

Перспективные направления развития устройств считывания многоэлементных ИК фотоприемных устройств (обзор)

И. И. Ли

Представлен прогноз возможных путей развития ИК ФПУ. Подчеркивается возрастающая роль кремниевых устройств считывания на характеристики и функциональные возможности многоэлементных ИК ФПУ следующих поколений.

Ключевые слова: ИК ФПУ, кремниевый мультиплексор, пиксель, топология фоточувствительных элементов, АЦП, ЦАП, компаратор.

Ссылка: Ли И. И. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 5. С. 417.

Reference: I. I. Lee, Usp. Prikl. Fiz. 6 (5), 417 (2018).

Введение

На начальных этапах развития многоэлементных инфракрасных фотоприемных устройств (первое и второе поколение ИК ФПУ) основные усилия были направлены на решение материаловедческих и технологических проблем с целью повышения чувствительности и повышения пространственного разрешения путем увеличения формата ИК ФПУ и уменьшения размеров фоточувствительных элементов [1–3].

Для устройств считывания первого и второго поколения ИК ФПУ основной задачей было считывание фотосигналов с многоэлементных фотоприемников и их мультиплексирование на несколько выходов.

Целью данной работы является представление прогноза дальнейших возможных путей развития ИК ФПУ.

Устройства считывания третьего поколения

Постепенно дополнялся перечень задач, решаемых кремниевыми мультиплексорами и, соответственно, усложнялась их структура.

Важным шагом в этом направлении стала структура устройства считывания с «командным» регистром, что обеспечило возможность опера-

тивно, в режиме реального времени, изменять режимы работы ИК ФПУ, например, такие как выбор произвольного окна (т. н. «оконный режим»), регулировать время накопления, кадровую частоту, формировать большинство управляющих напряжений непосредственно на кристалле.

К началу 2000-х годов задачи, поставленные для ИК ФПУ второго поколения были в основном решены: реализованы ИК ФПУ различных форматов вплоть до 2048×2048 с чувствительностью, близкой к режиму ОФ, и сформулированы задачи на следующее, третье поколение ИК ФПУ.

Общий облик ИК ФПУ третьего поколения дан в ряде работ, основной задачей для которого является не увеличение формата, а повышение вероятности обнаружения и идентификации целей, снижение габаритных размеров, потребляемой мощности и стоимости многоэлементных ИК ФПУ, задача SWAP [4–6].

Следует отметить, что уже к настоящему времени решены большинство материаловедческих и технологических проблем необходимых для реализации ИК ФПУ третьего поколения:

– разработаны мультиспектральные многоэлементные ИК ФПУ [6, 7];

– разработаны на основе лавинных фотодиодов многоэлементные ИК ФПУ, обеспечивающие в условиях низкого уровня фона работу в режиме счета фотонов в спектральном диапазоне 1–5 мкм [8–10];

– удалось повысить температуру работы ИК ФПУ на 30–40 К. Эта задача решена как путем совершенствования технологии (в частности, совершенствовании основного материала КРТ), так и поиска новых материалов и новых физических принципов детектирования излучения [2, 11–16].

Ли Ирлам Игнатьевич, в.н.с., д.т.н.

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН.

Россия, 630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.

Тел.: 8(383) 330-77-81, 8(913) 715-72-19.

E-mail: irlamlee@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 26 июля 2018 г.

© Ли И. И., 2018

В меньшей степени, несмотря на прогресс в области кремниевой технологии, изменения коснулись устройств ввода. Фотосигналы в устройствах считывания на пиксельном уровне формируются в аналоговом виде и становятся основным фактором, ограничивающим пороговую чувствительность и динамический диапазон многоэлементных ИК ФПУ.

Для устройств считывания третьего поколения основной задачей является переход к цифровому формированию видеосигналов. В большинстве современных кремниевых мультиплексоров формирование управляющих напряжений производится заданием цифрового кода на встроенные ЦАП, видеосигналы на выходы выводятся в цифровой форме (многоканальные, на столбец 12–14-разрядные АЦП) [17].

