

Однородность двумерного пространственного распределения эффективности обнаружения фотонов и вероятности перекрестных помех у многопиксельных счетчиков фотонов на микромасштабе*

Лиана Лю, Чуньлин Чжан, Джакомо Галлина, Гоцин Чжан

Исследована двумерная (2D) однородность пространственного распределения эффективности обнаружения фотонов (ЭОФ) и вероятности оптических перекрестных помех P_{ct} у многопиксельных счетчиков фотонов (МПСФ) на микроскопическом масштабе. Экспериментально показано, что 2D пространственное распределение P_{ct} заметно неоднородно, а именно: P_{ct} имеет большие значения в углах и на краях каждого пикселя в МПСФ, что указывает на более сильное электрическое поле в этих местах пикселя вследствие обеднения носителями. Для ЭОФ неоднородность 2D распределения также становится заметной при небольшом размере пикселей МПСФ, что указывает на увеличение неоднородности распределения электрического поля в МПСФ с уменьшением размера пикселя. Предложен метод характеристики однородности пространственного распределения двумерного электрического поля в отдельном пикселе МПСФ, который можно использовать для управления процессом оптимизации МПСФ и их свойств. Эти перспективные методики могут быть естественно распространены на любые гейгеровские лавинные фотодиоды и их массивы.

Ключевые слова: многопиксельный фотонный счетчик, кремниевый фотоумножитель, однородность пространственного распределения, эффективность обнаружения фотонов, вероятность оптических перекрестных помех, микроскопический масштаб.

1. Введение

Кремниевый фотоумножитель (Si-ФЭУ), также называемый твердотельным фотоэлектронным умножителем или многопиксельным счетчиком фотонов (МПСФ), широко используется во многих областях, таких как ядерная физика [1], медицина (при визуализации) [2], лазерная физика (лидары) [3], биофизика [4], квантовая оптика [5], квантовая информатика [6]. Разработка МПСФ с высокой эффективностью обнаружения фотонов (ЭОФ), низкой вероятностью оптических перекрестных помех P_{ct} , низкой вероятностью ложного срабатывания после импульса $P_{ар}$ и низкой темновой скоростью счета является важной целью для исследователей.

Много усилий было сосредоточено на том, как оптимизировать ключевые параметры МПСФ [7–10]. Например, общая ЭОФ повышается путем надлежащего увеличения квантовой эффективности, геометрического фактора заполнения и вероятности запуска лавинного пробоя [7, 10]. Общая P_{ct} МПСФ может быть уменьшена с помощью оптически изолирующих канавок, заполненных отражающим/поглощающим материалом, чтобы локализовать фотоны в одном пикселе лавинного фотодиода гейгеровского типа (ГЛФД) [8], или путем использования скрыто-

го перехода ниже активной области, чтобы предотвратить диффузию носителей, генерируемых фотонами [11], а также путем уменьшения толщины необедненной области либо использования подложки с очень малым временем жизни неосновных носителей (малой диффузионной длиной) [10]. Однако недостаточно внимания было уделено влиянию 2D пространственного распределения параметров МПСФ на микроскопическом масштабе (2D микропространственного распределения) на соответствующие макроскопические характеристики. Знание этих распределений для таких ключевых параметров МПСФ, как ЭОФ и P_{ct} , важно для целенаправленного изготовления соответствующих устройств и оптимизации их свойств.

К сожалению, в настоящее время существует мало работ по исследованию 2D микрораспределения параметров МПСФ. В работе [12] сообщается, что исследование Si-ФЭУ с высоким электрическим полем может быть осуществлено косвенно методом визуализации ИК эмиссии с использованием ИК ПЗС-камеры высокого разрешения. Однако установка для реализации этого метода является дорогостоящей, а чтобы обеспечить регистрацию ИК фотонов, ПЗС необходимо охлаждать до низкой температуры. В работе [13] измерена однородность 2D распределения для некоторых Si-ФЭУ на миллиметровом масштабе и обнаружена четкая зависимость P_{ct} от геометрического положения в Si-ФЭУ. Это явление объяснялось различным числом соседних пикселей у Si-ФЭУ. Также отмечено дополнительное изменение P_{ct} в масштабе одного пикселя с шагом 50 и 100 мкм, причина которого указана не была. Тем не менее в [13] были подробно изучены 2D распределения относительной ЭОФ и P_{ct} пикселей ГЛФД в микронном масштабе; результаты показывают, что механизм зависимости ЭОФ и P_{ct} от геометрического положения в Si-ФЭУ не может объясняться только различным количеством соседних пиксе-

* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

L.Liu. School of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048, China

Ch.Zhang. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, 710311, China

G.Gallina. TRIUMF, Vancouver, British Columbia V6T 2A3, Canada

G.Zhang. School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048, China; e-mail: zhang_356@163.com

Поступила в редакцию 25 сентября 2019 г.

лей ГЛФД. Двумерное распределение электрического поля в области обеднения одиночного пикселя также важно для однородности пространственного 2D распределения ЭОФ и P_{ct} .

2. Экспериментальная установка и методика эксперимента

Схема установки показана на рис.1. Для контроля положения МПСФ использовалась пьезоэлектрическая система нанопозиционирования с разрешением системы обратной связи 1 нм и диапазоном перемещения 200 мкм (PI nanoXYZ, Германия). Исследуемые МПСФ (S12571-100C, S12571-025C и S12571-010C (Hamamatsu Photonics КК, Япония) с размером пикселя 100×100 , 25×25 и 10×10 мкм соответственно) были закреплены в защитном корпусе и установлены на столик нанопозиционирования. Микроскоп (X-73, Olympus Corp., Япония) использовался для фокусировки пучка от пикосекундного лазерного источника (PDL-800D, PicoQuant, Германия, центральная длина волны 375 нм, полная ширина линии на уровне половины максимума 44 пс, частота следования импульсов 31.125 кГц – 80 МГц, максимальная средняя мощность излучения 0.7 мВт) в пятно с диаметром около 1 мкм на поверхности МПСФ. Чтобы уменьшить размер лазерного пятна, на оптическом пути лазерного пучка между лазерной головкой и объективом (NA = 0.90) была размещена точечная диафрагма (диаметр 100 мкм). Питание МПСФ осуществлялось от программируемого источника питания, выходные лавинные импульсы МПСФ сначала усиливались широкополосным услителем собственного изготовления, а затем регистрировались цифровым осциллографом (DPO4102B-L, Tektronix Inc., США, 5 ГГц/с, полоса пропускания 1 ГГц), позволявшим наблюдать форму сигнала и определять скорость счета выходных импульсов от широкополосного усилителя. Управление пьезоконтроллером и обработка данных с осциллографа и системы нанопозиционирования осуществлялись персональным компьютером с помощью программы LABVIEW. В результате 2D сканирования с помощью системы нанопозиционирования получалась 2D карта скорости счета лавинных импульсов при различных порогах фотонного эквивалента (PE).

Интенсивность излучения импульсного лазера была низкой, так что среднее число обнаруженных фотонов со-

ставляло менее 0.1 фотона за импульс, что должно гарантировать пренебрежимо малую вероятность многофотонных событий. Мы выбрали частоту следования лазерных импульсов $f = 5$ МГц, чтобы, с одной стороны, обеспечить полное восстановление пикселей МПСФ после предыдущего срабатывания, а с другой стороны, чтобы скорость счета сигнальных фотонов $R_{0.5PE}(x, y)$ не была ниже фоновой скорости счета $B_{0.5PE}$ при пороге 0.5PE. В этой ситуации чистая скорость счета (общая скорость счета за вычетом фоновой скорости счета) импульсов от МПСФ непосредственно отражает величину ЭОФ: чем выше чистая скорость счета, тем больше в рассматриваемой точке пикселя МПСФ локальная ЭОФ, которая в действительности является относительной ЭОФ МПСФ. Она может быть определена как

$$\eta_{rel}(x, y) = R_{0.5PE}(x, y) - B_{0.5PE}. \quad (1)$$

Значение $R_{0.5PE}$ получается непосредственно с осциллографа, а $B_{0.5PE}$ считывается после окончания сбора данных для 2D карты.

