотодіодної продукції ще з 70-х років минулого століття.

Більш сучасну продукцію представляє на ринку російська компанія ООО «Мері» (м. Санкт-Петербург). Її фотодіоди типу КДФ-12х12-ТОХ-2 та КДФ-6х6-ТО8-4 відрізняються великою площею фоточутливого елементу (біля 100 мм2), малими значеннями темнового струму (на рівні одиниць нА), широким спектральним діапазоном чутливості (230 – 1100 нм) та хоча і недостатнім, але досить широким, як у деяких розглянутих аналогів, динамічним діапазоном: 0,1 – 10000 лк. Монохроматична чутливість цих фотодіодів складає 0,4 А/Вт на довжині хвилі 550 нм. Виробник не

наводить дані щодо спектральної похибки, але даних про параметри фотодіодів достатньо, щоби зробити висновок, про те, що російські фотодіоди фірми Мері також не можуть бути використані у розробці ЗВТ для фото- та радіометрії без доопрацювання.

Аналітичні дослідження відомих фотодіодів показали, що ні один з них не може забезпечувати динамічний діапазон у сім порядків (0,01 - $2 \cdot 10^5$ лк), як того вимагають сучасні вимоги. Окрім того, використання для подальшого вдосконалення фотодіодів іноземного виробництва є складним, оскільки при такій роботі виникають складнощі організаційного характеру.

Вивчення параметрів та характеристик існуючих фотодіодів на основі кремнію, призначених для вимірювання світлових параметрів навколишнього середовища показує, що ні в Україні, ні в країнах СНГ у широкому доступі немає фотодіодів, які могли би забезпечувати вимоги, сформульовані на початку цієї роботи. Основний недолік існуючих аналогів, відібраних для подальшого аналізу та вивчення, полягає у недостатньо широкому динамічному діапазоні, т.т. у тому, що нелінійність енергетичної характеристики у кращих з вище перелічених фотодіодів перевищує 1 % у діапазоні від 0,1 до 10000 лк, в той час коли для виконання сучасних вимог потрібно мати фотодіоди, здатні забезпечити діапазон лінійності енергетичної характеристики від 0,01 до 250000 лк.

Серед зарубіжних фотодіодів є зразки, зокрема фотодіоди компанії Hamamatsu, які задовольняють вимоги по нелінійності по «нижньому» краю діапазону – вони працездатні від 0,01 лк. Але такі фотодіоди мають досить велику вартість. Окрім того, верхня межа згаданих фотодіодів складає лише 1000, 10000 лк, що не задовольняє сучасним вимогам НТД в Україні та СНГ.

Методи та способи розширення динамічного діапазону фотодіодів

Нелінійність енергетичної характеристики, яка визначає динамічний діапазон фотодіоду, як параметр якості широко застосовується у світовій практиці [43]. В даний час у фотодіодів вихідна потужність, інакше фотострум, обмежується двома важливими факторами. Насиченістю фотоструму, яка здійснюється за рахунок зростання просторового заряду у об'ємі фотодіоду [44] та теплотою, яка виділяється на кристалі фотодіоду в наслідок його розігріву рухом зарядів, зумовлених першим чинником. Ці два фактори є причиною катастрофічного зростання руху носіїв заряду через p-n перехід. У [45] показано, що зменшення ефекту, пов'язаного з об'ємним зарядом можна досягти шляхом зміни конструкції та технології контактів фотодіодів, зберігаючи при цьому високу швидкодію та гарну лінійність. Перевага запропонованої структури у тому, що тільки електрони, які мають більш високу швидкість, ніж певна бар'єрна величина, використовуються в якості активних носії. Нова конструкція має додатковий шар, який контролює відносну напругу електричного поля в абсорбційному шарі колекторної області [46]. Такий підхід дозволив досягти максимального значення фотоструму 152 мА при 6 Вольтах зворотного зміщення на 18 ГГц. Площа фоточутливого елемента мала діаметр 40 мкм. Підсвітка фотодіоду здійснювалась із зворотного боку кристалу фотодіоду. В цьому пристрої тепло, генероване в активній області мезаструктури в основному розсіюється на підкладці і, у певній мірі, у повітрі. Світло проходить через підкладку, яка має антивідбівне покриття на поверхні, яка приймає оптичне випромінювання. Така конструкція має назву фліп-чіпа. Максимальний вихідний фотострум, який досягається у цій структурі фотодіода, не обмежується насиченням і термічним пошкодженням. Серед різноманітних методів поліпшення розсіювання тепла, на запропонованих структурах вдалося досягти найкращого результату. Go із співавторами повідомив про два фотодіоди каскадно з'єднаних, зі схожою конструкцією з вихідною потужністю 63 мВт при 95 ГГц [47].

