

А. Е. ХАСТОН

(Лондон)

УНИВЕРСАЛЬНАЯ СЪЕМОЧНАЯ КАМЕРА С ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Введение. Около 10 лет назад Комиссия по атомной энергии Великобритании решила приступить к разработке сверхскоростных съемочных камер с электронно-оптическими преобразователями (ЭОП). Требовалось, чтобы система была способна работать как в кадровом режиме, так и в режиме хронографической регистрации. Основным компонентом такой камеры является ЭОП. Однако тогда подходящего прибора в Великобритании не было. Поэтому вначале необходимо было сконцентрировать усилия на разработке, а в дальнейшем и на производстве электронно-оптического устройства, обладающего нужными параметрами.

В 1956 году на IV Международном конгрессе по высокоскоростной фотографии был представлен доклад Бутслова, Завойского, Плахова, Смолкина и Фанченко [1], посвященный новым электронно-оптическим преобразователям, разработанным в СССР. Большое впечатление на английских ученых произвел преобразователь типа ПИМ-3, и подобная система была принята в качестве прототипа нашего прибора. О стадиях разработки сообщалось в 1961 году [2] на II симпозиуме по фотоэлектронным устройствам и в 1962 году [3] на VI конгрессе по высокоскоростной фотографии. Съемочные камеры с ЭОП экспонировались на Английской физической выставке в 1964 году, на VII конгрессе по высокоскоростной фотографии [4] и III симпозиуме по фотоэлектрическим приборам [5]. До 1966 года работы выполнялись Комиссией по атомной энергии, но впоследствии было решено перевести проект на коммерческую основу. Дальнейшая работа выполнялась фирмой John Hadland (P. 1) LTD. Эта фирма выпустила камеру Itakon, о которой сообщалось на VIII конгрессе по высокоскоростной фотографии [6, 7], а также ряд вспомогательных устройств.

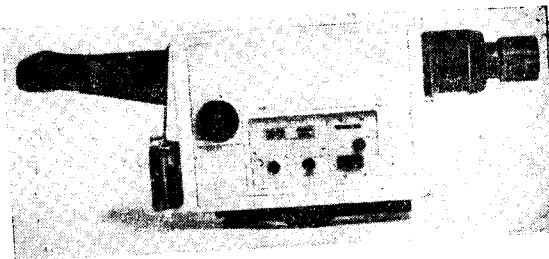


Рис. 1. Камера Itakon.

Базовая камера Itakon. Общий вид камеры показан на рис. 1. Это полностью автономный прибор, способный работать в кадровом и в хронографическом режимах регистрации. Прибор имеет ряд сменных блоков. В режиме покадровой съемки прибор работает с частотой от $5 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^7$ кадров в секунду. Три четырехдиапазонных блока хронографической развертки перекрывают диапазон скоростей развертки от 10 мкс/см до 10 нс/см.

Оптическая схема камеры показана на рис. 2. Объектив камеры формирует изображение на катоде ЭОП, а изображения с экрана пере-

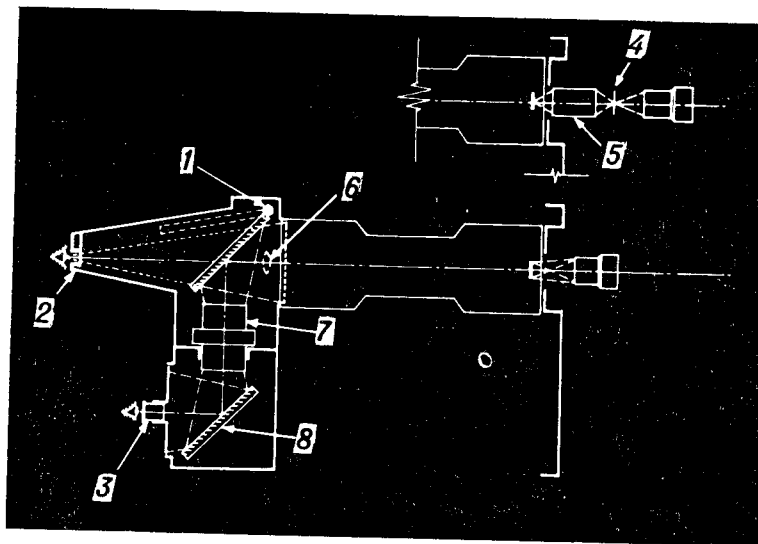


Рис. 2. Оптическая схема камеры:

1 — поворотное зеркало; 2 — затвор; 3 — окуляр микроскопа и сетка; 4 — щель;
5 — переносящие линзы; 6 — линза для наблюдения; 7 — переносящие линзы
и затвор; 8 — неподвижное зеркало.

