DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-1-II-22-26>

АПЕРТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЕК ФОТОДЕТЕКТОРОВ БЛПП-2000 И БЛПП-4000

© Павел Владимирович Ващенко^{1,2*}, Владимир Александрович Лабусов^{1,2,3}, Руслан Владимирович Шиманский¹

¹ Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 1.

² ООО «ВМК-Оптоэлектроника», Россия, 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 1, к. 100;

*e-mail: vaschenko@vmk.ru

³ Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, д. 20.

*Статья поступила 9 октября 2021 г. Поступила после доработки 22 ноября 2021 г.
Принята к публикации 24 ноября 2021 г.*

В атомно-эмиссионных спектрометрах в составе анализаторов спектров широко применяются линейки фотодетекторов. При ширине спектральной линии, сравнимой с шагом структуры линейки, возникает зависимость регистрируемого сигнала от положения линии относительно фотоячеек линейки фотодетекторов. Как правило, эта зависимость объясняется потерей высоких пространственных частот согласно теореме Котельникова, а апертурная характеристика фотоячеек (зависимость выходного сигнала фотоячейки от положения точечного светового пятна на ее поверхности) считается прямоугольной и определяется их размером. Однако такое приближение в ряде задач может приводить к существенным погрешностям. Цель работы — экспериментальное определение апертурных характеристик линеек фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000, применяемых в составе высокоскоростных анализаторов МАЭС, путем прецизионного перемещения светового пятна диаметром 0,7 мкм с длиной волны 405 нм. Шаг структуры линеек составляет 14 и 7 мкм соответственно. Показано, что при попадании светового пятна между фотоячейками рассматриваемых линеек фотодетекторов потери информации не происходит. Для линейки БЛПП-2000, выполненной по технологии ПЗС с обратной засветкой, коэффициент взаимного влияния фотоячеек составляет 30 %, а интегральный сигнал не зависит от положения светового пятна. Наличие изолирующих областей (локусов) между фотоячейками в линейке БЛПП-4000, выполненной по КМОП-технологии, привело к незначительным колебаниям интегрального сигнала в зависимости от положения светового пятна, однако позволило снизить коэффициент взаимного влияния до 5 %.

Ключевые слова: апертурная характеристика; линейка фотодетекторов; ПЗС; КМОП; атомно-эмиссионный спектрометр; анализатор спектров МАЭС.

PIXEL RESPONSE FUNCTION OF BLPP-2000 AND BLPP-4000 PHOTODETECTOR ARRAYS

© Pavel V. Vaschenko^{1,2*}, Vladimir A. Labusov^{1,2,3}, Ruslan V. Shimansky¹

¹ Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 1, prosp. Akademika Koptyuga, Novosibirsk 630090, Russia.

² VMK-Optoelektronika, 1-100, prosp. Akademika Koptyuga, Novosibirsk, 630090, Russia.; *e-mail: vaschenko@vmk.ru

³ Novosibirsk State Technical University, 20, prosp. K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia.

Received October 9, 2021. Revised November 22, 2021. Accepted November 24, 2021.

Photodetector arrays are widely used in atomic emission spectrometry as a part of spectrum analyzers. When the width of a spectral line is comparable with the array structure pitch, the recorded signal becomes dependent on the position of the line relative to the cells of the photodetector array. This dependence is usually explained by the loss of high spatial frequencies according to the Kotelnikov theorem, and the pixel response function of the cells (the dependence of the cell output signal on the position of a point light spot on the cell surface) is considered rectangular and determined by the cell size. However, this approximation can sometimes lead to significant errors. The aim of this study is to determine experimentally the pixel response function of BLPP-2000 and BLPP-4000 photodetector array cells used in high-speed MAES analyzers by precise moving of a light spot with a diameter of 0.7 μm and a wavelength of 405 nm. The array cell width is 14 and 7 μm , respectively. It is shown that when a light spot enters between the

cells of BLPP-2000 and BLPP-4000 photodetectors, no information is lost. As for the cells of back-illuminated CCD BLPP-2000 arrays, the coefficient of mutual influence is 30% and the integral signal does not depend on the position of the light spot. The presence of isolating areas (loci) between the cells in CMOS BLPP-4000 arrays led to insignificant oscillations of the integral signal depending on the position of the light spot, but, however, provided reduction of the coefficient of mutual influence to 5%.

Keywords: pixel response function; photodetector arrays; CCD; CMOS; atomic emission spectrometer; spectrum analyzer MAES.

