

М. М. БУТСЛОВ, В. С. КОМЕЛЬКОВ,
Ю. Е. НЕСТЕРИХИН

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ПРИБОР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ ПОЛУШИРИНЫ И ИНТЕНСИВНОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Введение

В 1955 г. Фюнфер и Росслер осуществили магнитную развертку изображения на экране электронно-оптического преобразователя с фотоэлектрической схемой регистрации. Регистрируемое изображение отклоняется магнитным полем поперек щели и освещает катод фотоумножителя, сигнал с которого посылается на осциллограф. Запуск магнитной развертки синхронизирован с исследуемым процессом и разверткой осциллографа. Недостаток данного метода состоит в том, что в случае применения стандартных электронно-оптических преобразователей инерционность высвечивания экрана ограничивает возможную скорость записи до 10 м/сек.

Большой интерес представляет совмещение этих двух устройств в одном приборе, так как при этом можно осуществить запись интенсивности свечения и размера изображения (спектр, контур отдельной линии, канал разряда, ступки плазмы и т. п.) по осциллограммам выходного тока умножителя.

Такой прибор, названный нами «двойным преобразователем», особенно необходим при спектральных исследованиях быстротекающих явлений.

В настоящей работе описаны конструкция и результаты испытаний одного из первых образцов двойного преобразователя.

Конструкция прибора

Схема прибора приведена на рис. 1. Электронное изображение с помощью электростатической линзы переносится на второй каскад преобразователя, усиливается и затем вторично переносится на диафрагму, за которой расположены щель и электронный умножитель.

Второй каскад преобразователя имеет отклоняющие пластины для перемещения изображения поперек щели.

В данном образце прибора щель (рис. 2) имеет высоту $h=10$ мм и ширину $l=0.1$ мм. Эти размеры не являются оптимальными и для каждого случая должны быть специально выбраны. Для определения полуширины спектральных линий ширину щели l целесообразно уменьшить до предельного разрешения ЭОП, т. е. до $0.05-0.03$ мм, учитывая, конечно, коэффициент усиления прибора и дисперсию спектрального прибора.

В исследованном образце двойного преобразователя применена система электронного умножителя ФЭУ-С с 13 каскадами. Питательное напряжение при съемке характеристик достигало 2.5 кв. Следует заметить, что линейность системы по выходному току оставляет желать лучшего. При токе порядка 0.3 ма уже наступает ограничение сигнала.

Схема управления, применяемая для записи характеристик прибора, указана на рис. 3.

На фотокатод прибора фокусировалось изображение микромет-

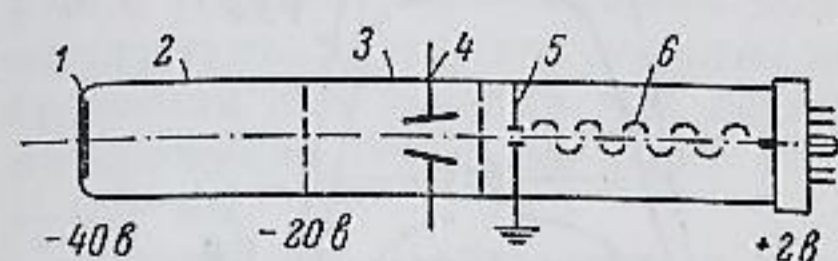


Рис. 1. Схема прибора.

1 — фотокатод; 2 — 1-й каскад электронно-оптического преобразователя; 3 — 2-й каскад электронно-оптического преобразователя; 4 — отклоняющие пластины; 5 — щель электронного умножителя; 6 — электронный умножитель.

