

2. Система состоит из стандартных модулей NIM и КАМАК, что открывает возможности использования разработок различных организаций и фирм, работающих в этих направлениях.

3. Осуществление процесса идентификации аппаратным путем с управлением и последующей обработкой с помощью ЭВМ позволяет получить загрузки системы до величин порядка  $10^3$  событий/с.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Астафьев В. А. и др. Широкодиапазонный спектрометр заряженных частиц со специализированным цифровым идентификатором, выполненным в стандарте КАМАК.— В кн.: Тез. II Всесоюз. совещания по автоматизации научных исследований в ядерной физике. Алма-Ата: Наука, 1978.
2. Васильев А. И. и др. Блоки управления и связи для организации систем в стандарте КАМАК.— В кн.: II Симпозиум по модульным ИВС: Сб. докладов. М.: изд. ИЯИ АН СССР, 1980.
3. EUROATOM — REPORT, EUR — 6500e.— Italy: Joint Nucl. Research Centre Ispra Establishment, 1978.

Поступило в редакцию 27 августа 1981 г.

УДК 681.3.04/05

М. П. ГРИШИН, Ш. М. КУРБАНОВ, Е. И. ЧЕРНОВ  
(Москва)

#### СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ФОТОМЕТРИРОВАНИЯ ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЛАВИННОГО ФОТОДИОДА С ОПЕРАЦИОННЫМ УСИЛИТЕЛЕМ

Автоматическая расшифровка на ЭВМ больших массивов фоновой информации в виде полутоновых изображений связана с разработкой системы для скоростного фотометрирования и быстрого ввода в ЭВМ оптических параметров элементов

изображения. Принцип действия прецизионной системы фотометрирования основан на подсвете осветительной системой исследуемого элемента носителя изображения, выделении и проецировании этого элемента на чувствительную поверхность фотоприемника, по электрическому сигналу которого находят оптическую плотность  $D$  носителя изображения [1]. Точность работы системы в основном определяется характеристиками фотоприемника. Применяемый в системах скоростного фотометрирования в качестве фотоприемника фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) часто не удовлетворяет требованиям по ряду основных параметров. Так, например, диапазон линейности его световой характеристики не всегда достаточен, а коэффициент усиления подвержен изменениям при резких перепадах плотности почернения носителя изображения (эффект утомления ФЭУ) [2].

В настоящей статье приведены данные теоретического анализа и экспериментальных исследований системы фотометрирования с фотоприемником типа «лавинный фотодиод — операционный усилитель» (ЛФД — ОУ), обладающим большим диапазоном линейности световой характеристики и не имеющим эффекта утомления для довольно больших уровней света.

Погрешность фотометрирования, обусловленная шумом фотоприемника. Принимая во внимание рассмотренные в работе [3] шумовые составляющие фотоприемника типа ЛФД — ОУ и учитывая, что шумовая погрешность в измерении  $D$  определяется выражением [1]

$$\Delta D_{\text{ш}} = 0,43 U_{\text{ш}} 10^D / U_{\text{max}}, \quad (1)$$

$U_{\text{ш}}$  — суммарное шумовое напряжение на выходе операционного усилителя (ОУ),  $U_{\text{max}}$  — максимальное напряжение на выходе ОУ,  $\Delta D_{\text{шЛФД}}$  для области рабочих частот  $\Delta f$ , не выходящих за пределы полосы пропускания ОУ, определится как

$$\begin{aligned} \Delta D_{\text{шЛФД}} = & 0,43 \cdot 10^{D/2} \left\{ \frac{2q\Delta f}{ESgM} \left\{ M^{\kappa-1} + 2 \cdot 10^D \left[ \frac{I_{\text{ут}}}{2ESgM} + \right. \right. \right. \\ & + \frac{\Phi_T}{U_{\text{max}}} + \frac{\Delta I_{\text{ут}}^2}{4qESgM\Delta f} + \frac{4,93 C_{\text{плФД}}^2 l^2(0) \Delta f}{qESgM} \times \\ & \left. \left. \left. \times \left( 1 + 0,67 \frac{l_0^2}{l^2(0)} \Delta f + 1,6 \frac{l_0}{l(0)} \Delta f^{1/2} \right) \right] \right\} \right\}^{1/2}, \quad (2) \end{aligned}$$

где  $E$  — освещенность чувствительной поверхности лавинного фотодиода (ЛФД) площадью  $S$ ;  $g$  — чувствительность ЛФД;  $\kappa$  — коэффициент, изменяющийся в пределах 2—3;  $\Phi_T$  — температурный потенциал;  $I_{\text{ут}}$  — ток утечки ЛФД;  $\Delta I_{\text{ут}}$  — низкочастотная флуктуация тока утечки;  $C_{\text{плФД}} = C_{\text{плФД}} + C_{\text{выхОУ}} + C_{\text{ос}}$ ,  $C_{\text{плФД}}$  — емкость ЛФД,  $C_{\text{выхОУ}}$  — входная емкость ОУ,  $C_{\text{ос}}$  — емкость резистора обратной связи ОУ;  $l(0)$ ,  $l_0$  — постоянные, определяющие спектральную плотность  $l(f)$  собственного шумового напряжения ОУ ( $l(f) = l(0)/f^{1/2} + l_0$ ) [4].

