ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ И ДРУГИЕ ВОПРОСЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Pin-фотодиод на основе InGaAs/InP для фотоприемных устройств систем импульсной лазерной дальнометрии

А.А.Короннов, Н.Ф.Салова, М.М.Землянов, А.В.Гринин, А.Е.Сафутин, Е.В.Кузнецов, М.А.Ладугин, М.Ю.Кузнецов, Н.Н.Брагин, А.В.Мамин

На основе эпитаксиальной структуры InGaAs/InP разработан и создан мезафотодиод с входом излучения через подложку и диаметром чувствительной области 150 мкм. Предпочтительность использования данного фотодиода в фотоприемных устройствах систем дальнометрирования обусловлена его конструкцией, которая исключает фотогенерацию носителей за пределами чувствительной площадки приемника и дает возможность с помощью высокоэнергетических дальномеров проводить измерения дистанции в ближней зоне при наличии помехи обратного рассеяния. Разработанный фотодиод при напряжении обратного смещения 5 В обладает темновым током не более 2 нА, емкостью не более 1.2 пФ и чувствительностью 0.55 А/Вт на длине волны λ = 1.064 мкм. На основе разработанного фотодиода создано малогабаритное фотоприемное устройство для систем импульсной лазерной дальнометрии, имеющее на λ = 1.064 мкм пороговую чувствительность менее 65 нВт для длительности импульса регистрируемого лазерного излучения 10 нс при вероятности правильного обнаружения 0.5 и показателе FAR = 1×10^{-3}.

Ключевые слова: *фотоприемное устройство, импульсный лазерный дальномер, мезафотодиод, pin-фотодиод, фотодиод с обратной засветкой.*

1. Введение

Современные системы импульсной лазерной локации ближнего ИК диапазона работают преимущественно в окнах прозрачности атмосферы вблизи длин волн λ = 1.06 и 1.54 мкм [1, 2], поэтому для детектирования лазерного излучения в таких системах в основном используются фотоприемные устройства (ФПУ) на основе Ge- или InGaAs-фотодиодов [1, 3]. При этом пороговая чувствительность ФПУ, использующих pin-фотодиоды на основе InGaAs, оказывается сопоставима с пороговой чувствительностью, обеспечиваемой германиевым лавинным фотодиодом (ЛФД). Это объясняется тем, что Ge является непрямозонным полупроводником, тогда как твердый раствор InGaAs – прямозонным.

В непрямозонном полупроводнике энергия входящего оптического излучения не полностью идет на генерацию носителей, поскольку она частично поглощается кристаллической решеткой, что ведет к тепловым потерям в структуре (приборе). Использование прямозонного полупроводника позволяет обеспечить меньшие темновые токи и бóльшую квантовую эффективность для длин волн 1.06 и 1.54 мкм [4]. При этом рабочее напряжение смещения pin-фотодиодов на InGaAs обычно не превышает 5 В [5–8], в то время как для нормальной работы Ge-ЛФД требуется не только существенно большее напряжение, но и его регулировка в диапазоне температур для изменения коэффициента лавинного умножения и поддержания наилучшего отношения сигнал/шум [9]. Необходимая при этом интеграция в состав фотоприемного устройства высоковольтного источника напряжения и схемы управления напряжением смещения [10] приводит к увеличению габаритных размеров фотоприемного устройства и потребляемой им мощности. Все это затрудняет использование ФПУ на основе Ge-ЛФД в малогабаритных энергонезависимых дальномерах. В свою очередь, фотоприемные устройства, использующие pin-фотодиоды на основе InGaAs, могут быть реализованы в миниатюрном корпусе и обладать малым энергопотреблением, но их устойчивость к помехе обратного рассеяния существенно ниже, чем у ФПУ на основе германиевых ЛФД, адаптированных для систем импульсной лазерной дальнометрии. Это обусловлено тем, что конструкция Ge-ЛФД, применяемых в фотоприемных устройствах дальномеров с высокоэнергетическими излучателями, имеет защитное металлизированное покрытие, которое препятствует засветке кристалла за пределами чувствительной площадки и тем самым исключает затягивание заднего фронта импульса фотоотклика из-за отсутствия фотогенерированных носителей, диффундирующих из области, прилегающей к чувствительной площадке фотодиода. Последнее, в свою очередь, обеспечивает возможность измерения дистанции до близкорасположенных объектов при наличии интенсивной помехи обратного рассеяния зондирующего излучения.

