



# КОМПАКТНЫЕ МОДУЛИ НА ОСНОВЕ SPAD-ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ В БЛИЖНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА\*

А. Гуядичи, Д. Симмерес, Д. Веронезе, Р. Биаси, А. Шулинатти, И. Рич, М. Гилни, П. Макьянти

Однофотонные лавинные диоды (SPAD) представляют реальную альтернативу традиционным стеклянным ФЭУ. Как детекторы эти диоды обладают высокой эффективностью регистрации фотонов в ближнем ИК-диапазоне и характеризуются пикосекундным временным разрешением. Ожидается, что они будут востребованы в квантовой криптографии, в исследованиях, связанных с анализом молекул, измерением времени жизни флуоресценции.

**В** последнее время благодаря появлению однофотонных лавинных фотодиодов (Single Photon Avalanche Photodiode – SPAD) произошел заметный прорыв в области создания устройств обнаружения одиночных фотонов. Красные лавинные диоды, так называемые RE-SPAD (Red-Enhanced SPAD), обладают высокой эффективностью регистрации фотонов в ближнем ИК-диапазоне (квантовая эффективность 37% при длине волны фотонов  $\lambda=800$  нм) при сохранении пикосекундного временного разрешения около 100 пс на уровне половины амплитуды (Full Width at Half Maximum-FWHM) даже при рассеянии света по всей активной области. Устройство детектора позволяет преодолеть ограничения, характерные для классической тон-

кой и толстой структур SPAD. В частности, тонкая структура ограничивает квантовую эффективность на длинных волнах (например, 15% при длине волны  $\lambda=800$  нм), в то время как толстая структура страдает от большого разброса времени фиксации прихода фотона, равной нескольким сотням пикосекунд. Наиболее заметные успехи от использования SPAD ожидаются при регистрации одиночных фотонов в исследованиях, связанных с анализом молекул, измерением времени жизни флуоресценции и с квантовой криптографией [1-5].

Высокая чувствительность – ключевое требование, предъявляемое к одномолекулярному анализу при флуоресцентной спектроскопии. Для достижения достаточного соотношения сигнал-шум необходимо использовать однофотонный детектор с высокой квантовой эффективностью и низким уровнем шума (то есть с низкой темновой скоростью счета). Кроме того, надо иметь в виду, что время жизни быстрых компонентов при флуоресцентном распаде молекулы может

\* Перевод статьи A.Giudice, G.Simmerle, D.Veronese, R.Biasi, A.Gulinatti, I.Rech, M.Ghioni, P.Maccagnani. High-detection efficiency and picosecond timing compact detector modules with red-enhanced SPADs. – Proc. of SPIE, 2012, v. 8375 83750P-8. Предоставлен компанией ООО "Азимут".



составлять несколько сотен пикосекунд. Поэтому, как правило, их измеряют с помощью технологии коррелированного во времени подсчета одиночных фотонов (TCSPC – time-correlated single photon counting) [6,7]. В связи с этим используемые счетчики одиночных фотонов должны не только обеспечивать высокое временное разрешение при измерении времени прихода фотона, но также должны стабильно работать в широком динамическом диапазоне скорости счета (до нескольких миллионов импульсов в секунду).

Рынок предлагает однофотонные детекторы на основе быстрых фотоэлектронных умножителей, которые могут получать временное разрешение лучше, чем 100 пс (FWHM). Но эти детекторы имеют недостаточную квантовую эффективность из-за ограничений, накладываемых фотокатодами при использовании в красной области спектра. Однофотонные лавинные диоды (SPAD) в настоящее время являются реальной альтернативой традиционным стеклянным ФЭУ. Модули регистрации одиночных фотонов на основе SPAD с толстой обедненной областью (20–25 мкм) и большой активной областью (до 180 мкм в диаметре) коммерчески доступны. Они имеют очень хорошую эффективность регистрации фотонов и низкий уровень шума, но при этом – недостаточное временное разрешение. Действительно, их типовое значение временного разрешения превышает 300 пс (FWHM). Модули регистрации фотонов на основе SPAD с тонкой обедненной областью (1–2 мкм), изготовленные по планарной кремниевой технологии на эпитаксиальных подложках, могут достигать временного разрешения около 30 пс (FWHM) при комнатной температуре [8]. Но они страдают от низкой квантовой эффективности в спектральном диапазоне от 650 нм до 900 нм.

В Миланском политехническом университете в сотрудничестве с CNR-IMM – Институтом микроэлектроники и микросистем (IMM), входящим в Итальянский совет по исследованиям (Italian National Council for Research, CNR) – разработаны новые кремниевые планарные однофотонные лавинные диоды с повышенной чувствительностью к красной области спектра (RE-SPAD) [9]. В них уникально сочетаются высокое временное разрешение, высокая квантовая эффективность и низкая темновая скорость счета. Разработчики создали первые прототипы высокоэффективных модулей регистрации одиночных фотонов (серия PDM-R), опираясь на опыт, накопленный в компании Micro Photon Devices [10] при изготовлении модулей на основе SPAD предыдущего поколения.

