

УДК 539.172.13

СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПРОФИЛЯ И ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БАЗЕ ММД

К. ф.-м. н. О. А. Федорович¹, д. ф.-м. н. В. М. Пугач¹, А. С. Ковальчук¹,
Д. И. Сторожик¹, В. М. Милиция¹, Е. Г. Костин¹, Б. П. Полозов¹, Г. Рем²

¹Институт ядерных исследований НАН Украины, г. Киев, Украина;
²Diamond Light Source, Oxfordshire, United Kingdom
oafedorovich@kinr.kiev.ua

Разработана технология изготовления микростриповых металлических детекторов (ММД) толщиной около 2 мкм, способных регистрировать потоки ионизирующего излучения в широком диапазоне энергий и интенсивности. Особенности ММД являются их прозрачность, радиационная стойкость, высокое пространственное разрешение, уникальная технология производства, низкое рабочее напряжение (до 20 В), доступная считывающая электроника.

Ключевые слова: микростриповые металлические детекторы, ионизирующее излучение, радиационная стойкость, пространственное разрешение.

В последние годы возрос интерес к детекторам ионизирующего излучения, которые позволяют измерять не только величину ионизирующего излучения, но и его распределение в пространстве и разрешение во времени. Но особый интерес представляют детекторы, которые измеряют параметры ионизирующего излучения и практически полностью пропускают излучение, тем самым многократно увеличивая срок службы детекторов.

Отделом Физики высоких энергий совместно с Лабораторией плазменных технологий Института ядерных исследований НАНУ разработаны микростриповые металлические детекторы (ММД) и создана технология их изготовления [1—3]. Эти детекторы способны регистрировать потоки ионизирующего излучения в широком диапазоне энергий и интенсивности. Отличительной особенностью ММД от микро-детекторов на основе полупроводниковых, сцинтилляционных или газоразрядных материалов, которые полностью поглощают исследуемый пучок или существенно его деформируют, является его практически идеальная работа в качестве измерительного прибора, выполняющего мониторинг исследуемого пучка заряженных частиц, γ - или рентгеновского излучения без искажения характеристик.

В основе принципа работы ММД лежит вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ). Пучок заряженных частиц или фотоны, проходя через тонкую полосу металлической фольги, висящую в вакууме или в воздухе и закрепленную с концов на подложке (стрип), вызывает ВЭЭ, образуя тем самым положительный заряд. Возникший заряд интегрируется высокочувствительным зарядовым интегратором, присоединенным к стрипу. В явлении ВЭЭ главную роль играет тонкий приповерхностный слой металла толщиной 10—50 нм, что дает возможность создавать сверхтонкие (1 мкм) детекторы с минимальной массой детектирующего материала. Это одно из главных преимуществ детектора. Другими особенностями ММД являются высокая радиационная стойкость (более 100 МГр), высокое пространственное разрешение (до 2 мкм), уникальная технология производства, низкое рабочее напряжение (до 20 В), доступная считывающая электроника.

Возможные области применения этих детекторов следующие: мониторинг профиля микропучков заряженных частиц и синхротронного излучения; регистрация событий в масс-спектрометрах и электронных микроскопах (электронная фокальная плоскость); датчики рентгеновского и гамма-излучения; прецизионные измерения пространственного распределения радиационной нагрузки (в микробиологии, медицине, микрометаллургии, и измерения в реальном времени дозы облучения и другие.

Сейчас существуют образцы ММД с количеством стрипов от 16 до 1024 с шагом между стрипами от 2 до 200 мкм.

В 2012 году были разработаны и изготовлены детекторные модули ММД для применения в системе фокусировки микропучков на синхротроне Diamond Light Source (DLS, Великобритания) (рис. 1, 2).

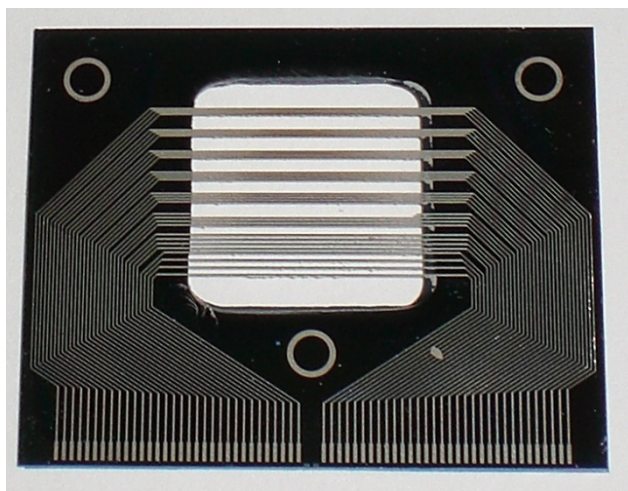


Рис. 1. Фото ММД с переменным шагом (8 групп полос с шагом от 3 до 300 мкм)