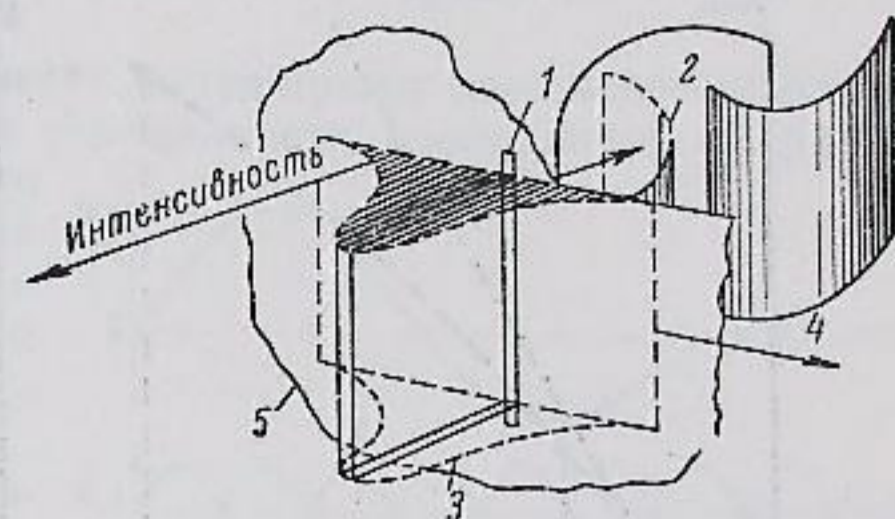


Рис. 2. Устройство и расположение щели.

1 — щель; 2 — эмитер умножителя; 3 — электронное изображение; 4 — направление перемещения изображения; 5 — диафрагма умножителя.

рической щели размером 0.4 мм в масштабе 1 : 1. Щель освещалась лампой накаливания в 20 вт, закрытой матовым стеклом. Пилообразное напряжение на отклоняющие пластины «двойного преобразователя» поступало от генератора 104-И. С этого же генератора снимался сигнал синхронизации для запуска развертки осциллографа ДЭСО-1, на экране которого регистрировался выходной ток умножителя. При амплитуде отклоняющего напряжения на пластинах около 500 в электронное изображение пересекает щель дважды: при прямом и обратном ходе. Соответственно на экране осциллографа возникает два импульса.

Примерные осциллограммы записи изображения щели показаны на рис. 4 (см. вклейку, стр. 80). Метки времени нанесены через интервал времени $5 \cdot 10^{-6}$ сек.

Характеристики прибора

Характеристики прибора определялись по осциллограммам изображений освещенной щели шириной 0.4 мм на фотокатод прибора. При этом световой поток изменялся в 20—25 раз с помощью промежуточной диафрагмы.

Как и следовало ожидать, осциллограмма выходного напряжения имеет форму трапеции (рис. 3, 4), так как при движении изображения по щели умножителя электронный поток нарастает от нуля до максимальной величины за время $t = \frac{l}{v}$, где l — ширина щели, v — скорость развертки.

По форме и размерам осциллограммы можно судить об однородности освещения и резкости изображения. На рис. 4 показано отклонение осциллографического изображения от идеального контура при выбранной ширине щели. Следует учесть, что электронное изображение не может

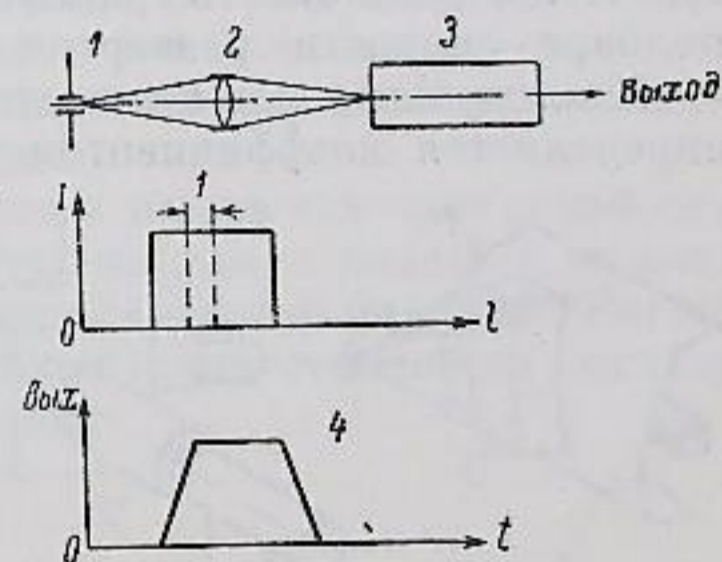


Рис. 3. Схема управления, применяемая для записи характеристик прибора.

1 — щель 0.4 мм; 2 — объектив; 3 — двойной преобразователь; 4 — идеальная осциллограмма.

быть получено более резким, чем это позволяет разрешение электронно-оптического преобразователя, составляющее $20 \div 30$ линий/мм. Следует считать, что прибор удовлетворительно передает исследуемый «профиль» изображения.

