

Лабораторная работа № 35.

**ИЗУЧЕНИЕ АППАРАТНОЙ ФУНКЦИИ
ЭЛЕКТРОННООПТИЧЕСКОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Преподаватель к.ф.-м.н., снс ФГУП ГНЦ РФ ТРИНИТИ
Юфа Владимир Наумович

СОДЕРЖАНИЕ

I.	Введение	2
II.	Устройство современных ЭОПов	2
III.	Методы определения пространственных характеристик ЭОП	12
IV.	Схема и порядок выполнения лабораторной работы	20
V.	Методы обработки результатов работы	21
VI.	Контрольные вопросы	23
VII.	Список литературы	23
VIII.	Рисунки	24

I. Введение

В круг задач по изучению окружающего нас мира входит исследование изображений самых различных объектов. Во всех случаях регистрации изображений существенными являются:

- задачи преобразования спектра излучения в диапазон чувствительности приемника;
- усиление яркости изображения;

- пространственное и временное разрешения регистрирующей системы.

Все эти задачи с успехом решаются в практике сегодняшнего эксперимента применением электронно-оптических преобразователей (ЭОП). Можно смело сказать, что внедрение электронно-оптических преобразователей в физический эксперимент произвело революцию в практике фотографических методов исследования быстропротекающих процессов. Действительно, их временное разрешение вплоть до 10^{-12} с (на четыре порядка величины лучше, чем у оптико-механических камер!), чувствительность близкая к предельной¹, простота сканирования изображений и возможность регистрировать излучение в инфракрасной, видимой, ультрафиолетовой и мягкой рентгеновской областях спектра делают эти уникальные приборы незаменимыми инструментами исследования.

II. Устройство современных ЭОПов

Электронно-оптические преобразователи – это вакумные приборы, в которых оптическое изображение сначала преобразуется в свой электронный аналог, т.е. в электронное изображение, которое усиливается и затем проецируется на люминесцентный экран, где снова преобразуется в оптическое изображение. В настоящее время в мире выпускается несколько десятков различных типов электронно-оптических преобразователей, предназначенных для научных исследований, но все их многообразие можно условно разделить на так называемые “времяанализирующие приборы” и “усилители света”. Последние как наиболее простые мы и используем для первого знакомства.

¹ Предельной чувствительностью называется чувствительность, позволяющая регистрировать единичные фотоны (или электроны). Понятно, что увеличивать чувствительность сверх предельной бессмысленно, поскольку ни пол фотона ни пол электрона в природе не существует.

Устройство типичного усилителя света показано на рис. 1. С помощью внешнего объектива изображение проецируется на полупрозрачный фотокатод (2), который часто формируют на полупрозрачной металлической подложке (1). Последняя необходима, чтобы избежать падения напряжения вдоль фотокатода при больших импульсных световых нагрузках, поскольку собственное сопротивление большинства фотокатодов чрезмерно велико. Эмиссия электронов с поверхности фотокатода в каждой его точке пропорциональна интенсивности падающего в эту точку света, в силу чего пространственное распределение эмитированных электронов $n_e(x, y) = \mu n_p(x, y)$, где n_e – пространственная плотность эмитированных электронов², μ – квантовый выход фотокатода, а n_p – пространственная плотность падающих на фотокатод фотонов. Таким образом, эмитированное фотокатодом электронное изображение с точностью до случайных флюктуаций повторяет изображение оптическое. Динамический диапазон фотокатода превышает несколько миллионов. Это означает, что эмиссия с пространственно разрешаемого участка изображения, примерно равного β^2 , пропорциональна количеству фотонов падающего света в пределах от нескольких электронов до их нескольких миллионов. Повторим, что при малом числе эмитированных электронов обсуждаемая пропорциональность определяется статистикой фотоэлектронов и выполняется только в среднем. В максимуме спектральной чувствительности цена рождения электрона составит примерно 3 фотона/электрон. Справедливо ради нужно отметить, что это, конечно, рекордные результаты. Фотокатод рядовых коммерческих трубок считается хорошим, ес-

² Заметим, что рождение фотоэлектронов есть случайный процесс, поэтому это равенство выполняется только в среднем, т.е. n_e выполняет роль математического ожидания.

ли его квантовый выход составляет $0,15 \div 0,2$. Понятно, что при таком квантовом выходе нужно затратить в среднем $5 \div 7$ фотонов для рождения одного электрона.

Экран электронно-оптического преобразователя (5), являющийся составной частью анода в этой электронной системе, формируется на противоположной фотокатоду стенке вакуумной колбы и служит для преобразования электронного изображения в оптическое. Экраны электронно-оптических преобразователей, кроме как лучшей разрешающей способностью ($\beta \approx 1,25 \div 2 \cdot 10^{-2}$ мм), мало чем отличаются от экранов телевизоров или экранов компьютерных дисплеев. Такие экраны состоят из осажденного люминофора (часто сине-фиолетового свечения ($\lambda_{\max} \approx 450$ нм, $\Delta\lambda \approx 60$ нм), лежащего в максимуме чувствительности большинства детекторов излучения) и вакуумно-напыленной поверх него пленки алюминия толщиной $\sim 50 \div 100$ нм. Алюминиевые пленки такой толщины практически прозрачны для электронов с энергией порядка 10 кэВ и фактически непрозрачны для света. Роль этих пленок двояка: во-первых, они формируют электрическое поле в районе экрана и, во-вторых, они отражают свечение люминофора в направлении детектора излучения, чем с одной стороны повышают эффективность регистрации, а с другой – экранируют фотокатод от паразитной засветки. Энергетическая эффективность³ экрана при облучении его электронами с энергией в диапазоне 10÷20 кэВ составляет 10÷15%. 10÷20 кэВ – это как раз та разность потенциалов

³ Энергетическая эффективность экрана вводится по определению как отношение мощности фотонного потока, излучаемого экраном, к мощности потока электронов, облучающих экран [Вт/Вт]. При импульсном режиме работы энергетическая эффективность экрана определяется, как отношение энергии фотонов излученных экраном, к энергии электронов, облучивших экран за время регистрируемого светового импульса [Дж/Дж].

