Письма в ЭЧАЯ. 2021. Т. 18, № 7(239). С. 637–642

МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

# ГЕОМЕТРИЯ МИКРОЭЛЕКТРОННОГО КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

*А. В. Косуля* [а, 1], *В. Г. Вербицкий* [б]

[а] Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева, Киев

[б] Киевский национальный университет им. Т. Шевченко, Киев

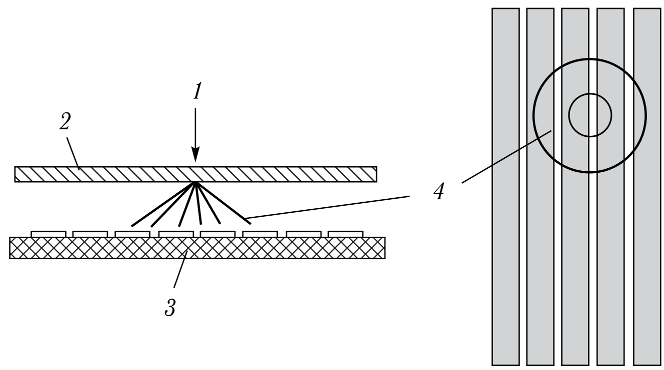
Проведен расчет оптимального расстояния от микроканального умножителя, состоящего из двух микроканальных пластин, до кристалла большой интегральной схемы (БИС). Определена геометрия, и проведена оптимизация корпуса микроэлектронного координатно-чувствительного детектора. Определена геометрия входных каналов БИС в составе координатно-чувствительного детектора заряженных частиц. Получена зависимость разрешающей способности микроэлектронного координатно-чувствительного детектора от геометрических размеров входных каналов БИС.

The calculation of the optimal distance from the microchannel multiplier, consisting of two microchannel plates, to the crystal of a large integrated circuit (LIC) is carried out. The geometry is determined and the optimization of the housing of the microelectronic coordinate-sensitive detector is carried out. The geometry of the LIC input channels as part of the coordinate-sensitive charged particle detector is determined. The dependence of the resolution of the microelectronic coordinate-sensitive detector on the geometric dimensions of the LIC input channels is obtained.

PACS: 85.30.De

Источник ионов с лазерной ионизацией исследуемого вещества и протяженной фокальной плоскостью магнитного анализатора масс-спектрометра с двойной фокусировкой позволяет проводить элементный анализ многокомпонентных образцов одновременно без специальной подготовки пробы. Использование микроэлектронного координатно-чувствительного детектора (МКЧД) в качестве приемника ионов изотопов различных элементов позволяет осуществлять регистрацию результатов анализа в реальном масштабе времени и юстировку масс-спектрометра в зависимости от условий эксперимента [1]. Вследствие этого увеличиваются точность и чувствительность анализа, значительно сокращаются время анализа и затраты исследуемого материала, что особенно важно при создании наноматериалов, получении сверхчистых материалов [2]. Основные узлы МКЧД: специализированная большая интегральная схема (БИС), корпус и микроканальный умножитель. Конструкция МКЧД рассмотрена

[1] E-mail: alexandr250990@gmail.com




Формирование сигнала в МКЧД. *1* — ион; *2* — МКП; *3* — матрица электродов; *4* — импульс электронов

в [2], специализированная БИС — в [3, 4]. Микроканальный умножитель представляет собой две микроканальные пластины (МКП) в шевронной сборке, которые образуют шевронный узел [5–8]. Ион, попадая на поверхность МКП, преобразуется в лавину электронов, которая попадает на кристалл БИС и заряжает входные электроды. Для срабатывания БИС необходимо, чтобы $10^6$ электронов попали на металлизированные входные электроды БИС. Кристалл БИС представляет собой матрицу электродов (см. рисунок).

Распределение по энергии электронов, вылетающих из каналов МКП, описывается распределением Чанга–Эверхардта [9, 10]:

$$f(W) = A\frac{W_0 - W_f - \Phi}{(W_0 - W_f)^4}, \tag{1}$$

где $A$ — нормировочный множитель; $W_f$ — энергия Ферми $SiO_2$; $\Phi$ — работа выхода электрона из $SiO_2$.

Рассмотрим происходящие процессы с точки зрения волновой теории. Каждый пучок электронов сопоставим с соответствующей волной де Бройля, а канал, из которого вылетает лавина, соответственно, с источником. В таком случае волны от разных источников не должны взаимодействовать между собой, т. е. интерферировать, или же интерференцией можно пренебречь. При этом достаточно рассмотреть интерференцию двух соседних источников.