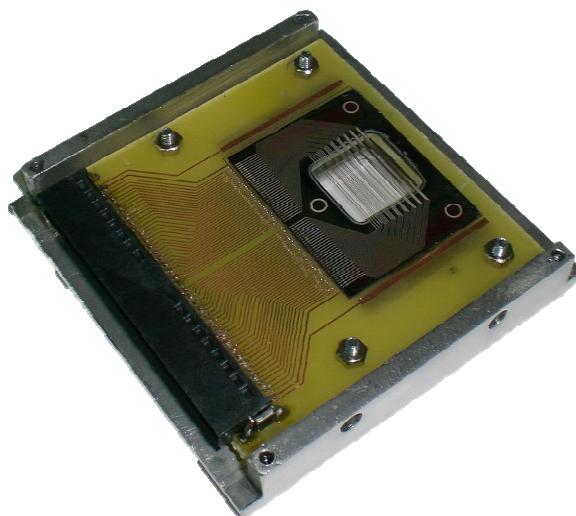


Рис. 2. Фотография модуля ММД с переменным шагом стрипов

Для этого проекта были разработаны и изготовлены уникальные по своим характеристикам сенсоры с переменным шагом стрипов — ММД32_v (количество стрипов — 32, расстояние между стрипами от 2 до 300 мкм).

Для достижения пространственного разрешения с микронными размерами и небольшой толщиной (несколько мкм) микрострипов детектора для производства ММД была разработана и использована технология плазмохимического травления кремния [4]. Датчики были изготовлены с помощью технологии микроэлектроники и плазменно-химического травления. Чтобы изолировать металлическую пленку от подложки, диэлектрические слои были выращены на обеих сторонах пластины. Вначале был нанесен слой оксида кремния (0,1—0,3 мкм), а поверх него слой нитрида кремния толщиной 0,2 мкм. Для улучшения адгезии на диэлектрик был нанесен тонкий (0,1 мкм) слой титана. После этого был нанесен слой никеля (1—1,5 мкм). Нанесение тонких металлических пленок проводилось термоионным способом с дополнительной ионизацией паров металлов при рабочем давлении в установке 10^{-5} Торр. Испарение напыляемого металла проводилось электронно-лучевой пушкой, а разряд производился в собственных парах металла. Подложка нагревалась до 400°C, что позволяло получить высокую адгезию напыляемых пленок. При отрыве пленок от основы происходил разрыв по кремнию. А напыление без напуска буферных газов в камеру дало возможность получить чистые пленки металлов без окисления с высокой проводимостью и большой прочностью на разрыв. Дополнительная ионизация паров металла также способствовала улучшению адгезии. При приложении отрицательного потенциала к подложке происходило ускорение положительных ионов, и они с большой скоростью внедрялись в подложку, создавая улучшенное сцепление с ней.

После этого наносилась тонкая пленка фоторезиста, проводилось его экспонирование через заранее изготовленный с помощью электронно-лучевой литографии фотошаблон, проявление, задубливание и сушка. Далее производилось химическое травление тонких пленок никеля и титана, которые были освобождены от фоторезиста в процессе проявки. Таким способом был создан рисунок с микрострипами, подводящими полосками и контактными площадками на пластине из кремния толщиной 450 мкм. Оставшийся (не экспонированный) фоторезист был снят специальным растворителем. Затем проводилась резка алмазным диском пластины на отдельные заготовки.

Прозрачное окно с тыльной стороны было создано с помощью плазмохимического травления. Для травления использовался плазмохимический реактор с управляемой энергией ионов, разработанный в ИЯИ НАН Украины. В настоящее время технология позволяет производить полосы шириной порядка нескольких микрометров, таким образом обеспечивая размеры щелей между стрипами 2 мкм при толщине датчиков 450 мкм. При этом удается селективно стравить кремний толщиной 450 мкм и

не повредить полоски никеля толщиной 1—2 мкм. Это возможно благодаря использованию плазмохимических реакторов с низкими энергиями ионов. При высоких энергиях ионов происходит распыление никелевой и титановой пленок.

Фото некоторых металлических микроstriповых детекторов приведены на рис. 3.