между фотокатодом и экраном, при которой обычно работают однокаскадные электронно-оптические преобразователи. Поэтому каждый электрон с энергией лежащей в этих пределах, рождает в зависимости от напряжения питания и эффективности фотокатода $\sim 300 \div 1000$ фотонов со средней энергией 2,75 эВ, что соответствует максимуму спектральной плотности излучения люминофора сине-фиолетового свечения.

Итак, непосредственно у поверхности фотокатода сформирован электронный аналог спроецированного на фотокатод оптического изображения. Наша задача – перенести его на экран электронно-оптического преобразователя. Этую задачу выполняет электронная оптика – специальная конфигурация электрических полей, собирающая все электроны эмитированные какой-либо точкой фотокатода в сопряженную с ней точку экрана. Заметим, что роль поверхностей линз оптического объектива, изменяющих направление распространяющихся лучей, в электронной оптике играют эквипотенциальные поверхности электрического поля. Действительно, если между вектором напряженности электрического поля, всегда перпендикулярного эквипотенциальной поверхности, и вектором скорости электрона существует некоторый угол, то существует и компонента электрического поля, перпендикулярная вектору скорости, которая и вызывает искривление электронной траектории. Чем больше угол между векторами, тем больше и эта трансверсальная сила. Необходимое для переноса электронного изображения с фотокатода на экран поле формируется системой электродов, в простейшем случае всего двумя электродами – это электроды (3) и (4) на рис.1. Можно ли и в каких случаях не создавать сложных конфигураций электрических полей, а обойтись лишь однородным продольным электрическим полем, естественно реализуемым, когда между плоскими фотокатодом и экраном приложено ускоряющее напряжение? Оценим, какой в этом случае будет кружок рассеяния на экране при эмиссии электронов из некоторой точки фотокатода. Известно, что фото-

катод излучает электроны изотропно по всем направлениям, причем максимум плотности вероятности распределения электронов по энергиям для многощелочного фотокатода при облучении его квантами света видимого диапазона лежит в области $E_0 \approx 0,5$ эВ. Пусть некий “средний” электрон, ускоряясь продольным электрическим полем по направлению от фотокатода к аноду (экрану), равномерно движется в перпендикулярном направлении со скоростью, соответствующей максимуму плотности распределения вероятности. Из этих посылок нетрудно получить оценку радиуса кружка рассеяния: $r = 2S\sqrt{E_0/E}$, где S – расстояние между катодом и анодом, E_0 – энергия эмитированного электрона, а E – энергия ускоренного электрона. Расстояние между катодом и анодом S обычно составляет ~ 10 см, поэтому, если $E_0 = 0,5$ эВ, а $E = 10$ кэВ, то $r \approx 1,4$ мм. Понятно, что это не может нас устроить. Чем же можно предпринять в такой ситуации? Во-первых, уменьшить S , скажем до 5 мм. Тогда диаметр кружка рассеяния составит $\sim 0,14$ мм. Это не блестящий результат, но работать можно, и такие приборы, так называемые бипланары (biplanar), существуют. Несмотря на их подкупающую простоту, они не получили широкого распространения по причине малого коэффициента усиления, достаточно большого паразитного фона и невысокого пространственного разрешения. Другая возможность – использовать продольное, параллельное электрическому, магнитное поле. При этом за счет трансверсальной компоненты скорости электроны будут двигаться по винтообразным траекториям, совершая полный оборот вокруг оси вращения, за отрезок времени $\Delta t = 2\pi/\omega$,

где $\omega = \frac{eH}{mc}$ – так называемая ленгмюровская частота. Обратим внимание на то, что время полного оборота не зависит от скорости электронов. Поэтому, если подобрать соотношение между ускоряющим электрическим и магнитным полями так, чтобы время пролета электрона от фотокатода до экрана

равнялось бы Δt , то все электроны, вылетевшие из одной и той же точки фотокатода, совершив полный оборот вокруг своих осей вращения, снова соберутся вместе в одной и той же точке экрана. Такие приборы были когда-то очень широко распространены, несмотря на их отчаянные габариты, чрезмерный вес и необходимость стабилизировать ускоряющее напряжение и ток в магнитных катушках с точностью до 0,1%. В то время обеспечить сравнимое качество фокусировки в чисто электростатических приборах не представлялось возможным, но по мере развития техники электростатической фокусировки их пространственное разрешение резко возросло и приборы с магнитной фокусировкой просто вымерли, как динозавры. Решающую роль в улучшении качества пространственного разрешения приборов с электростатической фокусировкой сыграло внедрение в оптику стекловолоконной техники. Дело в том, что в простых электростатических приборах, подобных изображеному на рис. 1, невозможно получить одинаково хорошее пространственное разрешение в центре и на краю поля зрения. Другими словами, плоскости фотокатода и экрана оказываются оптически сопряженными лишь в приосевой области. В то же время всегда существуют поверхности (к сожалению, не плоские), которые могут быть оптически сопряжены с помощью электрических полей даже не очень сложной конфигурации. Это всегда хорошо понималось – так еще 50 лет назад фотокатод прибора RCA C73435 формировался на сферической поверхности. Однако здесь возникала другая трудность – как спроектировать оптическое изображение на сферическую поверхность без геометрических искажений и неоднородности пространственного разрешения по полю зрения? Кардинально решить все перечисленные проблемы оказалось возможным только при использовании так называемых “стекловолоконных шайб”. Стекловолоконные шайбы, используемые как входные и/или выходные окна современных электронно-оптических преобразователей, состоят из миллионов пре-

