

К. ф.-м. н. А. Д. ЄГОРОВ, В. А. ЄГОРОВ, С. А. ЄГОРОВ, І. Є. СІНЄЛЬНИКОВ

Україна, м. Харків, Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України  
E-mail: yegorov@ire.kharkov.ua

## ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ ЕФЕКТА БЛУМІНГА ПЗЗ-ДЕТЕКТОРІВ ОПТИЧНОГО СПЕКТРУ

*Представлено результати порівняльних досліджень впливу ефекту насичення і розпливання зарядів на якість і динамічний діапазон зображень, одержуваних за допомогою приладів із зарядовим зв'язком з лінійною структурою декількох типів. На прикладі зареєстрованих спектрів показано ступінь нелінійних спотворень зображень яскравих спектральних ліній. Запропоновано спосіб зменшення впливу цього ефекту, а також описано апаратуру та методичне забезпечення для її реалізації в практиці атомно-емісійної спектрометрії.*

*Ключові слова:* прилади із зарядним зв'язком (ПЗЗ), блумінг-ефект, нелінійні спотворення, динамічний діапазон, закон взаємозамісності.

Багатоеlementні напівпровідникові детектори набувають все більшого поширення в практиці оптичної спектрометрії, але багато хто відзначає такі їхні недоліки, як недостатній динамічний діапазон і нелінійність світлосигнальної характеристики. Так, в роботах [1, 2] розкриваються особливості архітектури ПЗЗ-фотоприймачів і фактори, що обмежують динамічний діапазон сенсорів, а також розкривається сутність явища розпливання зарядів (ефект блумінгу) в приладах із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) [2] і вплив засобів пригнічення блумінга (антиблумінгу) на лінійність ПЗЗ-фотоприймачів [3]. В [4] досліджуються динамічні і спектральні характеристики КМОН-фотоприймачів S11639 шляхом аналізу спектрів безперервних спектральних джерел, таких як галогенова лампа і дейтерієва лампа, а в [5] виконане порівняльне дослідження цього сенсора з ПЗЗ-сенсорами TCD1205 компанії Toshiba та ILX511 компанії Sony, які мають антиблумінг. В [6, 7] виконане експериментальне дослідження динамічного діапазону спектрометра з лінійним ПЗЗ-фотоприймачем TCD1304 компанії Toshiba для відносно широкосмугових спектрів світлодіодів. В [1, 8, 9] надаються описи деяких методів алгоритмічного і апаратного розширення динамічного діапазону ПЗЗ сенсорів. В [10] пропонується додати додатковий канал реєстрації з пікселями меншого розміру. Але при цьому в літературі відсутні порівняння найбільш поширених сенсорів TCD1304 з сенсорами інших типів, а також дослідження щодо можливостей розширення їхнього динамічного діапазону в області великих сигналів.

Дослідження динамічного діапазону ПЗЗ-сенсорів у випадку окремо розташованих ліній атомно-емісійних спектрів проводилося нами раніше [11]. Метою даної роботи було виконання порівняльних досліджень динамічного діапазону сенсорів залежно від наявності в них антиблумінгу, а також розробка шляхів його розширення при спектрофотометричних вимірюваннях.

### Експериментальна установка

Із аналізу попередніх досліджень та загальних міркувань авторами було зроблено висновок про те, що застосування зустрічного транспортування зарядів може відкрити принципово нові можливості лінеаризації світлосигнальної характеристики фотодетекторів. Для більш поглибленого вивчення цих питань з урахуванням високої насиченості атомно-емісійних спектрів експериментальна установка, описана в [12], була модифікована таким чином, щоб забезпечити детектування спектра ПЗЗ-лінійками детекторів із зустрічним напрямком транспортування зарядів. Основою експериментальної установки була мультисенсорна камера на базі ПЗЗ з лінійною структурою без антиблумінгу TCD 1304 компанії Toshiba [13]. Крім того, для порівняльних досліджень застосовувалися кілька модифікацій односенсорних ПЗЗ-камер з фотоприймачами TCD1205 і ILX511, які мають антиблумінг. Всі камери — оригінальної авторської розробки. Основні параметри досліджуваних ПЗЗ-фотоприймачів наведено в **таблиці**.

Особливістю сенсорів всіх досліджуваних фотоприймачів є велика, сильно витягнута, апер-

Основні параметри досліджуваних ПЗЗ-фотоприймачів

Тип сенсора	Розмір пікселя, мкм	Кількість пікселів	Наявність антиблумінгу	Чутливість, В/(лк·с)	Динамічний діапазон
TCD1304 (Toshiba) [13]	8×200	3648	–	160	300
TCD1205 (Toshiba) [14]	14×200	2048	+	80	400
ILX511 (Sony) [15]	14×200	2048	+	200	267

тура пікселів, що добре узгоджується з формою щільності спектральних приладів. Сенсори компанії Sony мають обмежений спектральний діапазон чутливості в ультрафіолетовій області спектра, що в деяких випадках вимагає застосування додаткового люмінофорного покриття.

