

ФИЗИКА

Э.А. Керимов,
С.Н. Мусаева,
М.Р. Магеррамова

Параметры приемных устройств на шоттки-матрицах

В работе экспериментально определена зависимость сигнала чувствительного элемента фотодиода от контрастной температуры объекта по отношению к $300\text{ }^\circ\text{K}$ фону для $1/2$ оптической системы и среднеквадратичного шума от числа накопленных электронов. Для повышения качества изображения применяется специальное электронное устройство, устраняющее аддитивную составляющую геометрического шума. При этом в качестве опорного кадра используется усреднённый по 16 последовательным кадрам фоновый сигнал.

Ключевые слова: диод Шоттки; детектор; фоточувствитель; частота Найквиста; двухмерная матрица; квантовой эффект.

В работе исследована зависимость отношения сигнал / шум для одномерной линейки из 256 фоточувствительных элементов на IrSi-диодах от интенсивности излучения абсолютно чёрного тела при температуре $500\text{ }^\circ\text{K}$ в спектральной области $3,4 \div 4,2\text{ }\mu\text{m}$; время интегрирования сигнала — 35 мс. Облучение осуществляли через поверхность кремния. Так как поверхность не просветляется, потери на отражение достигали 30 %. Получено значение отношения сигнал / шум, равное единице, при облучённости $4,5 \cdot 10^{-7}\text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$, что соответствует предельной чувствительности отдельного элемента, равной $8 \cdot 10^{-12}\text{ Вт}$. Сигнал линейно возрастал с облучённостью, вплоть до значений $10^{-3}\text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$. Значение динамического диапазона составляло $5 \cdot 10^3$, рабочая температура чувствительных элементов была равна $80\text{ }^\circ\text{K}$. Неравномерность чувствительности элементов в линейке, равная 0,55 %, определялась лишь точностью соблюдения геометрических размеров чувствительных элементов. Модуляционная передаточная функция (МПФ), полученная на матрице 25×50 элементов, приведена на рисунке 1. Значение МПФ на частоте Найквиста составляет 60 %.

Чувствительность двухмерной матрицы из 64×64 элементов на IrSi-диодах с МОП-ключами определяли при температуре $77\text{ }^\circ\text{K}$ и времени накопления — 19 мс. Инжектированный сигнальный заряд измеряли внешним предусилителем, по причине чего основным источником шума были наводки на коаксиальный кабель, связывающий вход матрицы с предусилителем.

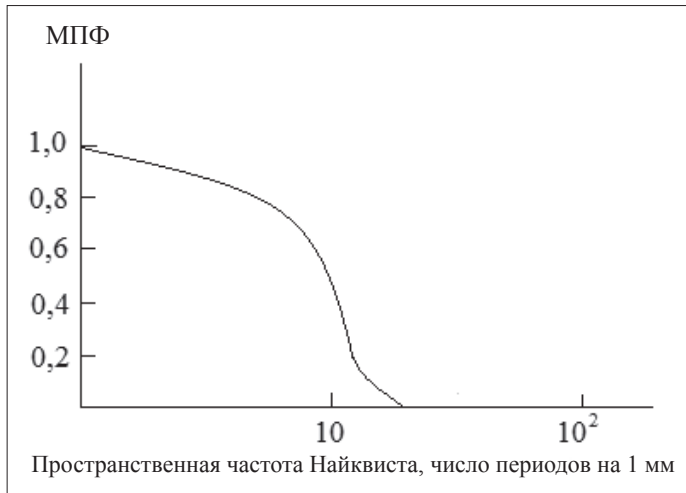


Рис. 1. Нормированная модуляционная передаточная функция шоттки-детектора (МПФ) в линейной матрице 25×50 элементов

В этих условиях чувствительность матрицы по отношению к разности значений облучённости фона при $300\text{ }^\circ\text{K}$ и АЧТ при $500\text{ }^\circ\text{K}$ составляла $3,5 \times 10^7$ В/Вт, при среднеквадратичной величине шума 5 мВ и динамическом диапазоне 48 дБ . Была измерена также чувствительность по отношению к разности температур АЧТ. При температуре фона $300\text{ }^\circ\text{K}$ чувствительность составляла $10,5\text{ мВ/К}$, что для указанного выше среднеквадратического значения шума соответствует эквивалентной шуму разности температур $0,48\text{ }^\circ\text{K}$. Испытания показали, что матрица не имеет неработающих элементов, среднеквадратичная величина разброса чувствительности элементов составляет $1,8\%$ и определяется в основном экранированием потока входным окном. При использовании этой матрицы в оптической системе с диаметром входного зрачка 50 мм и относительным отверстием $f/1$ получено тепловое изображение малоконтрастных объектов в окне прозрачности атмосферы $3\text{--}5\text{ мкм}$. При облучении фоточувствительной структуры со стороны слоя силицида можно получать изображения объектов в спектральном интервале $0,4 \div 5,2\text{ мкм}$. В диапазоне длин волн до $1,1\text{ мкм}$ (граничная длина волны кремния), механизмом обнаружения излучения является собственное поглощение фотонов в кремнии и разделение фотоносителей полем перехода шоттки-диода; на длине волны больше $1,1\text{ мкм}$ при поглощении излучения в слое силицида происходит внутренняя фотоэмиссия фотоносителей из металла в полупроводник. Если толщина слоя силицида меньше 10 нм , то шоттки-матрица в видимом и ближнем ИК-диапазонах по квантовой эффективности сравнима с кремниевыми твёрдотельными преобразователями изображения.