дельно плотно упакованных светопроводящих волокон, ориентированных параллельно оптической оси прибора. Шаг этой растровой структуры d соответствует наружному диаметру отдельных, двухслойных светопроводящих стекловолокон (второй слой – изолятор, предотвращающий паразитную засветку соседних волокон) и составляет в современных приборах $5\div10$ мкм. Ясно также, что переданное такой структурой изображение будет состоять из отдельных световых точек (пикселей) со световым диаметром $3\div8$ мкм, однако их плотность составит $10^6\div4\cdot10^6$ см⁻². Это много или мало 2000 на 2000 элементов разложения на каждый квадратный сантиметр поверхности? Для сравнения заметим, что полностью в идеальном телевизионном кадре элементов разложения содержится в десять раз меньше. Однако для нас гораздо важнее другое – тот факт, что $d \ll \beta$. После укладки стекловолокон и их спекания стекловолоконная шайба с точки зрения возможности ее механической обработки, в том числе возможностей ее шлифовки и полировки, ничем не отличается от обычного стекла. Поэтому одну из ее поверхностей, скажем ту, на которую будет проецироваться в дальнейшем оптическое изображение, делают плоской, а другую, ту на которой будет формироваться фотокатод, – сферической. Конечно же, устройство современных усилителей света далеко от той изначальной конструкции, что приведена на рис. 1, в чем нетрудно убедиться бросив даже беглый взгляд на рис.2, на котором представлена конструкция усилителя света PMU12x18, выпускавшегося фирмой BIFO. На Рис. 3. показан внешний вид этого прибора: справа – собственно вакуумный прибор, слева – прибор в контейнере. Внутри этого, залитого высоковольтным компаундом контейнера, помещается не только собственно электронно-оптический преобразователь но также и высоковольтный преобразователь напряжения, делители напряжения и электроника, ответственная за работу прибора, так что наружу часто выводятся лишь два провода, подключаемых к 3-х вольтовой батарейке.

Коэффициент усиления электронно-оптического преобразователя, т. е. отношение количества фотонов, излученных люминофором экрана, к количеству фотонов, пришедших на фотокатод может быть вычислен по формуле: $\eta = \mu\varphi \frac{eU}{h\bar{v}_{\text{вых}}}$.

Здесь μ – квантовый выход фотокатода, φ – энергетическая эффективность экрана, e – заряд электрона, U – разность потенциалов между фотокатодом и анодом электронно-оптического преобразователя, $h\bar{v}_{\text{вых}}$ – энергия фотона (в джоулях), усредненная по спектральному распределению фотонов, эмитированных экраном. Приняв $\mu = 0,2$; $\varphi = 0,125$;

$U = 10$ кВ; и $h\bar{v}_{\text{вых}} = 4,4 \cdot 10^{-19}$ Дж, найдем, что $\eta \approx 90$. Это отличный результат, к сожалению, в обычных, стандартных однокаскадных усилителях света η колеблется в пределах $30 \div 50$. Существует несколько возможностей повышения η .

Первая – это переход к многокаскадным приборам.

В многокаскадных приборах внутри одной вакуумной колбы монтируются последовательно несколько идентичных каскадов усиления, разделенных тонкой прозрачной для света пленкой (обычно это слюда толщиной $5 \div 10$ мкм). На одной стороне этой пленки формируется экран, на другой – фотокатод, так что эта многослойная конструкция является одновременно экраном для предыдущего каскада усиления и фотокатодом для последующего.

Другая возможность увеличить коэффициент усиления – это использование, так называемых микроканальных пластин для размножения электронов внутри прибора. Микроканальные пластины – это предельно плотно упакованные сборки из миллионов одиночных микроканальных электронных умножителей, продольные оси которых ориентированы перпендикулярно плоскости всей сборки. Конструкция одиночного микроканального электронного умножителя показана на рис.4. Такой микроканальный электронный умножи-

тель, называемый иногда электронным умножителем с равномерно распределенными динодами, представляет собой полую трубку с наружным диаметром $5\div 10$ мкм и длиной $0,3\div 0,5$ мм. Внутренняя поверхность трубы обрабатывается специальным химическим составом, в результате чего она, становится слабо проводящей. Благодаря этому потенциал, обусловленный напряжением, приложенным к торцам трубы оказывается равномерно распределенным по ее длине, что в свою очередь обеспечивает равномерность электрического поля, направленного вдоль оси трубы. Электроны, попадающие в такую трубку, ускоряются электрическим полем вдоль ее оси, но благодаря трансверсальной компоненте скорости и небольшому диаметру трубы достаточно часто сталкиваются с ее стенками. Ускоряющее электрическое поле подбирается такой величины, чтобы на длине пробега электрона между столкновениями со стенками трубы он приобретал бы энергию, обеспечивающую вторичную электрон-электронную эмиссию. Если коэффициент вторичной электрон-электронной эмиссии оказывается большим единицы, внутри трубы происходит размножение электронов. Таким образом, величина коэффициента размножения электронов, или как принято называть коэффициент усиления, зависит от приложенного к торцам трубы напряжения и изменяется в пределах от 0 до 10^4 при изменении приложенного напряжения от $\sim 0,5$ до 1 кВ. Понятно, что если мы имеем дело не с отдельным микроканальным электронным умножителем, а с их плотно упакованной структурой, мы имеем возможность усиливать электронное изображение и этим увеличивать яркость оптического изображения на экране электронно-оптического преобразователя. Как это видно на рис. 2, на котором показано устройство прибора PMU12x18, микроканальная пластина монтируется в непосредственной близости к экрану. Между выходным торцом микроканальной пластины и алюминиевым покрытием экрана прикладывается напряжение, в силу чего электроны, которые покидают микро-

канальную пластину ускоряются до энергии 5÷7 кэВ, что обеспечивает достаточно высокую энергетическую эффективность экрана. Понятно, что в такого рода приборах электронное изображение проецируется не на экран, а на входной торец микроканальной пластины. Заметим, что усилитель света PMU12x18 – типичный представитель современных приборов этого класса. Его параметры достаточно высоки – $\beta < 20$ мкм по всему входному зрачку диаметром 12 мм, коэффициент усиления $\eta = 2 \cdot 10^4$.