Itakura і співавтори продемонстрували максимальну вихідну потужність від 790 мВт при 5 ГГц з використанням фліп-чіпа з 4-діодних матриць [48].

У [49] показано, що мінімізації не лінійності, т.т. розширенню динамічного діапазону фотодіода, може сприяти використання ефектів ударної іонізації та Франца-Келдиша, які полягають у визначенні того, які є додаткові джерела генерації струму через p-n перехід. Дослідження показали, що ці ефекти спостерігаються при опромінювання фотодіоду різними довжинами хвиль і також залежать від контактів до фоточутливого елементу. Показано, що ці два ефекти можуть компенсувати один одного і звести до мінімуму нелинейність фотодіода, як що оптимізувати конструкцію фотодіоду по відношенню до довжини хвилі і напруги зміщення.

У статті [50] запропонована нова модель досліджування нелінійності фотодіоду шляхом порівнянні її величини у різних умовах генерації власного шуму. Показано, що величина нелінійності фотодіода може бути зменшена, а його динамічний діапазон розширений, як що правильно обирати режим генерації фотогенерованих носіїв заряду, керуючи режимом зміщення на фотодіоді.

У [51] розглядаються питання створення потужних фотодіодів, модифікованої конструкції, яка забезпечує високій рівень лінійності вихідного фотосигналу від падаючої оптичної потужності типу фліп-чіп.

Авторами у [52] запропонований новий спосіб оцінки нелінійності енергетичної характеристики фотодіоду, який полягає у тому, що цей параметр за допомогою трьох вимірювальних систем для того, щоби порівняти точність вимірювання різних установок. Показано, що такий метод може бути використаний для уточнення похибки вимірювання нелінійності енергетичної характеристики та встановлює критерії взаємозамінності таких установок.

Також досліджувалась залежність нелінійності енергетичної характеристики при великих освітленості (фотострум до 100 мА) як залежність від площини фоточутливого елемента [53]. Показано, що чутливість фотоприймачів, які мали великі площі активної області, досягали насичення при більш високих значеннях фотоструму у порівнянні з пристроями на базі фотодіодів з меншою активною областю.

Висновки

1. Проаналізовані нормативні документи різних країн, яки висувають вимоги до ЗВТ, призначених для контролю енергетичних характеристик оптичного випромінення, зокрема для медично-гігієнічних завдань. На основі цього аналізу сформульовані вимоги до створюваних первинних перетворювачів для вимірювання енергетичних характеристик оптичного випромінення.

2. Вивчення параметрів та характеристик існуючих фотодіодів на основі кремнію, призначених для вимірювання світлових параметрів навколишнього середовища показує, що ні в Україні, ні в країнах СНД немає фотодіодів, які могли би забезпечувати сформульовані вимоги. Основний недолік існуючих перетворювачів полягає у недостатньо широкому динамічному діапазоні, т.т. у тому, що нелінійність енергетичної характеристики у кращих з вище перелічених фотодіодів перевищує 1 % у діапазоні від 0,1 до 10000 лк, в той час коли для виконання сучасних вимог потрібно мати фотодіоди, здатні забезпечити діапазон лінійності енергетичної характеристики від 0,01 до 250000 лк.

3. Серед зарубіжних фотодіодів є зразки, зокрема фотодіоди компанії Hamamatsu, які задовольняють вимоги до нелінійності по «нижньому» краю діапазону – вони працездатні від 0,01 лк. Але такі фотодіоди мають досить велику вартість. Окрім того, верхня межа згаданих фотодіодів складає лише 1000, 10000 лк, що не задовольняє сучасним вимогам НТД в Україні та СНГ.

4. Наявні технічні рішення, перелічені у цьому параграфі показують, що способи розширення цієї задачі існують. Зокрема це збільшення площі активної (фоточутливої) області фотодіода, відвід тепла від його поверхні в разі роботи при великих освітленостях та забезпечення рівномірності чутливості фотодіоду по поверхні активної області.

Література

1 Mehta A. Ambient-Light Sensing Optimizes Visibility and Battery Life of Portable Displays /A. Mehta // Strategic Applications Engineer, Amplifiers & Sensors. -2011. –Vol. 6. – p.20-27.

