

УДК 535.247.049.7:621.383.52

Устройства считывания для многоэлементных ИК ФПУ третьего поколения

И. И. Ли

Решение основных задач для ИК ФПУ третьего поколения в основном будут определяться прогрессом в области кремниевых устройств считывания, и поэтому разработка кремниевых устройств считывания становится одним из основных приоритетов для всех фирм, занимающихся разработкой тепловизионных систем.

PACS: 85.60.Dw; 85.60.Gz

Ключевые слова: ИК, фотоприемные устройства, кремниевые устройства считывания, устройства считывания с временной задержкой и интегрированием.

Введение

В начале 90-х годов прошлого столетия были сформулированы задачи для инфракрасных фотоприемных устройств (ИК ФПУ) второго поколения: освоить производство ИК ФПУ мегапиксельного формата [1]. По мере совершенствования технологии и уменьшения топологических норм появлялась возможность уменьшать шаг расположения фотоприемных ИК-элементов, увеличивать формат и совершенствовать устройства считывания. К началу 2000 г. эти задачи успешно решены, а именно, реализованы ИК ФПУ различных форматов вплоть до 2048×2048 и сформулированы задачи на следующее, т. е. третье поколение, для которого основной задачей является не увеличение формата, а повышение вероятности обнаружения и идентификации целей, снижение габаритных размеров, потребляемой мощности и уменьшение стоимости многоэлементных ИК ФПУ [1—3].

Следует отметить, что к настоящему времени в основном уже решены большинство материаловедческих и технологических проблем ИК ФПУ третьего поколения [3], которые можно последовательно охарактеризовать следующим образом.

– Отработаны технологические проблемы создания мультиспектральных многоэлементных ИК ФПУ [4, 5].

– Налажено производство неохлаждаемых болометрических ИК ФПУ с шагом 17—25 мкм мегапиксельного формата с NETD ~ 30 мК [3, 6].

– Начато производство мегапиксельных ИК ФПУ в спектральном диапазоне 5—12 мкм с шагом 10—15 мкм, т. е. геометрические размеры пикселя уже приближаются к дифракционному пределу [3, 7—9].

– Удалось поднять температуру работы ИК ФПУ. В длинноволновом спектральном диапазоне 8—10 мкм на HgCdTe до температуры 120—130 К, а в спектральном диапазоне 3—5 мкм до температуры 170 К [8, 9]. Разработаны новые типы фотоприемников, например, фотодиодов с монополярной проводимостью (гетеропереходы типа полупроводник—барьер—полупроводник) [10], сверхрешеток второго типа InAs/GaSb [5]. Работа ИК ФПУ при более высоких температурах позволяет повысить энергоэффективность криоохлаждаемых машин и, следовательно, снизить габаритные параметры, потребляемую мощность и стоимость ИК ФПУ.

– В спектральном диапазоне 1—5 мкм разработаны многоэлементные ИК ФПУ на основе лавинных фотодиодов с коэффициентом лавинного умножения 10—100, с шум фактором $F \sim 1,5$ —2. Показана возможность создания многоэлементных ИК ФПУ, обеспечивающих в условиях низкого уровня фона работу в режиме счета фотонов [11, 12].

Несмотря на впечатляющие достижения в технологии изготовления многоэлементных ИК-фотоприемников, большинство исследователей подчеркивают, что функциональные возможности ИК ФПУ третьего поколения, а именно, решение части задач по обработке видеосигналов, распознавания образов и т. д. должны решаться кремниевыми устройствами считывания в цифровой форме [1, 13].

Важно отметить, что достижения в области устройств считывания ИК ФПУ базируются на результатах многолетних разработок КМОП-приемников изображения видимого диапазона. Их разработкой с середины 90 годов (ввиду огромного потребительского рынка таких ФПУ: мобильные

Ли Ирлам Игнатьевич, ведущий научный сотрудник.
Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН.
Россия, 630090, Новосибирск, проспект Академика
Лаврентьева, 13.
Тел. 8 (383) 330-77-81. E-mail: irlamlee@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 25 июля 2014 г.