## СТРУКТУРА RE-SPAD

Однофотонный лавинный фотодиод представляет собой смещенный значительно выше напряжения пробоя ( $V_B$ ) p-n-переход, который остается в метастабильном состоянии без протекания тока. При этом напряжении смещения напряженность электрического поля настолько велика, что достаточно ввести в обедненный слой полупроводника один заряженный носитель, чтобы возник самоподдерживающийся лавинный процесс [11]. Ток моментально возрастает (за наносекунды или субнаносекунды) до стабильного уровня ~1 мА. Если падающий фотон генерирует основной носитель заряда, то передний фронт импульса лавины отмечает время прихода фотона. Ток продолжает протекать до тех пор, пока лавина не будет погашена за счет снижения напряжения смещения до или ниже значения напряжения пробоя  $V_B$ . Чтобы зарегистрировать следующий фотон, напряжение смещения должно быть восстановлено. Эти операции обычно выполняются с помощью так называемой активной схемы гашения (AQC – Active Quenching Circuit) [12].

Из этого следует, что одиночный фотон может быть обнаружен, если он попадает в активную область детектора и возникает самоподдерживающаяся лавина. То есть эффективность регистрации фотонов (PDE) диодом равна квантовой эффективности, помноженной на вероятность возникновения лавины. В Миланском политехническом университете был разработан и произведен в сотрудничестве с группой CNR-IMM (Болонья) RE-SPAD. Работа над новым детектором началась с изготовления хорошо зарекомендовавшей себя тонкой структуры SPAD, которая впоследствии была переработана. Цель переработки – добиться эффективности регистрации фотонов в красном/ближнем ИК-диапазоне длин волн, сохраняя при этом разброс времени фиксации прихода фотона около 100 пс. Для этих целей использовали следующие методы.

Во-первых, значительно увеличили толщину p-слоя (примерно от 3 до 10 мкм) [9] для повышения вероятности поглощения фотонов, особенно в длинноволновой области спектра.

Во-вторых, изменен профиль электрического поля, характеризуемого дрейфовой областью и областью умножения носителей заряда. Назначение дрейфовой области – сбор генерируемых фотонами электронов и направление их в область умножения. В свою очередь в области умножения, электрическое поле которой велико, происходит ударная ионизация. В новых диодах

профиль электрического поля в области умножения не изменился, что даже в новом приборе гарантирует незначительные погрешности при фиксации времени прибытия фотона. Зато область дрейфа в новом детекторе значительно расширена при сохранении значения напряженности электрического поля около  $2 \cdot 10^4$  В/см. С одной стороны, такое значение напряженности достаточно высоко для получения предельной скорости электронов и минимизации времени пролета носителей через область дрейфа. С другой стороны, это достаточно низкое значение напряженности, ограничивающей напряжение пробоя.

Структура RE-SPAD показана на рис.1 [13]. Катод в диоде получают путем формирования в эпитаксиальном слое р-типа диффузионной (неглубокой) области n-типа. Для снижения напряжения пробоя центральной части диода проводится имплантация бора. Полученный карман, обычно называемый обогащенной областью, определяет активную область р-п-перехода и предотвращает преждевременный пробой на краях детектора. Несмотря на то, что активный р-п-переход – основная область структуры SPAD, стабильную работу детектора обеспечивают и другие области диода.

Например, вокруг диода создаются сильнолегированные диффузионные области p<sup>+</sup>-типа (изоляция). В SPAD с тонкой структурой эти диффузионные области n-типа удлиняются до подложки p<sup>+</sup>-типа. Таким образом, при обратном смещении перехода анод-подложка можно электрически изолировать SPAD от любого другого устройства на кристалле. В рассматриваемом случае изолирующая диффузия не достигает подложки, поэтому электрически изолировать два соседних элемента не представляется возможным. Хотя это обстоятельство не является проблемой для создания модулей детектирования одиночных частиц,

оно вызывает другие нежелательные эффекты. Один из наиболее значительных – распространение р-п-перехода между анодом и подложкой через всю толщину кремниевого кристалла, что приводит к формированию большой емкости между этими областями. Она в свою очередь препятствует эффективному считыванию лавинного тока анода. Этот эффект может препятствовать снижению неточности (короткого временного джиттера) при измерении времени прихода фотонов в новых модулях регистрации серии PDM-R. Эту проблему решили путем считывания лавинного тока у катода и подключением активных схем гашения к аноду. В конце концов, влияние эффекта большой емкости было снижено за счет обратного смещения подложки через сопротивление, равное ~150 кОм. В результате напряжение подложки при быстрых переходных процессах практически оказывается плавающим.

