

Гибридный многоканальный фотоприемник для спектрального диапазона 1–1,6 мкм

М. Р. Айнбунд, Д. Л. Глебов, В. В. Забродский, Е. Е. Левина, Д. Е. Миронов,
А. В. Николаев, А. В. Пащук, К. Я. Смирнов, В. М. Фролов

Созданы образцы гибридного двенадцатиканального детектора для лазерного локатора в спектральном диапазоне 0,95–1,65 мкм с фотокатодом на гетероструктурах InP/InGaAs. В качестве анода детектора использована кремниевая фотодиодная линейка в режиме «back-illuminated» с фронтом импульсной характеристики менее 10 нс. Чувствительность любого канала более 1 А/Вт. В работе представлены результаты исследования быстродействия однодлинных линеек и спектральные характеристики фотокатодов.

Ключевые слова: гибридный фотоэлектронный прибор, гетероструктура InP/InGaAs/InP, фотокатод с переносом электронов, *p-i-n*-диод.

Ссылка: Айнбунд М. Р., Глебов Д. Л., Забродский В. В., Левина Е. Е., Миронов Д. Е., Николаев А. В., Пащук А. В., Смирнов К. Я., Фролов В. М. // Прикладная физика. 2018. № 6. С. 54.

Reference: M. R. Aimbund, D. L. Glebov, V. V. Zabrodski, E. E. Levina, D. E. Mironov, A. V. Nikolaev, A. V. Pashuk, K. J. Smirnov, and V. M. Frolov, Prikl. Fiz., No. 6, 54 (2018).

Введение

Принцип работы лазерного локатора основан на регистрации временной задержки отраженного препятствием импульсного лазерного излучения. В современных локаторах используются импульсные лазеры с длиной волны 1,06 и 1,5 мкм, при этом вторая длина волны является предпочтительной, поскольку безопасна для зрения.

Лазерный локатор должен обеспечивать поле обзора в определенном диапазоне пространственных углов и определенную частоту обновления информации (кадровая частота). В современных образцах лазерных локаторов для обеспечения этих требований используются двухкоординатные механические сканирующие системы. Наряду с преимуществами (такими, как использование для построения кадра единственного приемника излучения), подобные системы обладают и существенными недостатками – низкой частотой строчной развертки, высокими массогабаритными показателями и невысокой надежностью. В результате такой важный параметр как пространственное разрешение в пределах заданной частоты обновления информации в современных образцах локаторов выглядит весьма скромно.

Анализ зарубежных и отечественных источников показывает, что существенного улучшения быстродействия локатора можно добиться применением акустооптических сканирующих систем, которые являются практически безынерционными. При этом применение таких систем требует использования многоэлементного фотоприемника: линейного для комбинированного сканера (акустооптическая строчная развертка и механическая кадровая) или матричного – в случае полного отказа от механической развертки и перехода к двумерному акустооптическому сканеру. Второй случай выглядит предпочтительнее, поскольку

Айнбунд Михаил Рувимович¹, нач. лаб., к.т.н.

Глебов Дмитрий Львович², нач. сектора.

Забродский Владимир Викторович³, н.с.

Левина Елена Евгеньевна¹, вед. инженер.

Миронов Денис Евгеньевич¹, в.н.с.

Николаев Андрей Валерьевич³, н.с.

Пащук Андрей Владимирович¹, вед. инженер.

Смирнов Константин Яковлевич¹, инженер.

Фролов Виктор Михайлович¹, инженер.

¹ АО «ЦНИИ «Электрон».

Россия, 194223, Санкт-Петербург, пр. Тореза, 68, лит Р.

E-mail: m.ainbund@mail.ru

² АО «Государственный Рязанский приборный завод»

(АО «ГРПЗ»).

Россия, 390000, г. Рязань, ул. Семинарская, 32.

E-mail: d1106g@yandex.ru

³ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН.

Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

E-mail: slidet@mail.ioffe.ru

Статья поступила в редакцию 24 июля 2018 г.