Вероятность оптических перекрестных помех МПСФ может быть записана как

$$P_{ct}(x, y) = \frac{R_{1.5PE}(x, y) - P_{1.5PE}}{R_{0.5PE}(x, y) - P_{0.5PE}}. \quad (2)$$

В работах [7, 14] эта величина называется вероятностью быстрых оптических перекрестных помех. В формуле (2) $R_{1.5PE}(x, y)$ и $P_{1.5PE}(x, y)$ – полная скорость счета импульсов и средняя фоновая скорость счета, измеренные путем установки порогового уровня осциллографа на 1.5PE, а $P_{0.5PE}$ – средняя фоновая скорость счета при пороге 0.5PE.

3. Результаты и их обсуждение

Карты относительной ЭОФ и P_{ct} трех типов МПСФ Hamamatsu показаны на рис.2, из анализа которого можно сделать три наблюдения. Первое состоит в том, что 2D пространственная конфигурация пикселей в МПСФ хорошо видна на рис.2 и (частично) согласуется с фотографиями МПСФ (рис.3). Значительно более низкие относительные значения ЭОФ и P_{ct} в промежутках между пикселями указывают на низкое электрическое поле в области обеднения промежутков. Примечательно, что такие компоненты на фоточувствительной поверхности МПСФ, как гасящие сопротивления и металлическая пленка, очевидно, блокируют фотоны, которые должны быть поглощены в области сильного электрического поля, что уменьшает эффективное значение геометрического фактора заполнения МПСФ и должно учитываться при измерениях ЭОФ.

Второе наблюдение состоит в том, что при размере пикселя не меньше 25 мкм распределение P_{ct} в одном пикселе не является таким же однородным, как распределение относительной ЭОФ. На рис.2,б,г ясно видно, что на краях и в углах пикселя P_{ct} выше, менее четко эта тенденция прослеживается и на рис. 2,е. Данное явление может быть естественным образом связано с более сильным электрическим полем E на краях и в углах пикселей. Однако возникает интересный и естественный вопрос: и ЭОФ, и P_{ct} зависят от E , почему же распределения ЭОФ более однородны, чем распределения P_{ct} ?

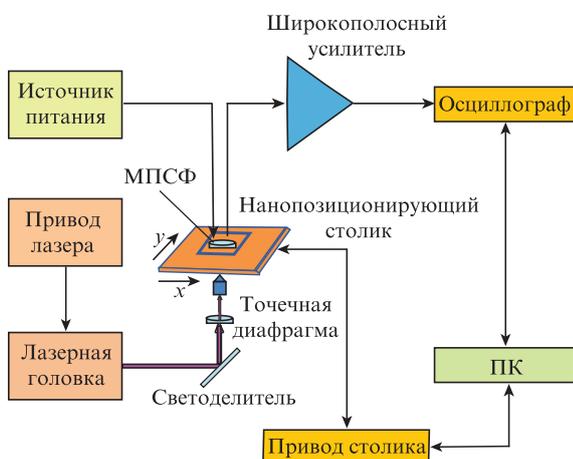


Рис.1. Схема установки для изучения однородности пространственного распределения ЭОФ и P_{ct} .