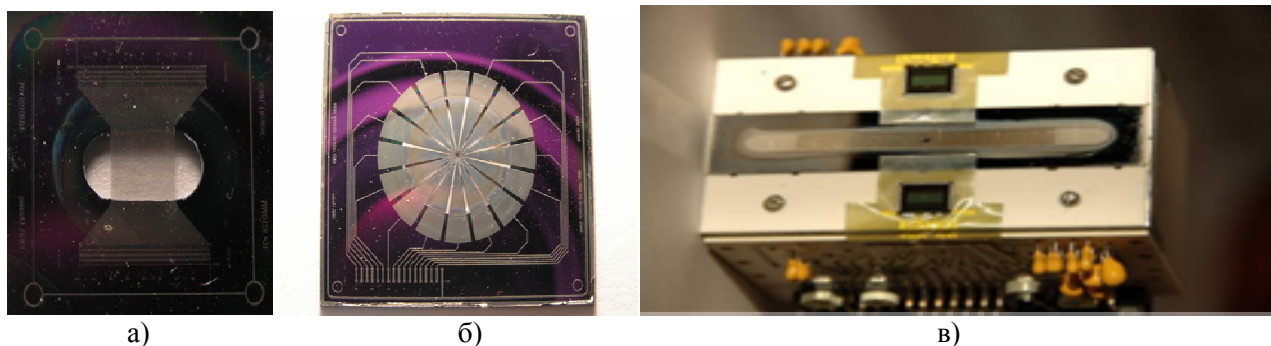


Рис. 3. Металлические микроstriповые детекторы:

а — 128-канальный; *б* — 16-секторный (проверен на синхротроне DLS, Великобритания),
в — 1024-канальный ММД, связанный микрокабелями для считывания микроэлектроникой

Чувствительность ММД к радиационным потокам определяется факторами их физического преобразования, а также факторами электроники считывания (флуктуации заряда на вводах в ЧИП из-за токов утечки, воздействия температуры/влажности, полосы радиочастот и т. д.). В настоящее время для релятивистских частиц надежно регистрируемый поток находится в диапазоне от 10^4 частиц /с на датчик. ММД были успешно применены для мониторинга профиля пучка рентгеновских лучей на синхротроне DESY в лаборатории HASYLAB (Гамбург) [5]. Для предотвращения микроволнового нагрева металлических полос пятислойный ММД (32 Al-стрипов, шаг — 70 мкм, толщина 2 мкм) был введен в рентгеновский пучок с энергией 15 кэВ интенсивностью $4,5 \cdot 10^{14}$ фотонов/с/мм². Коэффициент пересчета был оценен как $1,5 \cdot 10^4$ фотонов/э.

Были выполнены исследования характеристик металлических микроstriповых детекторов в режиме измерений распределения дозы излучения синхротрона высокого уровня в установке (синхротрон ESRF, Франция, лаборатория ID17) минилучевой терапии в реальном времени. Биомедицинскими особенностями является то, что терапия требует достаточно высоких доз (до нескольких кГр/с) [6]. Высокий коэффициент лучевой нагрузки не позволяет применять любые обычные детекторы для измерения распределения дозы в режиме реального времени. Распределения дозы в настоящее время измеряются с помощью специальных рентгеновских пленок, обработка которых занимает 1—2 дня.

Для мониторинга распределения дозы отдельных пучков синхротронного излучения в режиме реального времени был предложен и испытан датчик на основе системы металлического микропиксельного детектора TimePix [7]. TimePix обеспечивает измерение распределения дозы в реальном времени. Полученные результаты иллюстрируют отличные характеристики металлического TimePix микродетектора и обеспечивают 2D-изображение распределения дозы многих пучков на площади 14×14 мм. Результаты измерений коэффициентов пик-минимум-дозы-TimePix и цветных рентгеновских пленок хорошо согласуются.

Выполнены исследования 16-секторного металлического микродетектора на линии В16 синхротрона DLS (диаметр пучка — 100 мкм, энергия 10—20 кэВ). Определена чувствительность ММД (10^{-3} э/фотон), которая соответствует теоретическим расчетам. Измерена позиционная чувствительность различных групп секторов ММД в зависимости от перемещения детектора относительно оси пучка. На базе системы сбора и обработки данных X-DAS (SENS-TECH, Великобритания) [7] построена система мониторинга профиля и положения пучков заряженных частиц. В 2012 году выполнены испытания этой системы с детектором ММД64 на ускорителе ЭП-10К ИЯИ НАН Украины. Начато изготовление нового многоканального детекторного модуля для исследований динамики фазовых переходов в металлах, которые проводятся в Институте проблем материаловедения НАН Украины.

