

УДК 621.383

Инжекционные фотодиоды

В. И. Стафеев

ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Дано описание физических механизмов инжекционного усиления фотоэлектрических сигналов в “длинных” диодах, работающих при смещении в пропускном направлении — инжекционных фотодиодов. Показана возможность высокой фоточувствительности инжекционных фотодиодов в ультрафиолетовой, видимой, инфракрасной и субмиллиметровой областях спектра. Приведены результаты экспериментальных исследований на разных полупроводниковых материалах.

Фоточувствительные полупроводниковые приборы широко используются в системах автоматики, оптической связи, навигации, в космической технике, астрономии, в современной военной технике (разведка, прицеливание, самонаведение) и в других областях науки и техники [1—29]. Наиболее широко применяются приборы, действие которых основано на возбуждении свободных носителей в зону проводимости из валентной зоны или с примесных уровней в запрещенной зоне. Созданные светом неравновесные носители обеспечивают получение в полупроводнике дополнительной проводимости, измерение которой и дает возможность осуществлять регистрацию света. На этом эффекте основано действие фоторезисторов. При наличии в полупроводнике барьера (p - n -переход, гетеропереход, барьер Шоттки и др.) созданные светом неосновные носители разделяются на этом барьере, что приводит к возникновению фотоЭДС. На этом эффекте основано действие “обычных” фотодиодов. Существуют и другие типы фоточувствительных полупроводниковых приборов: фототранзисторы, фототиристоры и др.

Автором был предложен [1, 2] новый класс полупроводниковых фотоприемников с внутренним усилением в слабом электрическом поле — инжекционные фотодиоды (ИФД). В отличие от обычных и лавинных фотодиодов они обладают высокой фоточувствительностью не только в области собственного, но и примесного поглощения и в области далекого ИК-излучения.

Впервые высокая фоточувствительность фотодиодов в пропускном направлении была обнаружена в диодах из германия с примесью золота [3] при температуре жидкого азота.

В инжекционных фотодиодах p - n -переход или другой потенциальный барьер (например барьер Шоттки) изготавливается в полуизоляторе — высокоомном полупроводнике с большой длиной диффузионного смещения, причем толщина базовой

области (расстояние от барьера до второго контакта) должна быть в несколько раз больше длины диффузионного смещения — “длинные” диоды [1—4].

Инжекционные фотодиоды в отличие от обычных фотодиодов работают при подаче на барьер электрического смещения в пропускном направлении. В этом случае основная часть внешнего напряжения падает на высокоомную базовую область. При протекании прямого тока p - n -переход инжектирует в базовую область неосновные носители, для компенсации объемного заряда которых из второго контакта в полупроводник втекает равное количество основных носителей. В базовой области концентрации неравновесных электронов и дырок равны, т. е. сохраняется квазинейтральность. При высоких уровнях инжекции концентрации неравновесных носителей значительно превышает концентрацию равновесных, и они определяют проводимость базовой области.

Освещение снижает сопротивление базы, что приводит к перераспределению приложенного смещения. Напряжение на p - n -переходе возрастает, и усиливается инжекция носителей в базу, что дополнительно снижает ее сопротивление. Последнее вызывает повышение напряжения на p - n -переходе с соответствующим ростом инжекционного тока и т. д. Вследствие положительной обратной связи происходит инжекционное усиление первичного фототока.

Фоточувствительность ИФД резко возрастает с ростом тока в пропускном направлении, и коэффициент усиления может достигать 10^3 — 10^6 .

Имеется принципиальное различие в фоточувствительности в области основной полосы поглощения (валентная зона — зона проводимости) и в области примесного поглощения [9, 10]. Освещение не только повышает концентрацию носителей, но и влияет на параметры, определяющие их распределение в базовой области (время жизни, би-

полярная подвижность и др.), что обеспечивает дополнительное "параметрическое" усиление фототока. В ИФД существуют два механизма усиления фототока [5—8].

