

УДК 520.622

## КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР ВЫСОКОГО ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ С АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫМ ФОТОКАТОДОМ

© 2009 В. Г. де-Бур<sup>1</sup>, Г. М. Бескин<sup>1</sup>, С. В. Карпов<sup>1</sup>,  
В. Л. Плохотниченко<sup>1</sup>, А. С. Терехов<sup>2</sup>, С. С. Косолобов<sup>2</sup>, Г. Э. Шайблер<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия, 630090

Поступила в редакцию 25 февраля 2009 г.; принята в печать 25 марта 2009 г.

Разработана конструкция и изготовлены образцы координатно-чувствительного детектора с фотокатодом из арсенида галлия — вакуумного фотоэлектронного прибора с микроканальным усилением и многоэлементным коллектором. Квантовая эффективность фотокатода достигает в максимуме 48% при диапазоне чувствительности от 350 до 900 нм. Блок микроканального усиления состоит из двух пластин с ионно-барьерной пленкой на входе, координаты электронных лавин определяются с помощью 16-элементного коллектора. Детектор имеет пространственное разрешение 25 мкм при диаметре рабочего поля 18 мм и временном разрешении около 1 мкс.

Ключевые слова: *методы астрономических наблюдений, приборы и инструменты*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для исследования нестационарных процессов в астрофизике необходимо использовать координатно-чувствительные детекторы (КЧД) с высоким временным разрешением, способные регистрировать отдельные фотоны. Эти приборы должны иметь следующие очевидные характеристики:

- высокую квантовую эффективность,
- высокое временное разрешение,
- низкий уровень шумов и собственного темнового фона,
- хорошее пространственное разрешение,
- приемлемую стоимость.

Широко распространенные в наше время панорамные приемники излучения на основе ПЗС-матриц (CCD) (см. Табл. 1) имеют очень высокую квантовую эффективность (до 90%), но и высокий уровень шумов, не позволяющий регистрировать единичные фотоны, а также большое время считывания. Это ограничивает их временное разрешение и диапазон яркостей регистрируемого излучения. Например, даже используя самые большие оптические телескопы (диаметром 6–8 м), невозможно

наблюдать объекты слабее 14–16 звездной величины с миллисекундным временным разрешением.

ПЗС-матрицы с электронной бомбардировкой (ЕВССД) [1] способны регистрировать отдельные фотоны, но их квантовая эффективность, ограничиваемая чувствительностью фотокатода, как правило, не превышает 20%. Эти приборы также имеют большое время считывания и к тому же очень дороги и ненадежны.

ПЗС-матрицы с внутренним усилением (ЕМССД) [2] регистрируют отдельные фотоны с очень высокой квантовой эффективностью (до 90%), но необходимость считывать весь кадр ограничивает их временное разрешение миллисекундами даже при уменьшении числа элементов.

Детекторы на основе эффектов сверхпроводимости (STJ, TES) [3, 4] в принципе имеют очень высокую квантовую эффективность (до 90%), но на практике она оказывается на порядок ниже. Предельная скорость счета часто ограничивается значениями несколько тысяч имп/с, число элементов пока не превышает 9–16, а необходимость охлаждения детекторов до ультранизких температур делает их чрезвычайно дорогими.

Лавинные фотодиоды (APD) и матрицы на их основе [5] имеют высокую квантовую эффективность (до 80%) и предельную скорость счета до  $10^6$  имп/с, они относительно просты в работе, но

Таблица 1. Сравнение светоприемников разных типов

Тип детектора	CCD	EBCCD	EMCCD	STJ & TES	APD array	КЧД (PSD)
Квантовая эффективность	80%	20%	60%	30%	60%	35%
Временное разрешение	> 1 мс	> 1 мс	1 мс	> 1 мкс	< 1 мкс	< 1 мкс
Число элементов изображения	> 10 <sup>6</sup>	> 10 <sup>6</sup>	10 <sup>5</sup>	до 36	до 64	10 <sup>6</sup>
Регистрация отдельных квантов	да	да	нет	да	да	да
Стоимость, тысячи евро	40	60	30	1000	50	15

все еще состоят из небольшого числа элементов. Попытки увеличить их количество приводят к увеличению стоимости приборов и уменьшению квантовой эффективности.