Другая важная область диода залегает под активным р-п-переходом и представляет собой эпитаксиальный р<sup>+</sup>-слой, называемый скрытым слоем (sinker, сток). Он обеспечивает низкое сопротивление на пути протекания тока. Низкоомное последовательное сопротивление, расположенное между скрытым слоем и контактом анода, образовано сильно легированной областью р<sup>+</sup>-типа, которая формирует и омические контакты. Однако в связи с увеличением толщины р-слоя с квазисобственной электропроводностью сильнолегированная область р<sup>+</sup>-типа больше не достигает скрытого слоя. Это приводит к значительному увеличению последовательного сопротивления SPAD, что особенно нежелательно с точки зрения временного разрешения. Было показано, что увеличение последовательного сопротивления снижает скорость образования лавины и приводит к ухудшению точности времени регистрации частицы [14].

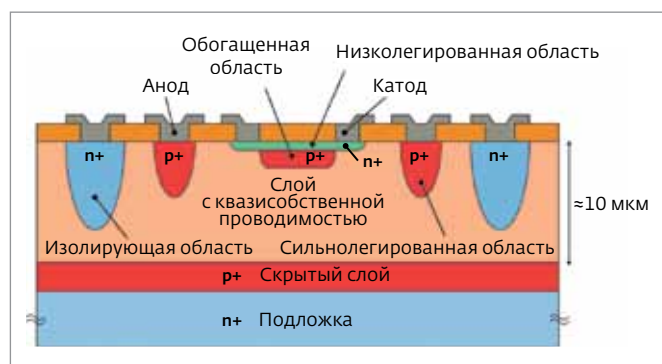
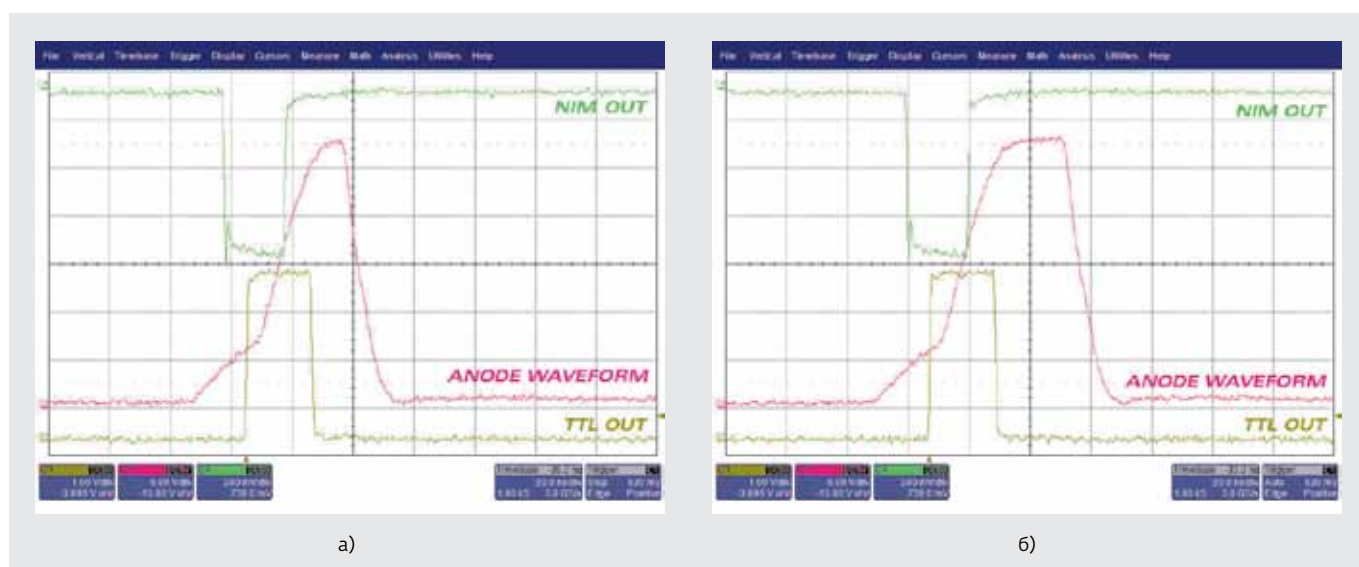


Рис.1. Структура RE-SPAD



Рис.2. RE-SPAD-чип, установленный на керамической плате



**Рис.3.** Осциллограмма сигналов анода (красный), TTL OUT (желтый) и NIM OUT импульсов (зеленый): а) – значение мертвого времени модуля счета фотонов 66,4 нс; б) – значение мертвого времени модуля счета фотонов 80 нс

Разработчики Миланского политехнического университета для исключения эффекта ухудшения временных характеристик в первых образцах модулей регистрации фотонов серии PDM-R сформировали шесть диодов на кристаллах размером 3×2 мм. Поскольку эти диоды не изолированы, то параллельное соединение всех шести анодов (рис.2), позволило значительно снизить последовательное сопротивление.

