

А.Г. Каменев, И.В. Чубинский-Надеждин, И.А. Ефимов  
К.С. Луценко, Н.А. Мартынов, Н.С. Попов

(Институт аналитического приборостроения АН СССР,  
Ленинград)

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТЕКТОРОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Детекторы и системы детектирования потоков заряженных частиц можно разделить по принципу построения на два типа: одноканальные и многоканальные (в том числе позиционно-чувствительные — ПЧД).

Как правило, одноканальные детекторы используются для определения временной зависимости импульсных и квазистационарных потоков регистрируемых частиц (например, времяпролетный масс-спектр, спектр масс или энергий, получаемый при временной магнитной или электрической развертке анализатора спектрометра, поток вторичных частиц в растровом электронном или ионном микроскопе). Величины квазистационарных регистрируемых потоков частиц характеризуются значениями  $10\text{--}10^9$  част/с, а для импульсных потоков —  $1\text{--}10^6$  част/имп при длительности импульсов  $10^{-8}\text{--}10^{-5}$  с.

Многоканальные системы на основе ПЧД используются на выходе энерго/масс-анализаторов с протяженной фокальной плоскостью и обеспечивают снижение порога чувствительности и сокращение времени измерений пространственных зависимостей плотности потока частиц. Характерные размеры рабочей поверхности ПЧД составляют порядка нескольких сантиметров, требуемое пространственное разрешение — от десятков до сотен микрометров, диапазон измеряемых потоков частиц аналогичен приведенному для детекторов одноканального типа.

Требованием высокой чувствительности обусловлено использование в обоих типах детекторов вторично-электронных умножителей (ЗУ), например, микроканальных пластин (МКП) [1-3].

Развитие детекторов для аналитических приборов идет в направлении более полной реализации параметров, которые могут быть обеспечены современными ионно-оптическими схемами приборов. В первую очередь это касается расширения динамического диапазона измерений, повышения быстродействия, использования чисто цифровых режимов регистрации (режим счета частиц) и обработки сигналов. В случае ПЧД актуальными задачами являются также увеличение рабочей поверхности и улучшение пространственного разрешения детектора.

В данной статье представлены результаты исследований двух перспективных, с нашей точки зрения, вариантов построения детекторов: гибридного ЗУ с большим динамическим диапазоном для одноканальных систем регистрации и электронно-оптического ПЧД, ориентированного на использование в электронных и масс-спектрометрах.

**Гибридный электронный умножитель** предназначен для регистрации квазистационарных и импульсных потоков заряженных частиц, изменяющихся в пределах более семи порядков [4]. Он построен на базе сборки МКП и электронно-чувствительной полупроводниковой мишени (ЭПМ), бомбардируемой электронами с выхода МКП.

Принцип работы ЭПМ основан на явлении генерации электронно-дырочных пар в полупроводниковой структуре (например, в *pn*-переходе планарного диода) при бомбардировке ее чувствительной поверхности потоком электронов с энергией порядка нескольких килоэлектронвольт [5]. На *pn*-переход подается напряжение обратного смещения, бомбардирующие его поверхность электроны проникают в обедненную область перехода, где образуют  $10^2$ – $10^3$  пар неравновесных носителей заряда, в зависимости от энергии электронов и конструкции диода.

Дрейф носителей в электрическом поле перехода вызывает ток во внешней цепи, пропорциональный числу образовавшихся носителей. ЭПМ характеризуется коэффициентом усиления  $10^2$ – $10^3$  при энергиях бомбардирующих электронов более 5 кэВ, малым шумом, высоким быстродействием (время отклика порядка единиц наносекунд), линейностью (вплоть до 1–10 А в импульсе), нечувствительностью к большим нагрузкам (средний ток порядка единиц миллиампер) [5].

Последовательная установка МКП и ЭПМ в электронном умножителе позволяет снизить коэффициент усиления МКП при сохранении требуемого высокого коэффициента всего умножителя. Предельная нагрузка ЭУ определяется допустимой плотностью выходного тока МКП ( $0.1$ – $0.3$  мкА/см<sup>2</sup>) [1], и при коэффициенте усиления МКП около  $10^4$  допустимая плотность потока регистрируемых частиц на входе ЭУ достигает  $10^8$  част/с·см<sup>2</sup>. При этом общее усиление ЭУ может составлять около  $10^7$ , что позволяет использовать режим счета отдельных частиц.