2 Природне і штучне освітлення : ДБН В.2.5-28-2006. – [Чинний від 2006-10-01]. - К: ИСС «Зодчий»: «ИМЦ», 2006. -76 с. (Державні будівельні норми україни).

3 Будівлі і споруди. Методи вимірювання освітленості (ГОСТ 24940-97) : ДСТУ Б В.2.2-6-97. – [Чинний від 1997-11-05]. -МІТКС - М.: Минстрой России, ГУП ЦПП, 1997. -78с. (Національний стандарт України).

4 Естественное и искусственное освещение. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-2.04-153-2009. –[Чинний від 2009-02-05]. -Мінськ.: Госстандарт, 2009. -20с. (Технический кодекс).

5 Паспортні дані на фотодіод S78686 [електронний ресурс]. Hamamatsu: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод S78686: http://www.hamamatsu.com

6 Паспортні дані на фотодіод S9219-01[електронний ресурс]. Hamamatsu: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод S9219-01: http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/alpha/S/4103/S9219-01/index.html

7 Паспортні дані на фотодіод S9219 [електронний ресурс]. Hamamatsu: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод S9219: http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/alpha/S/4103/S9219/index.html

8 Паспортні дані на фотодіод S8265 [електронний ресурс]. Hamamatsu: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод S8265: http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/alpha/S/4103/S8265/index.html

9 Паспортні дані на фотодіод S7686 [електронний ресурс]. Hamamatsu: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод S7686: http://htmldatasheet.ru/hamamatsu/s7686.htm

10 Паспортні дані на фотодіод S1087 [електронний ресурс]. Hamamatsu: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод S1087: http://www.allcomponents.ru/hamamatsu/s1087.htm

11 Паспортні дані на фотодіод S1227-1010BQ [електронний ресурс]. Hamamatsu: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод S1227-1010BQ: http://www.allcomponents.ru/hamamatsu/s122733br.htm

12 Паспортні дані на фотодіод S1227-1010BR [електронний ресурс]. Hamamatsu: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод S1227-1010BR: http://www.allcomponents.ru/hamamatsu/s122733bq.htm

13 Паспортні дані на фотодіод S3590 [електронний ресурс]. Hamamatsu: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод S3590: http://www.chipfind.ru/datasheet/hamamatsu/s3590.htm

14 Паспортні дані на фотодіод VNB6061 [електронний ресурс]. EG&G: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод VNB6061: http://www.datasheetarchive.com/VTB6061-datasheet.html

15 Паспортні дані на фотодіод PIN10RP [електронний ресурс]. United Detector Technology: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод PIN10RP: http://www.datasheetarchive.com/photodiode%20CIE%20eye%20response-datasheet.html

16 Паспортні дані на фотодіод PIN-10DF [електронний ресурс]. UDT Sensors Inc.: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод PIN-10DF: http:\\www.udt.com

17 Паспортні дані на фотодіод BPX 65 [електронний ресурс]. Sensors Inc.: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод BPX 65: http://www.osram-os.com/osram_os/en/; catalog.osram-os.com/.../catalogue.do?act...

18 Паспортні дані на фотодіод BPW21 [електронний ресурс]. Osram: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод BPW21: http://www.osram-os.com/osram_os/en/; catalog.osram-os.com/.../catalogue.do?act...

19 Паспортні дані на ФПУ LS521 [електронний ресурс]. Silicon Touch Technology Inc.: – Режим доступу до паспортних даних на ФПУ LS521: http://www.siti.com.tw/product/product.html

20 Паспортні дані на фотодіод BCS 2015G1 [електронний ресурс]. TDK Electronics: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод BCS 2015G1: http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/151271/TDK/BCS2015G1.html;

21 Паспортні дані на фотодіод BS120 [електронний ресурс]. Sharp co.: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод BS120: http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/B/S/1/2/BS120.