### МОДУЛЬ РЕГИСТРАЦИИ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ PDM-R

На основе улучшенных SPAD компания Micro Photon Devices разработала прототипы компактных (5×4×8 см) модулей регистрации одиночных фотонов. Кристалл SPAD установлен на двухступенчатый термоэлектрический охладитель и смонтирован в атмосфере азота в стандартном металлическом корпусе TO-8 с окном. Для того чтобы в полной мере использовать технические возможности новых SPAD, керамические печатные платы были переделаны с тем, чтобы минимизировать тракты передачи сигнала детектора.

Для достижения оптимальных параметров работы RE-SPAD перенапряжение смещения должно составлять до 20 В и, как указывалось ранее, для считывания лавинного тока катода, паразитная емкость которого меньше, чем у анода, следует применять активную схему гашения АС. Чтобы выполнить эти требования, совместно с Миланским политехническим университетом

была разработана и изготовлена активная схема гашения, способная генерировать импульсы напряжением до 26 В. Этого напряжения гасящих импульсов достаточно для получения перенапряжения смещения SPAD до 20 В и требуемых эффективности детектирования и временного разрешения. Высокое значение напряжения импульсов гашения было получено с помощью разработанной высоковольтной схемы гашения и восстановления на основе дискретных электронных компонентов. Все остальные компоненты активной схемы гашения (компараторы, схемы управления, линии задержки и т.п.) были выполнены в одной микросхеме, представляющей собой специализированную микросхему ASIC-типа, изготовленную с помощью стандартной КМОП-технологии [15]. Дискретные компоненты в основном представляют собой быстродействующие МОП-транзисторы, управляемые микросхемой АС. Ее конструкция обеспечивает минимальную временную задержку между моментом образования лавины и ее гашением, а также между гашением и восстановлением, и получение общего мертвого времени модуля регистрации фотонов 66,4 нс, благодаря чему скорость интенсивной регистрации составляет  $15 \cdot 10^6$  имп/с. Для создания первых прототипов был выбран модуль, мертвое время которого составляло около 80 нс, что соответствует максимальной скорости интенсивной регистрации около  $12 \cdot 10^6$  имп/с. Такой выбор позволил достичь наилучшего компромисса между низкой вероятностью остаточных пульсаций и высокой

максимальной скоростью регистрации фотонов. Из осциллограмм сигналов анода при значениях мертвого времени 66,4 и 80 нс (рис.3) видно, что сигналы гладкие, без помех, с быстрым гашением и восстановлением.

Во вспомогательные электронные схемы модуля регистрации одиночных фотонов входят: программируемый источник питания для подачи напряжения смещения на SPAD, конструкция которого была полностью заново разработана, чтобы обеспечить более высокое напряжение смещения при очень низких его пульсациях; схема драйвера термоэлектрического охладителя; схема синхронизации, которая с помощью линейной схемы подключена к высоковольтному выводу SPAD. Схема синхронизации питает ЭСЛ-блоки компараторов и логики, а также обеспечивает на выходе импульс, отмечающий время прихода фотонов со значением неточности времени регистрации менее 50 пс для стандартных SPAD с тонкой структурой (диоды с диаметром активной области до 200 мкм) и около 100 пс для RE-SPAD. Термоэлектрическое охлаждение позволяет снизить скорость темнового счета SPAD и, тем самым, увеличить быстродействие готового модуля. Схема управления термоэлектрическим охладителем на основе эффекта Пельтье была изменена с помощью интегральной схемы драйвера, который содержит аналоговый пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) контроллер для оптимальной температурной стабилизации.