даются на фотопленку с помощью двух плоских зеркал и переносящего объектива. Поворотное зеркало дает возможность оператору видеть экран ЭОП и производить точную фокусировку камеры. Для работы в режиме хронографической развертки на входе камеры устанавливается дополнительный объектив и щель. Камера снабжается сменными щелями с шириной 25, 50, 100 и 200 мкм. В камере использован ЭОП модели P856, который в настоящее время выпускается с фотокатодами S11 и S20. Он работает при ускоряющем напряжении в 20 кВ и имеет электронно-оптическое увеличение $M=2$. Схема ЭОП показана на рис. 3. ЭОП имеет три пары отклоняющих пластин, расположенных в дрейфовом пространстве трубки. Метод управления ЭОП в кадровом режиме, принятый нами, несколько отличается от того, которым пользуются советские коллеги.

Кадровая съемка. К первой паре отклоняющих пластин прикладывается синусоидальное напряжение (рис. 4). Оно многократно сканирует электронный луч по апертурной диафрагме таким образом, что пучок попадает на экран дважды за период, когда разность потенциалов на отклоняющих пластинах проходит через нуль. Это дает эффект многократного срабатывания затвора. Доля периода, равная времени экспонирования кадра, определяется амплитудой синусоидального напряжения и шириной апертурного отверстия. Во время экспонирования кадра изображение на экране не смещается, так как ко второй паре верти-

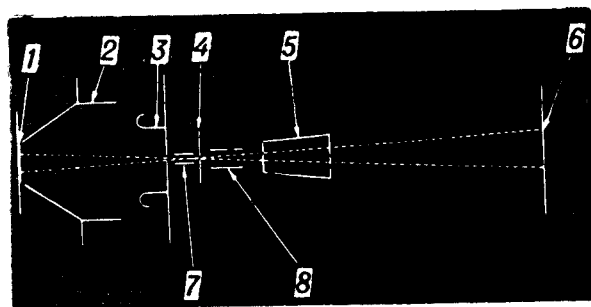


Рис. 3. Схема электронно-оптической части:
 1 — фотокаод; 2 — фокусирующий электрод; 3 — анод; 4 — диафрагма; 5 — отклоняющие пластины; 6 — экран; 7 — затворные пластины; 8 — компенсирующие пластины.

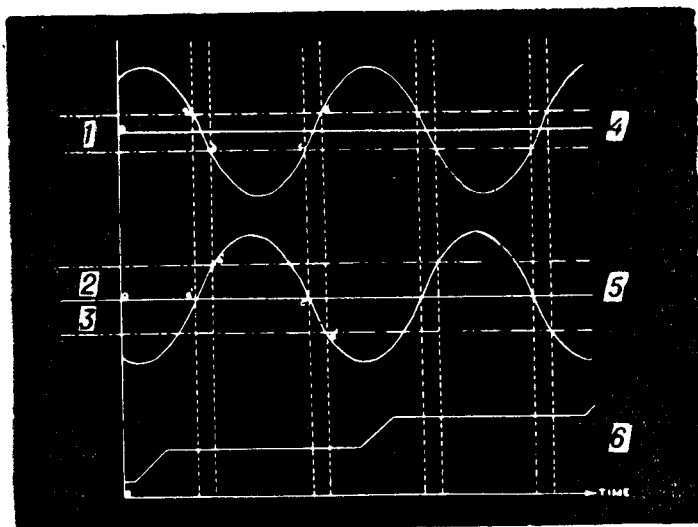


Рис. 4. Принцип работы камеры в кадровом режиме:
 1 — затвор открыт; 2 — верхнее изображение; 3 — нижнее изображение;
 4 — затворные пластины; 5 — компенсирующие пластины; 6 — отклоняющие пластины.