Координатно-чувствительные детекторы (КЧД), в английской транскрипции position sensitive detector (PSD), — вакуумные фотоэлектронные приборы с микроканальным усилением и многоэлементным коллектором, сочетают высокую чувствительность и предельную скорость счета, оставаясь относительно несложными и надежными в работе.

Для сравнения характеристики всех упомянутых приемников сведены в таблицу, из которой видно, что по совокупности параметров КЧД являются оптимальными детекторами для исследований с высоким временным разрешением.

Ранее нами был описан КЧД с мультищелочным фотокатодом и квадрантным коллектором [6]. В настоящей работе представлен КЧД принципиально новой конструкции: бипланар с фотокатодом из арсенида галлия и многоэлементным коллектором. Новый КЧД имеет несколько меньшую чувствительную поверхность (диаметром 18 мм), но большую квантовую эффективность и его спектральный диапазон простирается вплоть до 900 нм. Темновой фон прибора не превышает 2000 имп/с на всю площадь при охлаждении до температур ниже –20С. Пространственное разрешение составляет 25 мкм, мертвое время около 1 мкс.

Главными положительными особенностями разработанного прибора являются его повышенная квантовая эффективность и более высокое пространственное разрешение. Заметим, что прилагая сильное электростатическое поле к фотокатоду можно дополнительно увеличить его чувствительность. В лабораторных экспериментах удавалось достичь значения до 60–70%. Этот результат открывает перспективы дальнейшего улучшения характеристик описанного прибора.

## 2. КОНСТРУКЦИЯ КЧД

Технология изготовления высокочувствительных арсенид-галлиевых фотокатодов разработана в Институте Физики Полупроводников СО РАН [7, 8]. С их использованием в ИФП сконструированы ЭОП и ФЭУ с микроканальным усилением. Накопленный опыт позволил разработать и изготовить КЧД, первые же действующие экземпляры которого обладали необходимыми параметрами и достаточной надежностью. Схематическое изображение КЧД приведено на Рис. 1.

На внутренней поверхности входного стеклянного диска методом эпитаксиального осаждения нанесен фотокатод. На расстоянии 0.3 мм от него расположена входная поверхность первой микроканальной пластины (МКП), покрытая ионнобарьерной пленкой из двуокиси алюминия толщиной 7 нм. При напряжении 800 В на этом промежутке практически все фотоэлектроны проходят через алюминиевую пленку и часть из них попадает в каналы МКП, а диаметр кружка их рассеяния не превышает 15 мкм. В приборе используются пластины типа МКПО 25-6У, имеющие каналы диаметром 6 мкм, расположенные под углом около 12 градусов к нормали поверхности МКП. Общее сопротивление МКП составляет 200–300 МОм при сопротивлении контактных электродов не более 100 Ом.

Промежуток между первой и второй МКП, в котором расположено металлическое кольцо, составляет 30 мкм. При этом лавина электронов, размноженных в одном канале первой МКП, расширяется на входе во вторую МКП на 7–10 ее каналов. При усилении на первой МКП около 10<sup>3</sup> в каналы второй МКП попадают лавины, насчитывающие несколько сотен электронов, что приводит к насыщению размножения и формированию пика амплитудного распределения одноэлектронных импульсов.

Вылетающие из блока МКП электронные лавины при попадании на анод рассеиваются до размеров 8–10 мм, что необходимо для достижения довольно высокого пространственного разрешения