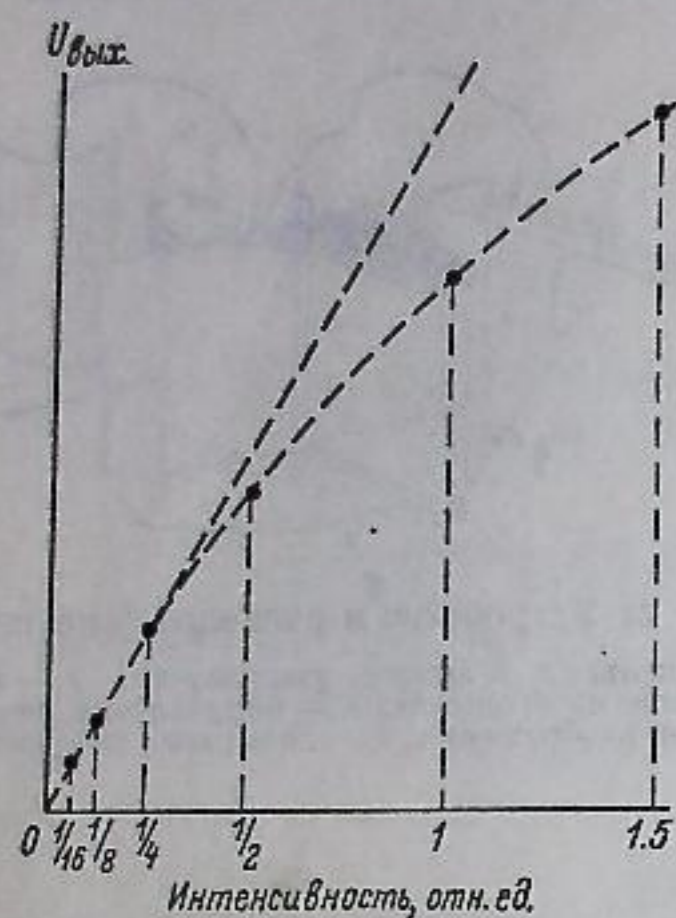


Рис. 5. Зависимость выходного напряжения прибора от интенсивности свечения изображения.

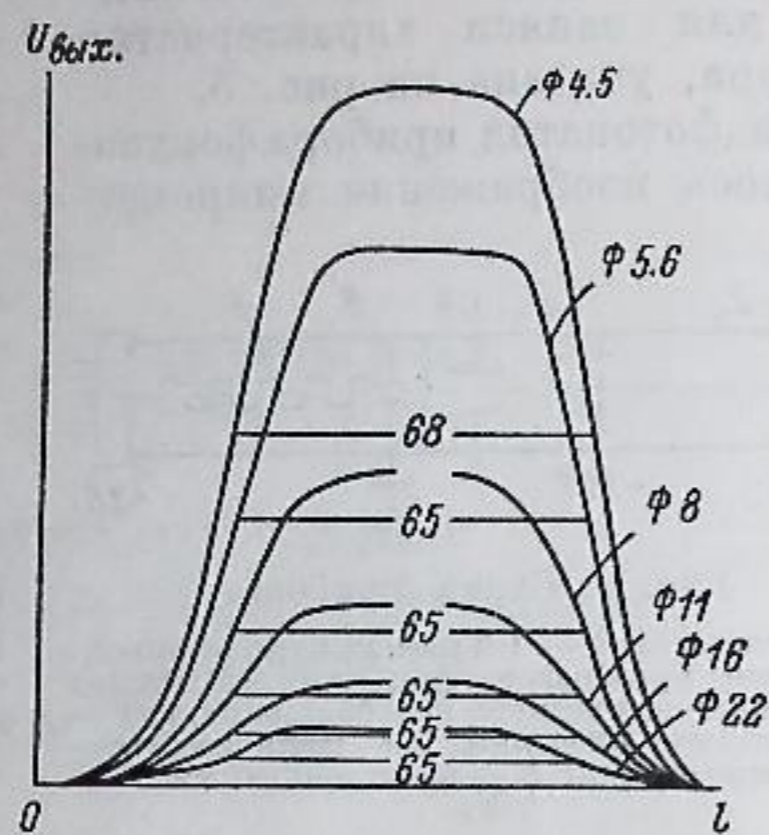


Рис. 6. Зависимость изменения полуширины щели при изменении интенсивности свечения изображения.

Необходимо отметить еще одну особенность «двойного преобразователя»: его способность трансформации изображений при соответствующем подборе скорости развертки изображения.

Минимальная освещенность, необходимая для уверенной регистрации, определяется коэффициентом усиления прибора и скоростью развертки.