Времязанализирующие электронно-оптические преобразователи отличаются от усилителей света лишь наличием отклоняющих пластин, предназначенных для сканирования электронного изображения. Переменное во времени электрическое поле между отклоняющими пластинами играет ту же роль, что и вращающиеся зеркало в оптико-механических приборах. При этом в фоторегистраторах на отклоняющие пластины, также, как в осциллографах, подается линейно изменяющееся во времени напряжение, обеспечивающее линейное перемещение электронного изображения вдоль экрана электронно-оптического преобразователя. В кадровых электронно-оптических камерах на пластины подаются импульсы ступенчатой формы, из-за чего электронное изображение скачками перемещается с одного места экрана на другое. Общее количество кадров в таких приборах невелико (обычно не больше 16), однако возможность их точной синхронизации с исследуемыми явлениями с лихвой компенсирует их малое количество.

В качестве примера на рис.5. показано устройство времязанализирующего электронно-оптического преобразователя PV201. Нетрудно заметить, что конструкция этого прибора, который сама собой разумеется содержит отклоняющие пластины, в общих чертах весьма схожа с подробно обсужденным нами ранее усилителем света (см. рис. 2). Здесь следует отметить, что этот прибор не обладает предельным времененным разрешением. Сегодня близкое к предельному времен-

ное разрешение ($3 \cdot 10^{-13}$ с) достигнуто в электронно-оптической камере К005, в которой используется электронно-оптический преобразователь PV-001.

III. Определение пространственных характеристик ЭОПа

В наш современный лексикон, особенно при обсуждении и выборе параметров фотоприемников (фотокамеры, телекамеры, пленки и т.д.), широко вошло понятие такого параметра, как разрешающая способность. Применительно к фотоприемникам – это характеристика, “определенная визуально по номеру элемента миры с наиболее тонкими штрихами, все направления штрихов в котором еще разрешаются раздельно” [3]. Таким предельным “элементом” миры, сфотографированной с экрана электронно-оптического преобразователя и показанной на рис. 6, является поле № 10. На том же рисунке приведены столь сильно различающиеся между собой микроденситограммы входного и выходного изображений, откуда видно, что для визуального разрешения в данном конкретном случае вполне достаточно 10%-й модуляции яркости на выходном экране. О чем говорит тот факт, что столь малая модуляция яркости позволяет визуально “разрешить раздельно все направления штрихов”? Безусловно, об удивительной способности человеческого мозга к опознаванию образов, но ведь и только! Можно ли на основе подобного рода визуальных измерений получить критерии для оценки погрешностей измерений входных сигналов?

К сожалению, нельзя. Было принято немало попыток с помощью критерия Релея залатать эти зияющие прорехи. Однако введенный Дж. Релеем численный критерий правильно устанавливает пороговое значение визуального разрешения лишь для вполне определенных условий: аппаратная функция – результат дифракции на круглом отверстии или щели, источники излучения точечные, а их интенсивность примерно одинакова. Здесь использование критерия Релея целесооб-

разно и оправдано. Применять же его для формализации визуальных восприятий вообще столь же неуместно, как, например, использовать, что кстати, постоянно делается, световые единицы (люмен, люкс и пр.) при определении чувствительности фотоэлектронных приборов, предназначенных для работы в ИК или УФ-диапазонах, в которых, как известно, функция видности просто равна нулю. Одно время казалось, что введение в практику метода измерений частотно-контрастных характеристик [4] существенно изменит дело, но и здесь дань традициям не позволила воспользоваться имеющимися возможностями. Действительно, вряд ли можно найти радиоинженера, который для снятия амплитудно-частотной характеристики использовал бы генератор прямоугольных импульсов, но откроите любой справочник – частотно-контрастные характеристики в оптике снимаются по штриховой мере! И дело даже не столько в том, что применение “синусоидальной” меры (т.е. меры, пространственная яркость которой меняется по закону $I(x)=I_0[1+\sin(\alpha x)]$) существенно упрощает математическое описание, а в том, что измерения со штриховой морой не обеспечивают на высоких пространственных частотах требуемую точность. Мы перечислили ряд параметров, призванных характеризовать оптические устройства в соответствии с требованиями ГОСТ-ов и нормалей, которые приводятся в справочной литературе. Из изложенного ясно, что для инженерного анализа и синтеза сколько-нибудь сложных оптических систем, равно как и для априорных оценок погрешности измерения входной освещенности $E_{\text{вх}}(x, y)$ по выходному изображению или точности восстановления входного изображения по выходному, сегодня необходимо применять совершенно другие методики [5].

Оптические изображения, регистрируемые в современном физическом эксперименте, чаще всего предназначены не для непосредственного визуального восприятия, а необходимы как исходные данные для расчета пространственного распределения параметров объекта исследования. Более

того, в основном это и не изображения в традиционном смысле этого слова, а лишь числовой массив, отражающий распределение освещенности на входе в измерительную систему. Требования, предъявляемые к такому массиву чисел, т.е. к выходному изображению, обусловлены той точностью, с которой необходимо определить набор функций координат и времени, описывающих состояние объекта исследования и являющихся конечной целью измерений. Возможность удовлетворить этим требованиям зависит от конкретных параметров используемых измерительно-регистрирующих систем. Последние обычно состоят из ряда устройств многократно трансформирующих приносимую со световым потоком информацию так, что выходные изображения подчас существенно отличаются от входных, что, собственно, и определяет потерю точности.