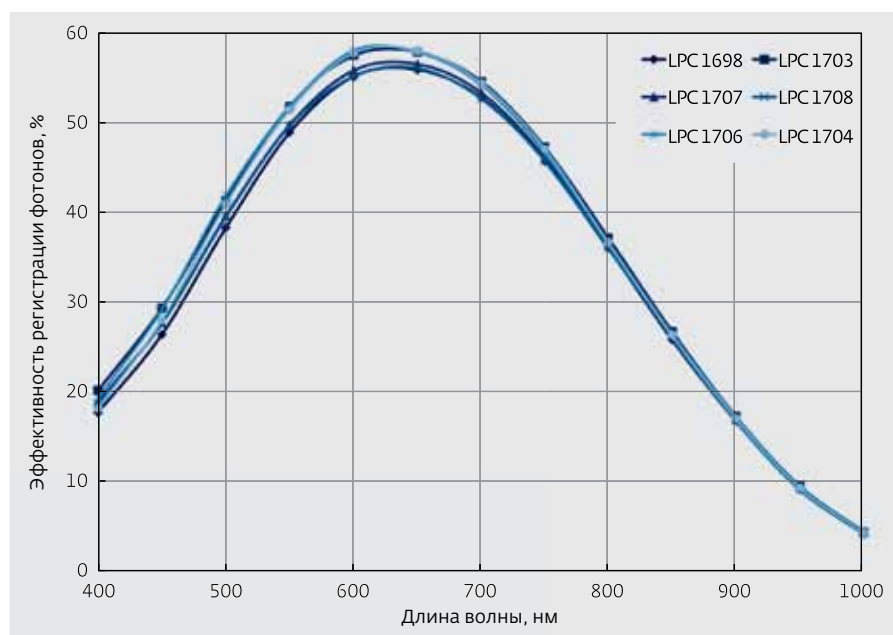


**Рис.4.** Модуль регистрации одиночных фотонов в стандартном металлическом корпусе с входным окном

Новый контроллер пельтье-охладителя позволяет устанавливать и регулировать значения температуры от комнатной до  $-10^{\circ}\text{C}$  и ниже. Всей системой управляет встроенный микроконтроллер, который постоянно следит за термистором с точно установленной зависимостью сопротивления от температуры, используемым для измерения температуры SPAD и напряжений модуля. Он также отключает модуль в случае, если один из контролируемых параметров находится вне диапазона значений, хранимых электронно-программируемым ПЗУ (EEPROM) микроконтроллера.

При регистрации фотона генерируемый модулем импульс через стандартный TTL-выход (TIMING OUT) передается на нагрузку (50 Ом). Платы синхронизации генерируют NIM-импульсы малой длительности (TIMING OUT) (рис.3), совместимые со стандартным измерительным оборудованием подсчета одиночных фотонов с временной корреляцией по времени (TCSPS). Внешний сигнал может быть подан на вход GATE IN для включения или отключения SPAD.

Стоит также отметить, что напряжение пробоя SPAD, равное 40–60 В, выше, чем у диодов предыдущего поколения, это не



**Рис.5.** Результаты испытаний эффективности регистрации фотонов

столь большое значение по сравнению со SPAD с толстой структурой, у которых напряжение пробоя превышает 250 В. Таким образом, рассеиваемая мощность остается достаточно низкой, благодаря чему детектор и модуль очень прочны, надежны и нечувствительны к случайному воздействию окружающего света. Корпусированные SPAD, активные схемы гашения и вспомогательная электроника были собраны в компактный модуль и установлены в металлический корпус, который служит также теплообменником для элемента Пельтье, используемого для охлаждения SPAD. Модуль регистрации фотонов (рис.4) работает от нерегулируемого источника питания на напряжение 12 В.

Диоды RE-SPAD, использовавшиеся в первых прототипах модулей регистрации фотонов серии PDM-R, эксплуатировались при напряжении, превышающем на 20 В напряжение смещения, и при температуре в диапазоне 5-10°C. При таких настройках полученная скорость темного счета, как правило, составляет менее 100 имп/с, а у некоторых детекторов с диаметром активной области диода 50 мкм – около 50 имп/с. Измеренная итоговая вероятность остаточных пульсаций также оказалась весьма низкой – менее 2,0%. При типовых значениях она составляет менее 1,4%, а в лучших экземплярах детекторов – около 0,3-0,6%.

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ И ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

Для того, чтобы оценить эффективность регистрации фотонов (PDE – photon detection efficiency) новых RE-SPAD, в Миланском политехническом

университете использовались хорошо налаженные экспериментальные установки. Для генерации почти монохроматического света с длиной волны, выбираемой между 400 и 1000 нм, использовался коммерчески доступный монохроматор ORIEL Spectraluminator 69050. Для получения равномерной засветки детектора в процессе испытаний в качестве рассеивателя света использовалась интегрирующая сфера. Для измерения интенсивности света, падающего на активную область SPAD, применялся калиброванный измеритель мощности. Полученные результаты испытаний представлены на рис.5. Видно, что в процессе тестирования детекторов были получены замечательные результаты с очень низким разбросом параметров и эффективностью регистрации фотонов: 58% при  $\lambda=650$  нм и 37% при  $\lambda=800$  нм. При  $\lambda=500$  нм величина разброса параметров не изменялась и составляла 42%. В будущем планируется исследовать методы улучшения этих параметров путем измерения характеристик PDM-R модулей при смещении RE-SPAD с перенапряжением более 20 В.