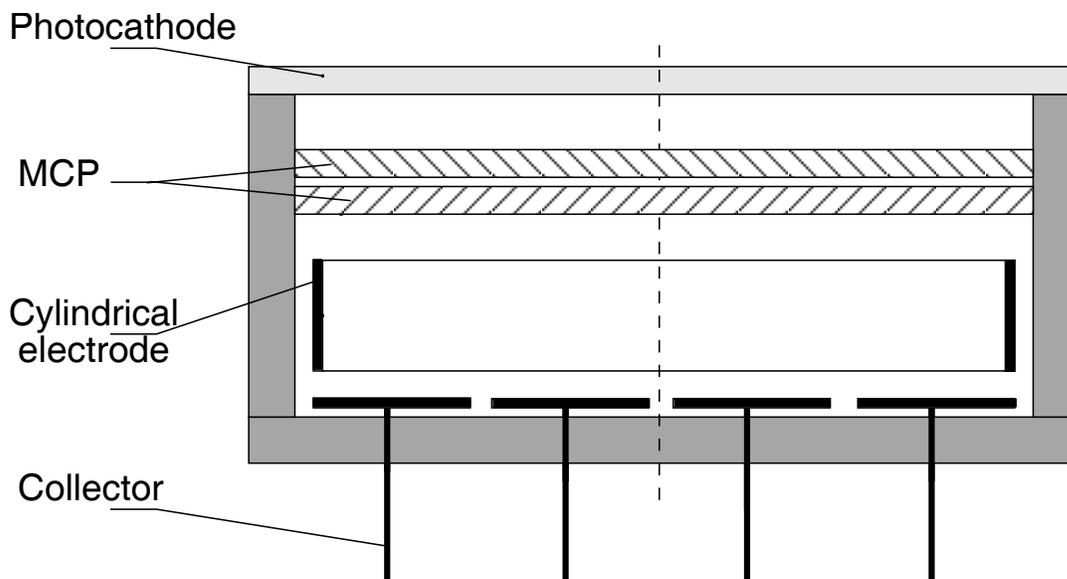


Рис. 1. Схематическое изображение КЧД.

(см. ниже). Цилиндрический электрод, который находится между микроканальными пластинами и анодом, формирует поле дрейфа лавин и предотвращает попадание электронов на боковые стенки КЧД и нерабочие области коллектора.

Характерной особенностью всех КЧД, в которых заряды электронных лавин делятся на элементах коллектора, является относительно большое расстояние между выходом МКП и коллектором, составляющее в данном приборе 13 мм. Оно и обеспечивает рассеяние электронных лавин до требуемых размеров. Существование разгонных промежутков между электродами приводит к тому, что характеристики прибора зависят от ориентации в магнитном поле Земли, что, в частности, выражается в смещении изображения как целого. К искажениям изображения могут приводить не изучавшиеся нами нестабильности зарядочувствительных усилителей. Однако оно не приводит к существенному ухудшению пространственного разрешения (см. ниже). Тем не менее, поскольку функцией КЧД является получение временных характеристик потоков фотонов прежде всего для точечных объектов, то их калибровка по опорным звездам позволяет учесть все нестабильности интегрально (совместно), при обработке накопленных фотонных листов.

Корпус прибора изготовлен из металла и керамики, его диаметр равен 32 мм, длина с выводами — 23 мм (Рис. 2).

Фотокатод расположен на глубине около 3.5 мм от передней плоскости — такова толщина входного стеклянного окна. Металлические лепестки на боковой поверхности служат для подачи напряжений

на электроды КЧД. Напряжения распределяются следующим образом: между фотокатодом и входом блока МКП — до 800 В, между входом и выходом блока МКП — до 2200 В, между выходом блока МКП и коллектором — до 150 В. Потенциал коллектора близок к нулю, а его максимум на фотокатод — до ( $-3000$ ) В.

Схематическое изображение 16-элементного коллектора, поясняющее его работу, приведено на Рис. 3. Коллектор состоит из 4 квадратных центральных элементов со стороной 5.5 мм и 12 наружных со скругленной периферией. Пунктирная линия на рисунке показывает рабочую область коллектора, за пределами которой точность определения координат резко падает, сторона этого скругленного квадрата составляет около 18 мм.

Соотношение размеров электронных облаков (заштрихованные кружки) и электродов коллектора таково, что лавина, как правило, попадает в основном на 4 смежные элемента коллектора, и координаты зарегистрированного события определяются по соотношению приходящихся на них зарядов (Рис. 3). Очевидно, что в случае одновременного прихода двух и более лавин, их положения можно определить лишь в случае попадания на разные электроды.

Оценим предельно достижимое пространственное разрешение для случая, когда центр электронной лавины попадает в центр группы из 4 соседних электродов. Если суммарный заряд лавины —  $10^6$  электронов, то на каждый элемент попадает 250000 электронов. Погрешность



Рис. 2. Внешний вид КЧД.

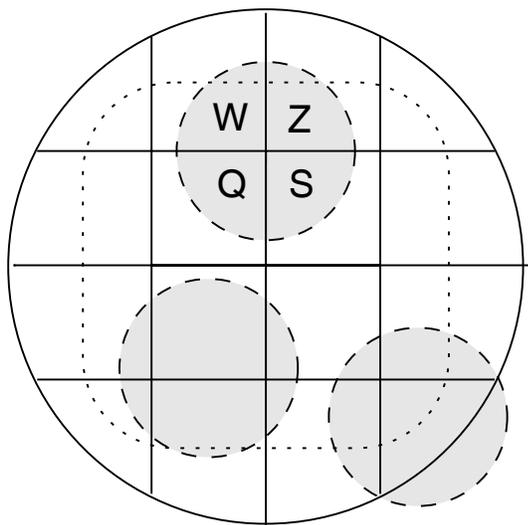


Рис. 3. Схема 16-элементного коллектора с электронными облаками. W,Z,S,Q — значения величин зарядов на отдельных электродах. Пунктир ограничивает рабочую область коллектора.