Большинство измерительно-регистрирующих систем конструируются так, чтобы в пределах того динамического диапазона, на который они рассчитаны, эти системы были бы системами линейными. В частности, это означает, что к ним применимы принципы суперпозиции: $f(x + y) = f(x) + f(y)$ и $f(\alpha x) = \alpha f(x)$. В теории линейных систем [6] входной сигнал $f_{\text{вх}} = f_{\text{вх}}(x)$ называется воздействием, а выходной сигнал $f_{\text{вых}} = f_{\text{вых}}(x)$ – откликом. При импульсном методе исследования в качестве тестовых воздействий используется единичная

функция $\chi(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < 0 \\ 1 & \text{при } x \geq 0 \end{cases}$ или единичный импульс (дельта-функция) $\delta(x)$, определенный так, что $\delta(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \neq 0 \\ \infty & \text{при } x = 0 \end{cases}$

и $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1$ (В оптике это “край освещенного поля” и “щель с шириной меньше нормальной” соответственно). Естественно, что эти математические абстракции, весьма удобные для анализа, не могут быть представлены реальными физическими объектами. Последние обычно описываются ап-

проксимирующими функциями, например:

$$\delta_1(x) = \frac{\alpha}{\sqrt{\pi}} \exp\left\{-(\alpha x)^2\right\} \text{ и } \chi_1(x) = \frac{1}{2} + \Phi(\alpha x), \text{ где ин-}$$

теграл вероятностей $\Phi(z) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^z \exp(-u^2/2) du$. При

этом, как и раньше, $\int_{-\infty}^{\infty} \delta_1(x) dx = 1$.

Отклик системы на единичный импульс называется импульсной реакцией (в оптике – аппаратной функцией) и обозначается нами $g(x)$. Отклик системы на единичную функцию называется переходной функцией и обозначается $h(x)$. Заметим, что $g(x)$ и $h(x)$, равно как и $g_1(x)$ и $h_1(x)$, связаны соотношениями: $\delta(x) = \frac{d}{dx} [\chi(x)]; g(x) = \frac{d}{dx} [h(x)]$.

Функция $g(x)$ полностью описывает измерительную систему без помех, поскольку с ее помощью можно однозначно связать сигналы на входе и выходе системы:

$$f_{\text{вых}}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{вх}}(x') g(x - x') dx'. \text{ При анализе двумерных}$$

изображений используется двумерная дельта-функция $\delta(x, y)$,

функция $\delta_2(x, y) = \begin{cases} 1/\pi a^2 & \text{при } (x^2 + y^2) \leq a^2 \\ 0 & \text{при } (x^2 + y^2) > a^2 \end{cases}$ – (так называемая “светящаяся точка”), или функция Гаусса от двух переменных $\delta_1(x, y) = \frac{\alpha^2}{\pi} \exp\left\{-\alpha^2(x^2 + y^2)\right\}$.

Разумеется, при этом аппаратная функция также будет функцией двух аргументов, а сигналы на входе и выходе будут связаны между собой двумерным уравнением:

$$I_{\text{вых}}(x, y) = \iint I_{\text{вх}}(x', y') g(x - x', y - y') dx' dy'.$$

При частотном методе исследования в качестве тестовых воздействий применяются синусоидальные входные сигналы, а роль аппаратной функции выполняет коэффициент передачи – комплексно-значная функция, определяющая

$$\text{отношение выходного сигнала ко входному: } K(\omega) = \left. \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} \right|_{\Omega}.$$

При этом $K(\omega) = A(\omega)\exp\{-i\varphi(\omega)\}$, причем функция $A(\omega) = |K(\omega)|$ называется амплитудно-частотной характеристикой а функция $\varphi(\omega)$ – фазово-частотной характеристикой. Заметим, что $I_{\text{вх}}(\omega) = \Phi_{\text{вх}}(\omega)$ и $I_{\text{вых}}(\omega) = \Phi_{\text{вых}}(\omega)$ соответственно являются Фурье-образами входного и выходного сигналов:

$$\Phi_{\text{вх}}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{вх}}(x) \exp\{-i\omega x\} dx, \quad \Phi_{\text{вых}}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{вых}}(x) \exp\{-i\omega x\} dx.$$

Их связь в Фурье-пространстве проста и наглядна $I_{\text{вых}}(\omega) = K(\omega)I_{\text{вх}}(\omega)$, поскольку коэффициент передачи показывает, как при прохождении системы ослабляется каждая спектральная компонента. Естественно, что восстановление сигнала по его Фурье-образу осуществляется с помощью обрат-

$$\text{ного преобразования Фурье: } f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\omega) \exp\{i\omega x\} d\omega.$$

Известно, что аппаратная функция $g(x)$ и коэффициент $K(\omega)$ передачи связаны парой преобразований Фурье:

$$g(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(\omega) \exp\{i\omega x\} d\omega \quad \text{и} \quad K(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \exp\{-i\omega x\} dx.$$

Можно показать, что если аппаратная функция симметрична относительно своего максимума, т.е. функция четная: $g(x) = g(-x)$, то $\varphi(\omega) \equiv 0$ и значения функции $K(\omega)$ действительные числа. Для такого рода систем коэффициент передачи строго адекватен частотно-контрастной функции или, как чаще ее называют в технической оптике, частотно-контрастной характеристике (ЧКХ), которая эксперимен-

тально определяется по максимальным и минимальным значениям освещенности в выходном изображении (E_{\max} и E_{\min} соответственно) при подаче на вход периодической структуры, освещенность, в которой изменяется по синусоидальному

$$\text{закону: } K(\omega) = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}.$$

Аппаратная функция $g(x)$ по определению – отклик системы на входной сигнал типа $\delta(x)$. Поэтому, казалось бы, метод измерения здесь прост. Действительно, для того чтобы $E_{\text{вых}}(x) \approx g(x)$, достаточно спроектировать на вход системы изображение щели с шириной $d \ll \beta$, где β т.н. “полуширина” аппаратной функции. К сожалению, погрешность именно такого метода измерения крайне велика. Тому три причины: обычная недостаточность динамического диапазона системы регистрации $E_{\text{вых}}(x)$, несовершенство проецирующей оптики и высокий уровень шумов. Рассмотрим их по порядку. Первая трудность заключается в необходимости определить аппаратную функцию с достаточно малой и примерно одинаковой относительной погрешностью как вблизи ее максимума, так и в далеких крыльях. (Только в этом случае можно надеяться в обратной задаче получить устойчивость решения при высокой точности восстановления.) Динамический диапазон обычных систем регистрации таких возможностей не представляет, однако выход здесь есть. Стандартный прием состоит в том, что за коллимирующим объективом, в фокальной плоскости которого расположена щель, помещается клин. Многоократные отражения от его граней позволяют на входе в систему получить ряд убывающих по яркости изображений щели. Понятно, что теперь значения $g(x)$ в крыльях и максимуме могут быть измерены по разным изображениям, а результаты сшиты. Это, конечно, дополнительные заботы, но что поделаешь. Вторая трудность обусловлена требованиями к разрешающей способности проецирующей системы, поскольку полуширина ее аппаратной функции должна быть много меньше полуширины аппарат-