Была проведена экспериментальная оценка параметров приёмного устройства на основе двухмерной матрицы (32×63 элемента) из IrSi шоттки-диодов для оптической системы с относительным отверстием $f/2,0$, при частоте кадров 60 Гц и рабочей температуре $80\text{ }^\circ\text{K}$. При этой температуре за счёт темнового тока ячейка

накапливала за время кадра $\approx 10^9$ электронов. Среднеквадратичная величина шума ячейки в матрице (без учёта геометрического шума) составила $\approx 1,3 \cdot 10^3$ электронов, при среднеквадратичном шуме считывающего ПЗС-регистра, $180 \div 250$ электронов на 1 ячейку. Абсолютная чувствительность фотоприёмного устройства достигала $4 \cdot 10^4$ электронов на 1°K при небольших изменениях температуры относительно фона 300°K , что для приведённой величины среднеквадратичного шума соответствует эквивалентной шуму разности температур $0,033^\circ\text{K}$. Такая высокая пороговая чувствительность, однако, не была реализована в приёмном устройстве из-за наличия геометрического шума, который был вызван не разбросом чувствительности отдельных элементов (среднеквадратичное значение её разброса составляло от 0,2 до 0,5 %), а по причине абсолютного значения их темнового тока (заряда). Так как этот геометрический шум — величина аддитивная, его можно заметно снизить, вычитая из сигнала наблюдаемых кадров сигнал некоторого опорного кадра. Однако при этом временной шум опорного кадра преобразуется в пространственный, который и ограничивает пороговые характеристики устройства. При аддитивной коррекции вариаций темнового тока с использованием сигнала только одного опорного кадра минимально разрешаемая разность температур на частоте, равной $1/5$ частоты Найквиста, составила менее $0,1^\circ\text{K}$. Утверждается, что при использовании в качестве сигнала опорного кадра, усреднённого по нескольким опорным кадрам, величина МРТ может быть улучшена в 2–3 раза. Динамический диапазон приёмного устройства составил 70 дБ.

Близкие характеристики имеет и матрица размером 64×128 элементов. При частоте кадров 60 Гц, с использованием германиевой оптической системы, имеющей входной участок диаметром 175 мм и относительное отверстие $f/2,35$, чувствительность матрицы составила 6,5 мВ/К (или $1,3 \cdot 10^4$ электронов на 1°K) для небольших температурных приращений относительно фона 300°K . Выходное напряжение матрицы при сигнале от фона 300°K , равно 235 мВ, пиковое значение шума (исключая геометрический), — 1,75 мВ (0,29 мВ — среднеквадратичное значение); соответственно, эквивалентная шуму разность температур составляет $0,045^\circ\text{K}$. Изготовленное на основе этой матрицы приёмное устройство имеет небольшие размеры ($35 \times 12,5$ см), высокую надёжность, относительно низкую стоимость и обеспечивает разрешение разности температур $0,1^\circ\text{K}$, что достаточно для большинства промышленных областей применения. Узел оптико-механического сканирования отсутствует. Рассматриваемое приёмное устройство может использоваться со специальным блоком, обеспечивающим преобразование выходного напряжения шоттки-матрицы в телевизионный стандарт.

На основе IrSi-матрицы из 160×244 элементов разработана тепловизионная камера. Матрица, смонтированная в 32-выводном керамическом корпусе, устанавливается в Дьюар и охлаждается до температуры 77°K жидким азотом. Для повышения качества изображения применяется специальное электронное устройство, устраняющее аддитивную составляющую геометрического шума. При этом в качестве опорного кадра используется усреднённый по 16 последовательным кадрам фоновый сигнал. Частота кадров — 30 Гц. Каждый кадр состоит

из двух чересстрочных полей по 160×122 элементов разложения. Экспериментально определены зависимости сигнала чувствительного элемента от контрастной температуры объекта по отношению к 300°K фону для $1/2$ оптической системы (рис. 2) и среднеквадратичного шума от числа накопленных электронов (рис. 3).

