

## Регистрация одиночных фотонов с использованием ПЗС-матрицы с электронным умножением

Роббинс М., Соломицкий Д.

### Аннотация

В данной статье рассказывается о твердотельных фоточувствительных приборах с зарядовой связью (ФПЗС), используемых для регистрации изображения в условиях малого уровня освещённости. Особое место занимает описание технологии электронного умножения, помогающей современным серийным ПЗС-матрицам регистрировать отдельные фотоны, поглощённые фоточувствительной областью.

### Введение

Со времён изобретения первых ФПЗС и до сегодняшнего дня технология производства постоянно совершенствовалась: разрабатывались новые принципы функционирования и считывания, увеличивалась интеграция и производительность фоточувствительных матриц, а минимальный порог чувствительности снижался из года в год, открывая новые возможности применения подобных устройств. Одним из таких нововведений было внедрение электронного умножителя в серийно выпускаемые модели ФПЗС (ФПЗС с ЭУ), значительно повышающего отклик устройства вплоть до единичных фотонов. При этом стоит отметить, что данная технология коммерчески доступна в течение последних десяти лет, и в настоящее время ведутся исследования по использованию ЭУ в КМОП-матрицах с XY-адресацией. Среди главных областей применения, где востребованы подобные устройства, можно выделить биологию, космос, авиацию, астрономию, военную технику и высокотехнологичную аппаратуру слежения за объектами.

### Основная часть

Шум является главным фактором, который ограничивает предел чувствительности любого полупроводникового устройства. При этом его можно классифицировать на три основных вида: фотонный шум, темновой шум и шум считывания.

Теоретически фотонный (или дробовый) шум может быть уменьшен за счёт условий, при которых максимально возможное число квантов света достигает светочувствительной области полупроводника одновременно. При этом поглощённые фотоны должны с наибольшей эффективностью образовывать электрон-дырочные пары. Последнее утверждение напрямую зависит от технологии изготовления приборов, размера и формы пикселя, коэффициента заполнения и многих других факторов. Типичные ФПЗС с передней засветкой обладают квантовой эффективностью на уровне 40% в видимом спектре, в то время как использование “прозрачных электродов” и дополнительных инверсных слоёв могут увеличить её примерно до 60%. Для получения максимальной квантовой эффективности используется подложка с обратной засветкой, при которой управляющие электроды наносятся на тыльную часть, а свет беспрепятственно проникает вглубь полупроводника со стороны лицевой плоскости. Стравливание кристалла ФПЗС с обратной засветкой до толщины в 20 мкм, помогает добиться не только 95%-ой квантовой эффективности в области видимого спектра, но и приличного отклика в вакуумном ультрафиолете (ВУФ). В свою очередь чувствительность в ИК области ограничена

шириной запрещённой зоны используемого полупроводникового материала или соединения. Однако, в настоящее время ведутся активные исследования и разработки в области внедрения объёмного высокоомного кремния, обладающего квантовой эффективностью на уровне 40-60% на длине волны 1000 нм, при этом сохраняющего хорошую функцию рассеяния точки.

При комнатной температуре основным источником темнового шума является спонтанная тепловая генерация электрон-дырочных пар, которая значительно снижается при охлаждении. Дополнительным источником шума (особенно актуально при низких температурах и очень малых уровнях сигнала) является такт-индуцированный или ложный заряд, который образуется в результате процесса ударной ионизации. Данный эффект может быть минимизирован благодаря правильному выбору архитектуры ФПЗС и оптимизации работы всех схем синхронизации. Для высокотехнологичных научных твердотельных фоточувствительных матриц, работающих в режиме MPP (инвертированный режим), типичное значение коэффициента потерь электронов может достигать менее чем  $10^{-4}$   $e^-$  за передачу. Данный эффект возможно существенно снизить за счёт обеднения области перехода Si/SiO<sub>2</sub>, при котором обязательным условием является наличие охлаждения.

Процесс преобразования потенциала пакета электронов в напряжение на выходе ФПЗС вызывает появление дополнительного шума, и его величина зависит от конструкции выходного усилителя и частоты считывания одного пикселя. Выходные усилители ПЗС-матриц, разработанные для научного применения, обладают уровнем среднеквадратичного шума порядка 1,5 электронов. При этом стоит отметить тот факт, что такие усилители работают на очень низкой скорости считывания (например, матрица 2000x2000 будет считываться несколько минут при условии использования одного усилителя). Для увеличения частоты считывания могут быть использованы два или более усилителей, разнесённые по разным частям ФПЗС. Если необходимо добиться максимально высокой скорости считывания при относительно малом уровне шума, то лучшим решением в данной ситуации будет размещение под каждым столбцом ПЗС-матрицы отдельного выходного усилителя.

Даже, несмотря на относительно малый уровень шума выходных усилительных каскадов в ФПЗС научного применения, задача регистрации отдельных поглощённых фотонов на таких приборах решается очень непросто. Однако, если рассмотреть возможность усиления малого сигнала не в выходном усилителе, а в процессе переноса заряда по горизонтальному регистру сдвига, то мы сможем значительно уменьшить шум считывания. Такой подход реализован в ФПЗС с ЭУ, где сигнал проходит через некоторое количество каскадов электронного умножения, работающих по принципу ударной ионизации с вероятностью события около 1,4%. Все 500 ступеней умножения обеспечивают общее усиление сигнала в 1000 раз независимо от частоты считывания. Таким образом, одноэлектронный (или однофотонный) полезный сигнал можно без особых усилий выделить из шумовой составляющей, даже при частоте кадров на уровне видеопотока и даже выше.

Для достижения беспрецедентной чувствительности, ФПЗС с ЭУ изготавливаются по технологии обратной засветки с глубоким уровнем охлаждения, уменьшающим шум. Подобные высокотехнологичные устройства коммерчески доступны, однако ж надо понимать, что сфера применения для них крайне специфична. Например, система адаптивной оптики для профессиональных астрономических телескопов, которая служит для коррекции влияния атмосферных явлений. При этом возможность регистрации однофотонного сигнала позволяет найти центр тяжести проецируемой картины точек с заданной точностью. В данном применении разрешение на выходе должно быть не менее 240x240 пикселей при частоте кадров в 1,5 кГц.

Для другого применения требовалась индивидуальная разработка фоточувствительного прибора для наблюдений из космоса за твёрдыми частицами в атмосфере. Прототип ФПЗС с ЭУ для регистрации света и измерения расстояния (англ. LIDAR) был разработан в рамках проводимых исследований Европейским Космическим Агентством как основа для будущих проектов, связанных с наблюдением за Землёй. Основным требованием было измерение изменения яркости малых пятен света с временным интервалом менее 1 мкс. Несмотря на

однофотонную чувствительность, датчик так же должен был быть стойким к сильной засветке, поступающей от зеркальной поверхности.

### **Заключение**

В данной статье были рассмотрены пути улучшения чувствительности серийно выпускаемых ФПЗС. Рассказывалось о технологии электронного умножения (ЭУ), внедряемой в серийные фоточувствительные матрицы. При этом сочетание высокой квантовой эффективности технологии обратной засветки с умножителем электронов приводит к резкому скачку в чувствительности современных ФПЗС, способных эффективно улавливать единицы фотонов при высокой частоте кадров.