Экспериментально исследовались характеристики базового варианта гибридного умножителя, содержащего две микроканальные пластины диаметром 23 мм, сопротивлением около 70 МОм, рабочей площадью 1.3 см<sup>2</sup>. Перед входом первой МКП с помощью сеточного электрода создается электрическое поле для более полного сбора вторичных электронов, что способствует повышению эффективности регистрации [6]. Ускоряющее напряжение между МКП и ЭПМ составляет 8 кВ, напряжение обратного смещения диода ЭПМ — 100 В, емкость диода — менее 20 пФ. В связи с малой длительностью и большой частотой следования выходных импульсов умножителя сигнал целесообразно предавать по линии передачи с согласованной нагрузкой 50–100 Ом.

Результаты экспериментальных исследований умножителя при работе в режиме счета показаны в табл. 1. Приведенные значения допустимой нагрузки соответствуют спаду коэффициента усиления на 2 %.

Модифицированный вариант ЭУ, предназначенный для использования в электронном спектрометре, содержит систему электродов для преобразования узкого (0.5–5 мм) пучка электронов, прошедшего через выходную щелевую диафрагму энергоанализатора, — в более широкий и снижения плотности выходного тока МКП. Предельная допустимая загрузка ЭУ — не менее  $10^7$  имп/с при коэффициенте усиления  $2 \cdot 10^7$ .

Для регистрации пучков с поперечным сечением менее  $1-2 \text{ мм}^2$  целесообразно установить перед входом ЭУ дополнительный динод-конвертор, вторичные электроны с которого более равномерно распределяются по входной поверхности первой МКП.

В режиме линейного усиления импульсных сигналов, что соответствует условиям измерения времяпролетных спектров, коэффициент усиления гибридного ЭУ сохраняет постоянное значение (например,  $2 \cdot 10^6$ ) вплоть до значения выходного импульсного тока 0.8 А (сопротивление нагрузки ЭУ равно 50 Ом) при длительности импульсов до 500 нс и среднем выходном токе более 0.2 мА. Большой коэффициент усиления умножителя позволяет регистрировать в этом режиме как одиночные частицы, так и пакеты, содержащие более  $10^6$  частиц.

В электронно-оптических ПЧД используется преобразование усиленного сборки МКП потока электронов в свет на люминесцентном экране с дальнейшей регистрацией светового потока позиционно-чувствительным фотоприемником, например, фоточувствительным прибором с зарядовой связью (ПЗС) [7, 8]. Основными достоинствами таких ПЧД следует считать сравни-

Таблица 1

Параметр	Значение параметра	Условия измерения
Допустимая нагрузка	До $5 \cdot 10^7$ имп/с до $10^7$ имп/с	Коэффициент усиления $10^7$ коэффициент усиления $5 \cdot 10^7$
Скорость счета темновых импульсов	Менее 1 имп/с	—
Максимальный коэффициент усиления	$2 \cdot 10^9$	Загрузка до $3 \cdot 10^5$ имп/с
Длительность импульсной характеристики на 0.5 высоты	Менее 3 нс	Сопротивление нагрузки 50 Ом
Эффективность регистрации	$0.75 \div 0.8$	Энергия электронов $150 \div 500$ эВ

тельно высокое пространственное разрешение и возможность регулировки чувствительности детектора для регистрации потоков частиц, изменяющихся в пределах нескольких порядков. Выходной сигнал ПЧД формируется при последовательном опросе элементов (ячеек) ПЗС.

В аналоговом режиме работы детектора период опроса массива элементов ПЗС намного превышает средний интервал между регистрируемыми частицами, в ячейках ПЗС происходит интегрирование (накопление) фотоиндуцированных носителей, и выходной сигнал пропорционален среднему числу частиц, пришедших на вход ПЧД за время накопления. Преимуществом аналогового режима является возможность регулировки чувствительности детектора путем изменения коэффициента усиления сборки МКП.

В режиме счета отдельных частиц период опроса ПЗС намного меньше среднего интервала между частицами, выходной сигнал от каждой частицы регистрируется как событие с адресом, определяемым по номеру опрашиваемой ячейки ПЗС. В режиме счета обеспечивается большая стабильность, меньшие шумы и лучшее пространственное разрешение (при электронной обработке с определением центра тяжести распределения выходного сигнала от каждой частицы).

Для расчета чувствительности и шумовых характеристик ПЧД в аналоговом режиме использована эквивалентная схема, в которой детектор представлен двумя последовательными каскадами преобразования. Первый каскад включает вторично-электронное усиление в МКП, электронно-оптическое преобразование, передачу (с изменением масштаба) оптического изображения на ПЗС, преобразование его в распределение фотоиндуцированных носителей с учетом искажения этого распределения при опросе ПЗС (из-за неэффективности переноса). Во втором каскаде происходит пространственная дискретизация распределения носителей структурой ячеек ПЗС.

