

## ПИРОМЕТРИЯ ПРОЦЕССА СВС НА ОСНОВЕ МДП-ФОТОДИОДНЫХ МАТРИЦ В РЕЖИМЕ НАКОПЛЕНИЯ ЗАРЯДА

П.Ю.Гуляев, А.В.Калачёв

Описан способ и устройство определения спектральной температуры для применения в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, детонационно-газового и плазмотермического напыления, как движущихся, так и неподвижных сред. Чувствительным элементом оптоэлектронного тракта прибора является МДП-фотодиодная матрица, работающая в режиме накопления заряда. Регистрируется время разряда фотоячеек до заданного уровня (в пределах сохранения линейности разряда) в двух каналах прибора. Отношение времен разряда зависит от температуры частиц.

Предлагаемое решение облегчает аналого-цифровое преобразование, обеспечивает большой динамический диапазон регистрируемых сигналов (до 120дВ) и высокую чувствительность.

Исследования температурной динамики и процессов тепломассопереноса затруднены из-за неприменимости контактных методов измерения температуры в дисперсных слабоупакованных средах в пределах 50-70% пористости, что характерно для образцов с насыпной плотностью. В оптической пирометрии слабосветящихся объектов смеси порошков измерения в области низких температур характеризуются недостаточной точностью. В яркостной пирометрии измерения температуры объектов, меньших размеров визируемой области, неправомерны и дают заниженные результаты. В приборах спектрального отношения происходит увеличение погрешности при уменьшении потока излучения от объекта (например, при уменьшении дисперсности порошка или снижении его концентрации). Измерение низких температур, определяемое отношением близких малых сигналов, сравнимых с пороговой чувствительностью и уровнем аппаратных шумов, также ведет к увеличению погрешности.

Целью данной работы является повышение точности измерения температуры объектов в области порошковой металлургии, а именно в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, а также в процессах детонационно-газового и плазмотермического нанесения покрытий.

Пирометр (рис.1) содержит оптическую систему 1, разделяющую входной световой поток на два канала с узкополосными интерференционными светофильтрами 3,4. Каждый канал содержит фотоприемник 5,6 со схемой выделения сигнала и формирователь выходных импульсов 7,8. Выходы формирователей поступают на таймеры 9, осуществляющие измерение длительности импульсов,

равных времени экспозиции насыщения фотоприемников до порогового уровня.

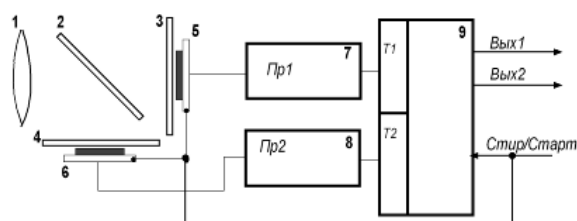


Рис.1. Блок схема оптоэлектронной системы: 1- оптическая система; 2 – светоделительная пластинка (дихроичное зеркало); 3,4- светофильтры; 5,6- фотоприемники; 7,8- блоки обработки и преобразования сигнала; 9 – таймер-счетчик

В качестве чувствительных элементов используются МДП-фотодиодные матрицы [1], работающие в режиме накопления заряда [2]. Аналого-цифровое преобразование осуществляется путем измерения промежутка времени между импульсом сброса фотоматрицы и моментом времени, соответствующего пороговому уровню сигнала ее разряда. Измерение этого промежутка времени осуществляется при помощи микроконтроллера или интегральных цифровых таймеров типа 8x53.

Применение МДП-фотодиодных матриц (ФДМ) в режиме накопления заряда позволяет наиболее полно использовать их возможности. На рис.2 приведена энергетическая характеристика малоформатных матриц [3].

Внутренняя принципиальная электрическая схема фотоячейки матрицы позволяет использовать различные варианты выборки информационного сигнала (рис.3) и оптими-

зировать конфигурацию схемы выделения сигнала под решение конкретной задачи.