Одним з недоліків ПЗЗ, що випускаються серійно, є недостатні лінійні розміри фотоприймачів вздовж напрямку дисперсії. Зазвичай спектральний діапазон атомно-емісійних аналізаторів становить 200–400 нм. При типовому спектральному розділенні 10 нм і розмірах зображення спектра 200 мм необхідна загальна кількість пікселів в камері реєстрації становить приблизно 20000. Наведені в таблиці сенсори мають довжину фоточутливої області 28,672–29,184 мм при загальній кількості пікселів від 2048 до 3648, тому застосування одиночних фотодетекторних лінійок прийнятне тільки для спектрографів з малою довжиною спектра. Для подолання цього обмеження застосовують мультисенсорні ка-

мери з шаховим розташуванням детекторних лінійок і спеціальні оптичні схеми розведення спектра на кілька рядів ПЗЗ [16]. Блок-схему та зовнішній вигляд мультисенсорної камери зображено на **рис. 1**.

Камера встановлювалася на місце касети з фотопластинкою в спектрограф ДФС-452 (також можна використовувати промислові спектрографи типу ИСП-28, ИСП-30, ДФС-458). В ній використовуються ПЗЗ TCD1304, що не мають антиблумінга. Камера складається з плати управління та двох мультисенсорних плат, розташованих одна над одною. Для зв'язку із зовнішнім комп'ютером плата управління містить контролер інтерфейсу USB, виконаний на базі мікросхеми FT232H компанії FTDI Chips [17]. Основні схеми синхронізації, управління, прийому, перетворення і передачі даних виконано на програмованій логічній матриці EP3C10E144 Cyclone III (Intel/Altera) [18].

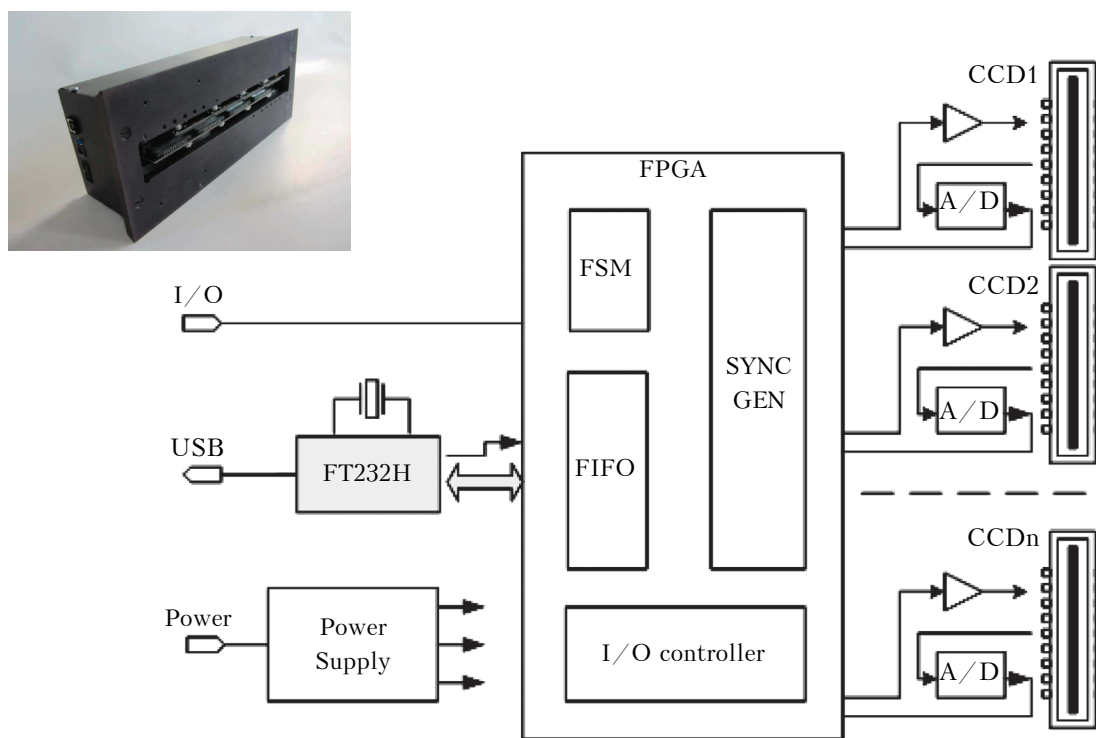


Рис. 1. Структурна схема мультисенсорної камери, а також її зовнішній вигляд (на вісім ПЗЗ-сенсорів): CCD1 ... CCDn – ПЗЗ; FPGA – програмована логічна матриця; FT232H – контролер інтерфейсу USB; A/D – АЦП; Power supply – схеми живлення

Мультисенсорні плати містять буферні формувачі сигналів, аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) (по одному для кожного сенсора), схеми посилення і узгодження рівнів. На платах розміщуються елементи кріплення і дзеркальні оптичні відбивачі, які розводять зображення спектра на два ряди сенсорів. Плати збираються в пакет і забезпечують реєстрацію спектра двома рядами сенсорів, розташування яких представлено на **рис. 2**. За звичайної, стандартної, конфігурації сенсори розташовуються зі зміщенням на величину, меншу довжини фоточувливої зони одного фотоприймача, як це показано на рисунку. В цьому випадку під час одного експонування частина спектра реєструється одним рядом лінійок, а частина — в області перекриття — двома. (На **рис. 2** перекриття умовно показано рівним одному пікселю, але в реальній камері воно становило 235 пікселів.)