В примесной области с ростом инжекционного тока фоточувствительность возрастает значительно быстрее и может превысить ее величину в области собственного поглощения. На рис. 1 представлены спектральные характеристики ИФД и эквивалентного фоторезистора из германия с примесью золота при температуре 78 К при различных напряжениях смещения. На рис. 2 представлено распределение спектральной чувствительности ИФД на основе легированного ртутью германия *p*-типа с толщиной базовой области 2,2 мм при 55 К при нескольких напряжениях смещения [11]. При малых прямых токах фоточувствительность в области собственного поглощения намного больше, чем в области примесного поглощения. При больших токах примесная фоточувствительность превышает собственную. Параметры, определяющие распределение инжектированных в базу носителей, зависят только от интенсивности примесного поглощения, непосредственно изменяющего заполнение примесных уровней и уровней ловушек. Это приводит к изменению не только концентрации неравновесных носителей, но и времени жизни, амбиполярной подвижности носителей и других параметров. Последнее вызывает изменение распределения и глубины проникновения неравновесных носителей в базовой области диода. Поэтому изменяется проводимость базовой области со всеми вытекающими последствиями — перераспределение напряжения между базой и *p-n*-переходом, дополнительный рост инжекции и т. д. Именно этот эффект вносит основной вклад в усиление фототока в инжекционных фотодиодах в области примесного поглощения.

Инжекционный механизм усиления обеспечивает примерно одинаковое усиление как фотосигнала, так и шумов [7], поэтому обнаружительная способность ИФД не хуже, чем у фоторезисторов из того же материала — эквивалентного фоторезистора — в одинаковых условиях (область спектра, температура и др.).

В ИФД с "омическим" контактом, т. е. контактом с высокой скоростью рекомбинации, наиболее высокое сопротивление имеет область базы вблизи омического контакта. Поэтому высокая фоточувствительность ИФД в отличие от обычных фотодиодов наблюдается при освещении со стороны, противоположной *p-n*-переходу [6, 9]. При освещении области со стороны *p-n*-перехода воз-

можно даже уменьшение тока, т. е. отрицательный фотоэффект. На рис. 3 представлена зависимость фоточувствительности от области освещения базовой области [10].

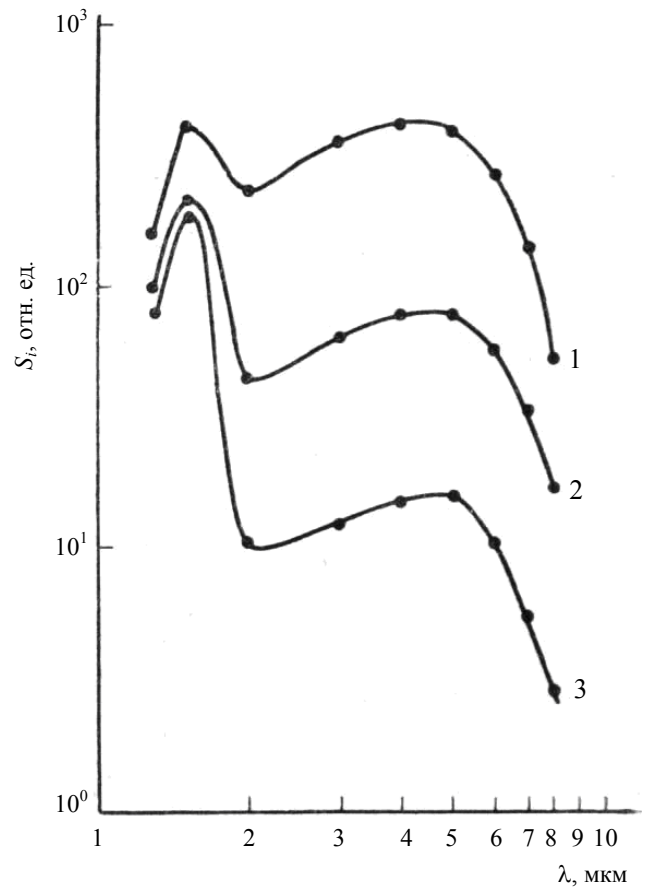


Рис. 1. Спектральные характеристики ИФД и фоторезистора из германия *p*-типа с примесью золота: 1 — диод при напряжении 30 В; 2 — диод при напряжении 10 В; 3 — резистор при напряжении 10 В