Прогресс в области кремниевой технологии позволил приступить к разработке кремниевых мультиплексоров с преобразованием фотосигналов в цифровую форму на пиксельном уровне. Преимущества устройств считывания с цифровым формированием фотосигналов на пиксельном уровне подтверждает разработка кремниевого мультиплексора форматом 320×256, с 15-разрядными АЦП в каждом пикселе [18–20]. Каждая ячейка устройства считывания с шагом 25 мкм содержит прямоинжекционное устройство ввода фотосигналов, компаратор, 15-разрядный счетчик, 15-битное ОЗУ, всего более 230 КМОП-транзисторов. Благодаря увеличению эффективной зарядовой емкости устройств считывания более чем на два порядка, появилась возможность полностью использовать падающее на фотоприемник излучение в течение всего кадрового времени ~ 10 мс, т. е. увеличить время накопления с ~ 0,1 до 10 мс и, тем самым, повысить в 5–10 раз, до теоретического предела (~ 2 мК) температурное разрешение ИК ФПУ в спектральном диапазоне 8–10 мкм.

Важно отметить, что достижения в области устройств считывания ИК ФПУ, в том числе с формированием фотосигналов в цифровой форме, во многом базируются на результатах многолетних разработок КМОП-приемников изображения видимого диапазона. Их разработка, с середины 90 годов, ввиду огромного потребительского рынка (мобильные телефоны, фотоаппараты, охраняемые системы и т. д.), интенсивно велась всеми ведущими фирмами [21]. В этот период они были отработаны на структурном и схемотехническом уровне, сформированы библиотеки, привязанные к конкретным технологиям, основных функциональных элементов устройств считывания с формированием фотосигналов в цифровой форме, АЦП, ЦАП, компараторы, счетчики, ОЗУ и т. д. В РФ такие работы велись в минимальном объеме.

Отметим ряд проблем, препятствующих разработке перспективных кремниевых мультиплексоров.

– Для кремниевых мультиплексоров с преобразованием сигналов в цифровую форму на пиксельном уровне необходимо использовать кремниевые технологии с топологическими нормами 90–130 нм. При этом изготовление кристаллов с многоканальными аналоговыми и цифровыми блоками предъявляет более жесткие требования к уровню технологии, чем для чисто цифровых устройств [22, 23]. В частности, более высокие требования предъявляются к однородности геометрических размеров и электрофизическим параметрам функциональных элементов кристаллов. Так, для МДП-транзисторов необходимо минимизировать разброс пороговых напряжений, а для емкостей – удельные значения емкости и т. д.;

– Как правило, при заказе опытных образцов кремниевых мультиплексоров необходимо изготовить одну или несколько пластин. Стоимость и время выполнения таких заказов для отечественных разработчиков существенно превышает время и стоимость аналогичных заказов для зарубежных фирм, имеющих доступ к предприятиям с опцией «фаундри».

Приоритетные направления развития устройства считывания следующего поколения

В ИФП СО РАН в инициативном порядке ведутся разработки перспективных кремниевых мультиплексоров. В частности, на структурном и схемотехническом уровне разрабатывались блоки, устройства, решающие ключевую задачу для перспективных устройств считывания, а именно, преобразование фотосигналов в цифровую форму на пиксельном уровне. Велась разработка основных функциональных узлов устройств ввода с цифровым формированием фотосигналов на основе прямоинжекционных устройств ввода и на основе трансимпедансных усилителей, компараторов, счетчиков и т. д., осуществлялось эскизное проектирование топологии ячеек устройств ввода. В частности, разрабатывались:

– мультиплексоры для ИК ФПУ с режимом ВЗН [24, 25];

– мультиплексоров для матричных ИК ФПУ с устройствами считывания и преобразования фотосигналов в цифровую форму на пиксельном уровне на базе прямоинжекционных устройств ввода [26, 27];

– мультиплексоров для матричных ИК ФПУ с устройствами считывания и преобразования фотосигналов в цифровую форму на пиксельном уровне на базе трансимпедансных усилителей [28];

– мультиплексоров обеспечивающие наряду с формированием тепловизионного изображения изображений информацию о дальности до объектов изображения в каждом пикселе, т. е. решающие проблему формирования трехмерного изображения [29–31].

Аналогичные разработки ведутся и в АО НПО «Орион» [32].

В рамках программ развития многоэлементных ИК ФПУ на первом этапе до 2020 года необходимо провести целевые ОКР, направленные на решение ключевой задачи для перспективных кремниевых мультиплексоров, т. е. мультиплексоров с формированием фотосигналов в цифровой форме на пиксельном уровне.

1. Разработать мультиплексор на основе прямоинжекционного устройства с цифровым преобразованием сигналов на пиксельном уровне и ИК ФПУ на их основе с шагом не более 20 мкм.

2. Разработать мультиплексор на основе трансимпедансного усилителя с цифровым преобразованием сигналов на пиксельном уровне с шагом не более 20 мкм.