На **рис. 3** для ілюстрації представлено зображення ділянки спектра, одержаного однією ПЗЗ-лінійкою TCD1304. З рисунка видно, що тільки ті лінії, амплітуда яких менша за 3000 відліків АЦП, зберігають свою форму. Спочатку лінії досягають амплітудного обмеження. Подальше зростання експозиції призводить до асиметричного, в напрямку транспортування зарядів в ПЗЗ-реєстрі, розпливання ліній, обумовленого блумінг-ефектом. При реєстрації слабких ліній основними компонентами шуму є флуктуації світлового потоку і шуми зчитування. Обидва компонента зменшуються зі збільшенням часу експозиції. Але оскільки задавати різну експозицію для різних ділянок спектра однієї лінійки неможливо, доводиться вдаватися до процедури лінеаризації з використанням даних про дотримання закону взаємозамісності [11].

Одним із способів розширення динамічного діапазону в області великих сигналів є реєстрація спектра з декількома експозиціями: сильні лінії бажано вимірювати з короткою експозицією, а слабкі — з довгою. Тоді, якщо буде дотримуватись закон взаємозамісності яскравості

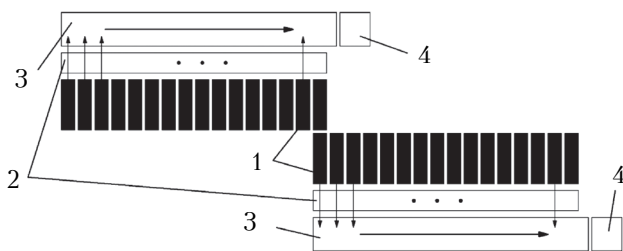


Рис. 2. Шахове розташування ПЗЗ-сенсорів:

- 1 — фоточувлива область сенсорів (лінійки фотодіодів);
- 2 — стоп-клапан; 3 — транспортні реєстри; 4 — схеми детектування зарядових пакетів

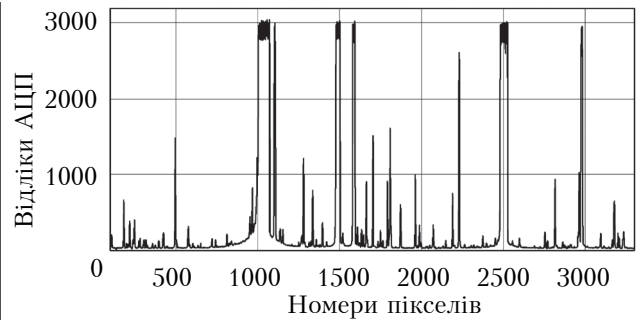


Рис. 3. Спектр газорозрядної неонові лампи ТМН-2 при часі експонування 1,892 с (напрямок транспортування зарядів — вправо)

та витримки, і сильні лінії не будуть перевантажуватися, і слабкі вдасться витягнути з шумів [1, 6]. Особливо шкідливим є асиметричне розповзання заряду в бік транспортування зарядових пакетів в ПЗЗ-реєстрі зсуву даних, бо це маскує сусідні лінії [6].

Відомо [19], що ПЗЗ-детектори мають в своєму складі секції детектування і накопичення зарядів, а також секцію транспортування зарядових пакетів на вихід сенсора. Кожна з цих секцій має свої недосконалості, і їх бажано вивчати окремо. У даній роботі для вивчення процесів, що відбуваються в транспортних реєстрах, використовується два ряди ідентичних ПЗЗ-сенсорів, які мають різні напрямки транспортування зарядів. Для цього в одному з рядів ПЗЗ-фотоприймачі були розвернуті на 180°, що дало стовідсоткове перекриття (**рис. 4**). У цьому випадку зображення, отримані верхнім і нижнім рядами лінійок, збігаються. Це в два рази збільшує кількість відліків і за нормальних шумів підвищує точність в  $2^{1/2}$  разів. Якщо пікселі фотодетекторів в одному ряді лінійок мають меншу площу, ніж в іншому, тоді можна вимірювати дуже яскраві лінії без перевантаження і тим самим розширювати динамічний діапазон, як це пропонується в [10].

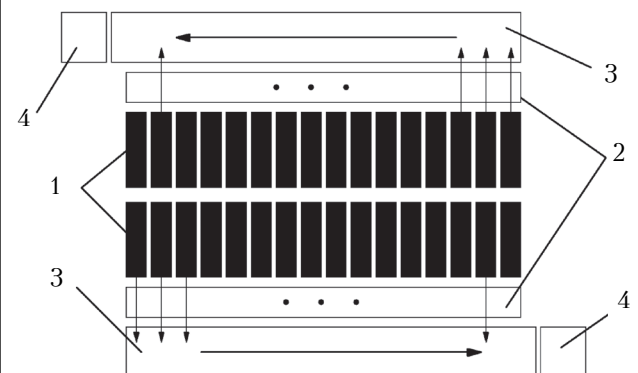


Рис. 4. Паралельне розташування ПЗЗ-сенсорів із зустрічним транспортуванням зарядів (позначення такі ж, як на **рис. 2**)