22 Паспортні дані на фотодіод T1610P [електронний ресурс]. Vishay: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод T1610P: http://www.vishay.com/photo-detectors/

23 Паспортні дані на фотодіод ALS - PD70-01C/TR7 [електронний ресурс]. Everlight Electronics Co., Ltd.: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод ALS - PD70-01C/TR7: http:\\www.everlight.Com

24 Паспортні дані на фотодіод ФД-288-02 [електронний ресурс]. ЦКБ «Ритм»: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод ФД-288-02: http://www.ckb-rhythm.narod.ru/tablpn.htm

25 Паспортні дані на фотодіод ФД 307[електронний ресурс]. ЦКБ «Ритм»: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод ФД 307: http://www.ckb-rhythm.narod.ru/fdSipn_fd307.htm

26 Паспортні дані на фотодіод ФД "Квант" [електронний ресурс]. ЦКБ «Ритм»: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод ФД "Квант": http://www.ckb-rhythm.narod.ru/fdSipn_fdkvant.htm

27 Паспортні дані на фотодіод ФД-254 [електронний ресурс]. ЦКБ «Ритм»: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод ФД-254: http://www.ckb-rhythm.narod.ru/fdSipin_fd254.htm

28 Паспортні дані на фотодіод ФД 337 гр.2 [електронний ресурс]. ЦКБ «Ритм»: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод ФД 337 гр.2: http://www.ckb-rhythm.narod.ru/fdSipn_fd337.htm

29 Паспортні дані на фотодіод УФД12 [електронний ресурс]. ЦКБ «Ритм»: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод УФД12: http://www.ckb-rhythm.narod.ru/tablpin.htm

30 Паспортні дані на фотодіод ФД "Порог" [електронний ресурс]. ЦКБ «Ритм»: – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод ФД "Порог": http://www.ckb-rhythm.narod.ru/tablpin.htm

31 18 Паспортні дані на фотодіод ФД-25-500 [електронний ресурс]. НВП "БИТ": – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод ФД-25-500: http://detector.org.ua/pin_photdiode_FD-25-500.html

32 Паспортні дані на фотодіод ФД-18-225 [електронний ресурс]. НВП "БИТ": – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод ФД-18-225: http://detector.org.ua/about_pin_photdiode_big_area.html

33 Паспортні дані на фотодіод ФД-10-100 [електронний ресурс]. НВП "БИТ": – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод ФД-10-100: http://detector.org.ua/pin_photdiode_10x10.html

34 Паспортні дані на фотодіод ФД-05-25 [електронний ресурс]. НВП "БИТ": – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод ФД-05-25: http://detector.org.ua/pin_photdiode_5x5.html

35 19 Паспортні дані на фотодіод ФД-24К [електронний ресурс]. ОАО «Московский завод «Сапфир» : – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод ФД-24К: http://www.mzsapphir.ru/docs/fd24_fd7k/fd24_fd7k.htm

36 Паспортні дані на фотодіод ФД-36 [електронний ресурс]. ОАО «Московский завод «Сапфир» : – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод ФД-36: http://www.mzsapphir.ru/kremnivie_photodiods_dcaenkcadkrcsdfhnakdhfcnkahdfaksdcfakdfasd.html

37 Паспортні дані на фотодіод ФД 344-02 [електронний ресурс]. ОАО «Московский завод «Сапфир» : – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод ФД 344-02: http://www.mzsapphir.ru/kremnivie_photodiods_dcaenkcadkrcsdfhnakdhfcnkahdfaksdcfakdfasd.html

38 Паспортні дані на фотодіод КДФ-12х12-ТОХ-2 [електронний ресурс]. ООО «МЕРИ» : – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод КДФ-12х12-ТОХ-2: http://mery.spb.ru/index.php?show=element&id=20

39 Паспортні дані на фотодіод КДФ-6х6-ТО8-4 2 [електронний ресурс]. ООО «МЕРИ» : – Режим доступу до паспортних даних на фотодіод КДФ-6х6-ТО8-4: http://mery.spb.ru/index.php?show=element&id=18

40 nternational Commission on Illumination, 1987: Methods of Characterizing Luminance Meters and Luminance Meters. ICI -No.69.

41 nternational Electrotechnical Commission, 1987: International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 845: Lighting, IEC 50.

42 Williams K. J. Photodetector nonlinearity limitations on a high-dynamic range 3 GHz fiber optic link / K. J. Williams, L.T. Nichols, R. D. Esman // Journal Lightwave Technol. -1998/ - Vol. 16(2). – P.192–199.

43 Liu P.-L. Saturation characteristics of fast photodetectors / P.-L. Liu, K. J. Williams, M. Y. Frankel, R. D. Esman // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 1999. - Vol. 47(7). –P. 1297–1303.

44 Klamkin J. High output saturation and high-linearity uni-traveling-carrier waveguide photodiodes / J. Klamkin, A. Ramaswamy, L. A. Johansson, H.-F. Chou, M. N. Sysak, J. W. Raring, N. Parthasarathy, S. P. DenBaars, J. E. Bowers, L. A. Coldren // IEEE Photonics Technology Letters. -2007. -Vol. 19/ -no. 3/ -P. 149–151.