В спектральном диапазоне 5–12 мкм в матричных ИК ФПУ, как правило, используются прямоинжекционные устройства считывания. Основным преимуществом данного типа устройств ввода сигналов является возможность реализации максимальной зарядовой емкости при минимальных требованиях к топологическим нормам кремниевой технологии. Однако устройствам считывания с прямой инжекцией заряда присущи известные недостатки, главным образом, обусловленные режимом работы входного затвора в подпороговом режиме, что приводит к повышенным требованиям к динамическому сопротивлению фотоприемных элементов. Современные кремниевые технологии с топологическими нормами 90–180 нм обеспечивают возможность разместить в ячейке формата $\sim 20 \times 20$ мкм 250–300 транзисторов, что дает возможность реализовать базовые цифровые блоки, такие как АЦП, ЦАП, компараторы, ОЗУ и т. п. в каждом пикселе. Поэтому необходимость дополнительно разместить в ячейке ввода трансимпедансный усилитель из 7–8 транзисторов уже не играет принципиальной роли. Требования к динамическому сопротивлению фотодиодов для кремниевых мультиплексоров на основе трансимпедансного усилителя значительно ниже. Следовательно, устройства ввода сигналов на базе трансимпедансного усилителя с преобразованием фотосигналов в цифровой форме на пиксельном уровне могут стать основным типом в кремниевых мультиплексорах, в т. ч. для ИК ФПУ

длинноволнового спектрального диапазона, позволят реализовать предельное температурное разрешение, поднять температуру работы на 10–20 К и, тем самым, существенно снизить вес, габаритные размеры, энергопотребление и стоимость ИК ФПУ.

Принципиально важно сформировать библиотеку основных функциональных элементов с преобразованием фотосигналов в цифровой форме на пиксельном уровне на привязанную к конкретной технологии, например, к технологии с топологическими допусками 90 нм. Это позволит в сжатые сроки реализовывать современные многоэлементные ИК ФПУ различного назначения.

По-видимому, уже к 2020 году на рынке будут широко представлены ИК ФПУ на основе кремниевых мультиплексоров с цифровым формированием видеосигналов на пиксельном уровне, с качественно более высокими параметрами.

Несомненно, что появление таких ИК ФПУ на базе нового поколения кремниевых мультиплексоров (с цифровым преобразованием фотосигналов на пиксельном уровне) качественно изменит возможности и тактико-технические характеристики тепловизионных систем. Поэтому большинство исследователей подчеркивают, что характеристики и функциональные возможности ИК ФПУ третьего поколения и, тем более, следующих поколений, в основном будут определяться прогрессом в области кремниевых устройств (систем) считывания [4, 5, 20].

Заключение

Период с 2020 годов будет временем становления ИК ФПУ следующего, четвертого поколения. В основе ИК ФПУ третьего и следующего четвертого поколения будут кремниевые мультиплексоры с преобразованием фотосигналов в цифровую форму на пиксельном уровне и обеспечивающие (при минимальном количестве внешних управляющих сигналов) реализацию различных дополнительных функций по формированию и обработке видеоизображений в фокальной плоскости ИК ФПУ.

Например, будут реализованы ЛИДАРы нового поколения, обеспечивающие дополнительно к тепловизионному изображению измерение расстояния до объектов для каждого пикселя, т. е. формирование трехмерного изображения путем измерения в каждом пикселе времени задержки прихода отраженных оптических сигналов от единичного лазерного импульса. Такие ЛИДАРы позволят качественно изменить возможности систем технического зрения нового поколения, необходимых для перспективных роботизированных си-

стем различного назначения, и уже сейчас западные фирмы активно ведут работы в этом направлении [33–35].

Если на ранних этапах развития ИК-фотоприемников в основном велось в интересах военной техники, то с улучшением характеристик ИК ФПУ, снижения их стоимости расширились области их применения в гражданских отраслях, что объясняет возрастающую важность этого технического направления. Например, программа «Робототехнические комплексы (системы) военного, специального и двойного назначения» выделена отдельным пунктом в числе основных направлений стратегии НТР РФ: (Указ Президента Российской Федерации от 16.12.2015 г. № 623).

Кремниевые мультиплексоры, обеспечивающие обработку в режиме реального времени огромных массивов информации в цифровой форме, решающие задачи формирования ИК-видеосигналов, распознавания образов и т. д., фактически трансформируются в специализированные процессоры, по сути, формируют самостоятельное научно-техническое направление. Именно такие кремниевые мультиплексоры будут определять облик и основные технические характеристики и функциональные возможности систем технического зрения следующих поколений.