**Лінеаризація світлосигнальної передавальної функції**

З використанням описаної мультисенсорної камери були проведені вимірювання спектра лампи тліючого розряду ТМН-2. Аналізувалася дуже яскрава лінія, що розташована поблизу пікселя № 1000 на рис. 3. Отримані результати фотометрування представлені на **рис. 5**, де з більшою деталізацією зображена ділянка спектра, отримана з двома різними експозиціями при транспортуванні заряду в протилежних напрямках. З цього рисунку видно, що форма спектральних ліній, зареєстрованих з малою експозицією (пунктир), не залежить від напрямку транспортування зарядів, а для отриманих з великою експозицією спостерігається їхнє асиметричне розпливання з деформацією одного з фронтів. Для відтворення форми спектра перевантаженої лінії пропонується «відрізати» спотворені половинки зображень, а одержані залишки числовими методами скласти по лінії розрізу, як це показано на **рис. 6**. За наявності шумів результат такої компіляції буде залежати від точності визначення координати симетрії лінії, зображеної пунктиром, і якщо для виконання цієї процедури застосувати інструменти методу найменших квадратів, то можна розраховувати на її достатню коректність.

Зазначимо, що частинами, які були «відрізані», теж не слід нехтувати — їх доцільно використовувати для оцінки аналітичного параметра. Якщо їх також скласти по тій же лінії розрізу, то будемо мати дуже розширену, а не звужену, як на рис. 6, лінію. Площа під цією лінією буде зростати й при перевантаженні лінії. Таким чином, якщо в ролі аналітичного параметра використовувати площу під спектральною кривою, то наявність блумінга можна перетворити з недоліку в перевагу. В результаті можна зареєструвати і слабкі лінії, і відновлені, рідко розташовані сильні лінії. Амплітудні характеристики цих сильних ліній можуть бути відновлені з залученням даних про їхнє розширення та дотримання закону взаємозамісності, що дозволить у разі збільшити динамічний діапазон. Ступінь можливого збільшення діапазону залежить від виду спектра, і більш надійний висновок про можливість застосування цього методу можна буде зробити тільки за результатами його практичного застосування.

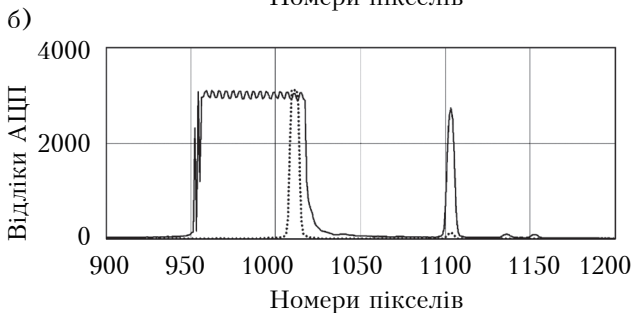
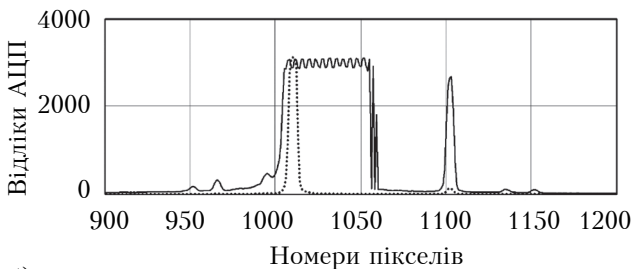


Рис. 5. Спектри, зареєстровані за умов зустрічного транспортування зарядових пакетів в ПЗЗ без антиблумінга з напрямком транспортування вправо (а) та вліво (б) з часом експонування 1,892 с (суцільні лінії) та 0,083 с (пунктирні лінії)

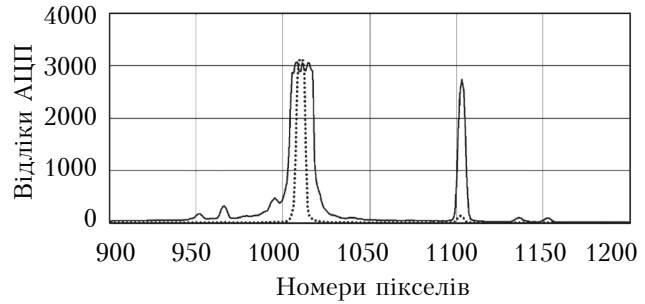


Рис. 6. Результат компіляції графіків, представлених на рис. 5

Таким чином, результатом виконання описаних перетворень є лінеаризована версія спектра з розширеним динамічним діапазоном, для остаточної обробки якої доцільно застосовувати метод максимальної правдоподібності [20].

**Порівняння із сенсорами з антиблумінгом**

З метою вивчення питань дотримання закону взаємозамісності були також досліджені лінійками ПЗЗ-детекторів з антиблумінгом TCD1205, ILX511 (див. таблицю).