ной функции исследуемой системы. Этому требованию (если к тому же проецирующая система снабжена описанным клиновым мультиплексором) можно удовлетворить лишь применяя весьма длиннофокусные объективы. Это, естественно, мало удобно, но принципиально возможно. Хуже с шумами. Дело в том, что ширина проекции щели, т.е. ее линейный размер во входном изображении принципиально должен быть много меньше β . Как следует из всего изложенного выше, шумы при этом будут чрезмерно велики, а значит велика погрешность и измеренных значений $g(x)$. Конечно, можно пытаться уменьшить ошибку измерения, используя статистику повторных испытаний или увеличивая, сколь это возможно, размер щели по ее длине, но существенно улучшить ситуацию такими приемами нельзя. Если функциональная зависимость $g(x)$ известна, измерять β , проецируя щель на вход системы разумно. В этом случае может быть достигнута приемлемая точность, поскольку все выходные отсчеты будут использованы для вычисления одного параметра. Однако для определения $g(x)$ в общем случае такой метод плохо подходит.

Какова же альтернатива? Она ясна – следует искать $K(\omega)$, а $g(x)$ вычислять используя операцию обратного фурье-преобразования. В этом случае на вход подается сигнал $E_{\text{вх}}(x) = \bar{E}(1 + \text{Sin}\omega x)$ и вся совокупность выходных отсчетов используется для определения единственного параметра – амплитуды переменной составляющей A выходного сигнала $E_{\text{вых}}(x) = \bar{E}A(1 + \text{Sin}\omega x)$. Напомним, что, если $g(x)$ – четная вещественная функция, а это, как правило, так, то $K(\omega) \equiv A(\omega)$. Поэтому несложно найти $K(\omega)$, изменяя от опыта к опыту пространственную частоту ω . Заметим, что для формирования входного сигнала в такого рода измерениях годится равноплечий интерферометр, например, интерферометр Майкельсона.

В оптике при изучении спектральных и статистических свойств, действующих в системе шумов, на вход пода-

ется сигнал $E_{\text{вх}}(x) = \text{const}$, а выходной сигнал $E_{\text{вых}}(x_i)$ считывается на достаточно частой сетке, так чтобы шаг считывания $\Delta = x_i - x_{i-1} << \beta$. Затем, если функция распределения шумов известна, вычисляется

$$\bar{E}_{\text{вых}}(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{\text{вых}}(x_i)$$

и квадрат сред-

$$\text{неквадратичного уклона} \sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [E_{\text{вых}}(x_i) - \bar{E}_{\text{вых}}(x)]^2,$$

который и есть оценка дисперсии, поскольку при $N \rightarrow \infty$ $\sigma^2 \rightarrow D[E_{\text{вых}}(x)]$. Отсюда при белом шуме нетрудно получить и его спектральную плотность: $\sigma_0^2 = \sigma \Delta$. В тех случаях, когда $\sigma(E)$, описанная операция повторяется при разных $\bar{E}_{\text{вх}}$. Если при этом спектральные и статистические свойства шума известны – как, например, это имеет место быть для электронно-оптических преобразователей или фотослоев, то никаких других измерений и не требуется. В противном случае приходится исследовать эти характеристики шума. Порядок действий при этом в оптике ни чем не отличается от описанного выше: сигнал на входе $E_{\text{вх}}(x) = \text{const}$ фиксируется, а совокупность считанных значений выходного сигнала $E_{\text{вых}}(x_i)$ регистрируется с помощью многоканального амплитудного анализатора.

Спектральные свойства шума $n(\omega)$ или $\overline{n^2(\omega)} = N(\omega)$ находятся путем усреднения квадратов фурье-образов совокупности отдельных реализаций. Для этого на вход многократно подается сигнал $E_{\text{вх}}(x) = \text{const}$ и для каждой конкретной реализации выходного сигнала $E_{\text{вых}}(x)$ определяется ее шумовая компонента $E_N^k = E_{\text{вых}}(x) - \overline{E_{\text{вых}}(x)}$, после чего вычисляются

$$\text{фурье-образы } E_N^k(\omega) = \frac{1}{X} \int_{-X/2}^{X/2} E_N^k(x) e^{-i\omega x} dx \quad \text{и проводится}$$

их осреднение $\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left| E_N^k(\omega) \right|^2 = N(\omega) / X$. Здесь, как и раньше,

ше, X – полная длина реализации.

Более подробно изложенное рассмотрено в работе [5] и в курсе лекций “Методы экспериментальной физики”. Нам же в заключение необходимо отметить, что когда система лишь синтезируется, т.е. экспериментально не исследована и ее сквозные параметры не известны, но имеются данные по составляющим ее компонентам (оптический тракт, проецирующий объектив, ЭОП и т.д.), аппаратные функции или коэффициенты передачи которых известны и есть $g_1(x)$, $g_2(x)$, $g_3(x)$... или $K_1(\omega)$, $K_2(\omega)$, $K_3(\omega)$..., то суммарная аппаратная функция, являющаяся параметром всей системы $g_\Sigma(x) =$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_n(x - x_{n-1}) g_{n-1}(x_{n-1} - x_{n-2}) \dots g_2(x_2 - x_1) g_1(x_1) dx_1 \dots dx_{n-1},$$

а ее коэффициент передачи $K_\Sigma(\omega) = K_1(\omega) K_2(\omega) K_3(\omega) K_4(\omega)$.