© Айнбунд М. Р., Глебов Д. Л., Забродский В. В., Левина Е. Е.,
Миронов Д. Е., Николаев А. В., Пащук А. В., Смирнов К. Я.,
Фролов В. М., 2018

обеспечивает не только увеличение быстродействия локатора, но и снижение его массы и габаритов, а также повышение надежности благодаря отсутствию движущихся механических частей. Существенным препятствием к созданию быстродействующих локаторов с акустооптическим сканером является полное отсутствие на мировом рынке линейных и матричных быстродействующих (время переходной характеристики < 5 нс), чувствительных (не менее 5 А/Вт) и малощумящих (темновой ток < 1 нА) фотоприемных датчиков, работающих в диапазоне $1\text{--}1,6$ мкм.

Целью данной работы являлось создание экспериментального образца многоканального датчика в диапазоне $1\text{--}1,6$ мкм для лазерного локатора. Данный локатор нужен, например, для обеспечения безопасности летательного аппарата в режиме скоростного полета на низкой высоте путём обнаружения малозаметных препятствий (провода, антенны, металлоконструкции) на расстоянии, обеспечивающем возможность маневра уклонения.

Поставленная задача

Ввиду сложности задачи, в качестве начальных требований по параметрам экспериментального образца датчика, которые могли бы быть приемлемы для проверки концепции и тестирования его в составе локатора, были взяты следующие параметры: спектральный диапазон $1\text{--}1,6$ мкм; общее число каналов или элементов датчика – 12; размер одного элемента – $2 \times 0,2$ мм; элементы расположены на одной линии вплотную друг к другу (по линейке), общий размер чувствительной области $\sim 24 \times 0,2$ мм; каждый элемент линейки должен иметь отдельный вывод; чувствительность на выходе элемента – не менее 1 А/Вт; фронт (время нарастания) импульсной характеристики ≤ 10 нс.

Намеченное решение

В данном случае для регистрации оптических сигналов требовалось иметь в приборе внутреннее усиление (при небольшом факторе шума). Твердотельные аналоги на основе массива диодов, чувствительные к излучению $1,54$ мкм и обладающие внутренним усилением, на данный момент в России отсутствуют. Решение задачи путем создания прибора на основе многоанодного фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) с микроканальными пластинами (МКП) весьма затруднительно, т. к. необходимый фотокатод очень требователен к вакууму в приборе, а МКП отличаются высоким газовыделением. Динодные ФЭУ (с жалюзийными, сеточными и другими каскадами) не обеспечивают необходимого пространственного разрешения.

Заданные требования к датчику предопределили его приемлемый конструктивный тип. А именно, датчик гибридного типа с линейкой кремниевых диодов и фотокатодом на эффекте переноса электронов под действием электрического поля с использованием гетероструктур InP/InGaAs/InP. В иностранной литературе такие катоды называются Transferred Electron (TE) – фотокатоды с переносом электронов или фотокатоды с барьером Шоттки [1–3]. Данные катоды позволяют за счет приложения электрического поля поднять фотоэлектроны на более высокий энергетический уровень и, таким образом, обеспечить им возможность выхода в вакуум (эмиссию), сдвигая красную границу фотоэффекта в красную зону до $1,7$ мкм. При этом «ЦНИИ «Электрон» уже имел на начало работы опыт как по созданию гибридного прибора на одном pin-диоде [4], так и по разработке TE-катода для области спектра до $1,7$ мкм [5, 6].

Конструкция гибридных приборов представляет собой вакуумный прибор, состоящий из фотокатода и расположенного на определенном расстоянии от него чувствительного к электронам твердотельного детектора электронов, в нашем случае линейки кремниевых диодов. Эмитированные фотокатодом электроны разгоняются высоким электрическим полем до энергий в несколько килоэлектрон-вольт и далее тормозятся в твердотельном детекторе. При торможении приблизительно на каждые $3,6$ эВ энергии фотоэлектрона в кремнии генерируется новая пара свободных носителей, т.е. электрон и дырка. Таким образом, происходит усиление первичного фотоэмиссионного тока от нескольких сотен до тысячи и более раз [3, 4].