Из выражения (2) видно, что для уменьшения шумовой погрешности  $\Delta D_{\text{шЛФД}}$  нужно увеличивать освещенность  $E$ ,  $g$  и  $U_{\text{max}}$ , уменьшать  $I_{\text{ут}}$ ,  $\Delta I_{\text{ут}}$ ,  $C_{\text{плФД}}$  и  $l(0)$ ,  $l_0$ . Следует, однако, отметить, что при больших  $U_{\text{max}}$  сложно реализовать большую полосу пропускания  $\Delta f$  фотоприемника, так как существенно растет постоянная времени цепи обратной связи ОУ. Увеличения  $g$  и уменьшения  $C_{\text{плФД}}$  добиваются выбором ЛФД с хорошей чувствительностью в области рабочего спектра и малой  $C_{\text{плФД}}$ . Для уменьшения  $l(0)$ ,  $l_0$  подбирают малощумящий ОУ. Влияние  $\Delta I_{\text{ут}}$  можно устранить, если работать с коммутацией светового потока при условии, что частота коммутации лежит выше частоты 1 кГц, до которой преобладает избыточный шум ФД [5].

Следует также отметить, что минимальное значение  $\Delta D_{\text{шЛФД}}$  достигается при

$$M_{\text{опт}} \approx 10^{(1/\kappa) \{ D + \lg [ \frac{\Delta I_{\text{ут}}^2}{(\kappa-2)qESg\Delta f} ] \}}. \quad (3)$$

Для случая когда влияние флуктуации тока утечки устранено,

$$M_{\text{опт}} \approx 10^{(1/\kappa) \{ D + \lg [ 2\Phi_T / (\kappa-2)U_{\text{max}} ] \}}. \quad (4)$$

Полученные выражения (2)—(4) справедливы для не слишком большого коэффициента умножения  $M$  (для отечественных ЛФД обычно не более 30—50). При реализации больших  $M$  шум фотоприемника резко возрастает за счет шума микроплазмы ЛФД.

Для области частот  $\Delta f$ , в которой еще не проявляется усиление собственных шумов ОУ из-за емкости  $C_{\text{плФД}}$ , основной вклад в шумовую погрешность фотоприемника вносит флуктуация тока утечки  $\Delta I_{\text{ут}}$ . В этом случае

$$\Delta D_{\text{шЛФД}} \approx 0,43 \Delta I_{\text{ут}} 10^D / ESgM. \quad (5)$$

Погрешность фотометрирования, обусловленная температурным дрейфом ОУ. Погрешность в определении оптической плотности  $D$  из-за температурного дрейфа ОУ

$$\Delta D_T = 0,43 \Delta T_1 10^D (\Delta U_{\text{см}} / \Delta T) / U_{\text{max}}, \quad (6)$$

где  $\Delta U_{\text{см}} / \Delta T$  — температурный дрейф напряжения смещения ОУ,  $\Delta T_1$  — изменение температуры ОУ относительно некоторой начальной (обычно комнатной) температу-

ры. Из выражения (6) видно, что для уменьшения  $\Delta D_T$  нужно уменьшать  $\Delta T_1$  (это обеспечивается термостатированием или периодической компенсацией напряжения дрейфа ОУ) и увеличивать  $U_{\max}$ , принимая, однако, во внимание рассмотренное выше ограничение.

Погрешность фотометрирования, обусловленная изменением коэффициента умножения ЛФД. Учитывая выражение, описывающее коэффициент умножения ЛФД [3], и зависимость напряжения пробоя ЛФД от температуры [6], получаем соотношение для погрешности определения оптической плотности  $D$ :

$$\Delta D_M = 0,43 M (\beta \Delta T_1 + \Delta E_{cm}/E_{cm}), \quad (7)$$

где  $\beta$  — температурный коэффициент пробоя ЛФД,  $E_{cm}$  — напряжение смещения на ЛФД.