З точки зору того, що у сенсорах цього типу відсутнє розтікання зарядів на сусідні пікселі, можна припустити, що вони мають широкий динамічний діапазон. Для перевірки цього припущення були виконані порівняльні дослідження закону взаємозамісності яскравості лінії і тривалості експозиції для лінійок різних типів. Результати фотометрування спектральних ліній різної амплітуди ділилися на величину тривалості експозиції. Згідно з законом взаємозамісності, отримані частки від операції ділення не повинні залежати від тривалості експозиції, тобто вони мають лягати на пряму, паралельну осі експозиції. Відхилення від цієї прямої свідчать про наявність нелінійностей світлосигнальної функції сенсора.



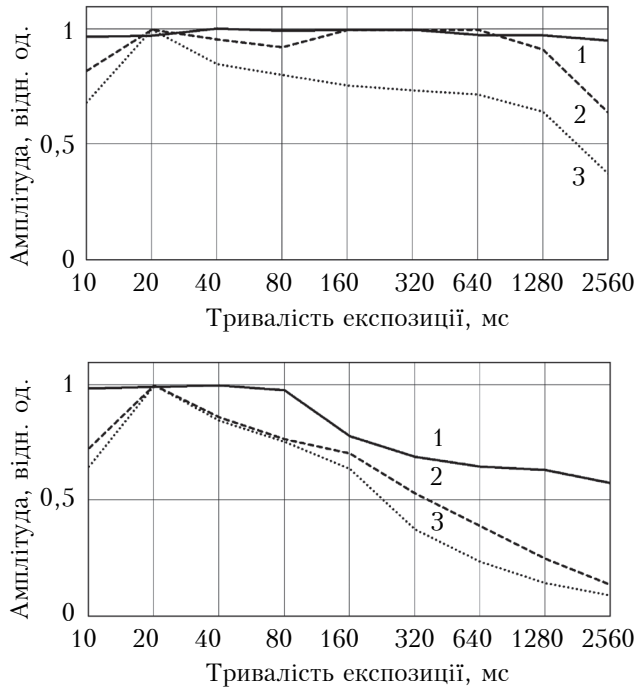


Рис. 7. Вплив тривалості експозиції на поведінку спектральних ліній малої (а) та великої (б) амплітуди, отримані лінійками з різних ПЗЗ-детекторів: 1 – TCD1304 (без антиблумінга); 2 – ILX511 (з антиблумінгом); 3 – TCD1205 (з антиблумінгом)

Графіки на **рис. 7** ілюструють поведінку функції взаємозамісності для двох спектральних ліній, зареєстрованих сенсорами трьох типів: **рис. 7, а** відноситься до лінії з номером пікселя 495, **рис. 7, б** – з номером 1580 (нумерацію див. на **рис. 3**) і відрізняються між собою за амплітудою приблизно в десять разів. З наведених даних випливає, що серед протестованих сенсорів закону взаємозамісності найкраще відповідає лінійка ПЗЗ без антиблумінга TCD1304. Тобто застосування ПЗЗ-детекторів з вбудованими апаратними засобами пригнічення ефекту блумінга, а також приладів з зарядовою інжекцією або КМОН-сенсорів, що не піддаються цьому ефекту, не є ефективним для проведення вимірювань в широкому діапазоні амплітуди. Це пов'язане, по-перше, з тим, що схеми антиблумінгу займають до 30% корисної площі детектора і, отже, погіршують використання фоточутливої площі фотоприймача [21]. По-друге, електрони, що генеруються світлом, втрачаються безповоротньо і тому не можуть бути використані для фотометрування. В цьому відношенні сенсори без антиблумінга ведуть себе принципово по-іншому. Вони не «зливають» надлишкові заряди повз системи реєстрації, а передають їх уздовж транспортного регістра через вимірювальні елементи в систему обробки. Таким чином, надлишкові заряди можуть, в принципі,

бути використані для підвищення фотометричної точності.

Як свідчить **рис. 7**, лінії 1, отримані при застосуванні сенсорів без антиблумінга, зберігають горизонтальне положення в більшому діапазоні, ніж лінії 2 та 3, отримані при застосуванні сенсорів з антиблумінгом, і тільки при великій тривалості експозиції вони починають «провалюватися». Це є наслідком того, що в таких умовах частина зарядів все ж таки втрачається, але ці втрати менші, ніж у сенсорів з антиблумінгом. Наявність антиблумінга в детекторі завжди передбачає його нелінійну світлосигнальну характеристику за рахунок «зливу» заряду, що перевищує певне значення, а різного роду втрати, в тому числі і накопиченого заряду, негативно позначаються на точності.

### Висновки

Аналіз представлених експериментальних результатів дозволяє зробити висновок про те, що основним обмежуючим фактором динамічного діапазону у випадку сильних сигналів є перевантаження схем накопичення і перенесення фотоелектричних зарядів структурами детектора, але цей негативний ефект можна використовувати для розширення динамічного діапазону фотоприймача.

Для ослаблення впливу ефекту блумінгу на результати аналізу пропонується наступне:

- в процесі вимірювань контролювати нелінійність трактів накопичення і перенесення заряду для встановлення дотримання принципу взаємозамісності яскравості ліній і тривалості експозиції;

- використовувати заряд, що асиметрично розпливається при перевантаженнях, для розширення динамічного діапазону, застосовуючи взаємно протилежні напрями його транспортування відносно спектру.