Введение

В настоящее время в атомно-эмиссионной спектроскопии широко применяют высокоскоростные многоканальные анализаторы эмиссионных спектров (МАЭС) на основе сборок ПЗС-линеек с обратной засветкой БЛПП-2000 и КМОП-линеек БЛПП-4000 [1 – 6]. Шаг структуры линеек составляет 14 и 7 мкм соответственно. Сигнал спектрометра с МАЭС можно представить в виде:

$$I_i = \int_R F(x)A(x - x_i)dx, \quad (1)$$

где i — номер фотоячейки; $F(x)$ — профиль интенсивности излучения на поверхности линейки фотодетекторов; $A(x - x_i)$ — апертурная характеристика i -й фотоячейки; x_i — положение центра i -й фотоячейки. Как правило, апертурная характеристика (зависимость фотоотклика фотоячейки от положения светового пятна малого размера на ее поверхности) считается прямоугольной, и ее ширина определяется размером фотоячейки. Однако такое приближение, например, при восстановлении функции профиля излучения на поверхности детектора [7] приводит к высоким погрешностям. Апертурную характеристику можно получить путем прецизионного перемещения с шагом ~ 1 мкм светового пятна такого же размера [8 – 11].

Цель работы — определение апертурных характеристик линеек фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000.

Экспериментальная установка

В работе использовали лазерный нанолитограф (ЛНЛ) с X-Y системой позиционирования [12 – 15]. Бескорпусные кристаллы линеек фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 по очереди устанавливали на двухкоординатный моторизованный стол. Погрешность перемещения линеек составляла не более 0,1 мкм. Линейки БЛПП-2000 и БЛПП-4000 перемещали вдоль линии размещения фотоячеек с шагом 0,5 и 0,25 мкм соответственно. На поверхность фотоячеек фокусировали излучение непрерывного ультрафиолетового лазера с длиной волны 405 нм. Диаметр фокального пятна составлял 0,7 мкм.

Обсуждение результатов

При каждом положении светового пятна получали выходной сигнал фотоячеек $U(x)$ и рассчитывали интегральный сигнал (сумму значений выходных сигналов соседних фотоячеек). На рис. 1 показаны зависимости выходного сигнала $U(x)$ нескольких расположенных рядом фотоячеек и их интегрального сигнала от положения светового пятна. Из графиков видно, что фотоячейка собирает фотогенерированные излучением носители, образующиеся и за ее пределами. При этом при попадании светового пятна между двух фотоячеек потери информации не происходит, а сигнал делится между ними примерно поровну.

Стоит отметить, что интегральный сигнал линейки БЛПП-4000 имеет небольшой уровень колебаний с максимумами, соответствующими попаданию светового пятна между фотоячейками. Это связано, по-видимому, с наличием между фотоячейками данной линейки, изготовленной по КМОП-технологии, изолирующих областей (локусов) для снижения взаимного влияния фотоячеек. Локусы, обычно изготавливаемые из SiO_2 , пропускают излучение, и образующиеся под ними носители заряда путем диффузии достигают соседних фотоячеек. При этом слой локуса на определенных длинах волн может снижать коэффициент отражения излучения от поверхности линейки (просветлять), что приводит к увеличению количества фотогенерированных носителей под ним и, соответственно, к увеличению интегрального сигнала. Подобные колебания интегрального сигнала у линейки БЛПП-2000 отсутствуют, так как она выполнена по технологии ПЗС с обратной засветкой (без локусов). Однако при этом наблюдается существенно большее «растекание» фотогенерированных зарядов на соседние фотоячейки, в связи с чем по этой технологии практически невозможно сделать шаг фотоячеек 7 мкм, как по технологии КМОП в БЛПП-4000.

Из рис. 1 также видно, что выходной сигнал при положении светового пятна в центре фотоячейки линейки БЛПП-2000 составляет 58 % от интегрального сигнала, а для линейки БЛПП-4000 — 86 %. Вклад других фотоячеек в интегральный сигнал для этих линеек составляет 42 и

Рис. 1. Выходной сигнал фотоячеек (черный) и интегральный сигнал (красный) линеек БЛПП-2000 (а) и БЛПП-4000 (б) на длине волны $\lambda = 0,405$ мкм

Fig. 1. Output signal (in black) and the integral signal (in red) of BLPP-2000 (a) and BLPP-4000 (b) photodetector array cells at a wavelength $\lambda = 0.405 \mu\text{m}$

Рис. 2. Апертурные характеристики линеек фотодетекторов БЛПП-2000 (а) и БЛПП-4000 (б) на длине волны $\lambda = 0,405$ мкм

Fig. 2. Aperture characteristics of BLPP-2000 (a) and BLPP-4000 (b) photodetector array cell at a wavelength $\lambda = 0.405 \mu\text{m}$

14 % соответственно. Это означает, что в линейке БЛПП-2000 в три раза больше фотогенерированных носителей попадает в соседние фотоячейки, чем в БЛПП-4000.