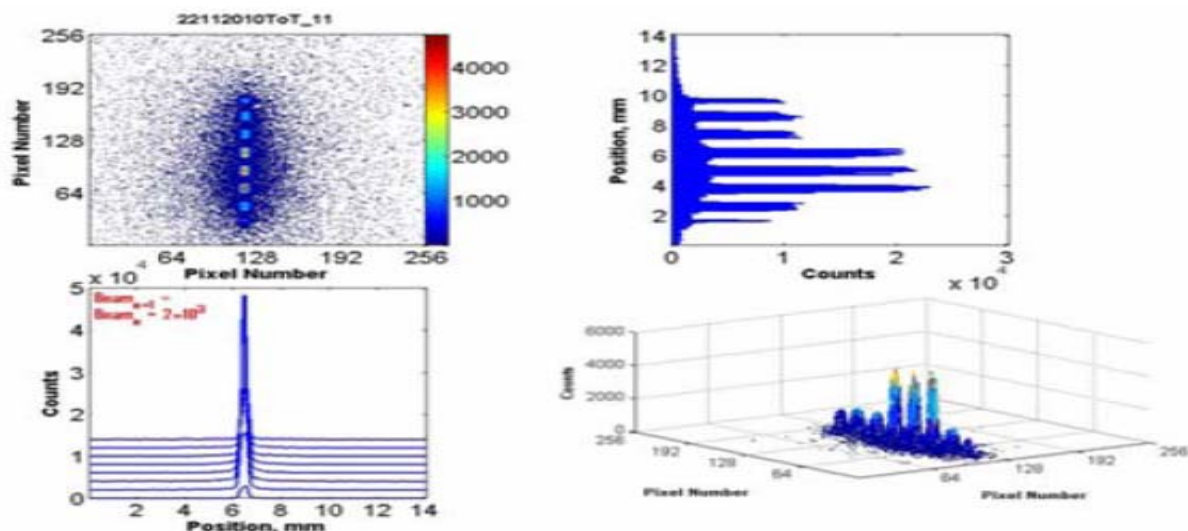


Рис. 4. Распределение дозы облучения, измеренной металлическим детектором TimePix на линии пучка излучения синхротрона ESRF (Франция): слева (сверху) — 2D-изображение; справа (сверху) и слева (внизу) — проекции на оси X и Y; справа (внизу) — изометрическое изображение

Данные, полученные для различных модификаций мини-, а также микролучевой конфигурации будут использоваться для создания новых ММД-излучения на основе жестких систем мониторинга для приложений лучевой терапии.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Пугач В. М., Перевертайло В. Л., Федорович О. А., і ін. Мікростріпові металеві детектори // Ядерна фізика та енергетика.— 2006.— № 1(17).— С. 95—101.
2. Пугач В. М., Федорович О. А., Перевертайло В. Л. и др. Плазменные технологии изготовления радиационно стойких микростриповых детекторов регистрации ионов для масс-спектрометров // Труды IX МНПК «СИЭТ-2008». — Украина, г. Одесса.— 2008.— Т. 2.—С. 163.
3. Федорович О. А., Пугач В. М., Костин Е. Г., и др. Изготовление микростриповых металлических детекторов различного назначения ионно-плазменными методами // Труды XII МНПК «СИЭТ-2011». Украина, г. Одесса. 2011.— С. 304.
4. Pugatch V. et al. Plasma technologies for manufacturing of micro-strip metal detectors // Voprosi atomnoi nauki i techniki (in Russian). № 1 (2007). P. 173—175.
5. Pugatch V. et al. Micro-strip metal detector for the beam profile monitoring // Nucl. Instr. and Meth.— 2007.— Vol. A581.— P. 531—534.
6. Llopart X. et al., Timepix, a 65k programmable pixel readout chip // Nucl. Instr. and Meth. A 581 — 2007.— P. 485—489.
7. <http://www.sens-tech.com>

O. A. Fedorovich, V. M. Pugatch, O. S. Kovalchuk, D. I. Storozhyk, V. M. Militsiya, E. G. Kostin, B. P. Polozov, G. Rem

MMD-based systems of the monitoring of profile and position of ionizing radiation beams.

The paper presents a newly-developed technology of the fabrication of 2 μm thick micro-strip metallic detectors (MMD) capable to register flows of ionizing radiations in wide range of energies and intensities. Particularities of such MMDs are their transparency, radiation resistance, high spatial resolution, a unique production technology, low operating voltage (up to 20V), and commercially available reading electronics.

Keywords: *micro-strip metal detectors, ionizing radiation, radiation resistance, spatial resolution.*