

УДК 520.3

Координато-чувствительный светоприемник, работающий в режиме счета фотонов

В. М. Балебанов, Э. А. Витриченко, В. В. Войцехович, С. К. Кулов,
А. В. Ламанов, Ю. А. Розэ, А. Н. Цаголов

Исследован координато-чувствительный светоприемник «Козерог», работающий в режиме счета фотонов. Он состоит из однокамерного ЭОП, двух шевронных МКП и квадрантного анода. Темновой ток для каждого из анодов составляет 100 имп/с, линейная часть зависимости свет—сигнал простирается до $6 \cdot 10^5$ имп/с, координатная чувствительность равна 12 мкм. С помощью 60-см телескопа можно наблюдать звезды до 10^m .

THE POSITION-SENSITIVE PHOTON-COUNTING PHOTODETECTOR, by Balebanov V. M., Vitrichenko E. A., Vojtsekhovich V. V., Kulov S. K., Lamanov A. V., Rozé Yu. A., Tsagolov A. N.—The position-sensitive photon-counting photodetector «Kozerog» is investigated. The detector consists of optoelectronic converter, two microchannel plates and quadrant anode. The dark current is 100 imp/s per quadrant. The linearity is up to $6 \cdot 10^5$ imp/s. The coordinate sensitivity is 12 μm . The lower limit is 10^m for 60 cm telescope.

В физике и астрономии есть задачи, в которых необходимо определять координаты светового пятна с максимальной квантовой эффективностью. Примеры таких задач — автоматизация наведения на светлое или на темное пятно в лабораторных приборах, определение рассогласования при наведении и гидировании телескопа по звезде, определение и компенсация дрожания звезды в адаптивном телескопе. Целью нашей работы является исследование свойств квадрантного светоприемника для видимой области спектра. Подобный прибор, работающий в аналоговом режиме, описан в [1]. Здесь исследуется новый прибор с большим докоммутационным усилением, работающий в режиме счета фотонов.

Схема устройства прибора показана на рис. 1. На фотокатод (1) оптической системой переносится изображение светового пятна. Фокусирующий электрод (2) строит это изображение из электронов на входе первой из двух МКП (3), образующих шевронную систему. МКП усиливают электронное изображение в 10^7 раз и переносят его в плоскость анодов (4), имеющих вид квадрантов. Между квадрантами есть зазор шириной 0.15 мм, влияние которого необходимо учитывать при малом и сложном световом пятне. За квадрантным анодом расположен заземленный электрод (5). На входе второй МКП установлена диафрагма (6) диаметром 10 мм.

Диаметры каналов МКП — 9–10 мкм, шаг структуры — 11–12 мкм, сопротивление в вакууме — 10^7 – 10^8 Ом. Материал МКП — восстановленное в водороде свинцово-силикатное стекло С-87-2. Толщина пластин — 0.5 мм, зазор между ними — 0.3 мм, разрешение — 40 пар линий на 1 мм. Фотокатод мультищелочной. Длина прибора без контактов составляет 100 мм, внешний диаметр колбы без штенгелей — 35 мм, масса — 60 г.

Прибор питается через делитель напряжения с заземлением анодов. Разность потенциалов следующая (в В): фотокатод — первая МКП — 1000, вход и выход первой МКП — 1000, зазор МКП — 500, вход и выход второй МКП — 1000, выход второй МКП — аноды — 750.

Регистрация числа импульсов с каждого анода проводится через четыре импульсных усилителя. Темновой ток составляет примерно 100 имп/с при температуре $+14^\circ\text{C}$, линейная часть характеристики

свет — сигнал простирается до отсчета $6 \cdot 10^5$ имп/с. Трудность такой регистрации заключается в том, что передний фронт импульса, поступающего из прибора в усилитель, имеет длительность всего 2 нс при амплитуде 10 мВ. Таким образом, возникает необходимость в специальной разработке усилителей с полосой частот более 500 МГц.

Результаты исследования прибора показаны на рис. 2. Здесь кривая 1 показывает координатную чувствительность прибора. По оси

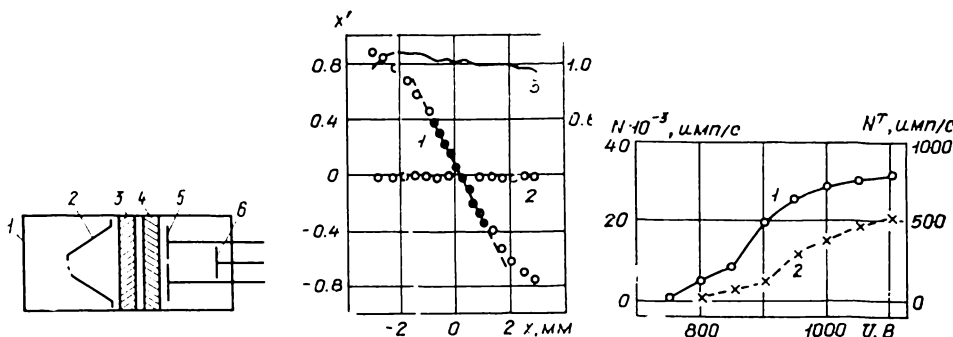


Рис. 1. Схема устройства прибора «Козерог»: 1 — мультищелевой фотокатод; 2 — фокусирующий электрод; 3 — шевронная система из двух МКП; 4 — аноды; 5 — заземленный электрод; 6 — диафрагма