Пространственное размытие сигнала в первом каскаде детектора может быть описано гауссоидной шириной на полувысоте  $R$ . Тогда функция пространственного отклика ПЧД, т.е. распределение выходного сигнала в ячейках ПЗС, соответствующее одиночной частице на входе детектора, имеет вид:

$$g(m, n) = \frac{K}{4} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{2m \Delta x + a}{1,2R} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{2m \Delta x - a}{1,2R} \right) \right] \times \\ \times \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{2n \Delta y + b}{1,2R} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{2n \Delta y - b}{1,2R} \right) \right],$$

где  $g(m, n)$  — выходной сигнал  $(m, n)$ -й ячейки ПЗС, выраженный в числе фотоиндуцированных носителей;  $K$  — коэффициент передачи детектора (носителей/част);  $m, n$  — номер ячейки, отсчитанный от центра распределения вдоль направления строк, столбцов;  $\Delta x, \Delta y$  — шаг структуры столбцов,

строк;  $a$ ,  $b$  — размеры ячейки вдоль направления строк, столбцов; функция  $\text{erf}(z) = 2\sqrt{\pi} \int_0^z e^{-t^2} dt$ .

Коэффициент  $K = GL\epsilon$ , где  $G$  — коэффициент усиления сборки МКП;  $L$  — светоотдача люминесцентного экрана (фотон/электрон);  $\tau$  — коэффициент трансмиссии оптической системы;  $\epsilon$  — квантовая эффективность ПЗС.

При работе в режиме счета необходимая эффективность обнаружения сигналов одиночных частиц достигается при  $K = 10^4 - 10^5$ . Это возможно в случае использования светосильных ( $\tau > 10^{-3}$ ) оптических систем, например, на основе волоконно-оптических элементов с большой числовой апертурой.

В аналоговом режиме работы ПЧД пространственное разрешение (на 0.5 высоты) составляет приблизительно  $R/M$  ( $a$ ,  $b \ll R$ ), где  $M$  — масштаб передачи изображения оптической системой (при  $M < 1$  изображение уменьшено). В этом режиме работы отношение сигнал/шум  $\phi$  на выходе детектора связано с плотностью потока регистрируемых частиц  $J$ , временем накопления  $T$  и параметрами детектора следующим образом:

$$\phi \approx [\pi jTab]^{1/2} [M^2 NF(1.2a/R)F(1.2b/R)]^{1/2},$$

где  $N$  — коэффициент шума МКП [9], а функция  $F(z)$  имеет вид:

$$F(z) = (1/z) [\exp(-z^2) + z\sqrt{\pi} \text{erf}(z) - 1].$$

Выражение для  $\phi$  может использоваться в случае одномерных и двухмерных ПЧД электронно-оптического типа в диапазоне значений произведения  $jT = 10 - 10^7$  при следующих условиях: а) динамический диапазон применяемых ПЗС не менее  $10^3$ , б) чувствительность детектора регулируется путем изменения коэффициента усиления МКП.

Были проведены экспериментальные исследования характеристик двух вариантов ПЧД. Вариант 1 построен на базе фокона ( $M = 0.25$ ) и волоконно-оптической линии передачи изображения. Вариант 2 содержит объектив с относительным отверстием 2:1 ( $M = 0.33$ ). Светосила обоих вариантов оптических систем практически одинакова ( $\tau \approx 2 \cdot 10^{-3}$ ). В ПЧД используются сборки из двух МКП и матричные фоточувствительные ПЗС К1200ЦМ1.

Детекторы имеют входную поверхность прямоугольной формы, позиционную чувствительность — вдоль направления большей стороны с интегрированием сигнала вдоль направления меньшей стороны.

ПЧД могут работать как в аналоговом режиме, так и в режиме счета. Канал регистрации в режиме счета содержит цифровое устройство, реализующее алгоритм поиска центра рас-

пределения выходного сигнала в ячейках ПЗС. Центр определяется с дискретностью, равной половине шага структуры ПЗС, при скорости обработки до  $2 \cdot 10^6$  событий/с.

Форма выходного сигнала при регистрации одиночных частиц хорошо согласуется с рассчитанной в предположении гауссовской формы функции размытия первого каскада эквивалентной схемы ПЧД для значений сигналов в ячейке ПЗС, превышающих 10 % от значения в максимуме распределения.