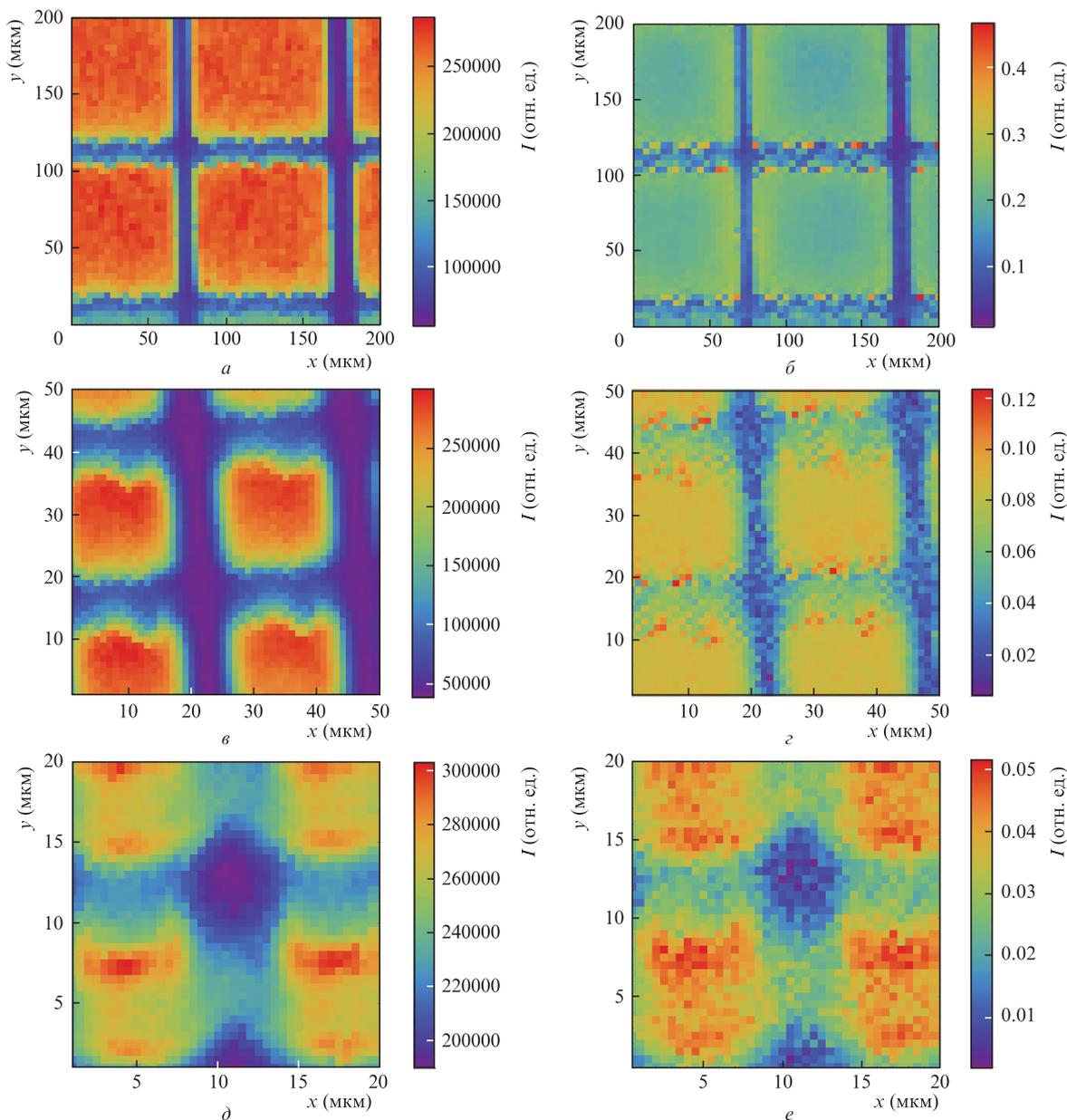


Рис.2. 2D распределение относительной ЭОФ (a, b, d) и вероятности оптических перекрестных помех P_{ct} (b, c, e) для МПСФ Hamamatsu с размерами пикселя 100 мкм (S12571-100C) (a, b), 25 мкм (S12571-025C) (b, c) и 10 мкм (S12571-010C) (d, e).