кальных отклоняющих пластин приложено в противофазе то же самое синусоидальное напряжение. Небольшой регулировкой фазовых соотношений между отклоняющими напряжениями изображение на экране можно разделить на два уровня — одно выше, а другое ниже центра экрана.

Сигнал ступенчатой формы, приложенный к третьей паре отклоняющих пластин, смещает изображение по экрану ЭОП в горизонтальном направлении.

Стартовый импульс, синхронизированный с исследуемым процессом, запускает генератор синусоидальных колебаний. Электронный затвор камеры до прибытия стартового импульса заперт, поэтому «мертвое» время прибора равно половине временного интервала между кадрами (см. рис. 4).

Кроме того, камера может быть использована в «дежурном» режиме. Временная диаграмма, иллюстрирующая этот режим, показана на

рис. 5. Генератор синусоидального напряжения запускается заранее предварительным импульсом, и амплитуда колебаний генератора поддерживается постоянной в течение 500 мкс. Смещение изображения по экрану начинается тогда, когда на запуск приходит второй синхроимпульс, связанный, например, с моментом появления «первого» свечения от исследуемого объекта. Размер изображения на экране равен 15×15 мм; разрешающая способность при малых скоростях съемки равна 10 парам линий на миллиметр. Она ухудшается до 5 пар линий на миллиметр при частоте съемки $2 \cdot 10^7$ кадров в секунду. Самая скоростная модель камеры этого типа имеет частоту съемки $6 \cdot 10^7$ кадров в секунду. На рис. 6, 7 приведены фотографии, иллюстрирующие работу камеры Итакоп в кадровом режиме.

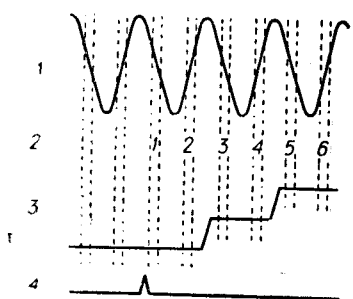


Рис. 5. Дежурный режим:
1 — колебания затворного напряжения; 2 — номер кадра; 3 — ступенчатое напряжение; 4 — второй синхроимпульс.

Хронографический режим. Переход к хронографическому режиму осуществляется сменой одного электронного блока. При этом электрические цепи изменяются так, что на горизонтальные отклоняющие пластины подается линейно изменяющееся парафазное напряжение. Максимальное временное разрешение в этом режиме составляет $5 \cdot 10^{-11}$ с*. Рис. 8

иллюстрирует работу камеры в хронографическом режиме.

Усилитель яркости изображения. Увеличение яркости изображения до уровня, необходимого для регистрации на фотоматериал (низкие уровни освещенности), может быть достигнуто за счет использования совместно с камерой Итакоп усилителя яркости типа 9664, выпускаемого фирмой ЕМІ. Перенос изображения с экрана Итакоп на вход усилителя производится с уменьшением в 4 раза; апертура объектива $D/f = 1/1,2$. Трубка 9664 с магнитной фокусировкой имеет четыре каскада усиления на пленках люминофор — слюда — фотокатод (коэффициент усиления по свету $K \cong 10^6$; разрешение $N \cong 25$ п. л/мм). Камера Итакоп и усилитель яркости устанавливаются на одной оптической скамье, а специально разработанные элементы переносящей оптики конструктивно объединяют систему.

Спектрографическая приставка. Спектрографическая приставка имеет геометрическую апертуру $D/f = 1/1,9$. Диспергирующим элементом приставки является дифракционная решетка, работающая в проходящем свете. Входной объектив камеры устанавливается на входе приставки, а разложенное по спектру изображение фокусируется на фотокатод ЭОП. Смещение приставки в вертикальном направлении позволяет выбирать нужную область спектра и осуществлять точную юстировку системы. Приставка имеет сменные решетки. В таблице приведены основные параметры спектрографической приставки.