© Ли И. И., 2014

телефоны, фотоаппараты, охранные системы и т. д.), интенсивно велась всеми ведущими фирмами [14, 15]. За это время ФПУ видимого диапазона прошли путь от простейших устройств считывания, обеспечивающих лишь считывание фотосигналов в аналоговой форме и их мультиплексирование на общий выход, до специализированных цифровых видеопроцессоров, на выходе которых формируются видеосигналы в цифровой форме. Найдены схемотехнические решения, позволившие снизить уровень шумов КМОП ФПУ видимого диапазона до 3—4 электронов, и разработаны базовые схемотопологические элементы таких видеопроцессоров: многоканальные, многоразрядные АЦП (14 разрядные АЦП на столбец), схемы формирования управляемых источников питания, управляющих напряжений и т. п., при жестких ограничениях по площади и потребляемой мощности.

Разработка устройств считывания второго поколения, решающих только задачу считывания массивов фотосигналов в аналоговой форме, могла решаться силами одного—двух разработчиков с использованием относительно дешевой КМОП-технологии с топологическими нормами до 0,6 мкм, с одним или двумя слоями металлизации.

Однако при переходе к устройствам считывания третьего поколения кардинально возрастает трудоемкость их разработки и стоимость изготовления, так как:

- переход к цифровой обработке сигналов требует разработки таких видеопроцессоров на структурном уровне;

- необходимо предварительно разработать схемотопологическую библиотеку базовых функциональных элементов с привязкой к конкретной технологии;

- требуется использовать КМОП кремниевую технологию с топологическими допусками 90—180 нм, при этом требования к уровню технологии для реализации аналоговых ИС существенно выше, чем к технологии при изготовлении чисто логических ИС; в частности, принципиальное значение имеет разброс пороговых напряжений (для многих схемотехнических решений необходимо, чтобы разброс пороговых напряжений не превышал нескольких милливольт), возникают более высокие требования к однородности топологических размеров компонент при учете возможности использования в локальных областях повышенных напряжений питания, а также и ряд других дополнительных требований.

Достижения в области устройств считывания третьего поколения

К числу наиболее значимых достижений в области устройств считывания третьего поколения следует отнести разработку ИК ФПУ форматом

320×256 с 15-разрядными АЦП в каждом пикселе [16]. 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 течении 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 2—3 мК), практически до теоретического предела температурное разрешение ИК ФПУ в спектральном диапазоне 8—10 мкм.

Несомненно, что появление таких ИК ФПУ качественно изменит возможности и тактико-технические характеристики тепловизионных систем [17]. В этой работе также отмечается, что наше отставание в этой области составляет не менее 5—7 лет.

В качестве примера на рис. 1 приведен один из вариантов упрощенной структурной схемы устройства считывания с формированием и обработкой фотосигналов в цифровой форме для многоканального ИК ФПУ с режимом ВЗН [18, 19]. Основной целью проекта является разработка линейчатого ИК ФПУ с режимом ВЗН для работы в малофоновых условиях, т. е. в условиях, когда к устройству считывания предъявляются наиболее жесткие требования к уровню шумов при вводе и формировании ВЗН фотосигналов.

Для снижения уровня коммутационных наводок важно, чтобы блоки ячеек ввода сигналов, блоки ячеек формирования ВЗН-сигналов, блоки ячеек удаления фотосигналов с дефектных фотоприемных каналов не включали дополнительных коммутационных элементов, не зависели от количества ВЗН-каскадов. В общем, необходимо минимизировать количество шин передачи сигналов.

Устройство считывания для режима ВЗН состоит из следующих основных узлов (блоков):

- блок устройств ввода фотосигналов (предусилитель 2, МДП транзистор 3) размерностью $n \times m$, где n — количество ВЗН-каскадов, m — количество каналов (на рис. 3 $n = 4$, но n может быть любым числом), при этом принципиальная схема устройств считывания, а также топология этих ячеек не изменяется при изменении n ;

- АЦП разрядностью N , (5), одно на столбец;

- блок устройств хранения и формирования ВЗН-сигналов (МДП-транзисторы 6, 8, ячейка сумматора 7 разрядностью $N+M$, логический элемент “И”), размерностью $n \times m$;

– блок, обеспечивающий запись и хранение информации о дефектных фотоприемных каналах (МДП-транзисторы 6, 7, ячейка ОЗУ 7, 9) размерностью $n \times m$.