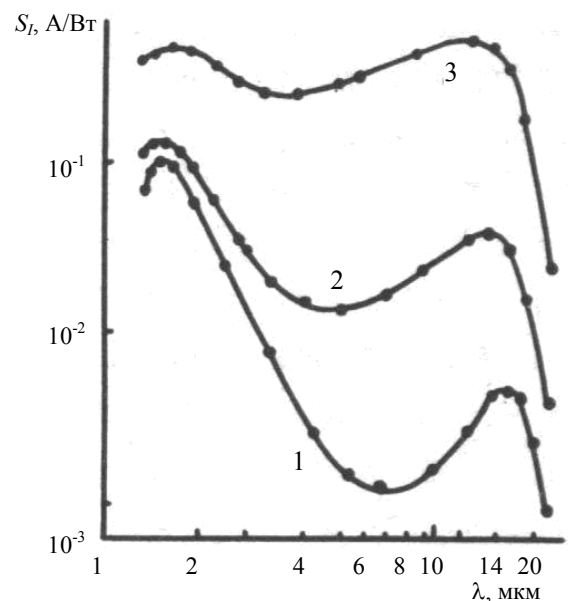


Рис. 2. Спектральные характеристики ИФД из германия с примесью ртути при толщине базовой области $d = 0,22$ см, температуре $T = 55$ К и напряжении: 1 — 1 В; 2 — 10 В; 3 — 20 В

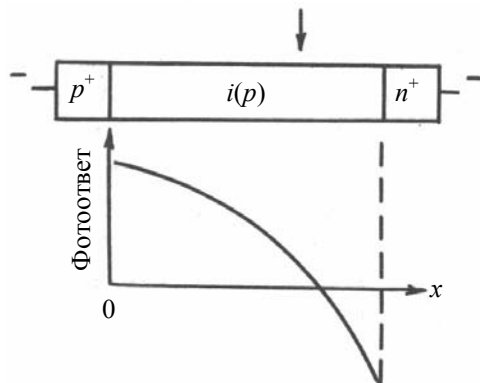


Рис. 3. Зависимость фоточувствительности от места освещения базовой области

В ИФД со структурой $p-i-n$ толщина базы должна быть больше примерно в два раза. При высоких уровнях инжекции в такой структуре наименьшая концентрация неравновесных носителей расположена в средней части базы. Поэтому в таких диодах максимальная фоточувствительность будет наблюдаться при освещении его средней области.

Инжекционные фотодиоды имеют высокую фоточувствительность в широкой спектральной области, в том числе в инфракрасной, ультрафиолетовой и субмиллиметровой [11, 12] областях спектра. Подвижность носителей зависит от их энергии, которая возрастает при поглощении электромагнитного излучения. Коэффициент поглощения возрастает при увеличении длины волны, и фоточувствительность на этом эффекте простирается до субмиллиметрового диапазона спектра.

Спектральное распределение фоточувствительности определяется глубиной залегания примесных уровней и может распространяться от ультрафиолета в широкозонных полупроводниках примерно до 100 мкм в инжекционных фотодиодах на основе германия и кремния, легированных элементами третьей или пятой группы. В таблице приведены энергия ионизации и граничная длина фоточувствительности основных примесей в германии и кремнии.

Инжекционные фотодиоды созданы и исследованы на многих полупроводниковых материалах: Ge, Si, соединениях A^3B^5 (InSb, GaAs, GaP, твердые растворы этих соединений), ZnS, GaSe и др. [14—23].

В ИФД на основе германия, легированного индием, при $\lambda = 3,1$ мкм токовая фоточувствительность достигала $S_i = 900$ А/Вт, вольтовая чувстви-

тельность $\sim 5 \cdot 10^8$ В/Вт, пороговая величина фоточувствительности $10^{-15} \div 10^{-16}$ Вт·Гц^{1/2}. В ИФД на основе кремния с примесью цинка фоточувствительность составляла $\sim 10^{-14}$ Вт·Гц^{1/2} [15].