Условие интерференции определяется как

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\,\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\frac{xl}{L}\right), \tag{2}$$

где $I_1$ — интенсивность первого источника; $I_2$ — интенсивность второго источника; $\lambda$ — длина волны де Бройля; $x$ — точка падения волн на кристалл БИС; $l$ — расстояние между источниками; $L$ — расстояние между МКУ и кристаллом БИС. Из уравнения (2) получаем первое условие — отсутствие интерференции:

$$\frac{x}{\lambda}\frac{l}{L} = \frac{1}{4} + \frac{1}{2}\,n. \tag{3}$$

Второе условие: интерференцией можно пренебречь, если ширина интерференционных полос много меньше расстояния между источниками:

$$\frac{\lambda L}{l} \ll l. \tag{4}$$

Перепишем уравнения (3) и (4) с учетом того, что $\lambda = h/mv$, где $h$ — постоянная Планка; $m$ — масса электрона; $v$ — скорость, которая определяется как $\sqrt{2W_0/m}$:

$$L = \frac{4xl\sqrt{2W_0 m}}{h(1+2n)}, \tag{5}$$

$$L \ll \frac{l^2\sqrt{2W_0 m}}{h}. \tag{6}$$

Если условия (5) или (6) выполняются, то волны не интерферируют, или же интерференцией можно пренебречь.

Между МКУ и кристаллом БИС ускоряющий потенциал отсутствует, т. е. пучок будет двигаться в свободном пространстве и расходиться под действием собственного пространственного заряда. Запишем уравнение Пуассона в цилиндрических координатах:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial U}{\partial r}\right) + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -4\pi\rho. \tag{7}$$

Предположим, что длина пучка много больше его диаметра, тогда вторым членом в левой части можно пренебречь. Сделаем допущение, что $\rho$ от $r$ не зависит, и в результате интегрирования получим

$$E_r = 2\pi\rho r = \frac{2I}{rv_z}, \tag{8}$$

где $I$ — полный ток пучка; $r$ — радиус пучка в данном месте.

Запишем уравнение движения для частицы на краю пучка:

$$m\ddot{r} = \frac{2eI}{rv_z}. \tag{9}$$

В результате первого интегрирования имеем

$$\dot{r}^2 = \frac{4Ie}{mv_z}\ln(r) + C. \tag{10}$$

Учитывая начальные условия, получаем

$$\dot{r}^2 = \frac{4Ie}{mv_z}\ln\left(\frac{r}{r_0}\right), \tag{11}$$

где $r_0$ — начальный радиус пучка. В результате второго интегрирования определяем

$$z = \frac{r_0}{2}\sqrt{\frac{m}{Iev_z}}\int\limits_1^{\varepsilon}\frac{d\varepsilon}{\sqrt{\ln(\varepsilon)}}, \tag{12}$$

где $\varepsilon = r/r_0$. С учетом того, что $v_z = \sqrt{2W_0/m}$, перепишем уравнение (12):

$$z = \frac{r_0}{2}\sqrt{\frac{m}{Ie}\sqrt{\frac{m}{2W_0}}} \int\limits_1^{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{\sqrt{\ln(\varepsilon)}}. \tag{13}$$

Таким образом, мы получили зависимость координаты $z$ от радиуса пучка $r$. Будем считать, что электроны из канала вылетают либо параллельно оси $z$, либо параллельно оси канала. Оптимальное расстояние между кристаллом БИС и МКУ будет тогда, когда ширина электрода БИС будет равняться диаметру пучка, т. е. все электроны попадут на электрод БИС. Иначе пучок будет расходиться и нужное количество электронов не попадет на электрод БИС. Тогда уравнение (13) будет иметь вид

$$L = \frac{r_0}{2}\sqrt{\frac{m}{Ie}\sqrt{\frac{m}{2W_0}}} \int\limits_1^{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{\sqrt{\ln(\varepsilon)}}. \tag{14}$$

Средняя энергия $W_0$ определяется из уравнения (1). Интеграл в уравнении (14) не берется в элементарных функциях и вычисляется численными методами. С другой стороны, расстояние должно быть таким, чтобы время движения пучка было больше времени переключения компаратора БИС:

$$L \geqslant \frac{1}{f}\sqrt{\frac{2W_0}{m}}, \tag{15}$$

где $f$ — частота считывания детектируемых частиц. Имея радиус пучка, можно вычислить площадь поперечного сечения и энергию, которая будет попадать на канал, что в дальнейшем необходимо для определения функции отклика детектора. Энергия, которая будет попадать на канал, определяется следующим выражением:

$$\Delta W = Sf(W), \tag{16}$$

где $f(W)$ задается уравнением (1); $S$ — площадь канала БИС.