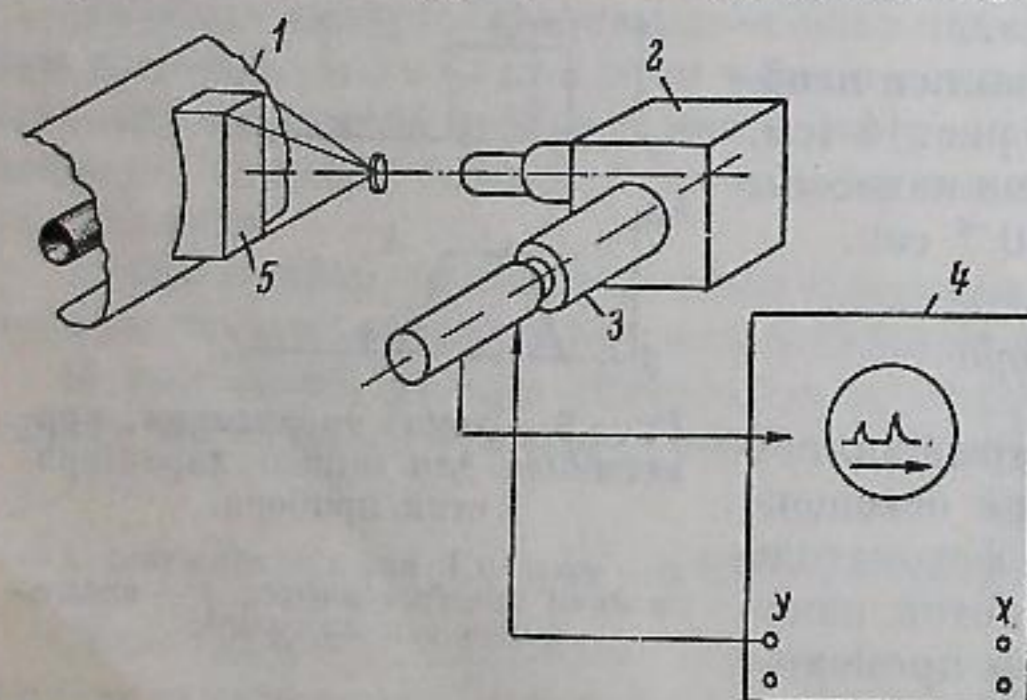


Рис. 7. Схема использования прибора в установке с импульсным разрядом.

1 — разряд; 2 — спектрограф; 3 — двойной преобразователь; 4 — осциллограф; 5 — смотровое окно.

На рис. 5 показана эта зависимость в относительных единицах. С увеличением освещенности амплитуда сигнала растет пропорционально, пока не перейдет в нелинейную область токовой характеристики умножителя.

Область пропорциональности может быть значительно увеличена при применении умножителя другого типа (ФЭУ-В, ФЭУ-13).

В измерениях с данным образцом прибора при нагрузочном сопротивлении 12 ком выходное напряжение достигало $3 \div 3.5$ в. Минимальное время прохождения изображения составляло $3 \cdot 10^{-6}$ сек. Прибор работает удовлетворительно при времени регистрации более $(20 \div 50) \cdot 10^{-6}$ сек.

Увеличение коэффициента усиления и применение умножителя улучшенной системы, вероятно, позволит довести это время до $5 \cdot 10^{-7} \div 10^{-6}$ сек.

На рис. 6 представлена зависимость полуширины изображения щели размером в 0.4 мм при изменении освещенности изображения. Проведенные результаты показывают, что уже с этим образцом прибора можно осуществить запись полуширины изображения при условии, что размеры изображения будут не менее $0.4 \div 0.5$ мм.

Измерение полуширины и интенсивности спектральной линии может быть проведено многократно в течение одного процесса согласно схеме рис. 7, 8. Помимо пилообразного напряжения, на развертку щели может быть подано синусоидальное напряжение, в котором используется его линейная часть; запись полуширины будет происходить в каждом полупериоде развертки. При этом варианте значительно упрощается схема управления, а синхронизация может быть опущена.

На рис. 9 (см. вклейку, стр. 80) на нижнем луче представлена осциллограмма контура линии ртути 4358 \AA .

Для выделения линии был использован спектрограф ДФС-13 с относительным отверстием $1 : 40$ и линейной дисперсией 4 \AA/мм .

Верхняя запись представляет собой осциллограмму развертывающей пилы со временем свипирования 250 мксек.