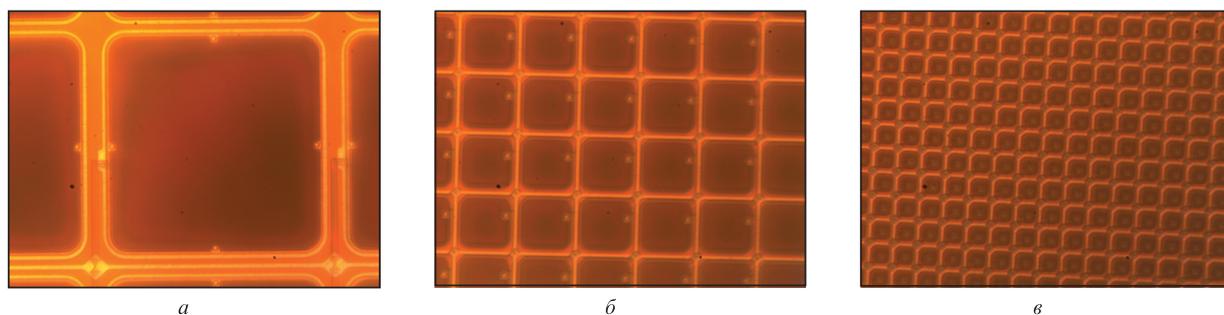


Рис.3. Фотографии МПСФ с размерами пикселей 100 мкм (S12571-100C) (a), 25 мкм (S12571-025C) (b) и 10 мкм (S12571-010C) (c).

Мы связываем этот факт с более сильной зависимостью P_{ct} от E по сравнению с таковой для ЭОФ. Действительно, с одной стороны, хорошо известно, что зависимость P_{ct} от приложенного напряжения V в основном су-

перлинейна, в то время как зависимость ЭОФ от V всегда сублинейна [15, 16]. Это означает, что одинаковое увеличение V вызывает большее увеличение P_{ct} , чем ЭОФ. Приложенное напряжение можно выразить следующим

образом (падением напряжения на гасящем сопротивлении и квазинейтральной области можно пренебречь):

$$V = \int_0^{W(x,y)} \varepsilon(x,y,z) dz = E(x,y)W(x,y), \quad (3)$$

где $W(x,y)$ – толщина обедненного слоя в данной точке поверхности; $\varepsilon(x,y,z)$ – значение локального электрического поля на определенной глубине z от верхней границы области обеднения p–n-перехода; $E(x,y)$ – интегральное среднее значение поля. Поскольку $W(x,y)$ пропорционально $V^{1/2}$ [17], из уравнения (3) легко вывести простое соотношение $V \sim E^2$. Следовательно, более резкая зависимость P_{ct} от V приводит к более резкой зависимости P_{ct} от E . С другой стороны, для данного V величина $W(x,y)$ меньше на краях и в углах пикселя из-за меньшей кривизны перехода и, следовательно, более сильного электрического поля E [18]. Из приведенных выше двух пунктов мы можем сделать вывод, что небольшое увеличение E на краях и в углах пикселей приводит к большему приращению для P_{ct} , чем для ЭОФ. Поскольку E на краях и в углах пикселя больше, чем в его центре, карты P_{ct} показывают более выраженную неоднородность, чем карты ЭОФ.

Третье наблюдение состоит в том, что неоднородность 2D распределения ЭОФ становится очевидной, когда размер пикселей МПСФ невелик. Это приводит к большей неоднородности распределения электрического поля в области обеднения ГЛФД пикселей МПСФ. Однако, хотя МПСФ с большим размером пикселя имеет явно большую величину геометрического фактора заполнения и, следовательно, большую ЭОФ и лучшую ее однородность, как показано на рис.2,а,в, МПСФ с большим размером пикселя имеют большую емкость соединения, что увеличивает время восстановления и время срабатывания. Следовательно, размер пикселя должен выбираться из компромиссных соображений.

Исходя из вышесказанного, мы можем утверждать, что требуются определенные усилия, чтобы сделать электрическое поле в пикселях МПСФ более однородным, увеличить полную ЭОФ и уменьшить P_{ct} , а также уменьшить общие темновую скорость счета и P_{ap} Si-ФЭУ, которые имеют сходное с ЭОФ и P_{ct} происхождение и механизм. Одним из решений является создание ЛФД-пикселей круглой формы вместо квадратных пикселей, обычно используемых в большинстве существующих Si-ФЭУ.