IV. Схема и порядок выполнения лабораторной работы

Цель работы

Изучение работы ЭОП, определение коэффициента увеличения, измерение разрешающей способности, построение частотно-контрастной характеристики, построение аппаратной функции ЭОП.

Порядок работы

1. Собрать схему измерений.
2. Включить питание ЭОП (не более 6 кВ). Включить осветитель (предварительно вывести яркость). Настроить микроскоп на зерно люминафора ЭОПа.
3. Перемещая миру 2 вдоль оптической оси, настроить ее изображение на резкость, используя микроскоп. Определить визуальное разрешение ЭОП (табл. 1).
4. Оставив на месте микроскоп, заменить миру оптической щелью, настроить ее изображение на резкость и, используя микрометрическую насадку к микроскопу, опреде-

лить коэффициент передачи системы (объект – ЭОП) – M^* .

5. Установить видеосистему, включить питание (~10 В), настроить её на резкость и снять изображения щели при следующих значениях её ширины – (80, 40, 35, 30, 25, 20, 15) мкм. Все файлы с расширением bmp.
6. Снова установить миру и сфокусировать её. Так как видеосистема уже настроена, за изображением миры можно наблюдать на мониторе компьютера.
7. Снять изображения миры (элементы: 1, 6, 11, 16, 21).
8. Обработать экспериментальные результаты и определить аппаратную функцию ЭОПа.

V. Методы обработки результатов работы

Рассмотрим алгоритм определения аппаратной функции в нашей лабораторной работе. Редактирование полученных файлов и их математическая обработка осуществляется на ПК Р-II-450 с использованием программ Adobe Photoshop 6 и Mathcad 2000.

- Редактируем файлы (Photoshop 6) – т.к. исходные файлы очень большие ~ 1 Мб, вырезаем прямоугольник в котором содержится необходимая нам информация, то есть исследуемый нами объект, и сохраняем как новый файл с расширением bmp.

- Включить Mathcad 2000. Набрать $A=READBMP("e:\C100.bmp")$. Построить изображение щели и получить матрицу ($A_1 = [M]$) значений зарегистрированных интенсивностей. Определив значения первого (m) и последнего (l) столбца, в которых содержится информация, построить усреднённую дву-

мерную матрицу $B = \frac{\sum_{n=m}^{n=l} A^{<n>}}{1 + (l - m)}$, ($B = [M]$) и, задав интер-

вал значений h , построить график изменения интенсивности. Из графика изменения интенсивности находим и записываем

значение ширины на полувысоте для контура интенсивности данной щели. Сохраняем полученный файл как С. mcd.

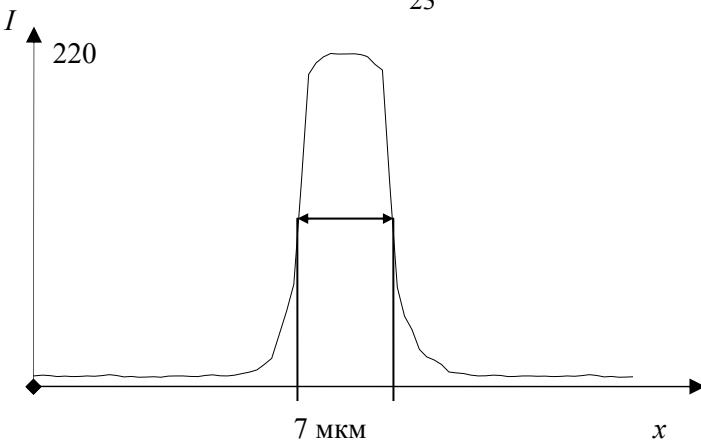
- Повторяем процедуру для всех изображений щели.
- Сравнив величины ширины на полувысоте для контуров интенсивности различных щелей, определить значение аппаратной функции g , т.е. какой ширине щели она соответствует. Создать файл базы данных g.dat., использовав команду `WRITERPN("e:\Br-\# g.dat") := B(#)` , где $\#$ – обозначение соответствующей усреднённой матрицы.
- Открыть новый файл. Провести обработку изображений элементов миры. Сохранить файл как т. mcd.
- Создать файлы базы данных m.dat., использовав команду `WRITERPN("e:\Br-\# m.dat") := B(#)` , где $\#$ – обозначение соответствующей усреднённой матрицы.
- Сравнить полученные графики изменения интенсивности в элементах миры с аппаратной функцией g .

Параметры миры № 4

Таблица 1

№ эл-та	Расстояние между штрихами (мкм)	№ эл-та	Расстояние между штрихами (мкм)	№ эл-та	Расстояние между штрихами (мкм)
1	80	6	59	11	44,9
16	34,08	21	23,42		

График аппаратной функции ПЗС фотоматрицы



Vl. Контрольные вопросы

1. Устройство ЭОП и принцип его действия.
2. Принцип суперпозиции.
3. Единичный импульс (δ функция) и единичная функция.
4. Импульсная реакция (g функция) и переходная функция.
5. Связь между $\delta(x) \rightarrow \chi(x)$ и $g(x) \rightarrow h(x)$.
6. АЧХ, ЧЛХ и коэффициент передачи.
7. Частотный метод исследования коэффициента передачи.
8. Плюсы и минусы определения $g(x)$ с помощью изображения щели.
9. Аппаратная функция (g функция) передающей системы.
10. Преимущества 2-объективной схемы передачи изображения.
11. Устройство МОП конденсатора и принцип его действия.
12. Принцип работы ПЗС фотоматрицы и её архитектура.

VII. Список литературы

1. Берковский А.Г., Гаванин В.А., Зайдель И.Н. Вакуумные фотоэлектронные приборы.– М.: Радио и связь, 1988.
2. Бутслов М.М., Степанов Б.М., Панченко С.Д. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. – М.: Наука, 1978.
3. Мальцев М.Д., Каракулина Г.А. Прикладная оптика и оптические измерения. – М.: Машиностроение, 1968, 471 с.