Основной материал	Примесь	Энергия ионизации, эВ	Длина волны λ , мкм
Ge	Au	0,15	8,3
	Hg	0,09	14
	Cd	0,06	21
	Cu	0,041	30
	Zn	0,033	38
	B	0,0104	120
Si	In	0,155	8
	Ga	0,072	17
	Bi	0,07	18
	As	0,054	23
	P	0,045	28
	B	0,044	28
	Sb	0,043	29
	Al	0,068	18
	Au	0,15	8,3

Для создания фотоприемников ультрафиолетового диапазона используются широкозонные соединения GaP, GaP_xAs_{1-x}, GaAs и др., которые обладают фоточувствительностью в области спектра вплоть до 200 нм. В качестве исходных использовались эпитаксиальные структуры $n-n^+$ -типа. Активным слоем является нелегированный n -слой толщиной около 10 мкм. Подложки ориентированы в плоскости (111). Для создания омического контакта к низкоомной подложке химическим методом наносился трехслойный контактный слой Au—Ni—Au толщиной 40—100—40 нм, соответственно. Барьер Шоттки создавался в высоком вакууме методом термического напыления полупрозрачного слоя золота толщиной ~ 100 нм на очищенную и свежепротравленную поверхность n -слоя.

Фотодиоды на основе GaP имеют максимум фоточувствительности при $\lambda_{\max} \sim 430-440$ нм. Для фотодиодов с фоточувствительной площадкой диаметром 15 мм при λ_{\max} типичное значение порога в пределах $(1-2) \cdot 10^{-14}$ Вт·Гц^{1/2}. Они обладают широким динамическим диапазоном, линейность в пределах $(10^{-12} \div 10^{-5})$ Вт/см².

Наилучшими параметрами в ультрафиолетовой области спектра обладают ИФД на основе легированного Ст арсенида галлия и ИФД с гетеропереходом GaAlAs—GaAs. Область спектральной чувствительности 300—1300 нм с максимумом вблизи 800 нм. Примесная фоточувствительность наблюдается вблизи $\lambda \sim 1300$ нм и особенно ярко проявляется при $T = 77$ К.

Наиболее коротковолновой фоточувствительностью ИФД обладают при освещении с торца, т. е. со стороны, противоположной $p-n$ -переходу. Фоточувствительность в λ_{\max} достигает 500 А/Вт.

Созданы ИФД с пороговой чувствительностью (NEP) при 300 К $\sim 10^{-14}$ Вт·Гц^{-1/2}, а при 77 К — $\sim 10^{-15}$ Вт·Гц^{-1/2}. В арсениде галлия рост пропускного тока увеличивает рекомбинационное излучение, которое поглощается в базовой области, снижает ее сопротивление и приводит к дополнительному усилению фототока. Динамический диапазон ИФД на основе GaAs с Сг при 300 К достигает 4—5-го порядков.

Высокой фоточувствительностью обладают ИФД и на других широкозонных материалах, например на основе GaSe, в области длин волн 0,36—0,65 мкм токовая чувствительность $S_i \sim 10^2$ А/Вт. В фотодиодах на основе ZnS при $\lambda = 0,3$ мкм $S_i \sim 10^3$ А/Вт [28].

Литература

1. Стафеев В. И. Модуляция длины диффузионного смещения как новый принцип действия полупроводниковых приборов// ФТТ. 1959. Т. 1. № 6. С. 841.
2. Stafeev V. I., Tuchkevich V. M. A new principle in the control of a current semiconductor devices// Rep. on Nineteenth Annual Conf. Phys. Electr., MIT, Cambridge, Massach, 1959.
3. Лебедев А. А., Стафеев В. И., Тучкевич В. М. Некоторые свойства диодов из германия с примесью золота// ЖТФ. 1956. Т. XXVI. № 10. С. 2131.
4. Стафеев В. И. Влияние сопротивления толщи полупроводника на вид вольт-амперной характеристики диодов// Там же. 1958. XXVIII. Вып. 8. С. 1631; Викулин И. М., Курмашев Ш. Д., Стафеев В. И. Фотоприемники с инжекционным усилением. — М.: ЦНИИ "Электроника", 1989.
5. Стафеев В. И. Фотопроводимость в полупроводниковом диоде, вызванная изменением времени жизни// ФТТ. 1961. Т. 3. № 9.
6. Гарин Б. М., Стафеев В. И. О влиянии света на статическую вольт-амперную характеристику "длинного" диода// Там же. 1972. Т. 6. № 1. С. 78—83.
7. Гарин Б. М., Стафеев В. И. О "примесной" фотопримесности при инжекции в компенсированный полупроводник: Всес. совещ. по диэлектрической электронике. — Ташкент, 1973.// Тезисы докладов. — Ташкент: Фан, 1973. С. 42.
8. Викулин И. М., Курмашев Ш. Д., Стафеев В. И. Фотоприемники с инжекционным усилением. — М.: ЦНИИ "Электроника", 1989.
9. Залетаев Н. Б., Серебренников П. С., Стафеев В. И. О генерационно-рекомбинационных шумах при биполярной инжекции в полуизолятор// ФТП. 1982. Т. 16. № 2. С. 324—330.
10. Власов А. Н., Залетаев Н. Б., Никифоров В. П., Стафеев В. И. Влияние неоднородного освещения на прямой ток в полуизоляторе с *p-n*-переходом// Там же. № 6. С. 1062—1069.
11. Викулин И. М., Курмашев Ш. Д., Андреев В. И. и др. Фотоэлектрические свойства *S*-диодов из германия, легированного ртутью// Там же. 1979. Т. 13. № 3. С. 460—462.
12. Блохин И. К., Осипов В. В., Стафеев В. И., Холоднов В. А. Фотопроводимость длинных диодов при поглощении света на инжектированных носителях и их разогреве// Радиотехника и электроника. 1981. Т. XXV. № 7. С. 1573—1580.