45 Z. Pan Li. H. High-saturation-current modified uni-traveling-carrier photodiode with cliff layer / Z. Li, H. Pan, H. Chen, A. Beling, J. C. Campbell // IEEE J. Quantum Electron. -2010. - Vol. 46(5). –P. 626–632.

46 Kuo F.-M. Linear-cascaded near-ballistic unitraveling-carrier photodiodes with an extremely high saturation current-bandwidth product / F.-M. Kuo, M.-Z. Chou, J.-W. Shi // J. Lightwave Technol. – 2011. - Vol. 29(4). –P. 432–438.

47 Itakura S. High-current backside-illuminated photodiode array module for optical analog links / S. Itakura, K. Sakai, T. Nagatsuka, E. Ishimura, M. Nakaji, H. Otsuka, K. Mori, Y. Hirano // J. Lightwave Technol. – 2010. - Vol. 28(6). –P. 965–971.

48 Hastings A.S. Minimizing Photodiode Nonlinearities by Compensating Voltage-Dependent Responsivity Effects / A.S. Hastings, D.A. Tulchinsky, K.J. Williams, H.Pan, A. Beling, J.C. Campbell // Journal of Lightwave Technology. -2010. -Vol. 28. -Issue 22. -P. 3329-3333.

49 Jun H. Nonlinearity of the Photodiode in a Microwave Photonic Link / H. Jun, Y. Chun, C. Yu Hua, L. Xiang Hua, X. Hong Da // Photonics and Optoelectronics. -2011. - Vol. 12 (5). –P. 1-4.

50 Li Z. High-power high-linearity flip-chip bonded modified uni-traveling carrier photodiode / Z. Li, Y. Fu, M.y Piels, H. Pan, A. Beling, J. E. Bowers, J.C. Campbell // Optics Express. -2011. -Vol. 19. -Issue 26. -P. B385-B390. Режим доступу до журн.: http://dx.doi.org/10.1364/OE.19.00B385.

51 Draa M.N. Comparison of photodiode nonlinearity measurement systems Meredith / N. Draa, A.S. Hastings, K.J. Williams // Optics Express. -2011. -Vol. 19. -Issue 13. -P. 12635-12645. Режим доступу до журн.: http://dx.doi.org/10.1364/OE.19.012635

52 Ku'barsepp T. Nonlinearity measurements of silicon photodetectors / T. Ku'barsepp, A. Haapalinna, P. Ka'rha, E. Ikonen // Applied optics. -1998. -Vol. 37. -No. 13. -P. 2716 – 2722. Режим доступу до журн.: http://users.tkk.fi/petek/AO371398.PDF.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОТОДИОДОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

Ю. Добровольский, Б. Шабашкевич, В. Кузенко, Л. Назаренко

На основе анализа современной нормативной базы сформулированы требования к создаваемым первичным преобразователям (фотодиодам) и исследованы характеристики существующих фотодиодов на основе кремния, для измерения энергетических характеристик оптического излучения. Показано, что основной недостаток существующих фотодиодов заключается в недостаточно широком динамическом диапазоне, который не обеспечивает линейности их энергетической характеристики в диапазоне освещенностей 0,01 - 250000 лк. Для решения этой проблемы, на основе мирового опыта, предложено увеличение площади активной (фоточувствительной) области фотодиода, отвод тепла от его поверхности при работе с большими освещенностями обеспечения равномерности чувствительности фотодиода по поверхности активной области.

INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF THE PHOTODIODE TO MEASURE THE ENERGY CHARACTERISTICS OF THE OPTICAL RADIATION IN THE VISIBLE RANGE OF THE SPECTRUM

Yu. Dobrovolskiy, B. Shabashkevich, V. Kuzenko, L. Nazarenko

On the basis of analysis of the current regulatory framework created by the requirements to the primary converters (photodiodes) and investigated the characteristics of the existing silicon-based photodiodes for measuring the energy characteristics of the optical radiation. It is shown that the main drawback of existing photodiodes is insufficiently wide dynamic range, which does not provide the linearity of their energy characteristics in the irradiance range 0.01 - 250,000 lux. To solve this problem, based on the world experience proposed to increase the area of the active (photosensitive) area of the photodiode, the heat from its surface during operation at high luminance and ensure uniformity of sensitivity across the surface of the photodiode active region.