Задача предотвращения затягивания импульса фотоотклика актуальна и для фотодиодов на основе InGaAs. В первую очередь, это обусловлено тем, что InGaAs-фотодиоды имеют преимущественно планарное исполнение, при котором периферия кристалла фотодиода оста-

А.А.Короннов, Е.В.Кузнецов, М.А.Ладугин. «НИИ “Полюс” им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп.1; Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г.Разумовского, Россия, 109004 Москва, ул. Земляной Вал, 73;
e-mail: koronnov@inbox.ru
Н.Ф.Салова, М.М.Землянов, А.В.Гринин, А.Е.Сафутин, М.Ю.Кузнецов, Н.Н.Брагин, А.В.Мамин. «НИИ “Полюс” им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп.1

Поступила в редакцию 4 марта 2022 г., после доработки – 3 мая 2022 г.

ется фоточувствительной [11, 12], поэтому их применение в ФПУ импульсных лазерных дальномеров требует принятия специальных мер для защиты кристалла от нежелательной засветки. Чаще всего непосредственно на фотодиод устанавливают апертурную П-образную диафрагму с диаметром отверстия, не превышающим диаметр чувствительной площадки фотодиода. Однако такая конструкция ФПУ требует точной юстировки диафрагмы, что отрицательно сказывается на технологичности прибора; при этом погрешность установки диафрагмы влияет на результирующую апертуру приемного канала дальномера и «зарезает» поле видения приемного канала дальномера, что увеличивает вероятность пропуска цели при ее лоцировании, особенно в случае малогабаритных подвижных объектов.

Другим подходом, позволяющим уменьшить влияние фотогенерации носителей за пределами чувствительной площадки фотодиода на форму импульса фотоотклика, является создание экранирующего кольца вокруг чувствительной площадки. Однако, несмотря на высокую эффективность такого конструктивного решения, уширение импульса полностью не исключается [12].

Известен также ряд методов по защите периферии кристалла от засветки путем формирования металлизированного покрытия, выполняющего функцию диафрагмы. Однако в работе [12] сообщается о резком увеличении емкости планарного фотодиода при формировании такого покрытия со стороны диффузионного слоя. Возможен также вариант диафрагмирования чувствительной площадки фотодиода со стороны прозрачной подложки InP в сочетании с засветкой фотодиода со стороны подложки [13]. К сожалению, при таком подходе для надежного исключения засветки фоточувствительной периферийной области кристалла дифрагирующим пучком требуется высокая точность двухстороннего совмещения элементов и уменьшение диаметра диафрагмирующего отверстия.

Альтернативой этому подходу является представленная в настоящей работе конструкция фотодиода, изготовленного по мезатехнологии, которая исключает фотогенерацию вне мезы за счет удаления фоточувствительного слоя за ее пределами. В этом случае отпадает необходимость диафрагмирования периферии кристалла. Существенно, что мезатехнология изготовления фотодиода обеспечивает по сравнению с планарным исполнением меньшую емкость фотодиода при одинаковых толщинах эпитаксиальных слоев и диаметрах чувствительных площадок [14]. Это, в свою очередь, увеличивает быстродействие фотодиода и обеспечивает более высокую чувствительность ФПУ при регистрации импульсов наносекундной длительности, характерных для импульсной лазерной дальнометрии.

Кроме того, для исключения потерь на отражение от сегмента контактной металлизации при засветке со стороны мезы в работе рассмотрена конструкция фотодиода с засветкой через подложку (так называемая обратная засветка). При этом, в отличие от планарного исполнения фотодиода с обратной засветкой, где требуется высокая точность двухстороннего совмещения, для изготовления мезафотодиода с обратной засветкой не требуется применение дорогостоящих установок двухстороннего совмещения и экспонирования, а приемлемая точность двухстороннего совмещения может быть достигнута при помощи специализированной оснастки.