На рис. 10 (см. вклейку, стр. 80) показано изменение интенсивности линии ртути 4358 \AA в течение процесса. Ртутная лампа питается от сети с частотой в 50 гц, а свипирование происходит с частотой порядка 1200 гц.

Света ртутной лампы недостаточно, в связи с чем отношение сигнала к шуму умножителя становится невыгодным.

Выводы

1. Результаты исследования характеристик двойного преобразователя подтверждают правильность принципиальной и конструктивной схемы прибора, а также указывают на возможность создания прибора с лучшими параметрами.

2. Прибор испытанного типа может быть применен для регистрации процессов длительностью 500—1000 мксек.

3. Для улучшения времени разрешения следует предусмотреть в последующих вариантах увеличение коэффициента усиления прибора на 2 порядка и применить скоростной умножитель с линейностью по току до $50 \div 100$ ма с временным разрешением $1 \div 5 \cdot 10^{-8}$ сек. (например, ФЭУ «Импульс»).

4. Для увеличения пространственного разрешения необходимо увеличить разрешающую способность ЭОПа, доведя ее до $40 \div 50$ линий/мм и уменьшить щель до $0.03 \div 0.02$ мм.

Авторы считают своим долгом выразить глубокую признательность С. Л. Мандельштаму и Г. Г. Долгову за ценную дискуссию и содействие настоящей работе.

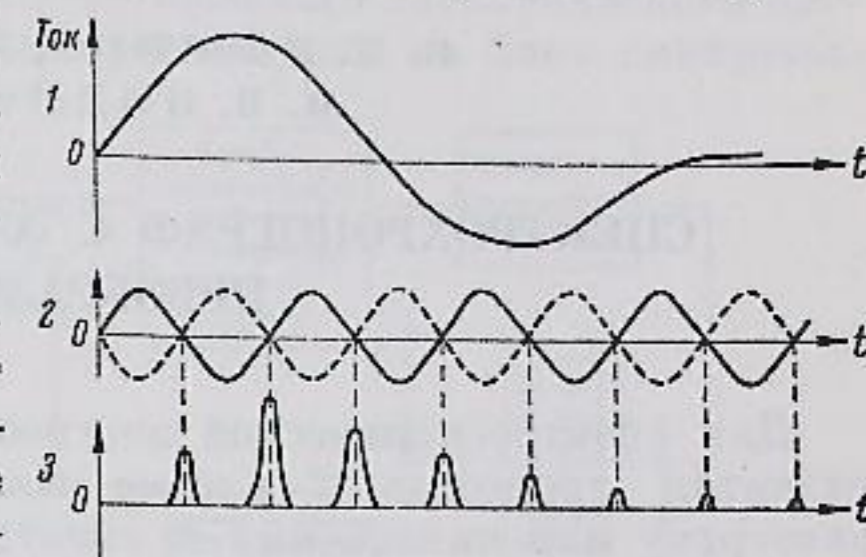


Рис. 8. Диаграмма работы прибора.

1 — разряд; 2 — развертка двойного преобразователя; 3 — осциллограмма линий во времени (полуширина и интенсивность).

зная величину максимальной скорости частиц. Для определения $\left(\frac{du}{dt}\right)_{\max}$ фоторегистрировались перемещения свободного конца ударника. Кинограмма «перемещение—время» приводится на рис. 4 (см. вклейку, стр. 240). Горизонтальные площадки соответствуют состоянию покоя свободного конца ударника. Разность уровней площадок характеризует величину перемещения свободного конца ударника. Максимальная скорость частиц определяется по скорости фоторегистрации и углу излома линии записи.

Для органического стекла получены следующие результаты (см. таблицу).

Вес заряда, в г	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9
Скорость частиц, $\left(\frac{du}{dt}\right)_{\max} \cdot 10^3$ см/сек.	3.19	3.65	4.40	4.50	4.58
Максимальная деформация, ϵ_{\max} , %	1.48	1.70	2.05	2.09	2.13
Цена полосы $\epsilon_0^{(1,0)}$, $\frac{\text{см} \cdot \text{кг}/\text{см}^2}{\text{полосу}}$	120	118	117	120	118
Скорость деформации, $\frac{\partial \epsilon}{\partial t} \cdot 10^5$ %/сек.	1.52	1.55	1.68	2.17	2.3

Было исследовано динамическое напряженное состояние модели рамной конструкции простейшего типа при воздействии на ее ригель поперечной импульсивной нагрузки. Модель изготавливалась из листового органического стекла толщиной 10 мм (рис. 5). Импульс давления взрыва заряда азидо свинца прикладывался через ударник посередине пролета ригеля рамы. Фотографирование проводилось с частотой съемки $\omega = 1\,350\,000$ сек.⁻¹; поле кадра указано на рис. 5.