Баллистическая синхροприставка [8]. Баллистическая синхροфотография широко применяется для фотографирования снарядов в полете. Обычно камера для съемки на движущуюся пленку устанавливается на известном расстоянии от линии полета снаряда. Фокусное расстояние объектива выбирается таким образом, чтобы изображение снаряда двигалось в плоскости пленки с той же скоростью, что и сама пленка в камере. Таким образом, изображение снаряда регистрируется в тот мо-

* Имеется в виду так называемое «техническое» временное разрешение, равное отношению размера разрешаемого на экране элемента к скорости развертки (примечание ред.).

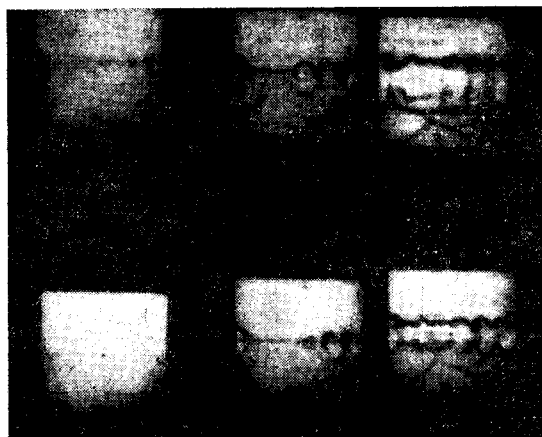


Рис. 6. Процесс электрического взрыва проволочки; теневой метод съемки (10^5 кадров в секунду; длительность экспозиции 2 мс).

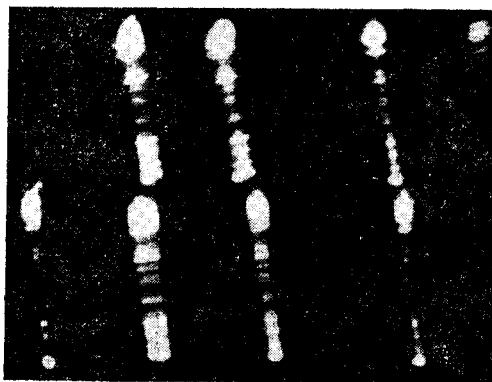


Рис. 7. Процесс электрического взрыва проволочки; собственное свечение ($6 \cdot 10^7$ кадров в секунду; длительность экспозиции кадра 2 нс).

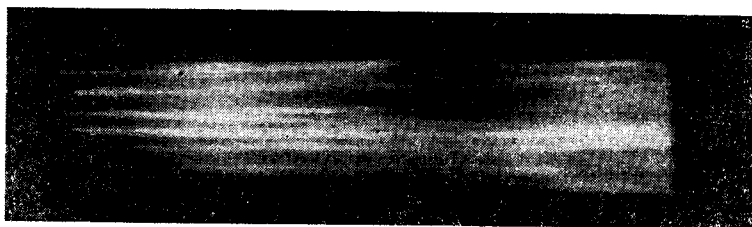


Рис. 8. Хронографическая запись процесса электрического взрыва проволочки (длительность развертки 20 мкс).

мент, когда он пересекает оптическую ось камеры. Чтобы устранить размазывание картины, возникающее из-за разницы в скорости движения пленки и изображения снаряда, в оптической схеме формируется промежуточное изображение, в плоскости которого устанавливается щель. По результирующему снимку можно измерить скорость, направление вращения и угол полета снаряда. Этот метод имеет ряд недостатков:

Размеры высоты спектра на фотокатод, мм	Решетка, лин/мм	Ширина спектрального диапазона, 10^{10} м	Спектральная разрешающая способность, 10^{10} м
7,5	200	2800	20
	300	1900	12,5
	400	1400	9,5
	600	860	6
9,0	200	3400	20
	300	2200	12,5
	400	1680	9,5
	600	1040	6

1) низкая скорость движения пленки ($V \leq 100$ м/с) позволяет использовать систему с движущейся пленкой только для регистрации больших и относительно медленно летящих объектов;

2) полезную информацию несет лишь малая часть всей длины пленки;

3) нельзя применять фотоматериалы типа Polaroid, поэтому приходится тратить время на обработку пленки.