2. Конструкция фотодиода и основные технологические операции

Фотодиоды изготавливались из структуры, выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке InP n-типа с концентрацией легирующей примеси на уровне $(2-3)\times10^{18}$ см$^{-3}$. Выращенные на подложке буферный слой InP, активный поглощающий слой InGaAs и ограничивающий слой InP имели толщины около 2 мкм. Согласование поглощающего слоя с подложкой проверялось методом рентгеновской дифрактометрии, отклонение пиков эпитаксиальных слоев от подложки не превышало 500 угл. сек. Фоновая концентрация активного поглощающего слоя, являющаяся одной из важнейших характеристик для фотодиодных применений, не превышала 1×10^{15} см$^{-3}$. Оптимизация таких параметров, как температура и скорость роста, а также соотношение элементов V и III групп периодической системы, позволила обеспечить подвижность электронов при комнатной температуре около 8500 см^2/(В·с) [15]. Верхний эпитаксиальный слой InGaAs p-типа проводимости имел уровень легирования более 1×10^{18} см$^{-3}$ для обеспечения низкого контактного сопротивления. Поперечное сечение эпитаксиальной пластины и конструкции фотодиода на ее основе схематично показано на рис.1.

Для уменьшения потерь при вводе излучения со стороны подложки, обусловленных ее шероховатостью, эта сторона пластины подвергалась постростовой полировке. Для этого исходная пластина разделялась при помощи лазерного скрайбирования на прямоугольные пластины, каждая из которых в отдельности защищалась с противоположной стороны фоторезистом и химически полировалась в травителе 10% $K_2Cr_2O_7$ + HBr (1 : 1) в течение 60 мин. После полировки на пластины со стороны подложки наносилось просветляющее покрытие SiO_2 методом пиролитического разложения тетраэтоксисилана в среде аргона и кислорода. Тетраэтоксисилан поступал в кварцевый реактор в виде газовой смеси с кислородом, образующейся в результате прогонки кислорода через барбатер с жидким тетраэтоксисиланом. Для нормального течения реакции температура в рабочей зоне поддерживалась при помощи накатной печи вблизи 350 °C, а суммарный расход кислорода и аргона (в пропорции 1 : 1)

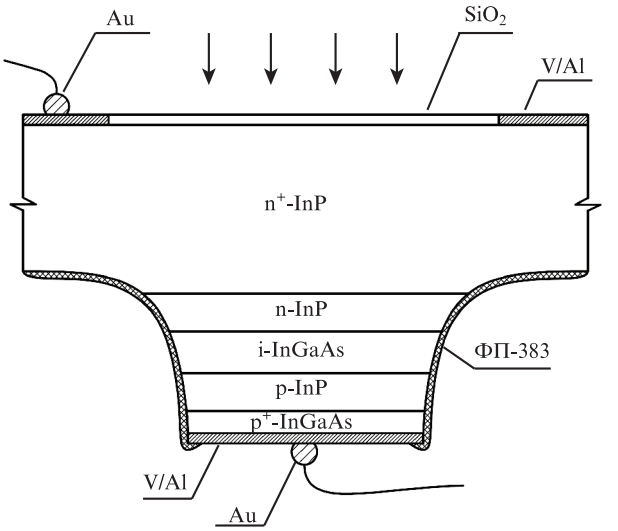

Рис.1. Схематичное изображение поперечного сечения pin-фотодиода на основе InGaAs/InP.

составлял 80 л/ч. При этих условиях необходимая толщина просветляющего покрытия, равная 190 нм, достигалась при осаждении в течение 60 мин.

После нанесения просветляющего покрытия на пластины со стороны, противоположной подложке, наносилось металлизированное покрытие Al толщиной 300 нм с подслоем V толщиной 50 нм. Покрытие наносилось методом резистивного испарения с предварительной ионной очисткой пластин. На следующем этапе проводилась двухсторонняя фотолитография для формирования границ областей будущих мез и соответствующих им областей с просветляющим покрытием; проецируемый с обеих сторон рисунок представлял собой непрозрачные круги диаметром 220 мкм, мультиплицированные по квадратной сетке с шагом 700 мкм. Далее с обеих сторон стравливались покрытия, не защищенные фоторезистом. После чего пластины повторно размещались в установке вакуумного напыления для нанесения металлизированного покрытия V/Al со стороны подложки, при этом, как и в предыдущем случае, толщина слоя V составляла 50 нм, а слоя Al – 300 нм.