На рис. 6 представлены фотографии волнового напряженного состояния ригеля рамы. В начальный момент времени ригель рамы не напряжен. Импульс распространяется вдоль ударника (рис. 6; см. вклейку, стр. 241). Далее начинается воздействие ударника на ригель рамы. Возникающая при этом волна напряжения имеет цилиндрическую форму (рис. 6, *а*). Многократные отражения ее от продольных граней ригеля приводят к образованию изгибающей волны напряжения (рис. 6, *б*). В этот момент возникает область нулевых напряжений, которая распространяется от «источника» своего зарождения со скоростью изгибающей волны и образует впоследствии нейтральную линию ригеля (рис. 6, *в*). Амплитуда образовавшейся изгибающей волны при распространении вдоль ригеля довольно быстро уменьшается, причем в самой волне напряженное состояние выравнивается (рис. 6, *г, д*).

Найденное значение цены полосы материала позволило определить величину максимальных касательных напряжений в поперечном сечении ригеля $z=0.5l$. На рис. 7 представлено распределение напряжений $\sigma_1 - \sigma_2 = 2\tau_{\max}$ в указанном сечении через интервалы времени $\Delta t = 7.2 \times 10^{-6}$ сек. Величина импульса составила $I = 0.6 \cdot 10^{-2}$ кг·сек., длительность импульса $T = 16.8 \cdot 10^{-6}$ сек. На нижней продольной грани ригеля распределение изохром определяет величину действующего растягивающего напряжения σ_1 , так как здесь $\sigma_2 = 0$. О величине контурных напряжений на верхней продольной грани ригеля можно судить после окончания действия импульса. Максимальные напряжения в ригеле рамы возникали в данном сечении в первые моменты времени после приложения нагрузки. Хотя величина этих напряжений превосходит статический предел прочности материала модели, ввиду кратковременности их действия, пластических деформаций и нарушений целостности ригеля не наблюдалось.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Фрохт. Фотоупругость. Гостехиздат, 1948.
2. Г. Кольский. Волны напряжения в твердых телах. ИЛ, 1955.
3. Л. К. Малышев. Строительная механика и расчет сооружений, 2, 1961.

А. П. ФЕДОРОВ

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КИНОКАМЕРЫ СФР ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

Высокоскоростная киносъемка в поляризованном свете находит широкое применение для исследования распространения волн напряжений методом сквозного просвечивания прозрачных моделей из оптически активного материала [1—6].

Дальнейшим развитием динамической фотоупругости является разработка методов и средств, позволяющих исследовать динамические процессы непосредственно на непрозрачных (например, металле) или оптически мало активных твердых телах. При этом на поверхность исследуемого тела наносится оптически активное покрытие и с помощью высокоскоростной киносъемки в отраженном или проходящем свете производится регистрация возникающих в покрытии оптических явлений, характеризующих деформации поверхности тела.

Метод покрытий в значительной степени дополняет и расширяет метод сквозного просвечивания. С помощью метода покрытий могут быть получены данные для решения вопросов теории подобия динамических явлений с целью пересчета результатов испытания прозрачных моделей на натурные металлические конструкции. Наконец, областью применения, в которой может быть использован только метод покрытий, является решение упруго-пластических динамических задач и вопросов разрушения непрозрачных твердых тел.

Ниже приводится описание аппаратуры, метода и результатов применения высокоскоростной киносъемки для исследования методом покрытий распространения волн напряжений в алюминиевых стержнях и моделях.

Аппаратура

Опыты проводились на оптической установке, собранной по V-образной схеме, показанной на рис. 1.

В схеме использованы все основные узлы установки, описанной в работах [3], [4], где приведены результаты исследования распространения волн напряжений в плексигласовых стержнях и пластинах.

В качестве источника света служила импульсная лампа ИФК-80 000, на которую в момент вспышки разряжалась батарея масляных конденсаторов общей емкостью 50 мкф при напряжении до 20 кв. Фотографическая регистрация осуществлялась сверхскоростным фоторегистратором СФР конструкции ИХФ АН СССР [7]. При использовании СФР в качестве лупы времени съемка производилась с применением четырехрядной