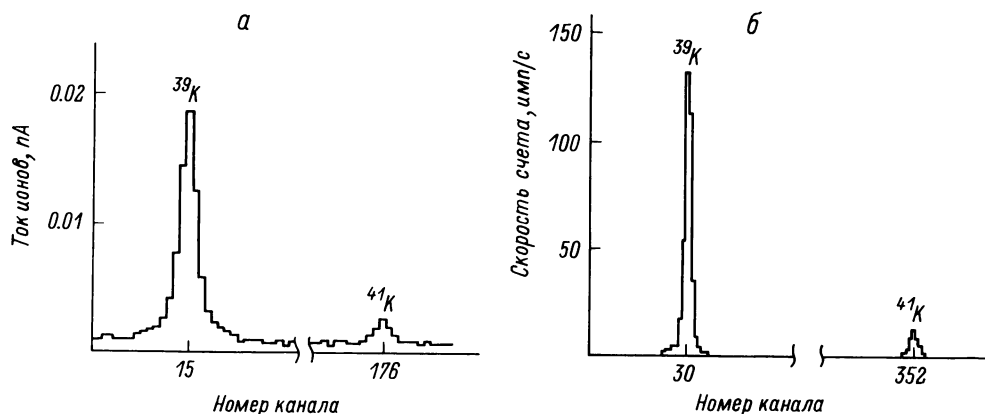
Измеренные значения отношения сигнал/шум  $\phi$  совпадают с расчетными (отклонение не более  $\pm 10\%$  в пределах всего рабочего диапазона входных потоков).

Параметры обоих вариантов ПЧД представлены в табл. 2. Рисунок иллюстрирует пример использования детектора (вариант 2) в магнитном статическом масс-спектрометре. Масс-спектр изотопов калия зарегистрирован в двух режимах работы ПЧД. Более высокое разрешение достигнуто в режиме счета, в аналоговом режиме регистрировался приблизительно в  $10^3$  больший поток ионов.

Результаты исследований характеристик гибридного ЭУ показывают, что его использование в составе чисто цифровой системы регистрации потоков заряженных частиц в диапазоне  $1-10^8$  част/с позволяет избежать необходимых ранее переключений режимов работы и/или чувствительности детектора. При измерении импульсных потоков частиц в линейном режиме динамический диапазон составляет не менее  $10^6$ .

Таблица 2

Параметр	Вариант 1	Вариант 2	
		Аналоговый режим	Режим счета
Размеры чувствительной поверхности	$16 \times 8 \text{ мм}^2$	$14 \times 8 \text{ мм}^2$	
Число элементов дискретизации	200	220	440
Пространственное разрешение	0.2 мм	0.11 мм	Менее 0.06 мм
Динамический диапазон измерений	Около $10^3$		Более $10^4$
Пределы рабочего диапазона плотности потока частиц	$2 \div 10^7 \text{ част} \cdot \text{с}^{-1} \text{ мм}^{-2}$		Не более $10^3 \text{ част} \cdot \text{с}^{-1} \text{ мм}^{-2}$
Время накопления	0.05 ÷ 10 с		-



Спектр изотопов калия, полученный с помощью ПЧД в двух режимах работы: а — аналоговый режим, ширина канала 60 мкм; б — режим счета, ширина канала 30 мкм

Характеристики электронно-оптического ПЧД свидетельствуют о возможности его применения в электронном спектрометре с энергоанализатором типа полусферического дефлектора, а также в изотопном масс-спектрометре, например, при анализе ультрамалых проб. Ближайшей перспективой развития ПЧД следует считать расширение диапазона потоков частиц, регистрируемых в режиме счета, и увеличение размеров входной поверхности для использования в масс-спектрометрах типа Маттауха—Герцога.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Айнбунд М.Р., Поленов Б.В. Вторично-электронные умножители открытого типа и их применение. — М.: Энергоиздат, 1981.
2. Рихтер Л., Хо В. // Приб. научн. исслед. — 1986. — № 8. — С. 3-19.
3. Seach M.P. // Journ. Electr. Rel. Phen. — 1990. — V. 50. — P. 137-157.
4. Чубинский-Надеждин И.В., Попов Н.С., Каменев А.Г., Лебедев Г.В. Электронный умножитель с большим динамическим диапазоном. — Препринт № 32, НТО АН СССР, 1990.
5. Силцарс А. и др. // ТИИЭР. — 1974. — № 8. — С. 93-139.
6. Frazer G.W. // Nucl. Instr. Meth. — 1983. — V. 206. — P. 445-449.
7. Drummond I.W., Cooper T.A., Street F.J. // Spectrochim. Acta. — 1985. — V. 40B, N 5, 6. — P. 773-779.

8. *Murphy D., Mauersberger K.* // Int. Journ. Mass Spectr. Ion Proc. — 1987. — 76, N 1. — P. 85-93.

9. *Шаген П.* Электронно-оптические преобразователи с канальным электронным умножением. — В кн.: Достижения в технике передачи и воспроизведения изображений / Под ред. Кейзана Б. Пер. с англ., Т. 1. — М.: Мир, 1978. — С. 13-84.

*Рукопись поступила 16.10.90*