4. Пресс Ф.П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. – М.: Радио и связь, 1991.
5. Пергамент М.И. Информационные аспекты оптических изображений. – М.: ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 1985.
6. Харкевич А.А. Теоретические основы радиосвязи. – М.: Гостехиздат, 1957.
7. Дьяков В. МАTHCAD 8/2000: Специальный справочник. – СПб: Из-во Питер, 2000.
8. Курбатов Л.Н. Оптоэлектронника видимого и инфракрасного диапазонов спектра. – М.: МФТИ, 1999.

VIII. Рисунки

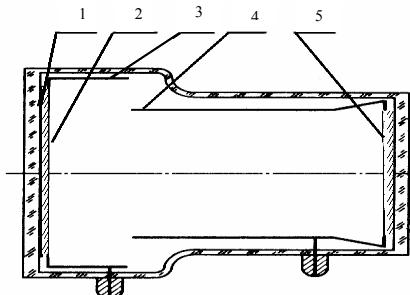


Рис. 1. Электронно-оптический усилитель

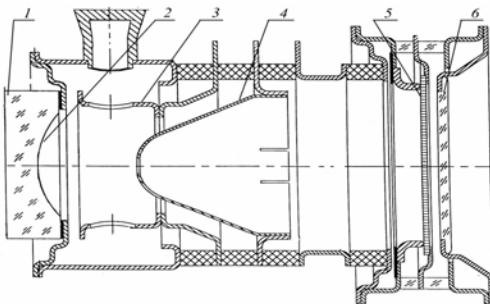


Рис. 2. Усилитель света PMU12x18. 1 – стекловолоконное входное окно, 2 – фотокатод, 3 - фокусирующий электрод, 4 – анод, 5 – микроканальная плата, 6 – выходное окно



Рис. 3. Усилитель света PMU12x18 справа – собственно электронно-оптический преобразователь, слева – прибор в контейнере

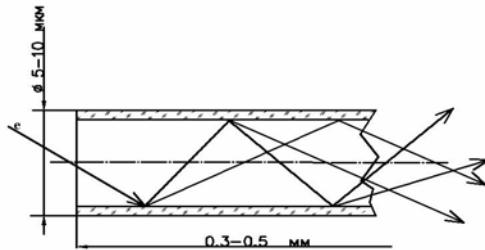


Рис. 4. Микроканальный электронный умножитель

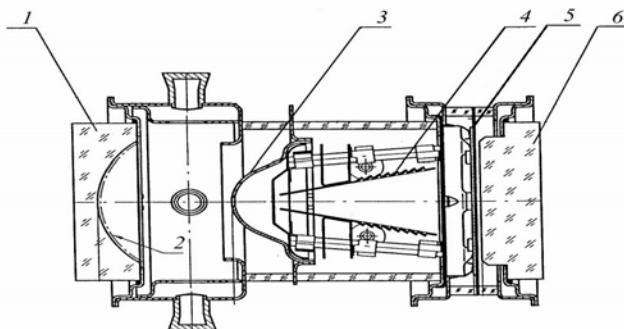


Рис. 5. Времяанализирующий электронно-оптический преобразователь РВ201. 1 – стекловолоконное входное окно, 2 – фотокатод, 3 - анод, 4 – отклоняющие пластины, 5 – микроканальная плата, 6 – выходное стекловолоконное окно

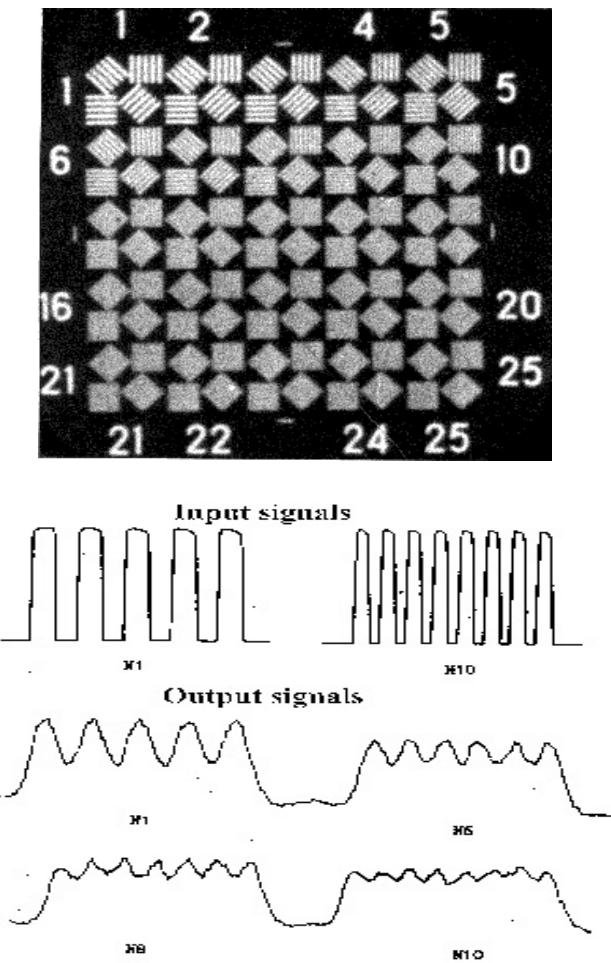


Рис. 6. Выходное изображение электронно-оптического преобразователя

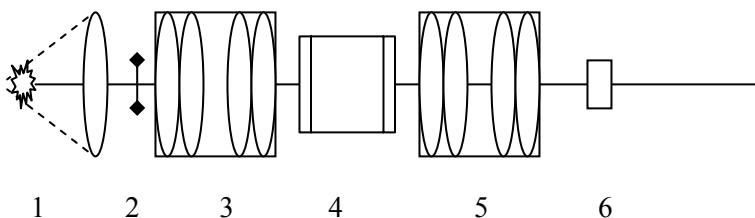


Рис. 7. 1 – осветитель, 2 – объект (мира или щель), 3 – репродукционная система объективов (два Юпитер-3, $M = 1$), 4 – ЭОП, 5 – репродукционная система объективов (Мир-1 и РО-2, $M = 2$), 6 – ПЗС фотоматрица.