На этапе последующей односторонней фотолитографии вскрывались участки металлизации диаметром 220 мкм, перекрывающие области с просветляющим покрытием. Затем выполнялась односторонняя фотолитография для формирования мезаструктур диаметром 150 мкм. Травление мез проводилось на глубину 7–8 мкм с использованием 10% $K_2Cr_2O_7$ + HBr (1 : 1). После завершения травления пластины очищались от фоторезиста и размещались в предварительно разогретом сушильном шкафу при температуре 80 °C. После сушки пластин выполнялась пассивация боковых поверхностей мезаструктур. Для этого поверх мезаструктур наносился слой фоторезиста, в котором при последующей фотолитографии проявлялись окна диаметром 110 мкм, совмещенные с центрами мез. После задубливания сформированная фоторезистивная маска надежно предотвращала рост токов, обусловленных поверхностной утечкой при хранении кристаллов в нормальных климатических условиях.

Разделение пластин на одиночные фотодиоды проводилось методом раскатки, после чего фотодиоды отбраковывались по величине темнового тока, который для большинства фотодиодов при напряжении обратного смещения 5 В лежал в диапазоне 0.45–0.55 нА. У отобранных фотодиодов снималась вольт-амперная характеристика (ВАХ), типичный вид которой при температуре 23 °C представлен на рис.2.

Золотые проволочные проводники приваривались к контактным площадкам фотодиодов методом микросварки, после чего фотодиоды устанавливались на технологические ножки для измерения их ВАХ, вольт-фарадных (ВФХ) и спектральных характеристик.

3. Результаты работы

Сопоставление ВАХ фотодиодов, снятых до и после микросварки, выявило увеличение их темнового тока в результате этой операции (рис.2). При этом было установлено, что приваривание проводника со стороны подложки не приводит к заметному изменению темнового тока, а его увеличение происходит лишь при микросварке контакта, расположенного на мезе, что объясняется частичной деградацией эпитаксиальной структуры при избыточном воздействии электрода, необходимом для обеспечения надежного контакта.

Сопоставление ВФХ фотодиодов после микросварки показало, что они несущественно отличаются друг от друга (меньше чем на 0.15 пФ), несмотря на заметные их отличия по темновому току. Типичная ВФХ представлена на рис.3. Верхняя граница полосы пропускания фотодиодов составила не менее 0.4 ГГц при ее определении по амплитудно-частотной характеристике, измеренной при засветке модулированным сигналом.

Спектральные характеристики фотодиодов измерялись с помощью монохроматора в диапазоне длин волн облучения 0.9–1.7 мкм. Масштабирование спектральной характеристики проводилось по значению токовой монохроматической чувствительности фотодиодов, измеренной на длине волны λ = 1.064 мкм и составившей 0.55 А/Вт. Типичная спектральная характеристика исследованных фотодиодов приведена на рис.4.

Ввиду актуальности проблемы пассивации мезаструктурных фотодиодов на основе соединения InGaAs [5, 8, 16] представляет интерес сравнение фотоэлектрических параметров разработанного нами фотодиода и его зарубежных аналогов (табл.1). Из таблицы следует, что применяемый в настоящей работе метод пассивации мезаструктуры фоторезистивной маской позволяет изгото-

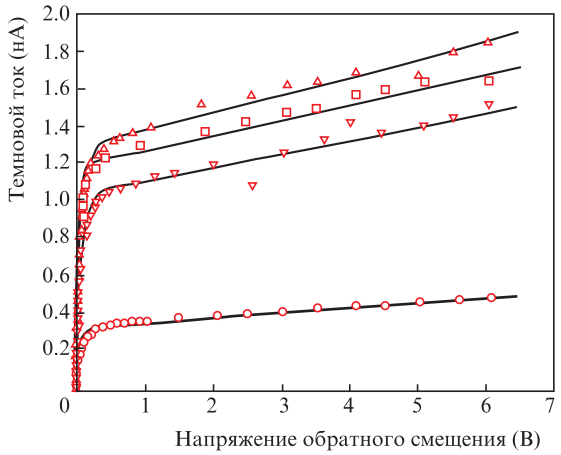

Рис.2. Вольт-амперные характеристики фотодиодов при температуре 23 °C (○ – типичная ВАХ фотодиодов до выполнения микросварки, измерена для фотодиода №1; △, ▽, □ – ВАХ фотодиодов № 1, 2, 3 соответственно после выполнения микросварки).