Специфіка емісійних спектрів, коли перевантажені лінії розташовуються відносно рідко, допускає застосування запропонованої методики. В цьому випадку сенсори без антиблумінгу, не зважаючи на розтікання зарядів, характеризуються більшою лінійністю амплітудної характеристики.

Недоліком запропонованого методу є зниження його ефективності у випадках наявності в спектрі близько розташованих ліній високої інтенсивності, але слід зазначити, що в практиці емісійного аналізу це явище зустрічається доволі рідко.

Отримані результати дозволяють розширити можливості використання серійних ПЗЗ-сенсорів для реєстрації спектрів і відкривають перспективу розробки дворядних ПЗЗ-сенсорів оптичних зображень, які простим подвоєнням

схеми можуть на порядки розширювати динамічний діапазон.

ВИКОРИСТАНІ ДжЕРЕЛА

1. Dynamic Range - Hamamatsu Learning Center [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/emccds.html> (Дата звернення 03.09.2019 р.)
2. CCD Saturation and Blooming. Hamamatsu Learning Center [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/ccdsatandblooming.html> (Дата звернення 03.09.2019 р.)
3. Mueller H., Hing P. Effects of Anti-Blooming in Scientific CCD Cameras // Sensovation AG / Technical Note 60802 [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://www.sensovation.com/bausteine.net/file/showfile.aspx?downloadid=8572&sp=E&domid=703&fd=0> (Дата звернення 03.09.2019 р.)
4. Jianping Tong, Jianxun Gao, Fei Wang, Hao Yang. Nonlinear correction of the sensor S11639 in mini spectrometer // Opto-Electronic Engineering Journal. — 2017. — Vol. 44, N 11. — P. 1101–1106.
5. McCormick D. Line array sensor comparison // Advanced MEMS, 2016. [Електронний ресурс]: Режим доступу: [http://www.advancedmems.com/pdf/AMEMS\\_LineSensorArraySummary\\_v1.pdf](http://www.advancedmems.com/pdf/AMEMS_LineSensorArraySummary_v1.pdf) (Дата звернення 03.09.2019 р.)
6. Кострин Д. К. Анализ спектральных линий с различной интенсивностью при диагностике технологических процессов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2015. — № 1. — С. 6–7.
7. Кострин, Д. К., Ухов А. А. Светосигнальная характеристика ПЗС-фотоприемника в области больших световых потоков // Контроль. Диагностика. — 2013. — № 5. — С. 40–42.
8. Ухов А. А. Оптические спектрометры с многоэлементными фотоприемниками / Автореф. дис. д-ра тех. наук. — СПб: ЛЭТИ, 2015.
9. Jian-Kang Zhou, Wei-Min Shen, Min-Xue Tang. Extended dynamic-range techniques of CCD measurements // Opto-Electronic Engineering Journal. — 2006. — Vol. 33, N 10. — P. 96–114.
10. Лабусов В.А., Бехтерев А.В. Линейки фотодiodов — базовые элементы многоканальных анализаторов атомно-эмиссионных спектров // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2007. — Т. 73, Спец. выпуск. — С. 7–12.
11. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А. Динамический диапазон ПЗС-фотоприемников атомно-эмиссионных анализаторов // Журнал прикладной спектроскопии. — 2019. — Т. 86, № 3. — С. 410–416. <http://dx.doi.org/10.1007/s10812-019-00839-9>
12. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А. и др. Мультисенсорная камера на приборах с зарядовой связью линейной структуры для спектральных измерений // Радиоэлектронные и компьютерные системы. — 2019. — Т. 90, №2. — С. 80–88. — <http://dx.doi.org/10.32620/reks.2019.2.07>
13. TCD1304AP Toshiba CCD Linear image sensor. Data Sheet.
14. TCD1205DG Toshiba CCD Linear image sensor. Data Sheet.
15. ILX511 2048-pixel CCD Linear Image Sensor (B/W) SONY
16. Бурмий Ж.П., Золотарева Н.И., Хвостиков В.А., Гражулене С.С. Фотоэлектрическая регистрация эмиссионных спектров на основе приборов с зарядовой связью. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2008. — Т. 74, №6. — С. 26–29.
17. FT232H – Hi-Speed Single Channel USB UART/FIFO IC [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT232H.htm> (Дата звернення 03.03.2019)
18. Cyclone III FPGAs [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/programmable/fpga/cyclone-iii.html> (Дата звернення 03.03.2019)
19. Приборы с зарядовой связью / Под ред. М. Хоувза, Д. Моргана. — Москва: Энергоатомиздат, 1981.
20. Косарев Е. Л. Методы обработки экспериментальных данных — Москва: Физматлит, 2008.
21. Fellers T. J., Davidson M. W. Concepts in Digital Imaging Technology. CCD Saturation and Blooming. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/ccdsatandblooming.html> (Дата звернення 03.03.2019)

Дата надходження рукопису до редакції 20.08 2019 р.