определения заряда складывается из двух статистически независимых составляющих — статистического шума заряда (близкого к пуассоновскому) и шума зарядочувствительных усилителей (ЗЧУ). В приведенном примере они составят соответственно 500 и 300 электронов (согласно

паспортным данным ЗЧУ). Совокупная среднеквадратичная ошибка равна 600 электронам. Так как координаты центра лавины определяются из соотношения [6]:  $Y=(W+Z)/(W+Z+S+Q)$  и  $X=(S+Z)/(W+Z+S+Q)$ , соответственно их погрешности  $\delta Y$  и  $\delta X \sim 10^{-3}$ , а размер лавины около 10 мм, то легко видеть, что погрешность измерений составляет примерно 10 мкм.

Общее поле, в котором могут быть измерены центры лавин имеет размер около 18 мм, т.е. на нем помещается порядка 1800 элементов разрешения по каждой координате и общее их количество порядка  $3 \times 10^6$ .

Реальное пространственное разрешение несколько хуже по двум основным причинам: рассеяния фотоэлектронов на промежутке фотокатод-МКП и шумов умножения блока МКП. В результате оно составило около 25 мкм, что дает размер поля около  $700 \times 700$  элементов разрешения.

Важно подчеркнуть, что эти характеристики достигнуты при относительно невысоком усилении блока МКП ( $10^6$ ) и высокой предельной скорости счета ( $10^5$  имп/с), обеспечивающих достаточно длительное время жизни прибора — несколько тысяч часов экспозиции без деградации фотокатода.

КЧД может работать в двух вариантах: при независимом измерении зарядов на всех 16 электродах с максимальным пространственным разре-

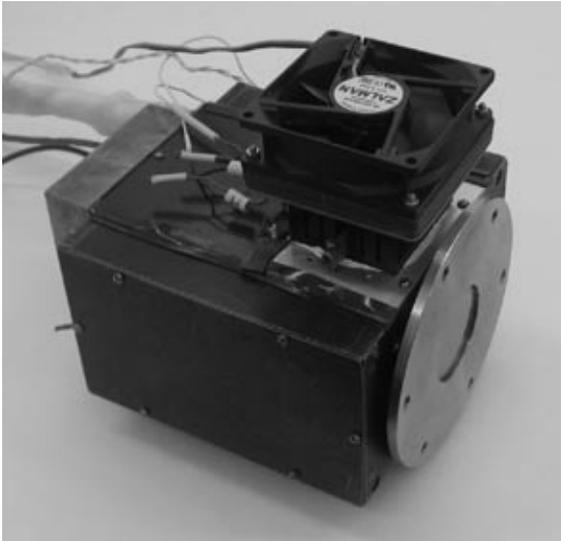


Рис. 4. Фотоприемное устройство.

шением, и при объединении 4 элементов в каждом из секторов. Во втором случае коллектор становится эквивалентным квадрантному электрически. В данной работе представлены результаты, полученные, как правило, в этом упрощенном варианте.

### 3. КОНСТРУКЦИЯ ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА

Для обеспечения функционирования КЧД было создано соответствующее обрамление в виде фотоприемного устройства (ФПУ). ФПУ в основных своих чертах подобно описанному ранее [6] и показано на Рис. 4. Диаметр входного фланца 130 мм, высота (вместе с вентилятором) и длина всего устройства составляют около 230 мм.