13. Блохин И. К., Осипов В. В., Стафеев В. И., Холоднов В. А. Фотопроводимость *p-i-n*-структур при поглощении света на инжектированных носителях// Там же. 1980. № 8. С. 1702—1707.
14. Мурыгин В. И. Исследование некоторых фотоэлектрических свойств полуизолирующего фосфида галлия и диодных структур на его основе// ФТП. 1973. Т. 7. № 4. С. 858—862.
15. Анисимова И. Д., Рудовол Т. В., Стафеев В. И. Исследование фотоэлектрических свойств структур с гетеропереходом *pGa_{1-x}Al_xAs—iGaAs—nGaAs*// Там же. 1975. Т. 9. № 1. С. 1145.
16. Лосев В. В., Орлов Б. М., Стафеев В. И. Фотоэлектрические свойства диодов на основе высокоомного ZnS// Там же. С. 41—45.
17. Анисимова И. Д., Мамедова А. Е., Михайлов И. И., Рудовол Т. В., Короб Е. Б., Стафеев В. И. Исследование фотоэлектрических свойств *n-i-n*-структур на основе высокоомного арсенида галлия// Там же. 1976. Т. 10. № 8. С. 1174.
18. Рудовол Т. В., Стафеев В. И., Саидов М. С., Никитин В. В., Мамедова А. З., Анисимова И. Д. Фотоэлектрические свойства *p-i-n*-структур на основе высокоомных твердых растворов *Ga_{1-x}Al_xAs*, легированных никелем и хромом// Радиотехника и электроника. 1977. Т. XXII. № 7. С. 1462.
19. Абдуллаев Г. Б., Залетаев Н. Б., Мамедова А. З., Стафеев В. И. Фотодиоды и фоторезисторы на основе GaSe// Там же. 1979. Т. XXIV. № 7. С. 1430—1432.
20. Викулин И. М., Курмашев Ш. Д., Андреев В. А. Инжекционное усиление примесного фототока в *p-InSb*// ФТП. 1981. Т. 16. № 5. С. 990—992.
21. Анисимова И. Д., Бурлаков И. Д., Стафеев В. И. Фотоприемники ультрафиолетового излучения на основе фосфида галлия, арсенида галлия и арсенид-фосфида галлия// Лазерная техника. 1994. № 3. С. 8—10.
22. Стафеев В. И., Анисимова И. Д. Фотодиоды с барьером Шоттки на основе GaP, GaP_xAs_{1-x} и GaAs для УФ- и видимого диапазонов спектра// ФТП. 1994. Т. 28. № 3. С. 461—466.
23. Стафеев В. И., Филачев А. М., Анисимова И. Д. Инжекционные фотодиоды// Сб. Фотоника-2003: Тез. совещ. "Актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники". — Новосибирск, Академгородок, 28—31 августа 2003 г. С. 53. — Новосибирск, 2003.
24. Курмашев Ш. Д., Викулин И. М., Стафеев В. И. Фотоприемники с инжекционным усилением// Сенсорная электроника и микросистемные технологии: Междунар. науч.-техн. конф. — Украина, Одесса, 1—5 июня 2004 г. Тез. докл. С. 25—26. — Одесса: "Астропринт", 2004.
25. Стафеев В. И. Фотопроводимость в полупроводниковом диоде, вызванная изменением времени жизни// ФТТ, 1961. Т. 3. № 9.
26. Стафеев В. И., Филачев А. М., Анисимова И. Д. Инжекционные фотодиоды// Сб. Фотоника-2003: Тез. совещ. "Актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники". — Новосибирск, Академгородок 28—31 августа 2003 г. С. 53. — Новосибирск, 2003.
27. Курмашев Ш. Д., Викулин И. М., Стафеев В. И. Фотоприемники с инжекционным усилением// Сенсорная электроника и микросистемные технологии: Междунар. науч.-техн. конф. — Украина, Одесса, 1—5 июня 2004 г. Тез. докл. С. 25—26. — Одесса: "Астропринт", 2004.
28. Stafeev V. I. Ultrafiolet photodetectors based on wide bandgap A₃B₅ compounds// SPIE. 1998. V. 3819. P. 63—65 (15 International Conference. on Photoelectronics and Nigt Vision Devices, october 28—30, 1998. — Moscow, Russia).
29. Абрамян Ю. А., Анисимова И. Д., Каляева В. П., Мирзабекян Э. Г., Михайлов И. И., Симонян Р. Г., Стафеев В. И. Инфракрасный радиометр на основе инжекционного фотодиода из арсенида галлия// ОМП. 1978. № 9. С. 71.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