Ширина дифракционной линии, для дифракции Фраунгофера, будет определяться выражением

$$\Delta H = \frac{2L}{d}\Delta\lambda, \tag{17}$$

где $d$ — диаметр канала МКП; $\Delta\lambda$ — разница длин волн де Бройля для электронов. Учитывая, что $\lambda = h/p$, перепишем уравнение (17):

$$\Delta H = \frac{2L}{d}\frac{h}{\sqrt{2m\Delta W}}. \tag{18}$$

Выразим из (18) $\Delta W$:

$$\Delta W = \frac{1}{2m}\left(\frac{2Lh}{\Delta H d}\right)^2. \tag{19}$$

Разрешающая способность определяется как

$$R = \frac{\Delta W}{W}, \tag{20}$$

где $\Delta W$ — ширина пика на полувысоте; $W$ — энергия, при которой функция (1) максимальна. Исследуя функцию (1) на максимум, определяем энергию $W$:

$$W = A\left(W_f + \frac{4}{3}\Phi\right). \tag{21}$$

Подставив выражение (19) и (21) в (20), получим

$$R = \frac{1}{2m}\left(\frac{2Lh}{\Delta H d}\right)^2 \frac{1}{A\left(W_f + \frac{4}{3}\Phi\right)}. \tag{22}$$

Как видно из выражения (22), ширина входного канала БИС $\Delta H$ должна быть много меньше диаметра канала МКП $d$ для достижения максимальной разрешающей способности. Однако при уменьшении ширины канала БИС будет уменьшаться и число электронов, попавших на канал. Количество электронов, энергия которых находится в диапазоне $\Delta W$, определяется выражением

$$\Delta N = Nf(W)\,\Delta W, \tag{23}$$

где $N$ — количество электронов, вылетевших из канала МКП. Подставляя выражение (16) в (23), получаем

$$\Delta N = NS\,(f(W))^2\,. \tag{24}$$

Поскольку необходимое количество электронов для срабатывания БИС составляет $10^6$, соответственно, $\Delta N \geqslant 10^6$.

Таким образом, полученные выражения дают возможность вычислить оптимальное расстояние между шевронным узлом и кристаллом БИС. Также они позволяют определить ширину и ограничения на ширину входных каналов БИС, что в дальнейшем поможет оптимизировать процесс серийного выпуска МКЧД.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Борискин А.И., Еременко В.М., Мордик С.Н.* Исследование ионно-оптических характеристик лазерного масс-спектрометра с координатно-чувствительным микроэлектронным детектором // ЖТФ. 2008. Т. 78, вып. 7. С. 111–117.
2. *Сидоренко В.П., Прокофьев Ю.В., Мурченко Д.С., Ерёменко В.М., Шелехов А.В.* Координатно-чувствительный детектор заряженных частиц для спектроскопии // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2016. № 4–5. С. 53–60.
3. *Сидоренко В.П., Вербицкий В.Г., Прокофьев Ю.В., Кизяк А.Ю., Николаенко Ю.Е.* СБИС для микроэлектронного координатно-чувствительного детектора приборов элементного анализа материалов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2009. № 2. С. 25–29.
4. *Сидоренко В.П., Вербицкий В.Г., Прокофьев Ю.В.* Схемотехника СБИС для микроэлектронного координатно-чувствительного детектора для элементного анализа материалов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2012. № 4. С. 39–46.
5. *Косуля А.В., Вербицкий В.Г.* Расчет шевронного узла микроэлектронного координатно-чувствительного детектора с двумя микроканальными пластинами // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43, вып. 18. С. 40–46.

6. *Косуля А. В., Вербицкий В. Г.* Энергетический спектр микроканального умножителя с двумя микроканальными пластинами в шевронной сборке // Там же. Вып. 22. С. 104–110.
7. *Беркин А. Б., Васильев В. В.* Математическое моделирование режима усиления импульсного тока в канале микроканальной пластины // ЖТФ. 2008. Т. 78, вып. 2. С. 127–129.
8. *Балдин А. А., Берлев А. И., Кудашкин И. В., Федоров А. Н.* Детектор на основе микроканальных пластин для контроля пространственно-временных характеристик циркулирующего пучка нуклотрона // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 2(186). С. 209–218.
9. *Chung M. S., Everhart T. E.* Simple Calculation of Energy Distribution of Low-Energy Secondary Electrons Emitted from Metals under Electron Bombardment // J. Appl. Phys. 1974. V. 45, No. 2. P. 707–709.
10. *Иванов В. Я.* Численное моделирование быстрых фотодетекторов большой площади // Вестн. СПбГУ. 2011. Сер. 10. Вып. 4. С. 14–31.

Получено 9 марта 2021 г.