В состав ФПУ входят следующие основные элементы:

- внешний корпус с герметичным входным окном и осушителем внутри;
- термоэлектрический холодильник, соединенный с внутренним корпусом, в котором находится КЧД и датчик температуры;
- зарядо-чувствительные усилители (ЗЧУ), усиливающие зарядовые импульсы на электродах коллектора;
- аналого-цифровые преобразователи (АЦП), преобразующие усиленные сигналы в цифровой код;
- дискриминатор, управляющий работой АЦП и чтением полученных данных;

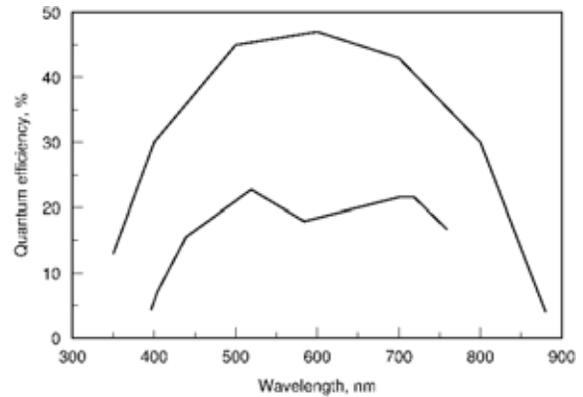


Рис. 5. Квантовая эффективность КЧД. Верхняя кривая — чувствительность катода в режиме измерения фототока. Нижняя — чувствительность всего детектора в счетном режиме.

- плата управления работой ФПУ, делитель напряжений питания КЧД и фильтры питания.

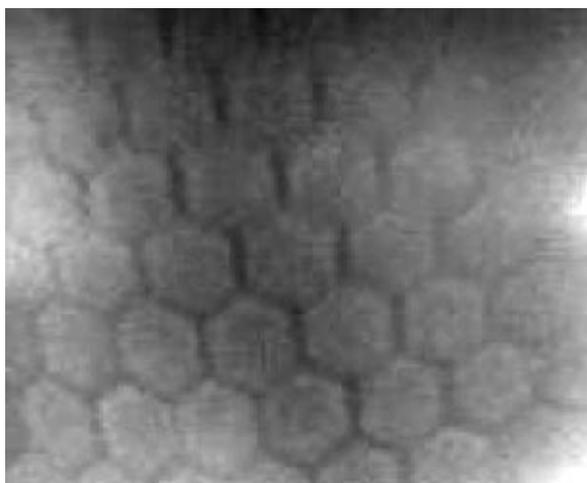
ФПУ соединяется кабелями (видны на рисунке слева) длиной около двух метров с внешними источниками питания и приборами контроля (расположены в крейте КАМАК), а также с системой регистрации “Квантохрон 4-48” [9].

### 4. КВАНТОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Квантовая эффективность фотокатода измерена в лаборатории в токовом режиме и представлена на Рис. 5 верхней кривой. Нижняя кривая — зависимость полной чувствительности самого детектора от длины волны, полученная в режиме счета фотонов. Для этого были использованы 8 эталонных радиолюминесцентных излучателей в диапазоне 355–760 нм с полосами излучения от 20 до 100 нм. Большой разброс точек на нижней кривой объясняется неточностью калибровки излучателей и погрешностями измерений. Сходные оценки квантовой эффективности были получены при наблюдениях стандартных звезд на 6-метровом телескопе.

Следует заметить, что квантовый выход арсенид-галлиевого детектора в красном диапазоне в несколько раз выше, чем у мультищелочного (см. Табл. 2).

Эффективная чувствительность детектора может быть повышена, возможно, до 40%, за счет оптимизации его внутренней конструкции, использования более качественных микроканальных пластин, улучшения характеристик зарядо-чувствительных усилителей.



**Рис. 6.** Фрагмент изображения плоского поля. Видна гексагональная структура первой микроканальной пластины.

**Таблица 2.** Отношение потоков отсчетов от стандартных засветок GaAs детектора к потокам на мультищельном (S20) детекторе

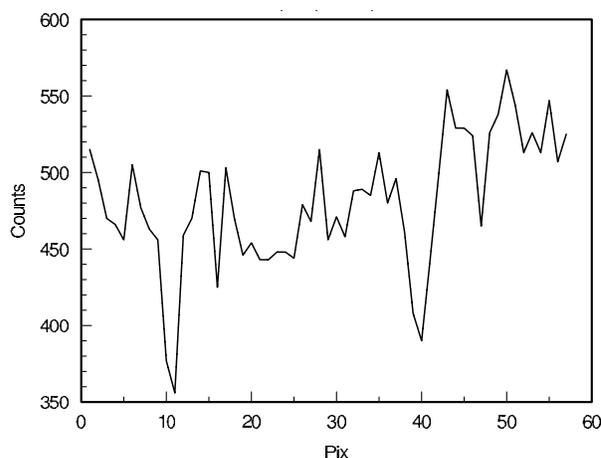
$\lambda$ , нм	365	405	440	520	700	720
k	0.70	1.40	1.83	2.53	4.13	4.83

### 5. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

Пространственное разрешение КЧД было измерено по изображению плоского поля, полученному при равномерной засветке фотокатода. При длительном накоплении начинают проявляться дефекты МКП — видна ее гексагональная структура. МКП спекается из жгутиков, нагревается и вытягивается, в результате чего в областях контакта каналы, расположенные вдоль линий спекания, деформируются, образуя зоны пониженной чувствительности размером 1–2 канала. На Рис. 6 они видны как темные линии.