DOI: 10.15222/TKEA2019.5-6.08  
УДК 621.383.72

А. Д. ЕГОРОВ, В. А. ЕГОРОВ,  
С. А. ЕГОРОВ, И. Е. СИНЕЛЬНИКОВ

Украина, г. Харьков, Институт Радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины  
E-mail: yegorov@ire.kharkov.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ ЭФФЕКТА БЛУМИНГА ПЗС-ДЕТЕКТОРОВ ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРА

*Многоэлементные полупроводниковые детекторы светового потока получают все большее распространение в практике оптической спектрометрии. Однако при спектрометрическом применении многие отмечают недостаточный динамический диапазон и нелинейность светосигнальной характеристики таких детекторов. Целью данной работы было выполнение сравнительных исследований динамического диапазона сенсоров в зависимости от наличия антиблуминга, а также разработка путей его расширения при спектрофотометрических измерениях. На экспериментальном материале показан характер нелинейности передаточной светосигнальной функции при сигналах большой амплитуды, показана роль насыщения и размытия (блуминга) изображения сложной системы линий различной амплитуды. Из общих сообщений и анализа предыдущих экспериментов сделан вывод о том, что применение встречного транс-*

портирования зарядов может открыть принципиально новые возможности линеаризации светосигнальной характеристики фотодетекторов.

Для проведения исследований была создана камера, позволяющая регистрировать одни и те же участки спектра парами детекторных линеек с противоположным направлением транспортировки зарядов в приборах с зарядовой связью (ПЗС). Представлено описание технических решений, применяемых при разработке камеры и результаты измерений реальных эмиссионных спектров. Предложены способы обработки данных, зарегистрированных при такой регистрации спектра. Показана возможность значительного расширения динамического диапазона в области больших сигналов.

Результаты измерений подтверждают возможность использования предложенного способа для линеаризации изображений перегруженных спектральных линий. Выполнено сравнение нелинейности сенсоров нескольких типов, отличающихся наличием/отсутствием встроенных средств подавления блуминга.

Полученные результаты могут быть полезны при разработке ПЗС-регистраторов оптических спектров.

Ключевые слова: приборы с зарядовой связью (ПЗС), блуминг-эффект, нелинейные искажения, динамический диапазон, закон взаимозаменяемости.

DOI: 10.15222/TKEA2019.5-6.08  
UDC 621.383.72

A. D. YEGOROV, V. A. YEGOROV,  
S. A. YEGOROV, I. E. SINELNIKOV

Ukraine, Kharkiv, O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine  
E-mail: yegorov@ire.kharkov.ua

## INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY TO COMPENSATE FOR THE BLOOMING EFFECT IN CCD OPTICAL SPECTRAL SENSORS

*The multipixel semiconductor light sensors are becoming more and more popular in the spectroscopy practice. But insufficient for the spectroscopy dynamic range and nonlinearity of such sensors are well known. The described experiment shows nonlinearity of the sensor starting from certain light level. The role of blooming effect is shown on different complex spectral reliefs. The aim of this work was to carry out comparative studies of the dynamic range of sensors depending on the presence of anti-blooming, as well as to develop ways to expand the dynamic range during spectrophotometric measurements. Based on common sense and the analysis of previous experiments it is reasonable to assume that registration of the same spectral region with bidirectional transportation of charges in CCD devices could give extra advantages for the following linearization.*

*In order to investigate the problem, a camera was created that allows recording the same plots of the spectrum with pairs of detector lines with the opposite direction of charge transport in charge-coupled devices (CCD). The paper presents a description of the technical solutions used in the development of the camera and the results of measurements of real emission spectra. The methods for processing data recorded during such spectrum registering are proposed. The possibility of a significant expansion of the dynamic range in the field of large signals is shown.*

*The results of the experiment prove the possibility of using the proposed method for linearization of over-illuminated spectral line images. The comparison of the non-linearity of several types of sensors with different anti-blooming capabilities was performed.*

*The described technology may be used for developing multisensor CCD spectral cameras.*

*Keywords: charge coupled devices, CCD, blooming effect, nonlinear distortion, dynamic range, reciprocity law.*

### REFERENCES

1. Dynamic Range - Hamamatsu Learning Center: <http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/emccds.html> (Access date 03.09.2019 p.)
2. CCD Saturation and Blooming. Hamamatsu Learning Center: <http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/ccdsatandblooming.html> (Access date 03.09.2019 p.)
3. Mueller H., Hing P. Effects of Anti-Blooming in Scientific CCD Cameras // Sensovation AG / Technical

Note 60802: <http://www.sensovation.com/bausteine.net/file/showfile.aspx?downdaid=8572&sp=E&domid=703&fd=0> (Access date 03.09.2019 p.)

4. Jianping Tong, Jianxun Gao, Fei Wang, Hao Yang. Nonlinear correction of the sensor S11639 in mini spectrometer. *Opto-Electronic Engineering Journal*, 2017, vol. 44, no. 11, pp. 1101-1106.

5. McCormick D. Line array sensor comparison // Advanced MEMS, 2016: <http://www.advancedmems.com/>

pdf/AMEMS\_LineSensorArraySummary\_v1.pdf (Access date 03.09.2019 p.)