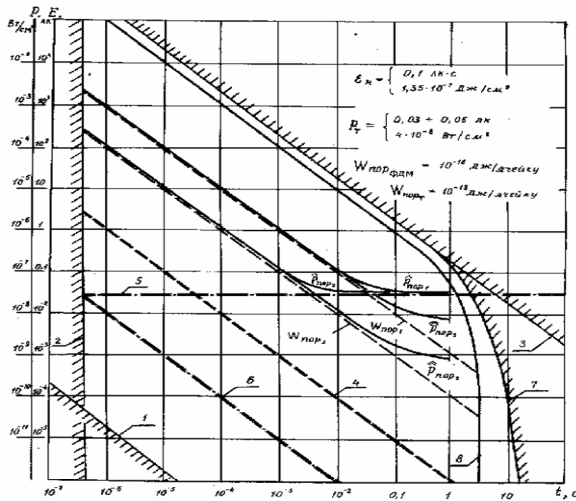


Рис. 2. Энергетическая характеристика чувствительности МДП-фотодиодных матриц: 1-термодинамический порог, 2-граница быстрогодействия; 3-насыщение; 4-шум фотодиода; 5-темновые токи; 6-флуктуационный порог

В случае снятия выходного сигнала с общего вывода U4 (как токового, так и напряжения) происходит суммирование токов подключенных ячеек матрицы. Регулировка чувствительности достигается изменением числа задействованных ячеек фотоматрицы.

Ток в цепи T2-T3 пропорционален напряжению  $U_{\text{d}\bar{a}}$  на фотодиоде D1.

Согласно [4] напряжение на фотодиоде в режиме накопления можно представить как:

$$\frac{U_{\text{d}\bar{a}}}{U_0} = \left[ 1 - A \int_0^{t_i} P_\lambda(t) dt + A^2 \left( \int_0^{t_i} P_\lambda(t) dt \right)^2 \right], \quad (1)$$

где  $A = \frac{e \cdot S_{\text{d}\bar{a}} \cdot \eta}{h\nu 2c_0 U_0}$ ,  $e$  – заряд электрона;

$S_{\text{d}\bar{a}}$  – площадь фотоприемника;  $\eta$  – квантовый выход фотоприемника;  $h\nu$  – квант света;  $c_0$  – начальная емкость фотодиода;  $U_0$  – напряжение источника обратного смещения;  $P_\lambda(t)$  – плотность светового потока на длине волны  $\lambda$ . Пороги выбраны в линейной области разряда, то есть квадратичным членом в (1) можно пренебречь.

$$\int_0^{t_i} P_\lambda(t) dt = \frac{1}{A} \left( 1 - \frac{U_{\text{d}\bar{a}}}{U_0} \right). \quad (2)$$

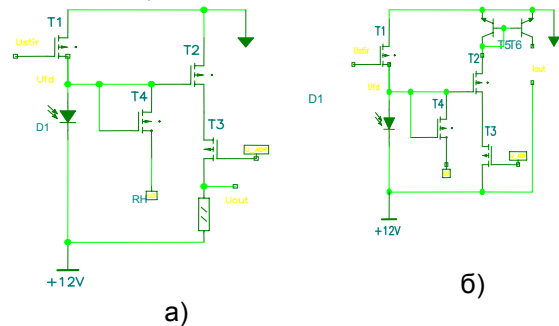


Рис.3 Вариант включения ячейки фотоматрицы: (а) выходной сигнал – напряжение на сопротивлении нагрузки, при ее подключении в цепь транзисторов T2,T3 ячейки, (б) регистрируется ток в цепи T2, T3 (в варианте используется токовое зеркало)

В первом приближении считаем поток  $P_\lambda(t)$  постоянным в течении времени накопления  $t_i$ , тогда  $P_\lambda(t)$  может быть найдена, как:

$$P_\lambda = \frac{f(U_{\text{d}\bar{a}}, U_0)}{t_i}. \quad (3)$$

Определяется время разряда фотодиода от начального значения  $U_0$  до фиксированного значения  $U_{\text{d}\bar{a}, \text{н}\bar{o}}$ , что соответствует изменению тока в цепи T2-T3 фотоячейки с  $J_0$  до  $J_{\text{н}\bar{o}}$ .

Ток  $J_{\text{н}\bar{o}}$  задается изначально – фиксированный заранее выбранный порог, ток  $J_0$  – определяется параметрами выходных ячеек фотоматрицы, количеством подключенных ячеек и напряжением обратного смещения  $U_0$ , следовательно, величина  $f(U_{\text{d}\bar{a}}, U_0) = F = \text{const}$ .