Photodetectors with internal injection amplification

V. I. Stafeev

Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

Physical mechanisms of photo-electric amplification in long diodes or injection photodiodes at direct bias are investigated. High photosensitivity of injection photodiodes in ultra-violet, visible, infrared and submillimetric spectral ranges have been shown. Different semiconductor materials injection photodiodes investigations are presented.

УДК 621.383

Широкоформатные матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона спектра

А. В. Борошнев

ФГУП «ЦНИИ "Комета"», Москва, Россия

Рассмотрены состояние и проблемы совершенствования матричных фотоприемных устройств инфракрасного (ИК) диапазона.

Матричные фотоприемные устройства (МФПУ) ИК-диапазона спектра представляют интерес для использования в различных областях [1—10]. В частности, такие устройства востребованы в оборонных системах, в системах по обнаружению и предотвращению чрезвычайных ситуаций, метеорологии, астрономии и др. Важнейшими характеристиками МФПУ являются величина порогового потока, спектральный диапазон fotocувствительности, размер пикселей, составляющих матрицу, и число этих пикселей, определяющих формат матрицы. Ключевым элементом функционирования фотоприемных матриц является мультиплексор, обеспечивающий процесс управления и преобразование параллельного изображения входной за светки в последовательность электрических сигналов.

В настоящее время для ИК-диапазона спектра промышленно освоенным можно рассматривать формат МФПУ 256×256 элементов. Проводятся исследования путей увеличения формата до 1000×1000 элементов и более. Работы в этом направлении связаны с необходимостью решения ряда задач как функционально-эксплуатационного, так и конструктивно-технологического характера. К первым можно отнести необходимость обеспечения высокого уровня пороговой чувствительности и детализации входных регистрируемых изображений полей яркости в заданном спек-

тральном интервале, большого динамического диапазона входных сигналов, а также длительного ресурса при заданном режиме (стационарный либо мобильный) и условиях (наличие внешних воздействий, температурный режим и др.) эксплуатации МФПУ и др.

Среди задач конструктивно-технологического характера можно выделить следующие. В процессе создания МФПУ осуществляется соединение мультиплексора с fotocувствительной матрицей с помощью индиевых столбов по flip-chip-технологии. При создании широкоформатной матрицы этот технологический этап может привести к механическим напряжениям в структуре МФПУ, что ведет к ухудшению параметров, а также обуславливает линейные погрешности монтажа. Увеличение формата приводит к росту габаритных размеров всей поверхности МФПУ и снижению эффективности заполнения fotocувствительной поверхности. Отсюда следует необходимость перехода на технологические процессы, обеспечивающие создание элементов с размерами 0,1 мкм и менее. Уменьшение размера пикселей приводит к уменьшению накопительной ячейки и, соответственно, к снижению величины преобразуемых сигналов,