Для уменьшения  $\Delta D_M$  нужно стабилизировать напряжение смещения и температуру или периодически выставлять коэффициент умножения равным заданному значению путем соответствующего изменения напряжения смещения на ЛФД [6, 7].

Сравнение фотоприемника типа «лавинный фотодиод — операционный усилитель» с фотоприемником типа «фотодиод — операционный усилитель». Шумовую погрешность  $\Delta D_{шфд}$  фотоприемника на основе фотодиода и операционного усилителя (ФД — ОУ) можно определить из выражения (2), если положить  $M = 1$ ,  $I_{yt} = -\Delta I_{yt} = 0$  (на фотодиоде нулевое смещение).

Для сравнения по шумовой погрешности фотоприемников типа ЛФД — ОУ и ФД — ОУ составим неравенство  $\Delta D_{шфд} \leq \Delta D_{шфд}$  и учтем, что максимальные шумовые погрешности наблюдаются при максимальной измеряемой оптической плотности. Решая неравенство, получаем

$$\begin{aligned} D_{\max} \leq \lg \{ & (M^{\kappa-2} - 1) ESgq / [2\varphi_T ESgq / U_{\max} - \\ & - I_{yt} q / M^2 - \Delta I_{yt}^2 / 2M^2 \Delta f + 9,86 C_{пфд}^2 I^2(0) \times \\ & \times \Delta f (1 + 0,67 (I_0^2 / I^2(0)) \Delta f + 1,6 (I_0 / I(0)) \Delta f^{1/2})] \}. \end{aligned} \quad (8)$$

Выражение (8) определяет области предпочтительного применения фотоприемников типа ЛФД — ОУ и ФД — ОУ с точки зрения обеспечения минимума шумовой погрешности.

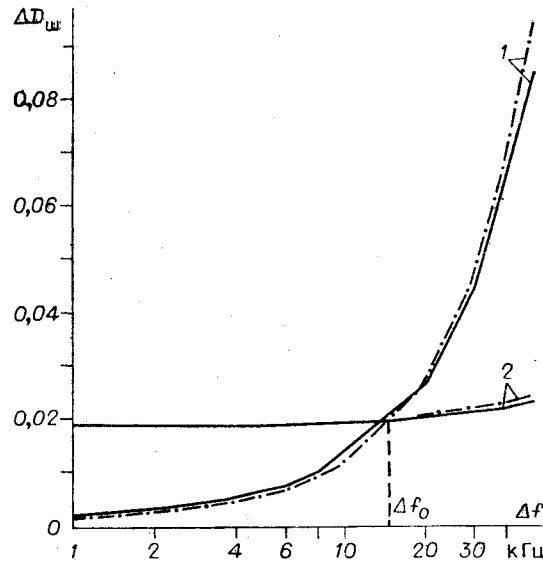
**Результаты эксперимента.** Для эксперимента использовался ОУ, собранный на микросхеме К553УД1А, на входе которой был включен дифференциальный каскад, выполненный на сборке полевых транзисторов КПС104В.

В результате измерения спектральной плотности приведенного ко входу ОУ собственного шумового напряжения  $l(0)$  и  $l_0$  соответственно составили 351,5 нВ и 10 нВ/Гц<sup>1/2</sup>. На входе ОУ включался ЛФД вначале в фотодиодном режиме без смещения, а затем со смещением в режиме ЛФД. В первом случае  $C_{пфд} = 90$  пФ,  $U_{\max} = 54$  В, а во втором —  $C_{пфд} = 25$  пФ,  $M = 15$ ,  $\kappa = 2,3$ ,  $U_{\max} = 54$  В,  $I_{yt} = 4,7$  нА,  $\Delta I_{yt} = 0,133$  нА.

На ЛФД с источника света подавался свет такого уровня, что  $ESg10^{-D} = 0,2$  нА. Производились измерения спектральной плотности выходного шума ОУ; определялись шумовые напряжения для разных значений  $\Delta f$ ;  $\Delta D_{ш}$  рассчитывались по формуле (1) (сплошная кривая 1 на рисунке), теоретическое значение шумовой погрешности  $\Delta D_{ш}$  — по формуле (2) с учетом равенства нулю напряжения смещения ФД (пятипунктирная кривая 1). Экспериментальная (сплошная) и теоретическая (пятипунктирная) кривые для режима ЛФД приведены на рисунке (кривая 2).

Из анализа графиков видно, что теоретические кривые хорошо согласуются с экспериментальными и для максимальной оптической плотности  $D_{\max} = 4$  и коэффициента умножения ЛФД  $M = 15$  при реализации в исследуемой системе фотометрирования полосы пропускания более 15 кГц целесообразно применять фотоприемник типа ЛФД — ОУ.