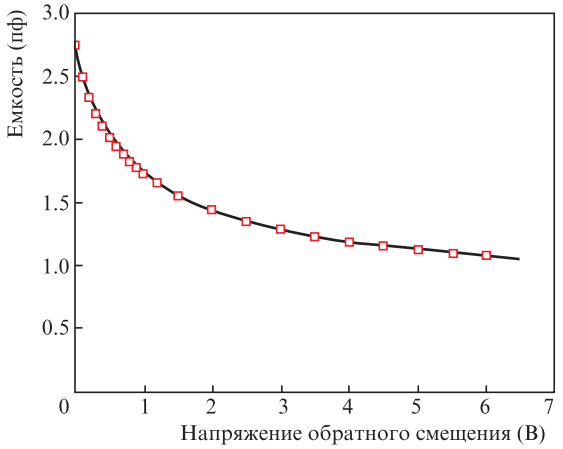

Рис.3. Типичная вольт-фарадная характеристика фотодиодов при температуре 23 °C (представлена ВФХ фотодиода № 1).

Табл.1. Фотоэлектрические параметры фотодиодов.

Фотодиод	Диаметр чувствительной площадки (мкм)	Темновой ток (нА) (U_{bias} = –5 В)	Емкость (пФ) (U_{bias} = –5 В)	Чувствительность (А/Вт)	
				λ = 1.064 мкм	λ = 1.55 мкм
Разработанный фотодиод	150	1.2–2	1.2–1.5	0.55	0.72
G11193-02R Hamamatsu [17]	200	0.04–0.8 (0.02–0.45)*	3–5 (1.7–2.8)*	0.66	0.77–1.0
FGA015 Thorlabs [18]	150	0.5–3.0	1.5–2.0	0.71	0.95
FD150 Laser Components [19]	150	0.5–3.0	1.5	0.7	0.85–0.95
FCI-InGaAs-120 OSI Optoelectronics [20]	120	0.05–2 (0.08–3.13)*	2 3.1*		0.9–0.95

* – параметр, приведенный к диаметру чувствительной площадки фотодиода 150 мкм.

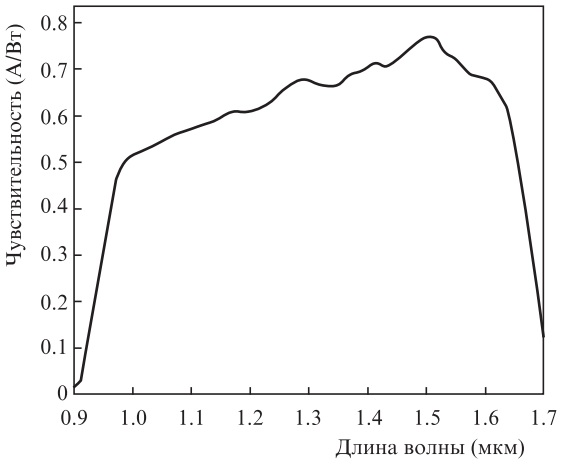

Рис.4. Типичная спектральная характеристика фотодиодов.

вить фотодиод с величиной темнового тока на уровне мировых образцов. Разработанный фотодиод по величине емкости также сопоставим с представленными в табл.1 фотоприемниками, но уступает им по ампер-ваттной чувствительности. При этом наш фотодиод выгодно отличается от представленных своим конструктивным исполнением, которое позволяет предотвратить фотогенерацию носителей вне чувствительной площадки. В результате применение разработанного нами фотодиода обеспечивает фотоприемным устройствам достаточную пороговую чувствительность в совокупности с устойчивостью к помехе обратного рассеяния без принятия дополнительных специальных мер защиты, необходимых для других фотодиодов.

4. Заключение

На основе разработанного фотодиода было создано малогабаритное фотоприемное устройство с пороговой чувствительностью на длине волны λ = 1.064 мкм менее 65 нВт для оптического импульса длительностью на половине высоты 10 нс при вероятности правильного обнаружения 0.5 и показателе FAR, равном 1×10^{-3}. Фотоприемное устройство имеет размер $46.0 \times 27.0 \times 6.7$ мм, массу 7 г и потребляемую мощность менее 120 мВт, что обеспечивает техническую возможность его применения в малогабаритных энергонезависимых системах лазерной локации. Полевые испытания и эксплуатация разработанного ФПУ в составе дальномеров, встраиваемых в беспилотные летательные аппараты, подтвердили его устойчивость к помехе обратного рассеяния и показали, что пороговая чувствительность ФПУ достигает приемлемого уровня. Полученные результаты однозначно демонстрируют эффективность применения разработанного фотодиода, что делает возможным создание новых малогабаритных высокочувствительных ФПУ для систем импульсной лазерной дальнометрии и расширяет области их возможного применения.