4. Заключение

Если размер пикселя МПСФ относительно велик, степень однородности 2D микропространственного распределения электрического поля в области обеднения в МПСФ может быть косвенно обнаружена по распределению оптической вероятности перекрестных помех P_{ct} , а когда относительно мал – по распределению как P_{ct} , так и

ЭОФ. В одном ЛФД-пикселе МПСФ 2D распределение P_{ct} , очевидно, неравномерно, причем величина P_{ct} больше в углах и на краях пикселя, что говорит о более сильном электрическом поле в этих областях. Если размер пикселей МПСФ невелик, неоднородность пространственного 2D распределения ЭОФ также становится заметной, что говорит о большей неоднородности распределения электрического поля в МПСФ с небольшим размером пикселя. Поэтому требуются некоторые усилия, чтобы сделать электрическое поле в пикселе более однородным и, таким образом, увеличить общую ЭОФ и уменьшить P_{ct} , P_{ap} , а также темновую скорость счета МПСФ. Наши развит метод характеристики однородности пространственного двумерного распределения электрического поля в одном пикселе МПСФ, который можно использовать для оптимизации свойств МПСФ. Наши подходы, естественно, могут быть использованы для любых ГЛФД и их массивов.

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (№11975176 и 11705136), Планом фундаментальных исследований естествознания в провинции Шэньси Китая (№2019JM-139), Специальным исследовательским проектом Отдела образования провинции Шэньси (№15JK1443), Национальным научным фондом Шэньси (грант №2018JQ1079).

- Grodzicka-Kobylka M., Moszyński M., Szczyński T. *Nuclear Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A*, **926**, 129 (2019).
- Bisogni M.G., Del Guerra A., Belcari N. *Nuclear Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A*, **926**, 118 (2019).
- Acerbi F., Paternoster G., Gola A., Regazzoni V., Zorzi N., Piemonte C. *IEEE J. Quantum Electron.*, **54** (2), 4700107 (2018).
- Re R., Martinenghi E., Mora A.D., Contini D., Pifferi A., Torricelli A. *Neurophotonics*, **3** (4), 045004 (2016).
- Chesi G., Malinverno L., Allevi A., et al. *Sci. Rep.*, **9**, 7433 (2019).
- Балыгин К.А., Зайцев В.И., Климов А.Н., Кулик С.П., Молотков С.Н. *ЖЭТФ*, **153** (6), 879 (2018) [*JETP*, **126** (6), 728 (2018)].
- Piemonte C., Gola A. *Nuclear Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A*, **926**, 2 (2019).
- Gola A., Acerbi F., Capasso M. *Sensors*, **19**, 308 (2019).
- Koyama A., Hamasaki R., Shimazoe K., et al. *Nuclear Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A*, **924**, 436 (2019).
- Acerbi F., Ferri A., Zappala G. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **62** (3), 1318 (2015).
- Ghioni M., Cova S., Lacaita A., Ripamonti G. *Electron. Lett.*, **24** (24), 1476 (1988).
- Ninkovic J., Andricek L., Jendrisyk Ch. *Nuclear Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A*, **628** (1), 407 (2011).
- Eckert P., Schultz-Coulon H.-Ch., et al. *Nuclear Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A*, **620**, 217 (2010).
- Acerbi F., Gundacker S. *Nuclear Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A*, **926**, 16 (2019).
- Gallina G., Giampa P., Retière F., et al. *Nuclear Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A*, **940**, 371 (2019).
- Vacheret A., Barker G.J., Dziewiecki M. *Nuclear Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A*, **656**, 69 (2011).
- Sze S.M., Ng K.K. *Physics of Semiconductor Devices* (Wiley, 2007).
- Sze S.M., Gibbons G. *Solid-State Electron.*, **9**, 831 (1966).