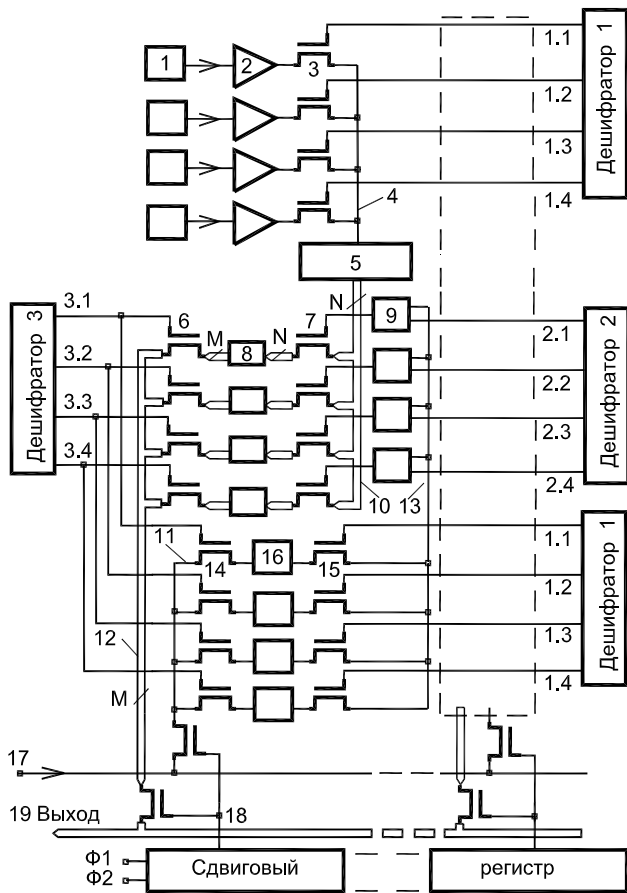


Рис. 1. Структурная схема устройства считывания с ВЗН: 1 — фотоприемник, 2 — предусилитель, 3 — МДП-транзистор ячейки считывания, 4 — аналоговая шина передачи фото-сигналов, 5 — АЦП, 6, 7 — МДП транзисторы ячейки формирования ВЗН сигналов, 8 — ячейка сумматора, 9 — логический элемент “И”, 10 — цифровая шина передачи фотосигналов, 11 — первая шина передачи информации о дефектных элементах, 12 — цифровая шина передачи ВЗН сигналов, 13 — вторая шина передачи информации о дефектных элементах, 14, 15 — МДП-транзисторы ячейки записи и хранения информации о дефектных элементах, 16 — ячейка ОЗУ, 17 — общая шина ввода информации о дефектных элементах, 18 — выход i той ячейки сдвигового регистра, 19 — выход устройства считывания

Как видно из рис. 1, основные блоки устройств считывания не содержат дополнительных коммутационных элементов, их структура, топологическая реализация, не зависит от количества ВЗН каскадов. Принципы работы блоков формирования ВЗН-сигналов, методика выявления и удаления сигналов от дефектных фотоприемных каналов подробно описаны в [18]. Преобразование сигналов в цифровую форму с выходов устройств ввода позволяет минимизировать требования к разрядности (N) столбцового АЦП (5). Разрядность сиг-

налов на выходе 19 устройства определяется разрядностью сумматоров. Разрядность сумматоров (8) должна быть в корень из числа каскадов ВЗН выше. Все функции, необходимые для формирования ВЗН-сигналов, обеспечиваются изменением управляющих напряжений формируемых на выходах программируемых дешифраторов 1—3. На рис. 2, а показаны временные диаграммы, необходимые для работы устройств считывания при прямом направлении сканирования, а на рис. 2, б при обратном направлении сканирования.