Шаг гексагональной структуры составляет 0.7 мм и определен в оптических исследованиях МКП. Изображение с гексагональной структурой можно использовать для оценки пространственного разрешения КЧД, т.к. перепады контраста очень велики. На основе этой картинки можно сделать вывод и о незначительном влиянии нестабильности усилителей в детекторе на координаты регистрируемых фотонов.

На Рис. 7 приведен разрез одного из центральных шестиугольников изображения плоского поля на Рис. 6 с длиной стороны около 1 мм. Оценка величины пространственного разрешения, сделанная по этому изображению, дает значение около 25 мкм. Оно определяется, в том числе, и нестабильностью зарядовых усилителей.



**Рис. 7.** Разрез одной из центральных гекс в изображении плоского поля.

### 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный в данной работе КЧД уже третий год используется в наблюдениях на 6-метровом телескопе САО РАН в составе многоканального панорамного фотоспектрополяриметра [10]. Измерения суммарной эффективности детектора по реальным наблюдениям, проведенным в июле 2007 года, дали в фильтрах В, V и R 13.4, 15.1 и 21.3% соответственно, что неплохо согласуется с лабораторными измерениями.

Пространственное разрешение детектора составляет около 25 мкм, а временное разрешение лучше 1 мкс при динамическом диапазоне —  $10^5$  имп/с.

В будущем предполагается увеличить диаметр фотокатода до 25 мм и использовать блок микроканального умножения из 3 МКП для улучшения суммарной квантовой эффективности детектора.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работы были проведены благодаря поддержке INTAS (грант № 04-78-7366), РФФИ (грант № 04-02-17555), программе Президиума Российской Академии наук и Федеральной Целевой программе “Научные и Научно-образовательные Кадры Инновационной России”

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Suyama et al., Proc. of SPIE **6294**, 6 (2006).
2. ANDOR technology, <http://andor.com>
3. M. A. C. Perryman et al., Astronom. and Astrophys. **346**, L30 (1999).
4. R. W. Romani et al., Astrophys. J. **521**, 153 (1999).
5. M. Kapusta et al., Nucl. Instr. Met. Phys. Res. A **504**, 139 (2003).

6. V. Debur et al., Nucl. Instr. Met. Phys. Res. A **513**, 127 (2003).
7. O. E. Tereschenko, S. I. Chikichev, and A. S. Terekhov, J. Vac. Sci. Technol. A **17**, 2655 (1999).
8. S. Pastuszka et al., J. Appl. Phys. **88**, 6788 (2000).
9. В. Л. Плехотниченко и др., Астрофизический бюллетень **64**, 198 (2009).
10. В. Л. Плехотниченко и др., Астрофизический бюллетень **64**, 308 (2009).

## HIGH TEMPORAL RESOLUTION COORDINATE-SENSITIVE DETECTOR WITH GALLIUM-ARSENIDE PHOTOCATHODE

**V. G. Debur, G. M. Beskin, S. V. Karpov, V. L. Plokhotnichenko, A. S. Terekhov, S. S. Kosolobov, G. E. Shaibler**

We present a coordinate-sensitive detector with a gallium-arsenide photocathode—a vacuum photoelectric device featuring microchannel gain and a multi-element collector—which had several prototypes manufactured. Quantum efficiency of the photocathode amounts to 48% at maximum, its sensitivity range spans from 350 to 900 nm. The microchannel gain unit consists of two plates with an ion barrier film at the entrance. The coordinates of electron avalanches are determined using a 16-element collector. The spatial resolution, diameter of the working field, and temporal resolution of the detector are equal to 25  $\mu\text{m}$ , 18 mm, and about 1  $\mu\text{s}$ , respectively.

Key words: *methods of astronomical observations, equipment and instruments*