Получаем измерительное уравнение для канала оптоэлектронного преобразователя:

$$P_{\lambda_i} = \frac{F_i}{t_{i,i}}. \quad (4)$$

С другой стороны поток пропорционален площади излучающей поверхности и зависит от ее температуры и излучательных характеристик (в приближении Вина запишем):

$$\hat{O} \sim S_0 P_\lambda \sim S_0 \epsilon_\lambda c_1 \lambda_i^{-5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda_i \cdot T}\right), \quad (5)$$

где  $S_0$  – наблюдаемая поверхность,  $T$  – температура поверхности,

## ПИРОМЕТРИЯ ПРОЦЕССА СВС НА ОСНОВЕ МДП-ФОТОДИОДНЫХ МАТРИЦ В РЕЖИМЕ НАКОПЛЕНИЯ ЗАРЯДА

$c_1 = 3.7413 \cdot 10^{-16} \hat{A} \delta \cdot i^2$ ,  $c_2 = 1.438 \cdot 10^{-2} i \cdot K$  - постоянные.

Отношение потоков от одного объекта на двух различных длинах волн не зависит от визируемой площади:

$$\frac{P_{\lambda_1}}{P_{\lambda_2}} = \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}} \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{-5} \exp\left( \frac{c_2}{\lambda_2 T} - \frac{c_2}{\lambda_1 T} \right) = \frac{F_1 \cdot t_{i,2}}{F_2 \cdot t_{i,1}} \quad (6)$$

Преобразуя (6), получим соотношение для определения температуры:

$$T = \frac{c}{\ln \frac{t_{i,2}}{t_{i,1}} + B} \quad (7)$$

где

$$C = c_2 \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right),$$

$$B = \ln \left[ \frac{F_1}{F_2} \cdot \frac{\varepsilon_{\lambda_2}}{\varepsilon_{\lambda_1}} \cdot \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5 \right].$$

Относительная погрешность определения температуры данным методом:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{T}{C} \sqrt{\left( \frac{\Delta t_{i,1}}{t_{i,1}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta t_{i,2}}{t_{i,2}} \right)^2 + (\Delta B)^2} \quad (8)$$

где

$$\Delta B = \sqrt{\left( \frac{\Delta F_1}{F_1} \right)^2 + \left( \frac{\Delta F_2}{F_2} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_1}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \varepsilon_{\lambda_2}}{\varepsilon_{\lambda_2}} \right)^2} \quad (9)$$

а  $\Delta F_i$  – изменения параметров фотоприемников, вызванные температурной нестабильностью, флуктуациями опорного напряжения и пр.;  $\Delta \varepsilon_{\lambda_i}$  – погрешность определения излучательной способности наблюдаемой поверхности (например, вследствие окисления, загрязнения и др.)

На рис.4 представлена упрощенная принципиальная схема одного канала оптоэлектронного преобразования устройства.

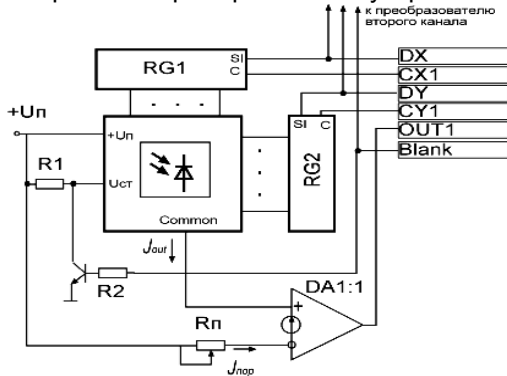


Рис.4. Упрощенная принципиальная схема одного канала оптоэлектронного преобразования

Сдвиговые регистры RG1, RG2 задают необходимую конфигурацию активной фотоприемной площади матрицы, также с их помощью возможна организация поэлементного опроса.

Транзисторный ключ на транзисторе Т1 – преобразователь уровня/формирователь импульса сброса.