6. Kostrin D. K. [Analysis of spectral lines with different intensities in the diagnosis of technological processes]. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2015, no. 1, pp. 6-7. (Rus)

7. Kostrin D. K., Ukhov A. A. [Light-signal characteristic of a CCD photodetector in the field of large light fluxes]. *Testing. Diagnostics*, 2013, no. 5, pp. 40-42. (Rus)

8. Ukhov A. A. *Opticheskie spektrometry s mnogoelementnymi fotopriemnikami* [Optical spectrometers with multi-element photodetectors]. Avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk. St.-Petersburg, LETI, 2015, 32 p. (Rus)

9. Jian-Kang Zhou, Wei-Min Shen, Min-Xue Tang. Extended dynamic-range techniques of CCD measurements. *Opto-Electronic Engineering Journal*, 2006, vol. 33, no. 10, pp. 96-114.

10. Labusov V. A., Bekhterev A. V. [Photodiode arrays are the basic elements of multichannel analyzers of atomic emission spectra]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2007, vol. 73, pp. 7-12. (Rus)

11. Yegorov A. D., Yegorov V. A., Yegorov S. A. Dynamic range of CCD photosensors for atomic-emission analyzers. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2019, vol. 86, iss. 3, pp. 443-448. <http://dx.doi.org/10.1007/s10812-019-00839-9>

12. Yegorov A. D., Yegorov V. A., Yegorov S. A. et al. [Multisensor linear CCD camera for spectrometry]. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2019, vol. 90, iss. 2,

pp. 80-88. <http://dx.doi.org/10.32620/reks.2019.2.07> (Rus)

13. TCD1304AP Toshiba CCD Linear image sensor. Data Sheet.

14. TCD1205DG Toshiba CCD Linear image sensor. Data Sheet.

15. ILX511 2048-pixel CCD Linear Image Sensor (B/W) SONY

16. Burmii Zh. P., Zolotareva N. I., Khvostikov V. A., Grazhulene S. S. [Photoelectric registration of emission spectra based on charge-coupled devices]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2008, vol. 74, no. 6, pp. 26-29. (Rus)

17. FT232H – Hi-Speed Single Channel USB UART/FIFO IC. <http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT232H.htm> (Access date 03.03.2019).

18. Cyclone III FPGAs. <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/programmable/fpga/cyclone-iii.html> (Access date 03.03.2019.)

19. *Charge-coupled devices and systems*. Ed. by. M. J. Howes, D. V. Morgan. Chichester, Sussex, England and New York, Wiley-Interscience, 1979. 312 p.

20. Kosarev E. L. *Metody Obrabotki Eksperimental'nykh Danykh* [Experimental data processing methods]. Moscow, Fizmatlit, 2008, 208 p. (Rus)

21. Fellers T. J., Davidson M. W. *Concepts in Digital Imaging Technology. CCD Saturation and Blooming*. <http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/ccdsatand-blooming.html> (Access date 03.03.2019.)

**Опис статті для цитування:**

Єгоров А. Д., Єгоров В. А., Єгоров С. А., Сінельніков І. Є. Дослідження можливостей компенсації ефекта блумінга ПЗЗ-детекторів оптичного спектру. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2019, № 5-6, с. 8–15. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2069.5-6.08>

**Cite the article as:**

Yegorov A. D., Yegorov V. A., Yegorov S. A., Sinelnikov I. E. Investigation of the possibility to compensate for the blooming effect in CCD optical spectral sensors. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 5-6, pp. 8-15. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.08>



**В. П. Зайков, В. І. Мещеряков, Ю. І. Журавльов. Прогнозування показників надійності термоелектричних охолоджуючих пристроїв. Книга 4. Динаміка функціонування однокаскадних ТЕП: монографія.— Одеса: Політехперіодика, 2019.**

Книгу присвячено дослідженню основних параметрів, показників надійності та динаміки функціонування термоелектричних охолоджуючих пристроїв (ТЕП) в процесі їх виходу на стаціонарний режим роботи в різних струмових режимах роботи. Запропоновано динамічну модель функціонування охолоджуючого термоелемента, що враховує масу і теплоємність об'єкта охолодження та конструктивних і технологічних елементів (КТЕ). Показано, як впливає теплоємність і маса КТЕ на час виходу пристрою на стаціонарний режим роботи. Також досліджено динаміку функціонування ТЕП з заданою кількістю термоелементів з урахуванням конструктивних і технологічних елементів. Розглянуто побудову ТЕП з заданим часом виходу на стаціонарний режим роботи. Досліджено вплив на характеристики ТЕП параметричних факторів, таких як середньооб'ємна температура гілки термоелемента, ефективність вихідних термоелектричних матеріалів, комбінація параметрів вихідних матеріалів при їхній однаковій ефективності. Розглянуто динаміку процесу виходу на стаціонарний режим роботи ТЕП з фіксованою геометрією гілок термоелементів за заданого теплового навантаження та перепада температури. Отримано співвідношення для оцінки температури теплопоглинаючого спаю в процесі виходу ТЕП на стаціонарний режим. Крім цього, проведено оцінку впливу на динаміку функціонування ТЕП тепловідводної здатності радіатора.

Призначено для інженерів, науковців, а також студентів відповідних спеціальностей, що займаються питаннями надійності елементів електроніки і в цілому РЕА, а також розробкою і проектуванням термоелектричних пристроїв.