Камера Имакоп с баллистической синхрорисставкой свободна от этих недостатков. Оптическая схема устройства изображена на рис. 9. Предмет проецируется с помощью входного объектива на узкую щель так, что при движении предмета его изображение пересекает эту щель. Щель фокусируется на катод ЭОП в масштабе 1 : 1 (два объектива Сакоп $D/f=1/1,2$). ЭОП увеличивает изображение щели в 2 раза. С экрана ЭОП изображение фотографируется в масштабе 1 : 1 на пленку Polaroid или на 70-миллиметровую роликовую пленку.

Синхроимпульс пускового устройства запускает развертку перед тем, как снаряд входит в поле зрения прибора. Сканирование начинается с левой стороны экрана, поэтому независимо от направления движе-

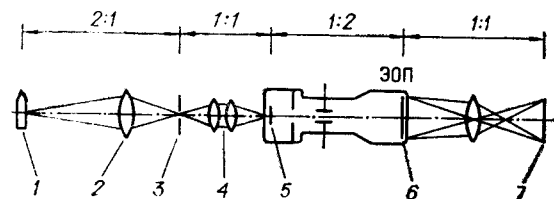


Рис. 9. Схема прибора, с баллистической синхрорисставкой:

1 — летящий снаряд; 2 — объектив; 3 — щель; 4 — переносящая оптика; 5 — фотокатод ЭОП; 6 — экран ЭОП; 7 — фотопленка.

ния снаряда «направление движения» его изображения, зафиксировано на фотографии, не изменяется. Предпочтительнее размещать камеру таким образом, чтобы снаряд двигался по отношению к ней слева направо, поскольку тогда изображение снаряда на экране перемещается в том же направлении, что и изображение щели. При этом повышается разрешающая способность формирующей изображение.

Экспозиция является функцией ширины щели и скорости сканирования. При фотографировании ружейной пули требуется обычно иметь длительность развертки 100 мкс при ширине щели, составляющей 1% от длины развертки (рис. 10). В этих условиях длительность экспозиции одного элемента снимка равна 1 мкс. Для получения оптимальной разрешающей способности объект может освещаться импульсной лампой-вспышкой. Наиболее приемлемой здесь является короткая прямая ксеноновая лампа малого диаметра, питаемая от согласованной искус-

ственной LC -линии и дающая постоянный выход света в течение всего времени экспонирования.

Излучение лампы большой пластмассовой линзой проецируется в область пространства, где должен появиться снаряд. На последнем будет вывечиваться яркая полоска, которая должна быть спроецирована в плоскость промежуточного изображения и на фотокатод прибора.

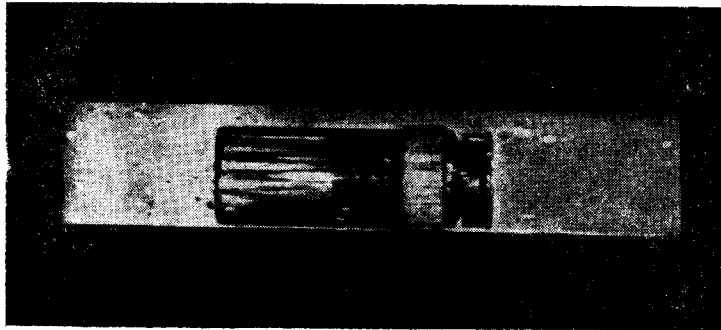


Рис. 10. Изображение пули, летящей со скоростью 1000 м/с, зарегистрированное с помощью баллистической синхроприставки (диаметр пули 20 мм).

В этих условиях освещения объекта диапазон возможностей прибора резко увеличивается.

Imakon-600 [9]. В этой модели использован новый метод получения очень высокой скорости съемки. Обычно ЭОП осуществляет съемку в два приема: схема управления прерывает электронный пучок и сдвигает прерванный пучок в различные участки экрана.