Линейка диодов

Известно, что особенностью регистрации электронов твердотельными детекторами является возможность многократного упругого и неупругого рассеяний регистрируемых электронов в кристаллической решетке [7]. Такой характер взаимодействия электронов с твердым телом существенно отличается от случая регистрации фотонов, т. к. для электронов возможно рассеяние с изменением импульса, что приводит к смене траектории его движения вплоть до возможности выхода некоторых электронов обратно из твердого тела в вакуум после нескольких актов рассеяния в приповерхностной области. Данная особенность рассеяния электронов требует минимизации толщины поверхностных слоёв твердотельного детектора, в которых не происходит эффективного сбора неосновных носителей заряда. Такими слоями являются пассивирующие слои диэлектриков, слои, обеспечивающие минимизацию поверхностного сопро-

тивления, и приповерхностные области p - n или изотипных переходов. Характерные толщины таких слоёв обычно более 10 нм. Современные кремниевые детекторы электронов имеют энергетический порог регистрации электронов от 200–600 эВ [8–10]. Такие кремниевые n - p - и p - n -переходы обладают поверхностными «мертвыми» слоями толщиной 5–15 нм.

Для гибридного ИК-детектора необходимо было разработать линейку из кремниевых диодов, которая должна обеспечивать эффективную регистрацию электронов с энергией 1–5 кэВ и временным разрешением не более 10 нс. Чтобы минимизировать «слепые» области между соседними элементами линейки, была выбрана вертикальная структура с обратной засветкой («back-illuminated»). В качестве базы выбран кремний p -типа, т. к. электроны обладают большей подвижностью, чем дырки. Для создания общего контакта к линейке использовался изотипный p + p -переход на обратной (расположенной напротив фотокатода) стороне диодной линейки, который формировался диффузией бора на глубину ~ 50 нм и обладал «мертвым» слоем ~ 10 –15 нм. Со стороны, проти-

воположной облучаемо, формировались поликристаллические n + p -переходы, легированные фосфором. Металлизация со стороны n + p -переходов представляла собой слой алюминия на поликристаллическом кремнии. Со стороны облучаемой электронами в сплошном слое алюминия на изотипном переходе были протравлено окно методом фотолитографии с помощью двустороннего совмещения.

После изготовления партии диодных линеек её образцы проходили тестирование. Производилось определение фронта (времени нарастания) импульсной характеристики. В этом процессе отдельный диод линейки облучался световыми импульсами длительностью 50 пс от лазерного светодиода с длиной волны 630 нм. Диаметр освещаемой площади составлял 0,2–0,3 мм. На общий контакт всех диодов линейки подавалось обратное напряжение $U_{\text{диод}}$. Выходы всех диодов, кроме тестируемого образца, заземлялись. Сигнал с тестируемого диода поступал на нагрузку осциллографа $R_{\text{осц}} = 50$ Ом. Осциллограмма импульсной характеристики одного из диодов линейки представлена на рис. 1.