Преодолеть сложившееся отставание в области многоэлементных ИК ФПУ, особенно в области кремниевых мультиплексоров, невозможно без целевых программ, направленных на разработку перспективных кремниевых мультиплексоров с формированием фотосигналов в цифровой форме на пиксельном уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рогальский А.* Инфракрасные детекторы. – Новосибирск: Изд-во «Наука», 2003.
2. *Rogalski A.* // Opto-Electronics Review. 2012. Vol. 20. No. 3. P. 279.
3. *Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А.* Твердотельная электроника. Фотодиоды. – М.: Физматкнига, 2011.
4. *Norton P. R.* // Proc. SPIE. 1999. Vol. 3698. P. 652.
5. *Chen L., Hewitt M., et al.* // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4028. P. 124.
6. *Tribolet P., Destefanic G.* // Proc. SPIE. 2005. Vol. 5783. P. 350.
7. *Rothman J., Perrais G., et al.* // Proc. SPIE. 2008. Vol. 6840. P. 69402M.
8. *Smith E., Gallagher A., et al.* // Proc. SPIE. 2009. Vol. 7298. P. 72981Y.
9. *Vojetta G., Guellec F., et al.* // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8375. P. 83750Y.
10. *Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Седнев М. В., Лопухин А. А., Коротаев Е. Д.* // Прикладная физика. 2015. № 1. С. 87.
11. *Walter M., Rehm R., et al.* // Proc. SPIE. 2010. Vol. 7608. P. 76081Z.
12. *Black S., Gordon T., et al.* // Proc. SPIE. 2011. Vol. 8012. P. 80121A-1-12.
13. *Reibel Y., Rublado L., et al.* // Proc. SPIE. 2011. Vol. 8185. P. 818503.
14. *Vuillermet M., Billon-Lanfrey D., et al.* // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8353. P. 83532K.
15. *Klipstein P., Klin O., et al.* // Optical Engineering. 2011. Vol. 50. No. 6. P. 061002.
16. *Ase A. L., (Ed.),* Photodetectors Based on the Cadmium-Mercury-Telluride Epitaxial System, – Novosibirsk, SBRAS Publishing House, 2012.
17. *Gershon G., et al.* // Proc. SPIE. 2013. Vol. 8704. P. 870438-1.
18. *Bisotto S., et al.* // Proc. SPIE. 2010. Vol. 7834. P. 78340J-1.
19. *Brown M., et al.* // Proc. SPIE. 2010. Vol. 7608. P. 76082H-1.
20. *Лу И. И.* // Прикладная физика. 2009. № 2. С. 69.
21. Special issue IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 56. No. 11, November 2009.
22. *Kar-Roy F., et al.* // Proc. SPIE. 2011. Vol. 7660. P. 76603v-1.
23. *Kozlowsky L.* // Opto-Electronics Review. 2006. Vol. 14. No. 1. P. 11.
24. *Лу И. И.* Патент РФ № 2465684, приоритет от 21.06.2011.
25. *Зверев А. В.* Патент РФ № 2498456 С1 от 24.05.2012.
26. *Кузнецов П. А., Моцев И. С.* // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 1. С. 83.
27. *Зверев А. В., Макаров Ю. С., Михантьев Е. А., Дворецкий С. А.* // Автометрия. 2016. Т. 52. № 4. С. 79.
28. *Лу И. И., Гришанов Н. В.* / Труды XXV международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, г. Москва, 2018. С. 217–218.
29. *Лу И. И., Гришанов Н. В.* Патент РФ № 2529768 от 5.03.2013.
30. *Лу И. И.* // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 4. С. 407.
31. *Lee I. I., Grishanov N. V.* / 16th International conference of Young Specialist on Micro/ nanotechnologies and electron Devices EDM- 2015, ISBN 978-5-7782-2704-0. P. 279–281.
32. *Бурлаков И. Д., Кузнецов П. А., Моцев И. С., Болтарь К. О., Яковлева Н. И.* // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 4. С. 383.
33. *Guellec F., Tchagaspanian M., de Borniol E., et al.* // Proc. SPIE. 2008. Vol. 6940. P. 69402M.
34. *Borniol E., Castelein P., Guellec F., et al.* // Proc. SPIE. 2011. Vol. 8012. P. 801232.
35. *Jack M., Charman G., et al.* // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8353. P. 83532F.

Perspective directions for the development of reading devices multi-element IR photodetectors (a review)

I. I. Lee

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS
13 Ak. Lavrentyeva av., Novosibirsk, 630090, Russia

Received July 26, 2018

A prognosis for possible ways of IR FPA development is presented. The increasing role of silicon ROICs for next generations IR FPA characteristics and functional potentials is emphasized.