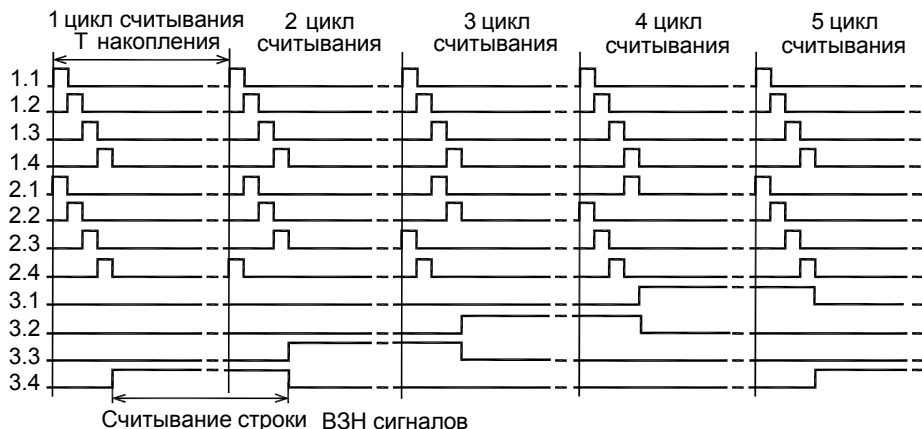
Таким образом, предлагаемая структура устройства считывания обеспечивает все необходимые опции современных ВЗН ИК ФПУ, формирование в цифровой форме ВЗН-сигналов, удаление сигналов с дефектных фотоприемных каналов, возможность двунаправленного сканирования. Альтернативный вариант построения устройства считывания с режимом ВЗН описан в работе [20].

В коротковолновом спектральном диапазоне ведутся разработки многоэлементных ИК ФПУ, в том числе на основе лавинных фотодиодов, в которых дополнительно к тепловизионному изображению определяется дальность до объектов изображения в каждом пикселе, т. е. ИК ФПУ формирует трехмерное (3D) изображение [21, 22]. Определение дальности до объектов изображения основано на измерении времени задержки прихода отраженных оптических сигналов от единичного лазерного импульса в каждом пикселе. Так, в [22] ячейка устройства считывания (размер пикселя 30×30 мкм, изготовленная по КМОП технологии с топологическими нормами 0,18 мкм) содержит предусилитель, компаратор, 14-разрядный счетчик, 14-разрядное ОЗУ, блоки формирования управляющих напряжений и ряд других функциональных элементов, обеспечивающих измерение времени задержки оптических сигналов от единичного лазерного импульса с точностью ~ 2 нс. Некоторым недостатком этого устройства является то, что тепловизионное изображение и информация о дальности формируется не одновременно, а в разных циклах считывания. Необходимо найти структурные и схемотехнические решения, позволяющие упростить базовую ячейку устройства считывания, уменьшить размер пикселя с 30 мкм до 15—20 мкм, снизить потребляемую мощность.

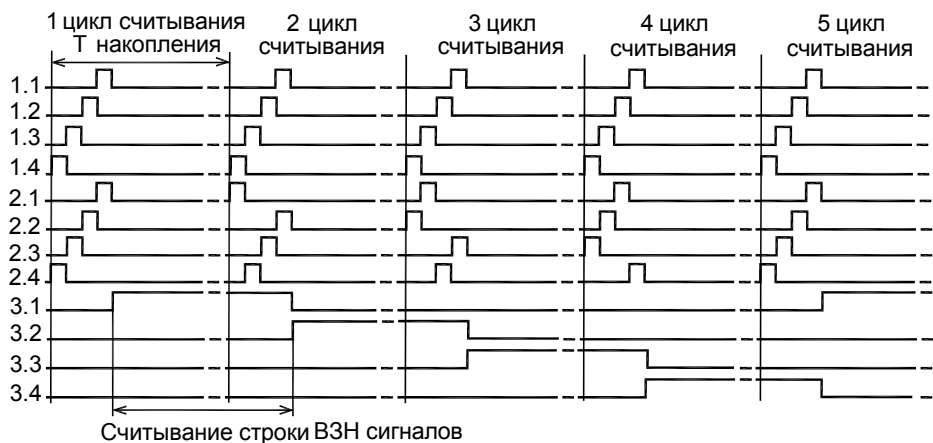
На рис. 3 приведена структурная схема устройства считывания, в которой за счет введения фильтра высоких частот, обеспечить возможность формирования 3D-изображений и тепловизионного изображения в одном цикле считывания [23]. Принцип работы ячейки аналогичен работе ячейки в [20]. Введение в канал определения дальности до объектов изображения фильтра высоких частот позволяет получить эти данные в одном цикле считывания с формированием тепловизионного

изображения. Введение общих строчных шин управления 18, 19 позволяет снизить требования к разрядности счетчика 12, так как общая разрядность канала о времени задержки поступления от-

раженного оптического сигнала определяется суммарной разрядностью управляемого M -разрядного строчного счетчика 20 и N -разрядного счетчика 12 в ячейке устройства считывания.