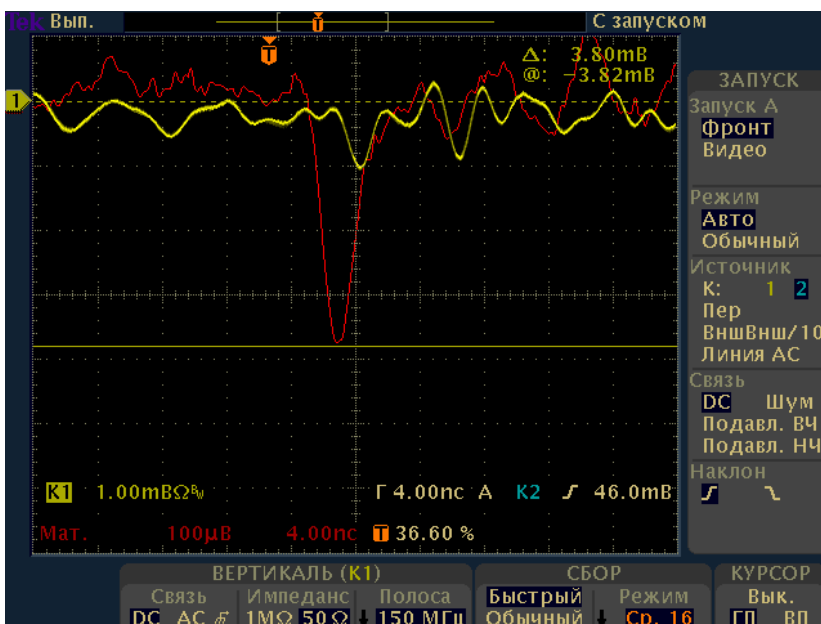


Рис. 1. Осциллограмма импульсной характеристики диода линейки, развертка 4 нс/дел, полоса 150 МГц. Помеха показана желтым цветом, а сигнал – красным цветом. Длительность сигнала на уровне 0,5 около 2,5 нс, фронт сигнала – 1,6 нс.

Как было сказано выше, регистрация электронов и фотонов твердотельными детекторами существенно отличается, поэтому величина фронта импульсного сигнала от электронов будет (при равных условиях) больше, чем величина фронта от лазерного светодиода с $\lambda = 630$ нм. Однако данный способ позволил заранее отбраковать партии линеек, которые имели недостаточное быстродействие, и выбрать из них наиболее быстрые.

Разработанные кремниевые линейки позволили обеспечить регистрацию с временным раз-

решением в единицы нс при рабочих напряжениях обратного смещения на линейке 150–400 вольт. Темновые токи диодов находились в диапазоне от единиц до сотен нА.

Фотокатод

Физические принципы работы ТЕ-фотокатода изложены в ряде работ [1–3]. В нашей конструкции ИК-фотокатода использовалась гетероструктура InP/InGaAs/InP, разработанная для

обеспечения чувствительности в диапазоне 0,95–1,65 мкм. Изготовление структур осуществлялось в АО «НИИ «Полус» им. М. Ф. Стельмаха». Достижение высокого квантового выхода является одной из наиболее трудных задач. В результате проведенных исследований удалось на ряде образцов получить в режиме на пропускание квантовый выход 1–3 % в диапазоне 1–1,55 мкм.

Для возможности уверенного совмещения активной площади фотокатода напротив диодной линейки фотокатод для многоканального датчика имел размеры активной площади больше, чем размеры активной площади диодной линейки (24×0,2 мм), а именно, размеры активной площади фотокатода составляли 26×4 мм. Активировка фотокатода, его совмещение с линейкой диодов, герметизация датчика методом холодной запрессовки через индий осуществлялись в вакууме на уровне 10^{-9} Па.

Внешний вид датчика изображен на рис. 2. Габариты датчика: диаметр 58 мм, высота 23 мм.



Рис. 2. Внешний вид образца датчика.

Спектральные зависимости квантового выхода Q фотокатодов, измеренные на двух образцах, представлены на рис. 3. При этом для образца № 2 приведены характеристики при различных значениях напряжения смещения $U_{см}$ на ТЕ-фотокатоде. Данное напряжение прикладывается между подложкой фотокатода и тонким металлическим электродом на его поверхности, причём плюсом к электроду.