Keywords: IR FPA, silicon multiplexer, pixel, topology of photosensitive elements, ADC, DAC, comparator.

REFERENCES

1. A. Rogalski, *Infrared Detectors* (Gordon and Breach Science Publishers, Canada, 2000; Nauka, Novosibirsk, 2003).
2. A. Rogalski, *Opto-Electronics Review* **20** (3), 279 (2012).
3. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid State Electronics. Photodiodes* (Moscow, Fizmatkniga Publ., 2011) [in Russian].
4. P. R. Norton, *Proc. SPIE* **3698**, 652 (1999).
5. L. Chen, M. Hewitt, et al., *Proc. SPIE* **4028**, 124 (2000).
6. P. Tribolet and G. Destefanic, *Proc. SPIE* **5783**, 350 (2005).
7. J. Rothman, G. Perrais, et al., *Proc. SPIE* **6840**, 69402M (2008).
8. E. Smith, A. Gallagher, et al., *Proc. SPIE* **7298**, 72981Y (2009).
9. G. Vojetta, F. Guellec, et al., *Proc. SPIE* **8375**, 83750Y (2012).
10. N. I. Iakovleva, K. O. Boltar, M. V. Sednev, A. A. Lopuhin, and E. D. Korotaev, *Prikl. Fiz.*, No. 1, 87 (2015).
11. M. Walter, R. Rehm, et al., *Proc. SPIE* **7608**, 76081Z (2010).
12. S. Black, T. Gordon, et al., *Proc. SPIE* **8012**, 80121A-1-12 (2011).
13. Y. Reibel, L. Rublado, et al., *Proc. SPIE* **8185**, 818503 (2011).
14. M. Vuillermet, D. Billon-Lanfrey, et al., *Proc. SPIE* **8353**, 83532K (2012).
15. P. Klipstein, O. Klin, et al., *Optical Engineering* **50** (6), 061002 (2011).
16. *Photodetectors Based on the Cadmium-Mercury-Telluride Epitaxial System*, Ed. by A.L. Aseev, (Novosibirsk, SBRAS Publishing House, 2012) [in Russian].
17. G. Gershon, et al., *Proc. SPIE* **8704**, 870438-1 (2013).
18. S. Bisottoa, et al., *Proc. SPIE* **7834**, 78340J-1 (2010).
19. M. Brown, et al., *Proc. SPIE* **7608**, 76082H-1 (2010).
20. I. I. Lee, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 69 (2009).
21. Special issue IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 56, No. 11, November 2009.
22. F. Kar-Roy, et al., *Proc. SPIE* **7660**, 76603v-1 (2011).
23. L. Kozlowsky, *Opto-Electronics Review* **14** (1), 11 (2006).
24. I. I. Lee, RF Patent, No. 2465684, June 21, 2011.
25. A. V. Zverev, RF Patent No. 2498456 C1, May 24, 2012.
26. P. A. Kuznetsov and I. S. Moschev, *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (1), 83 (2014).
27. A. V. Zverev, Yu. S. Makarov, E. A. Mikhant'ev, and S. A. Dvoretzkiy, *Optoelectron., Instrum. Data Process* **52** (4), 79 (2016).
28. I. I. Lee and N. V. Grishanov, in *Proc. XXV Intern. Conf. on Photoelectronics and Night Vision Devices* (NPO Orion, Moscow, 2018), pp. 217–218.
29. I. I. Lee and N. V. Grishanov, RF Patent No. 2529768, March 5, 2013.
30. I. I. Lee, *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (4), 407 (2014).
31. I. I. Lee and N. V. Grishanov, in *Proc. 16th International Conference of Young Specialist on Micro/ nanotechnologies and electron Devices* (EDM- 2015, ISBN 978-5-7782-2704-0). P. 279–281.
32. I. D. Burlakov, P. A. Kuznetsov, I. S. Moschev, K. O. Boltar, and N. I. Iakovleva, *Usp. Prikl. Fiz.* **5** (4), 383 (2017).
33. F. Guellec, M. Tchagaspanian, E. de Borniol, et al., *Proc. SPIE* **6940**, 69402M (2008).
34. E. Borniol, P. Castelein, F. Guellec, et al., *Proc. SPIE* **8012**, 801232 (2011).
35. M. Jack, G. Charman, et al., *Proc. SPIE*, **8353** 83532F (2012).