а



б

Рис. 2. Временные диаграммы управляющих напряжений на выходах дешифраторов

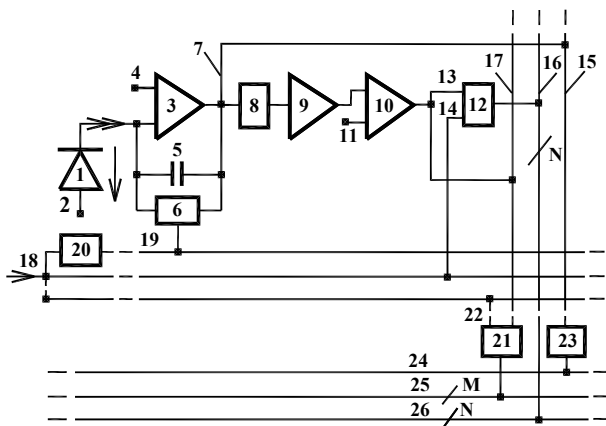


Рис. 3. Структурная схема устройства считывания обеспечивающая возможность формирования 3D-изображений:

1 — фотодиод, 3 — операционный усилитель, 4 — неинвертирующий вход операционного усилителя, 5 — емкость, 6 — ключ, 7 — выход операционного усилителя, 8 — фильтр высокой частоты, 9 — усилитель, 10 — компаратор, 11 — неинвертирующий вход компаратора, 12 — N -разрядный счетчик, 13, 14 — счетный и управляющие входы счетчика, 15, 16, 17 первая, вторая и третья столбцовые шины считывания, 18, 19 строчные шины управления, 20 — управляемый M -разрядный строчный счетчик, 21 — двухвходовый логический элемент ячейки мультиплексора, 22 вход логического элемента, 23 — канал считывания предусилителя ячейки мультиплексора, 24, 25, 26 — выходные шины мультиплексора

Заключение

Решение основных задач для ИК ФПУ третьего поколения в основном будут определяться прогрессом в области кремниевых устройств считывания, и поэтому разработка кремниевых устройств считывания стало одним из основных приоритетов для всех фирм, занимающихся разработкой тепловизионных систем.

Их отличительной особенностью становится преобразование и обработка фотосигналов в цифровой форме. Переход к цифровой обработке сигналов требует:

- разработки таких видеопроцессоров на структурном уровне;
- разработки схемо-топологической библиотеки базовых функциональных элементов (АЦП, ЦАП, компараторов и т. д.) с привязкой к конкретной кремниевой технологии с топологическими нормами 0,90—0,18 мкм.

Все это приводит к кардинальному увеличению трудоемкости и стоимости их разработки. Для преодоления наметившегося отставания в этой области необходимы специальные целевые программы.