На рис. 2 показан общий вид апертурных характеристик. Цветом обозначены границы фотоячеек и отмечен уровень регистрируемого сигнала

ла при попадании точечного светового пятна в центр фотоячейки x_0 . Для линейки БЛПП-2000, если обозначить выходной сигнал фотоячейки x_0 за 100 %, уровень выходного сигнала близлежащих фотоячеек составит 30 и 4 % соответственно. При этом соотношение соответствующих выходных сигналов фотоячеек БЛПП-4000 — 100, 5

и 1 %. Отношение значений выходных сигналов соседней и освещенной фотоячейки обычно называют коэффициентом взаимного влияния фотоячеек. Этот коэффициент для линейки БЛПП-2000 составляет 30 %, а для БЛПП-4000 — 5 %.

Заключение

Таким образом, экспериментально получены апертурные характеристики ПЗС-линеек с обратной засветкой БЛПП-2000 и КМОП-линеек БЛПП-4000 на длине волны $\lambda = 0,405$ мкм. Показано, что при попадании светового пятна между фотоячейками линеек фотодетекторов потери информации не происходит. Коэффициент взаимного влияния фотоячеек линейки БЛПП-2000 составляет 30 %, а БЛПП-4000 — 5 %. Обнаружено увеличение интегрального сигнала линейки БЛПП 4000 между фотоячейками до 2 – 3 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабин С. А., Селюнин Д. О., Лабусов В. А. Быстродействующие анализаторы МАЭС на основе линеек фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1. Ч. II. С. 96 – 102. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-96-102
2. Данилова Ю. В., Васильева И. Е., Шабанова Е. В. и др. Благородные металлы в породах сарминской серии: фазовый состав и элементные ассоциации / Геохимия. 2021. Т. 66. № 3. С. 262 – 274. DOI: 10.31857/S0016752521010027
3. Шевелев Г. А., Василенко Л. И., Каменская Э. Н. и др. Благородные и редкие металлы в некоторых месторождениях угля Казахстана / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1. Ч. II. С. 38 – 44. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-38-44
4. Pelipasov O. V., Polyakova E. V. Matrix effects in atmospheric pressure nitrogen microwave induced plasma optical emission spectrometry / J. Anal. At. Spectrom. 2020. Vol. 35. P. 1389 – 1394. DOI: 10.1039/D0JA00065E
5. Polyakova E. V., Pelipasov O. V. Plasma molecular species and matrix effects in the Hummer cavity microwave induced plasma optical emission spectrometry / Spectrochim. Acta. Part B. 2020. Vol. 173. 105988. DOI: 10.1016/j.sab.2020.105988
6. Зарубин И. А. Возможности малогабаритного спектрометра «Колибри-2» в атомно-эмиссионном спектральном анализе / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 1. Ч. II. С. 114 – 117. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-83-1-II-114-117
7. Ващенко П. В., Лабусов В. А., Лихачев А. В. Восстановление распределения интенсивности излучения на поверхности многоэлементного твердотельного детектора / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 1. Ч. II. С. 94 – 95.
8. Niemi S., Cropper M., Szafraniec M., Kitching T. Measuring a charge-coupled device point spread function: euclid visible instrument CCD273-84 PSF performance / Exp. Astron. 2015. Vol. 39. P. 207 – 231. DOI: 10.1007/s10686-015-9440-7
9. Mahato S., De Ridder J., Meynants G., et al. Measuring Intra-pixel Sensitivity Variations of a CMOS Image Sensor / IEEE Sens. J. 2018. Vol. 18. N 7. P. 2722 – 2728. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2798698
10. Fumo P., Waldron E., Laine Juha-Pekka, Evans G. Pixel response function experimental techniques and analysis of active pixel sensor star cameras / J. Astron. Telesc., Instr. Syst. 2015. Vol. 1. N 2. 028002. DOI: 10.1117/1.JATIS.1.2.028002

11. Tharun B., Georgiev T., Gille J., Goma S. Contrast computation methods for interferometric measurement of sensor modulation transfer function / J. Electron. Imaging. 2018. Vol. 27. N 1. 013015. DOI: 10.1117/1.JEI.27.1.013015
12. Belousov D. A., Poleshchuk A. G., Khomutov V. N. Device for Characterization of the Diffraction Pattern of Computer-Generated Holograms in a Wide Angular Range / Optoelectron. Instrument. Proc. 2018. Vol. 54. P. 139 – 145. DOI: 10.3103/S8756699018020048
13. Veiko V. P., Korol'kov V. P., Poleshchuk A. G., et al. Study of the spatial resolution of laser thermochemical technology for recording diffraction microstructures / Quantum Electron. 2011. Vol. 41. P. 631 – 636. DOI: 10.1070/QE2011V041N07ABEH014528
14. Poleshchuk A. G., Korolkov V. P. Fabrication and certification of high-quality and large-aperture CGHs for optical testing / Proc. of the EOS Topical Meeting on Diffractive Optics, Rochester, NY, USA, 9 – 11 October 2006. P. 20 – 23. DOI: 10.1364/OFT.2006.OFTuB2
15. Poleshchuk A. G., Korolkov V. P., Cherkashin V. V., et al. Minimization methods of direct laser recording errors of diffractive optical elements / Optoelectron. Instrument. Proc. 2002. Vol. 38. N 3. P. 3 – 19.