В работе показана допустимость применения в конструкции pin-фотодиода на InGaAs/InP контактной металлизации V/Al и последующего приваривания к ней золотых выводов методом термозвуковой сварки. Возникающая при этом частичная деградация фотодиода проявляется в некотором увеличении темного тока, конечное значение которого не превышает 2 нА, что не препятствует достижению низкой пороговой чувствительности фотоприемных устройств.

Авторы выражают благодарность коллективу НПЦ-660 «НИИ “Полюс” им. М.Ф.Стельмаха» за помощь в изготовлении фотодиодов и фотоприемных устройств на их основе, особенно И.В.Бинюкову за изготовление технологических оснасток и корпусов экспериментальных фотоприемных устройств, а также А.В.Иванову за участие в исследованиях фотоэлектрических характеристик фотодиодов.

1. Crawford I.D. *Proc. SPIE*, **1419**, 9 (1991). DOI: 10.1117/12.43841.
2. Stavrov A.A., Pozdniakov M.G. *Proc. SPIE*, **5381**, 119 (2004). DOI: 10.1117/12.547675.
3. Зверев Г.М., Землянов М.М., Короннов А.А. *Прикладная физика*, **2**, 79 (2015).
4. Stokoe J.C.D., Putland P.A., Sutherland R.R. *Quality and Reliability Engineering International*, **5** (4), 319 (1989). DOI: 10.1002/qre.4680050411.
5. Yamabi R., Tsuji Y., Hiratsuka K., Yano H. *Proc. 2004 Inter. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM)*. DOI: 10.1109/ICIPRM.2004.1442659.
6. Joshi A.M., Wang X. *Proc. SPIE*, **10295**, 102950C (1999). DOI: 10.1117/12.361073.
7. Diadiuk V., Groves S. H. *Solid State Electron.*, **29** (2), 229 (1986). DOI: 10.1016/0038-1101(86)90043-2.
8. Wang Y.S., Chang S.J., Tsai C.L., Wu M.C., Chiou Y.Z., Huang Y.H., Lin W. *IEEE Trans. Electron Devices*, **56** (6), 1347 (2009). DOI: 10.1109/TED.2009.2018170.

9. Hof C.V.T., Bakker T. *Appl. Sci. Res.*, **29** (1), 211 (1974). DOI: 10.1007/BF00384145.
10. Nishida K., Nakajima M. *Rev. Sci. Instrum.*, **43** (9), 1345 (1972). DOI: 10.1063/1.1685922.
11. Matukas J. *Proc. 2006 Inter. Conf. on Microwaves, Radar & Wireless Communications*. DOI: 10.1109/MIKON.2006.4345132.
12. Андреев Д.С., Варганова В.С., Хакуашев П.Е., Чинарева И.В., Дирочка А.И. *Прикладная физика*, **6**, 70 (2015).
13. Филачев А.М., Таубкин И.И., Тришенков М.А. *Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды* (М.: Физматкнига, 2011).
14. Skrimshire C.P., Farr J.R., Sloan D.F., Robertson M.J., Putland P.A., Stokoe J.C.D., Sutherland R.R. *IEE Proc. – Optoelectron.*, **137** (1), 74 (1990). DOI: 10.1049/ip-j.1990.0015.
15. Будтолаев А.К., Горлачук П.В., Ладугин М.А., Мармалюк А.А. и др. *Прикладная физика*, **1**, 82 (2016).
16. Ravi M.R., DasGupta A., DasGupta N. *IEEE Trans. Electron Devices*, **50** (2), 532 (2003). DOI: 10.1109/TED.2002.808530.
17. https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/g11193_series_kird1111e.pdf.
18. https://www.thorlabs.com/drawings/537cbd12f43c6dc7-6B870F63-EF0F-EC6F-9C5077C295037CD4/FGA015-SpecSheet.pdf.
19. https://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user_upload/home/Datasheets/fermionics/fd150.pdf&no_cache=1.
20. https://www.osioptoelectronics.com/Libraries/Datasheets/High-Speed-InGaAs-Photodiodes.sflb.ashx.