Литература

1. Norton P. R. // Proc. SPIE. 1999. V. 3698. P. 652.
2. Rogalski A. Infrared Detectors. -Gordon and Breach Science Publishers, Canada, 2000.
3. Rogalski A. // Opto-Electronics Review. 2012. V. 20. No. 3. P. 279.
4. Smith E., Gallagher A., et al. // Proc. SPIE. 2009. V. 7298. P. 72981Y.
5. Walter M., Rehm R., et al. // Proc. SPIE. 2010. V. 7608. P. 76081Z.
6. Black S., Gordon T., et al. // Proc. SPIE. 2011. V. 012. P. 80121A-1-12.
7. Reibel Y., Rublado L., et al. // Proc. SPIE. 2011. V. 8185. P. 818503.
8. Vuillermet M., Billon-Lanfrey D., et al. // Proc. SPIE. 2012. V. 8353. P. 83532K.
9. Gershon G., Albo A., et al. // Proc. SPIE. V. 8704. P. 870438-1.
10. Klipstein P., Gross Y., et al. // Proc. SPIE. V. 8704. P. 87041S-1.
11. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная электроника. Фотодиоды. — М.: Физматкнига, 2011.
12. Rothman J., Perrais G., et al. // Proc. SPIE. 2008. V. 6840. P. 69402M.
13. Лу И. И. // Прикладная физика. 2009. № 2. С. 69.
14. Kozlowsky L. // Opto-Electronics Review. 2006. V. 14. No. 1. P. 11.
15. Matsue S., Dales T., et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2009. V. 56. No. 11. P. 230.
16. Bisottoa S., et al. // Proc. of SPIE. 2010. V. 7834. P. 78340J-1.
17. Кузнецов П. А., Хромов С. С. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 321.
18. Лу И. И. // Автометрия. 2007. № 4. С. 56.
19. Лу И. И. Патент РФ, № 2465684, приоритет от 21.06.2011.
20. Зверев А. В. Патент РФ, № 2498456, приоритет от 24.05.2012.
21. Guellec F., Tchagaspanian M., Borniol E., et al. // Proc. SPIE. 2008. V. 6940. P. 69402M.
22. Borniol E., Castelein P., Guellec F., et al. // Proc. SPIE. 2011. V. 8012. P. 801232.
23. Лу И. И. Положительное решение по заявке на патент РФ № 2013109904/08(014655), от 23.05.2014 г.

Readout circuits for third-generation multi-element IR FPA

I. I. Lee

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS
13 Lavrentieva prosp. Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: Irlamlee@isp.nsc.ru

Received July 25, 2014

Problems in designing silicon readout circuits (ROICs) for third-generation IR FPA detectors, ROICs with on-chip digital signal are considered. The structure and circuit solutions for IR FPA ROICs capable of operating in time-delay and integration modes and staring 3D LADAR systems are presented.

PACS: 85.60.Dw; 85.60.Gz

Keywords: IR focal plane arrays, IR FPA, silicon readout circuits, ROIC, signal preprocessing, time-delay integration.

References

1. P. R. Norton, Proc. SPIE **3698**, 652 (1999).
2. A. Rogalski, *Infrared Detectors* (Gordon and Breach Science Publishers, Canada, 2000).
3. A. Rogalski, Opto–Electronics Review **20**, 279(2012).
4. E. Smith, A. Gallagher, et al., Proc. SPIE **7298**, 72981Y (2009).
5. M. Walter, R. Rehm, et al., Proc. SPIE **7608**, 76081Z (2010).
6. S. Black, T. Gordon, et al., Proc. SPIE **012**, 80121A-1-12 (2011).
7. Y. Reibel, L. Rublado, et al., Proc. SPIE **8185**, 818503 (2011).
8. M. Vuillermet, D. Billon-Lanfrey, et al., Proc. SPIE **8353**, 83532K (2012).
9. G. Gershon, A. Albo, et al., Proc. SPIE **8704**, 870438-1.
10. P. Klipstein, Y. Gross, et al., Proc. SPIE **8704**, 87041S-1.
11. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
12. J. Rothman, G. Perrais, et al., Proc. SPIE **6840**, 69402M (2008).
13. I. I. Lee, Prikladnaya Fizika, No. 2, 69 (2009).
14. L. Kozlowsky, Opto–Electronics Review **14**, 11 (2006).
15. S. Matsue, T. Dales, et al., IEEE Transactions on Electron Devices **56**, 230 (2009).
16. S. Bisottoa, et al., Proc. SPIE **7834**, 78340J-1 (2010).
17. P. A. Kuznetsov and S. S. Khromov, Uspekhi Prikladnoi Fiziki, **1**, 321 (2013).
18. I. I. Lee, Optoelectron. Instrum. Data Process., No. 4, 56 (2007).
19. I. I. Lee, RF Patent, No. 2465684, June 21, 2011.
20. A. V. Zverev, RF Patent, No. 2498456. May 24, 2012.
21. F. Guellec, M. Tchagaspanian, E. Borniol, et al., Proc. SPIE **6940**, 69402M (2008).
22. E. Borniol, P. Castelein, F. Guellec, et al., Proc. SPIE **8012**, 801232 (2011).
23. I. I. Lee, Positive Decison on Application for RF Patent No. 2013109904/08(014655), May 23, 2014.