Рис. 2. Результаты исследования прибора «Козерог»: 1 — зависимость x' от x ; 2 — зависимость y' от x ; 3 — неравномерность чувствительности фотокатода (шкала ординат справа)

Рис. 3. Зависимость числа импульсов от напряжения на каждой МКП (кривая 1, шкала слева) и темнового тока от этого напряжения (кривая 2, шкала справа)

абсцисс отложена величина x перемещения светового пятна по фотокатоду. Пятно имело форму квадрата 3.5×3.5 мм. По оси ординат отложена величина x' , определяемая по формуле

$$x' = [(N_1 - N_1^T) + (N_4 - N_4^T) - (N_2 - N_2^T) - (N_3 - N_3^T)] / \left[\sum_{i=1}^4 (N_i - N_i^T) \right], \quad (1)$$

где N_i — число импульсов от каждого из четырех квадрантов; N_i^T — темновой ток, $i=1, \dots, 4$.

Как справедливо заметил рецензент, формула (1) свидетельствует о зависимости точности определения координаты от числа импульсов, пришедших в плоскость анодов. В общем случае эта зависимость имеет вид:

$$\sigma_{x'} = qa/(C/\Pi), \quad (2)$$

где q — множитель порядка единицы, зависящий от формы светового пятна; a — характерный диаметр светового пятна; C/Π — отношение сигнала к шуму. В описываемом эксперименте $q=1$, $a=3.5$ мм, $C=3 \cdot 10^5$ импульсов (сумма фотоэлектронов с четырех квадрантов за время экспозиции 1 с). Источником ошибок будем считать только пуассоновский шум самого сигнала: $\Pi = \sqrt{C}$. Тогда теоретическая точность определения координаты x' составит: $\sigma_{x'}^T = 6.5$ мкм.

Оценим эту точность экспериментально с помощью рис. 2. Проведем методом наименьших квадратов прямую через 10 точек, показанных на рис. 2 черными кружками. Средняя квадратичная ошибка проведения данной прямой составит для координаты x величину $\sigma_x = 12$ мкм. Эту ошибку примем за экспериментальную координатную погрешность прибора.

Сравним экспериментальную и теоретические погрешности. Уравнение прямой, проведенной методом наименьших квадратов и показанной на рис. 2 штриховой линией, имеет вид: $x' = 0.053 - 0.406x$,

откуда после дифференцирования получаем экспериментальную погрешность $\sigma_{x'}^3 = 0.406\sigma_x = 4.9$ мкм. Расхождение $\sigma_{x'}^3$ и $\sigma_{x'}^T$ всего на 25 % можно считать удовлетворительным согласием теории и эксперимента. В свою очередь, это означает, что шум действительно связан только с пуассоновским шумом сигнала.

Кривая 2 на рис. 2 показывает зависимость y' от координаты x . Координата y' вычислялась по формуле, аналогичной (1). Кривая 2 демонстрирует независимость y' от x' и разброс значений y' совпадает с координатной чувствительностью.

Кривая 3 на рис. 2 показывает зависимость от координаты x суммы импульсов от всех четырех анодов. Эта сумма нормируется на величину сумм при $x=0$ (на рисунке шкала ординат справа). Кривая 3 используется для оценки неравномерности чувствительности фотокатода. По ней можно заключить, что в изученном диапазоне величины x (± 3 мм) эта неравномерность составляет ± 2 %.

На рис. 3 показана зависимость числа импульсов от напряжения питания на МКП (кривая 1) и темнового числа импульсов от этого же напряжения (кривая 2). На кривой 1 заметно счетное плато, которое начинается от напряжения 1 кВ. Важно было бы изучить счетные характеристики для больших напряжений, но при этом возникает риск пробоя прибора. Сигнал слабо зависит от разности потенциалов фотокатод — вход первой МКП и выход второй МКП — анод.

Нижний предел звездной величины, которую можно наблюдать с помощью 60-см телескопа, оценим при отношении $S/\Pi = 1$, причем за шум примем темновой ток при напряжении на МКП, равном 1 кВ (рис. 3, кривая 2). Это составит 10^n . Верхний предел определим по началу нелинейной части, которая наступает при $6 \cdot 10^5$ имп/с. Для того же телескопа это составит 3^m .

Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания.

1. Балебанов В. М., Витриченко Э. А., Ламанов А. В. и др. Новый квадрантный светоприемник для астрономии // Астрон. циркуляр.— 1986.— № 1425.— С. 1—2.

Ин-т космич. исследований АН СССР,
Москва

Поступила в редакцию 25.05.87,
после доработки 17.07.87