Измерения временного разрешения были основаны на технологии коррелированного во времени подсчета одиночных фотонов с помощью быстрого лазерного диода (лазерная головка PicoQuant LDH-P-670 с лазерным драйвером PicoQuant PDL-800-B), излучающего короткие световые импульсы с длиной волны  $\lambda=670$  нм. Лазер работал с частотой 40 МГц с лучом, сфокусированным на активной области детектора через оптическую систему, которая собирает свет от лазера и направляет его на детектор. Прототипы модулей счета фотонов серии PDM-R работали в режиме отсутствия внешней синхронизации: после каждой возникающей лавины SPAD восстанавливался для обнаружения следующих падающих фотонов. Для ослабления интенсивности лазерного излучения использовали электрически управляемый волоконно-оптический аттенюатор фирмы OZ-Optics (DD-100). Его поместили между оптоволоком на выходе лазерного диода и оптической системой. Эти испытания были выполнены с целью гарантировать вероятность обнаружения фотона по отношению к оптическому импульсу

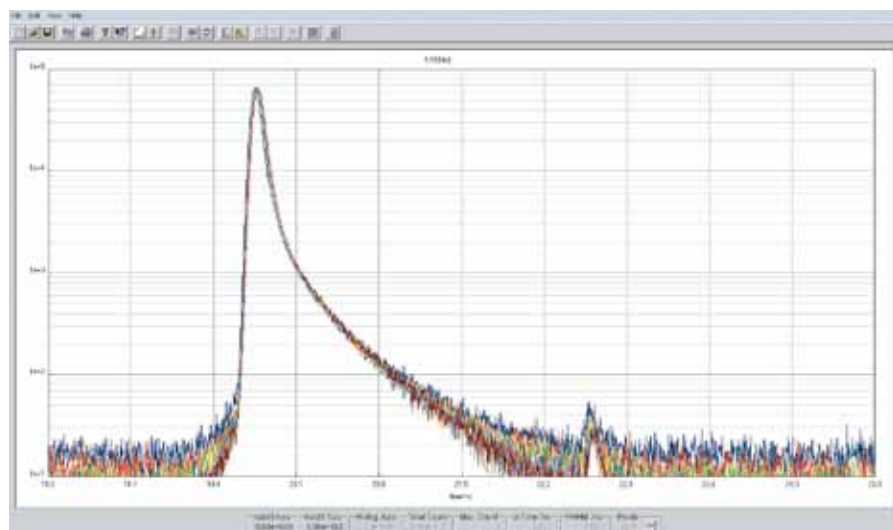
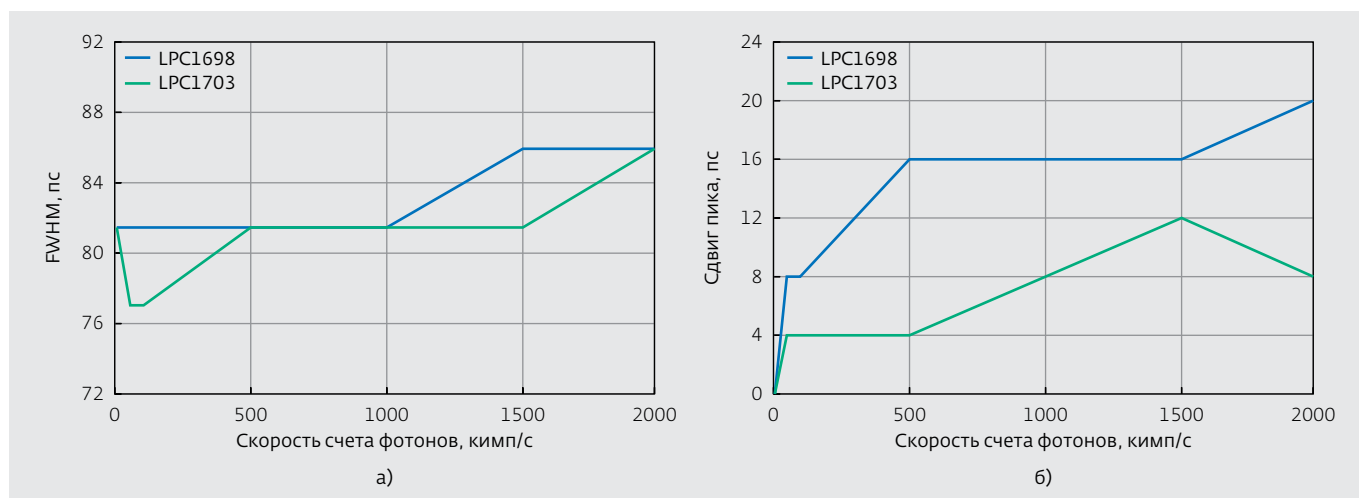