Резистором  $R_n$  задается пороговый ток  $J_{п\delta}$ . Точковый сигнал с общего вывода ФДМ поступает на неинвертирующий вход усилителя Нортон - DA1 (КР1401УД1), на инвертирующий вход подается пороговый ток  $J_{п\delta}$

при помощи резистора  $R_n$ , подключенного к источнику опорного напряжения (в данном случае просто к источнику питания). Микросхема работает как токовый компаратор, наличие на ее кристалле четырех усилителей позволяет организовать несколько каналов преобразования с практически идентичными характеристиками. При необходимости роль  $R_n$  может играть ЦАП с токовым выходом (например, КР572ПА1). В этом случае осуществляется полное электронное управление блоком, включая и управление порогом срабатывания. Следовательно, имеется возможность регулирования линейности передаточной характеристики и быстродействия.

Описанный модуль достаточно универсален и может управляться как специализированным контроллером, так и посредством персонального компьютера.

Ниже приводится способ подключения преобразователя к компьютеру через LPT-порт и интерфейс Centronics, а также и структура программного обеспечения для проведения измерений.

В качестве таймера может быть использован персональный компьютер, работающий под управлением однозадачной операционной системы (MS DOS) или системой реального времени (QNX).

Блок-схема подпрограммы измерения представлена на рис.5.

При работе в среде Windows 9x/NT/2000/XP подпрограмма измерения времени разряда выполняется в нулевом кольце защиты процессора для обеспечения равномерности и повышения точности подсчета временных интервалов. Неплохие результаты дает также запуск подпрограммы измерения времени разряда в качестве отдельной нити процесса с максимальным приоритетом (относительная погрешность определения времени в этом случае составляем

порядка 1-2% при времени накопления  $t_i \approx 10 \text{ мс}$  ).



Рис. 5 Блок-схема подпрограммы измерений

Полученные данные сохраняются на ПК в виде бинарных или текстовых файлов, или заносятся в базу данных управляющей программы.

Тарировка измерительной системы проводится по эталонному излучателю (вольфрамовая температурная лампа или модель черного тела). В процессе тарировки строится массив значений  $\{T, \ln(t_{n1}/t_{n2})\}$  для выбранных длин волн с известными излучательными характеристиками эталона.

Для предложенной реализации измерения временных интервалов максимальная погрешность определения времени насыщения фотоприемника составляет величину порядка 1-2 мкс., что соответствует времени накопления 10 мс без учета методической и систематической погрешности, вызванной нестабильностью параметров приемников и коэффициента излучательной способности.

Это дает погрешность в определении температуры 0,1-0,5%. Эффективное количество значащих бит счетчика – 24, которые определяются из условия  $t_{\text{нmax}}/t_{\text{нmin}}=10^7 \sim 2^{24}$ , как видно из рис.2.

Возможность неразрушающего считывания сигнала с фотодиода, работающего в режиме накопления заряда, позволяет реализовать метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для преобразования светового сигнала в электрический. При постоянном уровне шумов измерительного тракта, а в данном случае - это нестабильность порогов компараторов, динамический диапазон преобразования сигнала в цифровой код определяется тактовой частотой заполнения импульсов ШИМ и разрядностью счетчика.

**Выводы.** Таким образом, предлагаемое решение облегчает аналого-цифровое преобразование и обеспечивает полный динамический диапазон сигналов регистрируемых МДП-фотодиодными матрицами в режиме накопления заряда (теоретически до 120dB), ограниченный флуктуационным энергетическим порогом - порядка  $10^{-13}$ - $10^{-14}$  Дж/см<sup>2</sup> и энергией насыщения -  $10^{-7}$  Дж/см<sup>2</sup>, высокую чувствительность, обладает малой погрешностью при регистрации слабых потоков излучения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л. Приемники оптического излучения: Справочник.- М.: Радио и связь, 1987.- 296 с.
2. Веклер Дж. П. Режим накопления зарядов в кремниевых фотодетекторах// Полупроводниковые формирователи сигналов изображения./Под ред. Г. Йесперса.- М.: Мир, 1979. – С.97-106.
3. Гуляев П.Ю. Энергетический порог чувствительности фотодиодных матриц в режиме накопления заряда./ «Координатно-чувствительные фотоприемники и оптикоэлектронные устройства на их основе»: Тезисы докладов IV Всесоюзного совещания. Сентябрь 1987. – Барнаул, 1987.- С.120-127.
4. Госьков П.И., Якунин А.Г., Гуляев П.Ю., Царегородцев М.А. Применение нетипового включения фотодиодной матрицы в телевизионных системах. // Техника кино и телевидения.- 1987.- № 6.- С. 32-34.