

Измерение параметров выведенных протонных пучков полупроводниковыми детекторами

Лукьяшин В. Е.

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

В настоящее время использование пучков ускоренных протонов в прикладных и медицинских целях резко возросло, что повлекло за собой и развитие новых методов и приборов диагностики и дозиметрии протонных пучков. Транспортировка протонных пучков с большими диапазонами интенсивности (от $2,0 \cdot 10^8$ до $1,0 \cdot 10^{11}$ р/имп.) и временной структуры банча (от 70 нс до 200 мс) осуществляется в вакууме с использованием большого числа элементов магнитной оптики и точным знанием координат трассы. Детектирующие элементы приборов, измеряющих координаты трассы вывода, должны характеризоваться малыми размерами (порядка 1 мм), способностью работать в вакууме и иметь дифракционный диапазон в три–четыре порядка с известной функцией отклика. Одним из таких приборов можно считать кристаллические P/N и P-i-N детектирующие структуры на основе арсенида галлия (GaAs) кремния (Si) и алмаза (C). Эти кристаллические материалы термостойки, вакуумплотны и достаточно радиационно стойкие, а производство монокристаллов кремния наиболее развито.

Совершенствование методов получения сверхчистых монокристаллов Si и их ионного легирования позволило уверенно получать детектирующие P/N и P-i-N структуры с необходимыми электрическими характеристиками и топологическими параметрами. Размеры чувствительной зоны задаются при изготовлении и определяют координатное разрешение (dX ; dY ; dZ) и дозовую чувствительность детектора $J_{\min} = F(n, E, l) > J_{\text{noise}}$, где J_{\min} – ток детектора соответствующий минимальной дозе, $F(n, E, l)$ – функция числа частиц, их энергии и размеров детектора J_{noise} – шумовой ток детектора.

Для контроля за трассой пучка протонов и подведения его к мишеням малого размера, например опухоли структур глаза, можно использовать детекторы с размером чувствительной зоны 1 x 1 мм. Устанавливая их в вакууме, в точках кроссовера трассы и в процедурной кабине перед пациентом, можно не только контролировать пространственное положение пучка и угол вхождения его в мишень, но и динамически корректировать эти параметры в процессе облучения. Сигналы от детекторов, аппозитно размещенных по осям X, Y на уровне 50%-ной плотности распределения частиц, используются в цепи обратной связи как сигналы коррекции токов элементов магнитной оптики и/или аварийного прекращения вывода пучка протонов (см. рис.1).

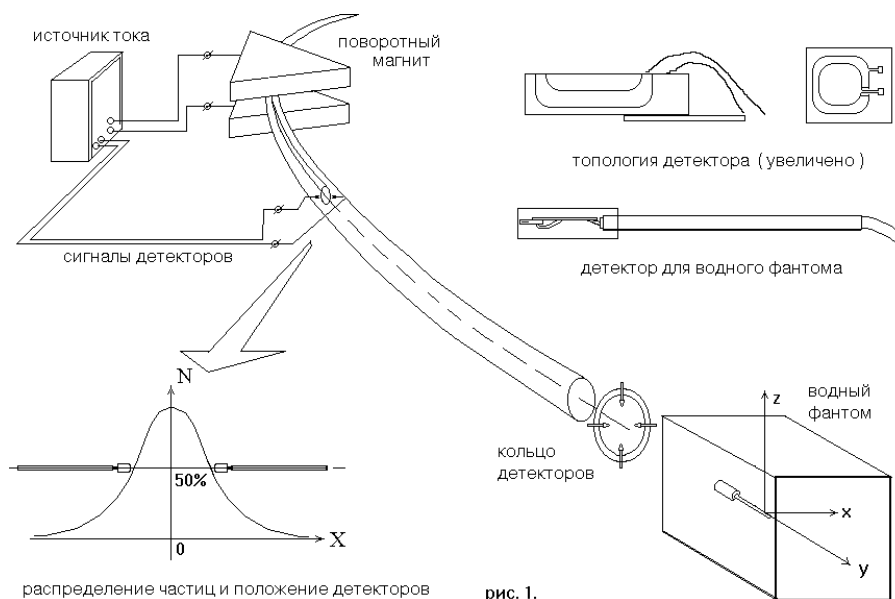
Этот принцип контроля за транспортировкой протонного пучка использовался в Упсальском исследовательском центре (Швеция) при облучении офтальмологических больных.

В ИТЭФ совместно с Российским НИИ космического приборостроения (РНИИКП) разработан и используется кремниевый P-i-N детектор. Детектирующая P-i-N-зона создана методом ионного легирования на сверхвысокоомной пластине кремния толщиной 0,2 мм. Толщина чувствительного слоя может варьироваться от 10 до 100 мкм подачей напряжения смещения обратной полярности. Это свойство позволяет регистрировать центральную, интенсивную часть пучка и его периферийную область, где плотность протонов в 100 раз меньше.

На медико-биологическом протонном пучке ИТЭФ с системой быстрого (длительность банча от 120 до 70 нсек) сброса пучка протонов с энергией от 70 до 200 МэВ используется кремниевый P-i-N-детектор для измерения как поперечного так и глубинного дозного распределения.

Герметично упакованный в тканеэквивалентный материал детектор помещается в водяной бак трехкоординатного фантома. Ориентируя чувствительную зону P-i-N детектора вдоль или поперек оси пучка, можно получать поперечные и глубинные дозные распределения с координатным разрешением $\pm 0,15$ мм. Использование трехкоординатного водного фантома и линейной сборки из полупроводниковых P-i-N детектирующих структур позволит сократить время и повысить точность измерения дозных распределений от импульсного протонного пучка с малой частотой вывода. Используя прямоугольную матрицу из P-i-N структур сформированных на общей пластине кремния, можно за один импульс протонного пучка получать двухмерное дозное распределение сложной формы (серповидное, треугольное и т. д.).

В топологически новых P-i-N-структурах с высокой степенью легирования (до 10^{22} ат./моль) напряженность электрического поля E уменьшаясь от деструктивного воздействия протонов на кристаллическую структуру (возникновение смещенных узлов, ловушек и т.д.), остается достаточным для коллектирования электрон-дырочных пар. При этом суммарная доза полученная кристаллом кремния, может достигать нескольких мегарад. Постепенное снижение чувствительности детектора можно оценить расчетными методами или определить экспериментально в сравнении с другим независимым монитором (ионизационная камера, трансформатор тока и т.д.). Это свойство позволяет использовать полупроводниковые детекторы как постоянные ореольные датчики качества вывода и транспортировки протонного пучка.



Детекторы данного типа слабо чувствительны к внешним магнитным и электрическим полям и могут устанавливаться в вакуумпроводе рядом с элементами фокусировки и поворота протонного пучка. Сигналы от набора колец с оппозиционно-секторным размещением детекторов, установленных в критических точках, характеризуют изменение траектории и фазового объема выводимого пучка протонов. Снижение амплитуд сигналов, связанное с отжигом детекторов в процессе эксплуатации, может быть компенсировано подачей обратного смещения на Р-і-N-структуры. Детекторы на основе новых Р-і-N-структур, можно использовать и размещая их в зоне пучка. Излучение, возникающее от взаимодействия протонов пучка с молекулами остаточного газа, регистрируется диафрагмированным детектором на расстоянии 5 см от оси пучка. Таким образом, срок эксплуатации ореольных датчиков, размещенных в вакууме, увеличивается без демонтажа и замены отдельных элементов.

Автор выражает свою благодарность А.И. Воронцову и А.С. Карпухину за научно-техническую поддержку по изготовлению полупроводниковых детекторов и исследованию их характеристик.