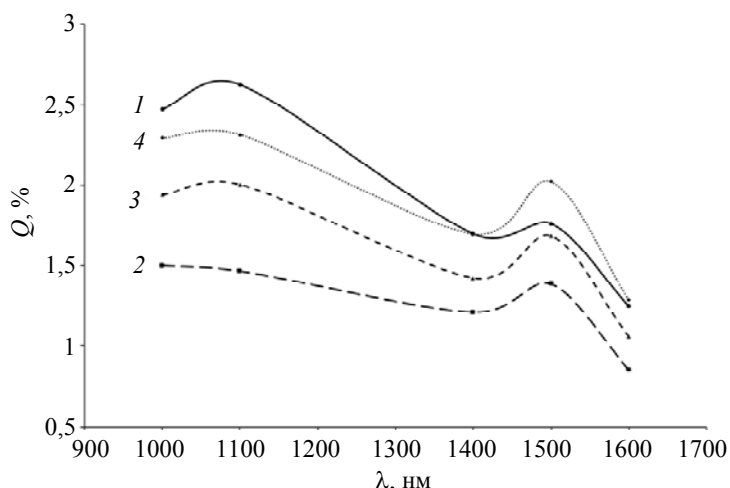


Рис. 3. Спектральные зависимости квантового выхода фотокатодов: 1 – образец № 1, $U_{см} = 3,6$ В; 2 – образец № 2, $U_{см} = 2,4$ В; 3 – $U_{см} = 2,6$ В; 4 – $U_{см} = 2,8$ В.

Анодная чувствительность образцов

Спектральные зависимости чувствительностей S двух образцов, измеренные на выходе одного из диодов каждого датчика, представлены на рис. 4.

Исследования чувствительностей всех диодов каждого датчика были проведены на специально созданном стенде многоканальных измерений, в котором было реализовано одновременное измерение фототока всех 12 диодов при равномерной засветке всей площади фотокатода. В качестве источника излучения была взята лампа накаливания. ИК-излучение от лампы проходило через кремниевую пластину, используемую в ка-

честве оптического фильтра, обеспечивающего прохождение излучения в диапазоне более 1 мкм. Лампа располагалась в темном помещении на расстоянии 0,5 м от образца. Ток накала лампы выбирался так, чтобы ток с фотокатода не превышал уровня 50 нА. В результате для каждого диода линейки был создан одинаковый уровень облученности и были получены значения их чувствительностей относительно друг друга. Используя измеренные ранее значения абсолютной чувствительности определенных диодов на $\lambda = 1100$ нм, были рассчитаны значения спектральной чувствительности S всех диодов обоих образцов. Соответствующие данные представлены в таблице.

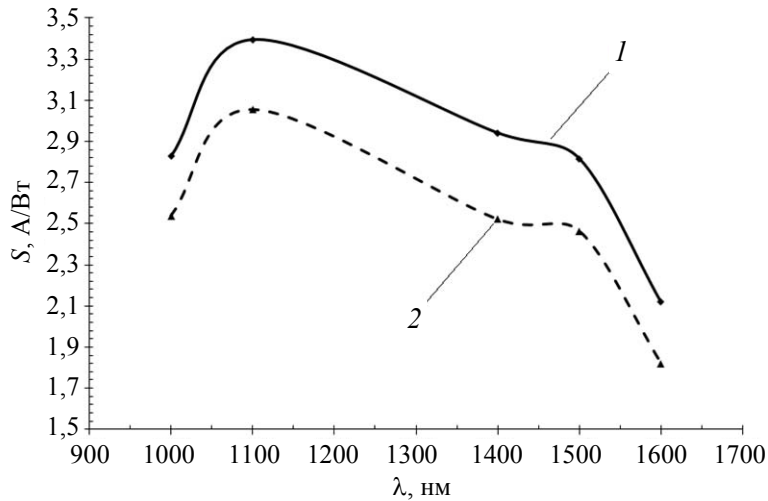


Рис. 4. Спектральные зависимости чувствительности S датчиков: 1 – образец № 1; 2 – образец № 2.

Таблица

Чувствительности диодов на $\lambda = 1100$ нм на образцах № 1 и № 2

Номер диода		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$S, \text{ A/Wt}$	Образец № 1	1,3	1,7	3,0	3,0	2,3	2,0	1,8	5,0	5,5	6,7	6,7	5,0
	Образец № 2	2,7	2,7	3,2	3,2	2,7	5	5,3	5,6	4,3	4	4	4,3

Заключение

В результате работы созданы образцы двенадцатиканального гибридного фотоэлектронного детектора для спектрального диапазона 1–1,6 мкм с чувствительностью любого канала более 1 А/Вт и с фронтом импульсной характеристики менее 10 нс. Данные образцы фотоэлектронного детектора соответствуют необходимым условиям для прохождения тестирования в лазерном локаторе со строчной акустооптической разверткой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bell R. L., James L. W., Moon R. L. // Appl. Phys. Lett. 1974. Vol. 25. No. 11. P. 645.
2. Escher J. S., Gregory P. E., Hyder S. B. // IEEE Trans. Electron Devices Lett. 1981. Vol. EDL-2. P. 123.