Рис.6. Частотная характеристика модуля PDM-R

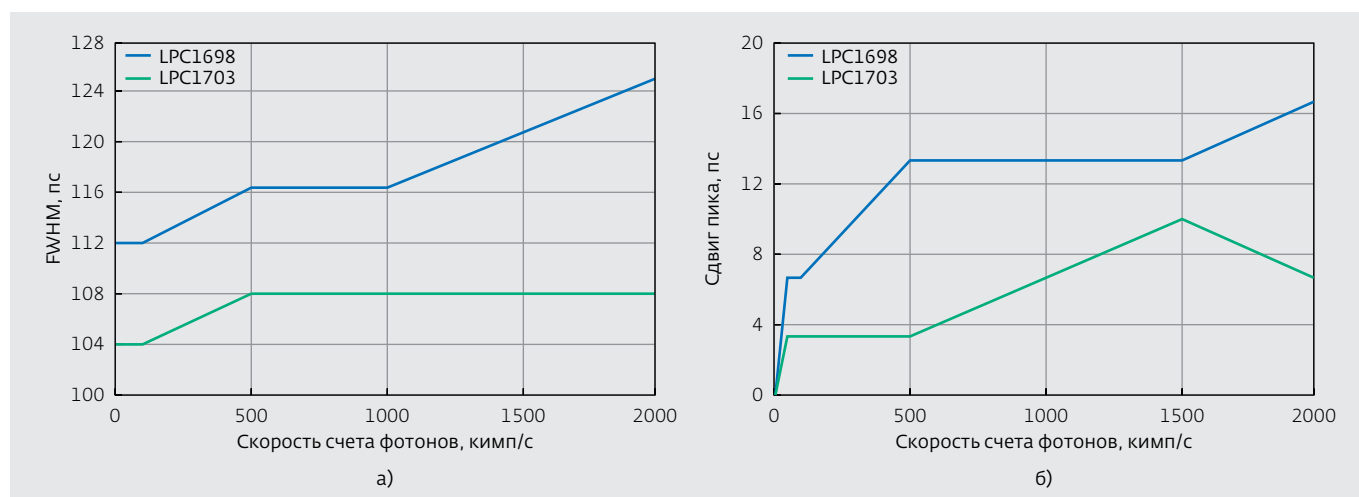


**Рис.7.** Зависимость частотных характеристик от изменения скорости счета для двух модулей (лазерный луч сфокусирован на активную область): а) – длительность импульса на уровне половины амплитуды (FWHM); б) – сдвиг пика кривой частотной характеристики

менее 5%. Сигналы "старт" и "стоп" обрабатывались системой коррелированного во времени подсчета одиночных фотонов (TCSPC-система) фирмы PicoQuant PicoHarp 300. На рис.6 показана частотная характеристика модуля PDM-R, оснащенного RE-SPAD с размером активной области 50 мкм. Типовое временное разрешение модуля составило от 77 до 86 пс (FWHM).

Следует отметить, что эта кривая также показывает чистый экспоненциальный хвост: пик обусловлен фотонами, поглощенными в области пространственного заряда, в которой носители заряда стремительно ускоряются. А появление

хвоста в графике вызвано фотонами, поглощенными в нейтральной области выше или ниже области пространственного заряда. В этом случае неосновные носители заряда, вызванные фотогенерацией, движутся хаотично, прежде чем будут обнаружены. Это объясняет случайную задержку при обнаружении таких фотонов. Влияние описанного хвоста может быть исключено из экспериментальных данных в случае исследования флуоресцентных событий распада с очень коротким временем жизни [16,17]. Наконец, небольшой пик, который можно заметить на конце хвоста, связан с отражением в оптическом стенде.



**Рис.8.** Зависимость частотных характеристик от изменения скорости счета для двух модулей (без фокусировки лазерного луча на активную область): а) – измерения длительности импульса на уровне половины амплитуды (FWHM); б) – сдвиг пика кривой частотной характеристики



Для проверки стабильности частотной характеристики были проведены измерения длительности импульса на уровне половины амплитуды (FWHM) и сдвиг пика кривой частотной характеристики при различных скоростях счета модуля. Для этого с помощью волоконно-оптического attenuатора, используемого в оптической установке, меняли затухание. Скорость счета модуля менялась от нескольких тысяч импульсов/с до 2 миллионов импульсов/с, но всегда сохранялась менее 5% относительно частоты повторения лазерного диода. Такой прием помог избежать искажений и скопления импульсов. На рис.7 показаны важные результаты, полученные для двух прототипов модулей: увеличение длительности импульса на уровне половины амплитуды менее чем на 10 пс и максимальный сдвиг пика только 20 пс.

Для того чтобы тщательно проверить параметры прототипов модулей серии PDM-R такие же измерения были повторно проведены на тех же самых двух модулях, но без фокусировки лазерного луча на активной области детектора. Полученные результаты измерений представлены на рис.8. Несмотря на незначительное увеличение длительности импульса на уровне половины амплитуды от 22 до 39 пс, даже с не сфокусированным

лучом временное разрешение модулей счета фотонов серии PDM-R составляет около 100 пс. Также было отмечено, что при изменении скорости счета модуля увеличение длительности импульса на уровне половины амплитуды составило менее чем на 13 пс с максимальным смещением пика на 16 пс. Хотя этот эффект все еще находится в стадии изучения, полученные результаты весьма значительны и демонстрируют стабильность производственного процесса изготовления RE-SPAD диодов с повторяемыми параметрами.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе нового поколения планарных RE-SPAD диодов с диаметром активной области 50 мкм разработаны и созданы высокопроизводительные модули счета фотонов (серии PDM-R), обладающие высокой эффективностью регистрации фотонов в ближней ИК-области спектра, низкой темновой скоростью счета и малыми остаточными пульсациями. Модуль счета фотонов PDM-R основан на монолитной частично интегрированной активной схеме гашения/восстановления и схеме с быстрым временем срабатывания для обеспечения высокой скорости подсчета фотонов и точной синхронизации.