REFERENCES

1. Babin S. A., Selyunin D. O., Labusov V. A. High-Speed Multichannel MAES Analyzers Based on BLPP-2000 and BLPP-4000 Photodetector Arrays / Inorg. Mater. 2020. Vol. 56. N 14. P. 1431 – 1435. DOI: 10.1134/S0020168520140022
2. Danilova Y. V., Savelyeva V. B., Danilov B. S., et al. Noble metals in rocks of the sarma group: phase composition and element associations / Geochem. Int. 2021. Vol. 59. N 3. P. 301 – 313. DOI: 10.1134/S001670292101002X
3. Shevelev G. A., Vasilenko L. I., Kamenskaya E. N., et al. Noble and Rare Metals in Some Coal Deposits of Kazakhstan / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2019. Vol. 85. N 1. Part II. P. 38 – 44 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-38-44
4. Pelipasov O. V., Polyakova E. V. Matrix effects in atmospheric pressure nitrogen microwave induced plasma optical emission spectrometry / J. Anal. At. Spectrom. 2020. Vol. 35. P. 1389 – 1394. DOI: 10.1039/D0JA00065E
5. Polyakova E. V., Pelipasov O. V. Plasma molecular species and matrix effects in the Hummer cavity microwave induced plasma optical emission spectrometry / Spectrochim. Acta. Part B. 2020. Vol. 173. 105988. DOI: 10.1016/j.sab.2020.105988
6. Zarubin I. A. Capabilities of a Compact Kolibri-2 Spectrometer in Atomic Emission Spectral Analysis / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2017. Vol. 83. N 1. Part II. P. 114 – 117 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-83-1-II-114-117
7. Vaschenko P. V., Labusov V. A., Lihachev A. V. Recovery of the radiation intensity distribution at the surface of a multi-element solid state detector / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 1. Part II. P. 94 – 95 [in Russian].
8. Niemi S., Cropper M., Szafraniec M., Kitching T. Measuring a charge-coupled device point spread function: euclid visible instrument CCD273-84 PSF performance / Exp. Astron. 2015. Vol. 39. P. 207 – 231. DOI: 10.1007/s10686-015-9440-7
9. Mahato S., De Ridder J., Meynants G., et al. Measuring Intra-pixel Sensitivity Variations of a CMOS Image Sensor / IEEE Sens. J. 2018. Vol. 18. N 7. P. 2722 – 2728. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2798698
10. Fumo P., Waldron E., Laine Juha-Pekka, Evans G. Pixel response function experimental techniques and analysis of active pixel sensor star cameras / J. Astron. Telesc., Instr. Syst. 2015. Vol. 1. N 2. 028002. DOI: 10.1117/1.JATIS.1.2.028002
11. Tharun B., Georgiev T., Gille J., Goma S. Contrast computation methods for interferometric measurement of sensor modulation transfer function / J. Electron. Imaging. 2018. Vol. 27. N 1. 013015. DOI: 10.1117/1.JEI.27.1.013015

12. **Belousov D. A., Poleshchuk A. G., Khomutov V. N.** Device for Characterization of the Diffraction Pattern of Computer-Generated Holograms in a Wide Angular Range / *Optoelectron. Instrument. Proc.* 2018. Vol. 54. P. 139 – 145.
DOI: 10.3103/S8756699018020048
13. **Veiko V. P., Korol'kov V. P., Poleshchuk A. G., et al.** Study of the spatial resolution of laser thermochemical technology for recording diffraction microstructures / *Quantum Electron.* 2011. Vol. 41. P. 631 – 636.
DOI: 10.1070/QE2011V041N07ABEH014528
14. **Poleshchuk A. G., Korolkov V. P.** Fabrication and certification of high-quality and large-aperture CGHs for optical testing / *Proc. of the EOS Topical Meeting on Diffractive Optics*, Rochester, NY, USA, 9 – 11 October 2006. P. 20 – 23.
DOI: 10.1364/OFT.2006.OFTuB2
15. **Poleshchuk A. G., Korolkov V. P., Cherkashin V. V., et al.** Minimization methods of direct laser recording errors of diffractive optical elements / *Optoelectron. Instrument. Proc.* 2002. Vol. 38. N 3. P. 3 – 19.