3. <http://www.intevac.com/intevacphotonics/livar-506/>
4. Селиверстов Д. Н., Гусев Ю. И., Курятков В., Прокофьева Т., Левина Е. Е., Логинов Б. Б., Масленников Л. А., Чернова О. В. Основные результаты научных исследований. ПИЯФ, 1996.
5. Паиук А. В., Фурсенко Т. А. // ПТЭ. 1994. № 2. С. 112.
6. Айнбунд М. Р., Васильев И. С., Гомин И. Н., Кудряшова С. Н., Левина Е. Е., Паиук А. В. / Тезисы докладов XX Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. (Москва, 2008). С. 218.
7. Беднарж Б., Ельцов А. В., Заховал Я., Краличек Я., Юрре Т. А. Светочувствительные полимерные материалы. – Л.: Химия, 1985.
8. <http://www.optodiode.com>
9. Funsten H. O., Sumszcynsky D. M., Ritzau S. M., Korde R. // IEEE Tran. Nucl. Sci. 1997. Vol. 44. No. 6. P. 2561.
10. Гостев А. В., Дицман С. А., Забродский В. В., Забродская Н. В., Лукьянов Ф. А., Рау Э. И., Сеннов Р. А., Суханов В. Л. // Известия РАН. Серия Физическая. 2008. Т. 72. № 11. С. 1539.

Hybrid multi-channel photodetector for 1–1.6 μm spectral range

M. R. Ainbund¹, D. L. Glebov², V. V. Zabrodski³, E. E. Levina¹, D. E. Mironov¹,
A. V. Nikolaev³, A. V. Pashuk¹, K. J. Smirnov¹, and V. M. Frolov¹

¹NRI Electron, JSC
68 Toreza av., St. Petersburg, 194223, Russia

²SRDP, JSC
32 Seminarская str., Ryazan, 390000, Russia

³Ioffe PTI, RAS
26 Polytechnicheskaya str., St.-Petersburg, 194021, Russia

Received July 27, 2018

Samples of the hybrid twelve-channel detector for the 0.95–1.65 μm spectral range with photocathode based on InP/InGaAs heterostructures for a laser location system are created. The “back-illuminated” silicon photodiode array with front of impulse less 10 ns was used as a detector anode. The sensitivity of any channel is more than 1 A/W. The results of diode array processing speed and spectral characteristics of photocathodes are represented.

Keywords: hybrid photoelectronic device, InP/InGaAs/InP heterostructure, TE photocathode, *p-i-n*-diode.

REFERENCES

1. R. L. Bell, L. W. James, and R. L. Moon, Appl. Phys. Lett. **25** (11), 645 (1974).
2. J. S. Escher, P. E. Gregory, and S. B. Hyder, IEEE Trans. Electron Devices Lett. **EDL-2**, 123 (1981).
3. <http://www.intevac.com/intevacphotonics/livar-506/>
4. D. N. Seliverstov, et al., *Main results of scientific research*. (PNPI, 1996) [in Russian].
5. A. V. Pashuk and T. A. Fursenko, Instrum. Exp. Tech., No. 2, 112 (1994).
6. M. R. Ainbund, I. S. Vasiliev, I. N. Gomin, S. N. Kudryashova, E. E. Levina, and A. V. Pashuk, in *Proc. XX International Scientific and Technical Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices* (Moscow, 2008), p. 218.
7. B. Bednarzh, et al., *Light-sensitive polymer materials*, (Leningrad, Khimiya, 1985) [in Russian].
8. <http://www.optodiode.com>
9. H. O. Funsten, D. M. Sunszcynsky, S. M. Ritzau, and R. Korde, IEEE Tran. Nucl. Sci. **44** (6), 2561 (1997).
10. A. V. Gostev, et al., Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **72** (11), 1539 (2008).