При этом длительность импульса на уровне половины амплитуды составляет около 100 пс и сдвиг положения пика менее 20 пс для скоростей счета до 2 миллионов импульсов/с. Другими преимуществами модулей счета фотонов серии PDM-R являются небольшой размер (5×4×8 см) и низкая рассеиваемая мощность. Такие беспрецедентные характеристики позволяют широко использовать созданные модули в самых сложных системах коррелированного во времени подсчета одиночных фотонов (TCSPC системы) и экспериментах, связанных с регистрацией одиночных фотонов.

Эта работа была частично поддержана грантом ЕС договор № 248095 (Q-ESSENCE) FP7-ICT-2009-4.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Gulinatti A., Rech I., Maccagnani P., Ghioni M., and Cova S.** Improving the performance of silicon single photon avalanche diodes. – Proceedings of SPIE, 2011, v.8033, Advanced Photon Counting Techniques V, p. 803302-1-803302-11.
2. **Ghioni M., Gulinatti A., Rech I., Zappa F. and Cova S.** Progress in Silicon Single-Photon Avalanche Diodes. – IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(4), p.852-862.
3. SPCM-AQ Datasheet, Excelitas Technologies. Available online at: <http://www.excelitas.com>
4. **Weiss S.** Fluorescence Spectroscopy of Single Biomolecules. – Science, 1999, 283, №. 5408, p. 1676-1683.
5. **Xie X. S. and Dunn R. C.** Probing Single Molecule Dynamics. – Science, 1994, 265, №. 5170, p. 361-364.
6. **Yang H., Luo G., Karnchanaphanurach P., Louie T.-M., Rech I., Cova S., Xun L. and Xie X.S.** Protein Conformational Dynamics Probed by Single-Molecule Electron Transfer. – Science, 2003, 302, p. 239-240.
7. **Becker W.** Advanced Time-Correlated Single Photon Counting Techniques. – Springer, Berlin, 2005.
8. **Gulinatti A., Rech I., Maccagnani P., Ghioni M. and Cova S.** Large-area avalanche diodes for picosecond timecorrelated photon counting. – Proceedings of ESSDERC, 35th European Solid-State Device Research Conference, 2005, p. 355–358.
9. **Gulinatti A., Panzeri F., Rech I., Maccagnani P., Ghioni M. and Cova S.** Planar silicon SPADs with improved photon detection efficiency. – Proceedings of SPIE, 2010, v.7681, Advanced Photon Counting Techniques IV, 7681, p. 1-12.
10. **Giudice A., Ghioni M., Biasi R., Zappa F., Cova P., Maccagnani P. and Gulinatti A.** High-rate photon counting and picosecond timing with silicon-SPAD based compact detector modules. – Journal of Modern Optics, 2007, 54, (2 & 3), p.225-237.
11. **Cova S., Ghioni M., Lacaíta A. L., Samori C., and Zappa F.** Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection. – Applied Optics, 1996, 35(12), p.1956-1976.
12. **Cova S., Ghioni M., Zappa F., Rech I. and Gulinatti A.** A view on progress of silicon single-photon avalanche diodes and quenching circuits. – Proceedings of SPIE, 2006, 6372, p. 63720I-1 - 63720I-12.
13. **Gulinatti A., Panzeri F., Rech I., Maccagnani P., Ghioni M. and Cova S.** Planar technologies for SPAD arrays with improved performances. – Proceedings of SPIE, 2012, 8268, p. 82681D.
14. **Assanelli M., Ingargiola A., Rech I., Gulinatti A. and Ghioni M.** Photon-Timing Jitter Dependence on Injection Position in Single-Photon Avalanche Diodes. – IEEE Journal of Quantum Electronics, 2011, 47(2), p.151-159.
15. **Ghioni M., Cova S., Zappa F. and Samori C.** Compact active quenching circuit for fast photon counting with avalanche photodiodes. – Rev. Sci. Instrum., 1996, v. 67, №. 10.
16. **Gulinatti A., Rech I., Fumagalli S., Assanelli M., Ghioni M. and Cova S.** Modeling photon detection efficiency and temporal response of single photon avalanche diodes. – Proc. SPIE, 2009, 7355, p. 73550X-1-73550X-17.
17. **Gulinatti A., Rech I., Assanelli M., Ghioni M. and Cova S.** A physically based model for evaluating the photon detection efficiency and the temporal response of SPAD detectors. – Journal of Modern Optics, 2010, 58, (3 & 4), 210-224.