Температурный дрейф исследовался в диапазоне температур 20 ÷ 50°C. Величина  $\Delta U_{cm} / \Delta T$  получилась равной 50 мкВ/°С. По результатам эксперимента, а также по формуле (6) были оценены погрешности  $\Delta D_T$ . Расчетные данные полностью совпали с экспериментальными. Их величина для диапазонов температур ( $\Delta T_1$ ) 10, 20, 30° соответственно составила 0,1; 0,24; 0,32.



Следует отметить, что величина погрешности получилась слишком большой (допустимая погрешность обычно составляет 0,01). По этой причине для уменьшения  $\Delta D_T$  нужно термостатировать фотоприемник либо периодически компенсировать его дрейф.

Были проверены два способа стабилизации коэффициента умножения ЛФД. Первый способ заключался в использовании опорного ЛФД [6, 7], что обеспечило в диапазоне температур  $20 \div 50^\circ\text{C}$  стабилизацию коэффициента умножения с точностью 6%, не приемлемой для прецизионных систем фотометрирования. Второй способ заключался в периодической подстройке коэффициента умножения, для чего на ЛФД через определенные промежутки времени подавался опорный световой поток, и система стабилизации при этом изменяла напряжение смещения на ЛФД таким образом, что выходной сигнал фотоприемника оставался постоянным. Такой метод обеспечил стабилизацию коэффициента умножения с точностью 0,5% при  $M = 15$ , чего вполне достаточно для прецизионной системы фотометрирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин М. П., Курбанов Ш. М., Маркелов В. П. Автоматический ввод и обработка фотографических изображений на ЭВМ.— М.: Энергия, 1976.
2. Дунаевская Н. В., Масленков И. П., Михайлов О. М. Воспроизводимость анодного тока ФЭУ в режиме перепада потоков излучения.— В кн.: Импульсная фотометрия. Л.: Машиностроение, 1978, вып. 5.
3. Берлизова О. М., Никонов Б. С., Трищенко М. А. Особенности работы лавинного фотодиода с операционным усилителем.— ОМП, 1977, № 8.
4. Шило В. Л. Линейные интегральные схемы.— М.: Сов. радио, 1979.
5. Бузанова Л. К., Глиберман А. Я. Полупроводниковые фотоприемники.— М.: Энергия, 1976.
6. Берлизова О. М., Трищенко М. А. Температурные зависимости параметров лавинных фотодиодов в различных режимах работы.— Микроэлектроника, 1977, т. 6, вып. 5.
7. Королев В. В., Берлизова О. М. Регулирование рабочего напряжения лавинного фотодиода.— ПТЭ, 1975, № 3.

Поступило в редакцию 25 июня 1980 г.;  
окончательный вариант — 19 июля 1981 г.

УДК 621.378.9 : 778.4

В. И. ГУЖОВ, А. И. ДРУЖИНИН, А. Г. КОЗАЧОК, А. В. ЛОГИНОВ

(Новосибирск)

#### ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ

В работе [1] описана голографическая измерительная система (ГИС), предназначенная для исследования напряженно-деформированного состояния твердых тел и включающая в себя голографический интерферометр с оптическим квантовым генератором, устройство ввода оптической информации в ЭВМ и мини-ЭВМ с набором периферийных устройств.

Голографические интерферограммы записываются в интерферометре, рассмотренном в [2], и с помощью электромеханического устройства вводятся в ЭВМ [3].

При решении ряда задач возникает необходимость в одновременной регистрации нескольких интерферограмм. В этом случае усложняются алгоритмы обработки и расшифровки, значительно повышаются требования к производительности ЭВМ. С другой стороны, результаты обработки желательно получать в реальном времени для того, чтобы экспериментатор мог оперативно вносить изменения в схему эксперимента, что существенно сказывается на качестве результатов.

Блок-схема системы для решения подобных задач приведена на рисунке. Система организована на базе расширенного комплекса УВК СМ-4 и включает в себя системный кейт КАМАК и матричный процессор. В системный кейт входят кейт-контроллер, драйвер черно-белого телевизора, ОЗУ  $2 \times 64$  Кбайт, драйвер электромеханического устройства ввода оптических изображений (УВОИ). Матричный процессор аналогичен описанному в [4].

Программное обеспечение создано на основе операционной системы RT-11 и включает в себя пакеты программ для обслуживания нестандартных системных устройств, для работы с матричным процессором и для обработки результатов эксперимента.

При работе с матричным процессором пользователю доступны два уровня подпрограмм. Первый уровень состоит из подпрограмм, реализующих векторные операции над строками данных. Программы второго уровня осуществляют матричные