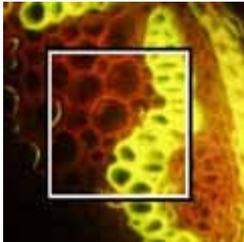


# КМОП-сенсоры с лавинными фотодиодами для получения изображений с субнаносекундным временным разрешением

Lucio Pancheri, Gian-Franco Dalla Betta and David Stoppa

*Пиксели, основанные на технологии лавинных КМОП фотодиодов могут лечь в основу компактных, недорогих светочувствительных сенсоров с высоким временным разрешением.*

4 June 2014, SPIE Newsroom. DOI: 10.1117/2.1201405.005477



Для визуализации времени жизни флюоресценции (FLIM), рамановской спектроскопии, времяпролетной оптической локализации и диффузионной оптической спектроскопии требуются детекторы с высоким пространственно-временным разрешением. В этих целях обычно применяются системы сканирования с такими детекторами высокого временного разрешения, которые используются в конфокальных микроскопах и лидарах (лазерных дальномерах). Единственными доступными сенсорами с широким полем зрения и субнаносекундным временным разрешением являются усовершенствованные ПЗС-матрицы с окном стробирования в 200 пикосекунд. Однако такие приборы обычно применяются только в исследовательской и военной технике из-за их высокой стоимости.

Перспективными выглядят субмикронные КМОП технологии с интеграцией лавинных фотодиодов, которые используют лавинное умножение для усиления тока, генерируемого фотоэлектрическими процессами. Такие приборы обладают хорошей квантовой эффективностью (отношению числа фотонов, поглощение которых образцом вызвало образование квазичастиц, к общему числу поглощенных фотонов) и низким уровнем шума. Интегрированные лавинные фотодиоды вместе с возможностью обработки сигнала на чипе, что обеспечивается КМОП технологией, обуславливают появление высокочувствительных фото сенсоров со сверхкоротким временным разрешением. Уже существуют пиксельные матрицы со средним разрешением, способные фиксировать сверхкороткие временные метки, но всё же предпочтительны сенсоры с высоким разрешением в связи с имеющимися технологическими и структурными требованиями<sup>1</sup>. Например, пиксел должен иметь возможность для обработки столь быстрых сигналов при малых размерах с большим коэффициентом заполнения (отношение фоточувствительной площади сенсора ко всей площади сенсора). Предлагаются два варианта решения с использованием лавинных фотодиодов как по гейгеровскому принципу работы (напряжение сдвига лавинных фотодиодов выше, чем напряжение пробоя, и лавинное усиление очень высоко), так и по суб-гейгеровскому (линейному) принципу, где напряжение сдвига лавинных диодов меньше напряжения пробоя, и лавинное усиление ниже.

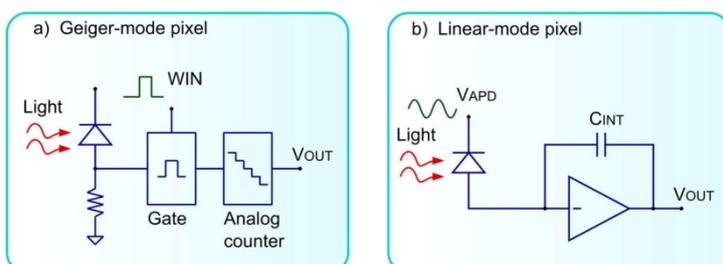
Вариант гейгеровского режима использует лавинные диоды, известные как однофотонные лавинные диоды (SPAD). Они осуществляют цифровое преобразование каждого улавливаемого фотона, поэтому ширина спектральной полосы, требуемая для обработки и передачи временной информации для каждого фотона, у сенсоров с высоким разрешением обычно очень велика. В этом случае в первую очередь обрабатывается временная информация при помощи временного стробирования и накопления улавливаемых фотонов на уровне пикселей, как это осуществляется в усовершенствованных ПЗС. В суб-гейгеровском режиме лавинные фотодиоды используются линейно посредством модуляции их лавинного усиления для осуществления фазочувствительного детектирования. В этом случае лавинный фотодиод работает как широкополосный прибор временной обработки сигналов.

Уже существует несколько образцов КМОП-матриц с лавинными фотодиодами, на основе субмикронных полупроводниковых технологий. Работая в Гейгеровском режиме, такие приборы обладают временным разрешением в десятые доли пикосекунды и низким шумом при условии их правильного исполнения и изготовления на основе качественных детекторных схем. Работая в линейном режиме, КМОП-матрицы с лавинными фотодиодами на основе субмикронных