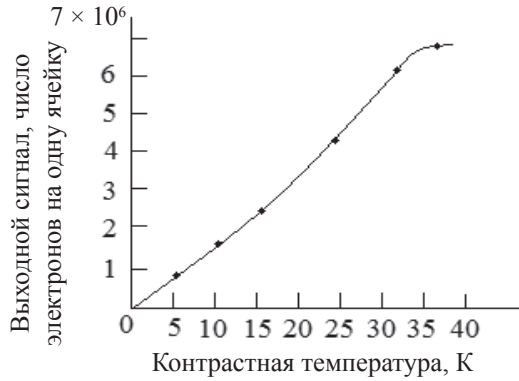


Рис. 2. Зависимость выходного напряжения шоттки-матрицы из 160×244 PtSi-элементов разложения от контрастной температуры относительно 300°K фона

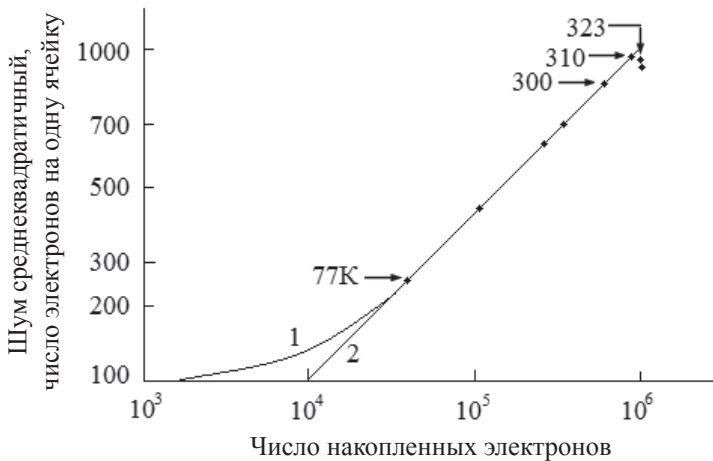


Рис. 3. Зависимость среднеквадратичного шума шоттки-диода от числа накопленных элементов:

1 — экспериментальная зависимость; 2 — теоретический предел для дробового шума

Температурная чувствительность камеры составляла 2×10^4 электронов на 1°K . Было видно, что уже при числе накопленных электронов $\approx 10^4$ шум матрицы определяется флуктуациями этой величины. В условиях измерения шума матрицы (охлажденная диафрагма соответствует апертуре $f/2,5$), темновой заряд составляет $1,2 \cdot 10^3$ электронов на один элемент при длительности кадра $1/30$ с.

Пространственная неравномерность сигнала разных элементов матрицы без поправки на геометрический шум, вызванный изменением величины

темнового заряда ячеек матрицы при облучении 300 °К фоном, равна 1–2 % после введения поправки (с усреднением по 16 кадрам опорного кадра) меньше 0,18 %, что составляет менее половины временного шума.

Литература

1. *Ибрагимов Г.Б., Керимов Э.А.* Фотоэлектрические свойства фотодиодов на основе силицида металла — кремний // Журнал «Известия». 2014. Т. 17. № 1. С. 42–47.
2. *Керимов Э.А.* Шумы фотоприемных устройств на основе диодов Шоттки // Электронный научный журнал «ФИЗ-МАТ». 2014. Вып. 1 (15). С. 3–8.
3. *Ибрагимов Г.Б., Керимов Э.А.* Фотоэлектрические свойства фотодиодов // Вестник МГПУ. Серия «Естественные науки». 2014. № 2 (14). С. 9–17.
4. *Киес Р.Д.* Фотоприемники видимого и ИК диапазонов. М.: Радио и связь, 1985. 328 с.
5. *Керимов Э.А.* Investigation of change of the height of potential barrier of the contact IrSi – Si // The Recent Trends in Science and Tecnology Management. 09–10 May 2013. London. P. 341–345.

Literatura

1. *Ibragimov G.B., Kerimov E'.A.* Fotoe'lektricheskie svojstva fotodiodov na osnove silicida metalla — kremnij // Zhurnal «Izvestiya». 2014. T. 17. № 1. S. 42–47.
2. *Kerimov E'.A.* Shumy' fotopriemny'x ustrojstv na osnove diodov Shottki // E'lektronny'j nauchny'j zhurnal «FIZ-MAT». 2014. Vy'p. 1 (15). S. 3–8.
3. *Ibragimov G.B., Kerimov E'.A.* Fotoe'lektricheskie svojstva fotodiodov // Vestnik MGPU. Seriya «Estestvenny'e nauki». 2014. № 2 (14). S. 9–17.
4. *Kies R.D.* Fotopriemniki vidimogo i IK diapazonov. M.: Radio i svyaz', 1985. 328 s.
5. *Kerimov E'.A.* Investigation of change of the height of potential barrier of the contact IrSi – Si // The Recent Trends in Science and Tecnology Management. 09–10 May 2013. London. P. 341–345.

*E.A. Kerimov,
S.N. Musaeva,
M.R. Magerramova*

Parameters of Receivers on Schottky Matrices

The authors experimentally determined dependence of the sensor signal of the photodiode from contrast temperature of the object in the relation to the 3000 °K background for 1/2 of an optical system and the rms noise, from the number of accumulated electrons. For higher image quality they use a special electronic device, eliminating the additive component of geometric noise. Thus, as a reference frame they used the background signal averaged over 16 consecutive frames.

Keywords: Schottky diodes; detector; photosensitive; Nyquist frequency; two-dimensional matrix; quantum effect.