В Imakon-600 нет операции прерывания луча и смещение изображения с одного участка экрана на другой выполняется настолько быстро, что на участках между кадрами пленка остается неэкспонированной. Работающая таким образом камера была описана несколько лет тому назад Симоновым и Кутуковым [10]. Они генерировали ступенчатый сигнал, используя последовательные отражения волны напряжения, возникающей при разряде несогласованной линии. Однако при этом неизбежна значительная нелинейность амплитуды развертки. В Imakon-600 необходимое отклонение достигается без генерирования ступенчатого сигнала как такового. Используются две пары пластин, отклоняющие изображение в одной и той же плоскости, как показано на рис. 11.

К одной паре пластин приложено пилообразное напряжение, в то время как ко второй паре приложено напряжение, изменяющееся по линейному закону. Пилообразное напряжение формируется специально разработанным генератором, а сигнал, изменяющийся по линейному закону, создается обычной схемой линейной развертки.

Скорость спада импульса пилообразного напряжения регулируется до совпадения со скоростью нарастания линейно изменяющегося напряжения. При сложении двух этих сигналов реализуется ступенчатое отклонение. Указанные выше две составляющие, каждая из которых

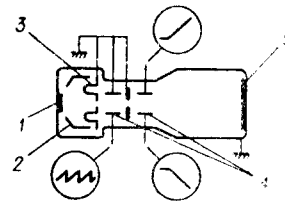


Рис. 11. Электронно-оптическая схема нового метода кадровой съемки: 1 — фотокатод; 2 — фокусирующий электрод; 3 — анод ЭОП; 4 — отклоняющие пластины; 5 — экран.

генерируется и подается на отклоняющие пластины ЭОП, независимо друг от друга обеспечивают очень высокую скорость покадровой съемки.

Имакоп-600 будет выпускаться в 1971 году со следующими параметрами:

1. Покадровая съемка. Три скорости $150 \cdot 10^6$ ($\tau_{\text{эксп}} = 4 \text{ нс}$); $300 \cdot 10^6$ ($\tau_{\text{эксп}} = 2 \text{ нс}$); $600 \cdot 10^6$ ($\tau_{\text{эксп}} = 1 \text{ нс}$).

2. Линейная развертка. Скорость записи до 4 мм/нс.

3. Круговая развертка. Изображение разворачивается по кругу с периодом длительностью 10 нс.

Улучшение временного разрешения стало возможным благодаря созданию новой модификации электронно-оптического преобразователя Р856, в которой существенно уменьшен разброс времени пролета электронов по сравнению со стандартной моделью.

Заключение. Электронно-оптическая регистрирующая система Имакоп является гибким прибором, выпускаемым промышленностью. Набор разнообразных приставок определяет универсальность прибора как средства проведения диагностических измерений во многих областях науки и техники. Камеры Имакоп используются в настоящее время во многих лабораториях мира, а три из них — в Советском Союзе. Продолжается дальнейшее усовершенствование камеры, поскольку политика фирмы J. Hadland (P. I) LTD выражается в стремлении удерживать ведущие позиции в области производства специального оборудования, соответствующего современному уровню. Это избавляет ученых и инженеров от затрат драгоценного времени на разработку своими силами необходимых им приборов. Мы с удовольствием отмечаем работы ученых и инженеров Советского Союза в этой области, которые оказали большое влияние на разработку камеры.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. M. Butslow, E. K. Zavoiskii, A. G. Plakhov, G. E. Smolkin, S. D. & Fanchenko. Proc. 4th Int. Congress on High-Speed Photography, 1958.
2. A. E. Huston, F. & Walters. Advances in Electronics and Electron Physics, 1962, v. 16.
3. F. Walters, R. A. Chippendale and R. P. Brown. Proc. 6th Int. Congress on High-Speed Photography, 1962.
4. A. E. Huston. Proc. 7th Int. Congress on High-Speed Photography, 1965.
5. A. E. Huston. Advance in Electronics and Electron Physics, 1965, v. 22B.
6. A. E. Huston, S. & Majundar. Proc. 8th Int. Congress on High-Speed Photography, 1968.
7. K. A. F. Haynes, *ibid.*
8. R. Hadland. Proc. 9th Int. Congress on High-Speed Photography, 1970.
9. A. E. Huston, *ibid.*
10. V. A. Simonov, G. P. & Kutukov. Proc. 5th Int. Congress on High-Speed photography, 1960.

Поступила в редакцию
1 февраля 1971 г.