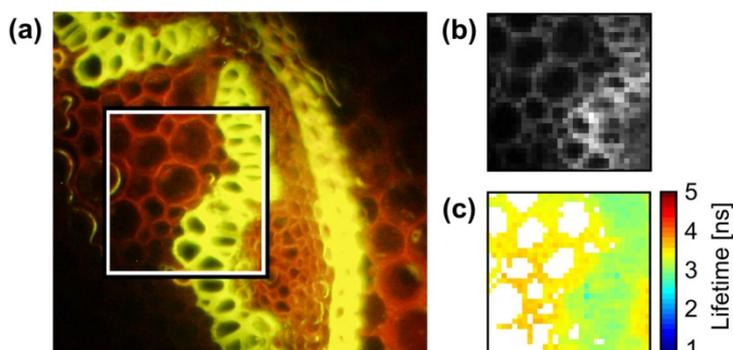
<sup>1</sup> Ограничения на скорость работы накладывают ёмкости, время транзита электронов и дырок, а также время лавинного умножения. Ёмкость увеличивается с ростом площади переходов и уменьшением толщины. Время транзита электронов и дырок возрастает с увеличением толщины, что заставляет идти на компромисс между ёмкостью и временем. Задержки, связанные с лавинным умножением, определяются структурой диодов и применяемыми материалами; существует зависимость от соотношения коэффициентов ударной ионизации для дырок и электронов. (Прим. пер.)

полупроводниковых технологий обладают шириной спектральной полосы в ГГц диапазоне и низкими остаточными шумами.

Следующая задача – получение КМОП-матриц с однофотонными лавинными диодами высокого временного разрешения и компактными пикселями.. Для решения данной задачи предлагается получить сверхкороткое стробирование на малых пиксельных структурах с приемлемым энергопотреблением. Ключом к уменьшению размеров пиксельной структуры является замена цифрового сигнала на аналоговый внутри пикселя с накоплением во внутреннем конденсаторе результатов фотонного воздействия в форме зарядового пакета. Вполне возможно изготовить компактный пиксел со сверхкоротким временным разрешением и хорошим коэффициентом заполнения при сохранении преимуществ однофотонного детектирования. Был изготовлен прототип фотосенсора с разрешением 32 x 32 пикселя, выполненный по 0,35 мкм технологическому процессу. Схематически изображенный на рисунке 1(a) пиксел имеет размер 25 мкм и коэффициент заполнения 20,8%. Минимальное время окна стробирования данного сенсора составляет 1,1 наносекунды с частотой 80МГц. На рисунке 2 показаны результаты визуализации времени жизни флуоресценции, полученные сенсором-прототипом.

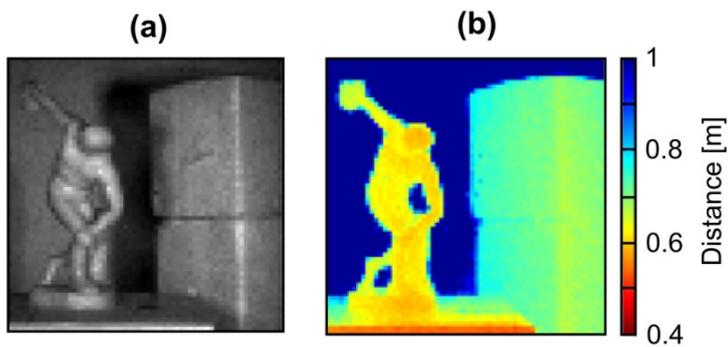


**Рисунок 1.** Схематическое изображение пикселей с лавинными фотодиодами (а) в Гейгеровском режиме и (б) линейном режиме.  $V$ : Напряжение.  $WIN$ : Стробующее окно.  $C_{INT}$ : Интеграционная емкость (при интегрировании фототока для подачи электрического сигнала напряжением, пропорциональным генерируемому заряду)



**Рисунок 2.** Флуоресцентная интроскопия ландыша (*Convallaria majalis*), полученная широкопольным микроскопом. (а) Растровое изображение, полученное камерой с цветной ПЗС-матрицей. (б) Растровый снимок и (с) карта времени жизни, полученная 32 x 32 пиксельным сенсором с однофотонным лавинным диодом.

Использовалась возможность изменения подаваемого на лавинный фотодиод напряжения в линейном режиме работы для пикселей с высокой широкополосной фазовой чувствительностью, как показано на Рисунке 1(б). Когда система улавливает измененный световой сигнал, модуляция лавинного усиления смешивает оптический и электрический сигналы, создавая на выходе фазозависимый ток. В таком режиме работы простой зарядонакопительный усилитель производит преобразование заряда в напряжение. Работающий по описанному выше принципу сенсор с разрешением 64 x 64 пикселя был использован во времяпролетной системе, позволившей получить очень высокий коэффициент демодуляции, достигающий 80% на частотах до 200 МГц. На рисунке 3 показаны растровое изображение и карта дальностей, полученные указанным сенсором.



**Рисунок 3.** Снимки, полученные сенсором разрешением  $64 \times 64$  пиксела с лавинными фотодиодами на удалении. (a) Растровый снимок. (b) карта дальностей.

Успешное массовое использование сенсоров с лавинными фотодиодами зависит от оптимизации современного производства кремниевых кристаллов т.к. светочувствительные сенсоры с лавинными фотодиодами вместе с недорогими импульсными и модулированными источниками света могли бы лечь в основу развития современного поколения инструментов с высоким временным разрешением для получения изображений в различных сферах применения.

---

**Lucio Pancheri, Gian-Franco Dalla Betta**

Department of Industrial Engineering  
University of Trento  
Trento, Italy

**David Stoppa**

Fondazione Bruno Kessler  
Trento, Italy