

УДК 537.533; 621.383

Разработка физической модели информационного сигнала; управления технологическими процессами изготовления и автоматизированного контроля параметров МКП, ЭОП и фотоприемников

Д. П. Николаев

Московский государственный институт электроники и математики, Москва, Россия
E-mail: Imis@miem. edu. ru

Рассмотрены принцип работы электронно-оптических преобразователей, принцип канального электронного умножения в целях разработки физической модели для управления технологическими процессами изготовления и автоматизированного контроля параметров микроканальных пластин, электронно-оптических преобразователей и фотоприемников.

Многие области человеческой деятельности базируются на приеме и преобразовании информации, представляющей собой распределенную в пространстве и времени совокупность сигналов, носителями которых являются световые или иные виды излучения.

Известно, что около 95 % всей информации [2] человек получает через органы зрения путем анализа изображений, формируемых на сетчатке глаза. У людей выработалось естественное стремление представить информацию, с которой он имеет дело, в виде зрительных образов.

Электромагнитное излучение широко используется в современной науке и технике, особенно в бесконтактных [2], дистанционных устройствах контроля [5], измерения, передачи и преобразования информации, сбора и передачи энергии [5] и др. Среди приборов, использующих электромагнитное излучение, особое место занимают оптико-электронные приборы, которым свойственны высокая точность, быстродействие, возможность обработки многомерных сигналов и другие ценные для практики характеристики. В состав этих приборов входят как оптические, так и электронные звенья.

Приемником лучистой энергии, предназначенным для усиления яркости изображения или преобразования изображения в инфракрасных, ультрафиолетовых или рентгеновских лучах в видимое изображение, является электронно-оптический преобразователь (ЭОП).

В зарубежной литературе появились сообщения о проведении работ по улучшению отдельных параметров и характеристик преобразователей, уменьшению их габаритных размеров, а также по созданию канальных усилителей яркости изображения, в которых усиление тока достигается за счет вторичной эмиссии с внутренних стенок тонких каналов, параллельно соединенных в общий блок [1].

Техника передач и воспроизведения изображений характеризуется огромным разнообразием приборов и технологий.

Одним из основных видов ЭОП являются ЭОПы с микроканальным усилением. Эти преобразователи обладают высоким коэффициентом преобразования при малых габаритах приборов. Основным элементом таких преобразователей является микроканальная пластина (МКП). Применение МКП в ЭОПах позволяет создать малогабаритные приборы ночного видения и приборы для регистрации быстропротекающих процессов. МКП дает возможность использовать ЭОП в режиме усиления, регулировать коэффициент усиления и предохранять ЭОП от световых перегрузок. Введение МКП в осциллографическую трубку позволяет регистрировать высокоскоростные осциллограммы и получать полутонные изображения при минимальном потреблении энергии.

Принцип канального электронного умножения

В настоящее время принцип канального электронного умножения становится предметом интенсивного изучения. В результате этого достигнуты значительные успехи в области технологии, позволяющие применять эти принципы к большинству разрабатываемых ЭОПов, используемых для ночного видения. Имеется большое разнообразие применения методов электронного умножения, но лишь некоторые из них получили практическое осуществление.

Работа любого детектора электромагнитного излучения в конечном счете ограничивается шумом. Взаимодействие излучения с веществом в процессе эмиссии основывается на квантовом характере излучения. Это значит, что при любом измерении характеристик излучения следует учитывать, что оно состоит из фотонов, энергия которых обратно пропорциональна длине волны излучения. Фотоны хаотически испускаются от объекта к приемнику, а яр-

кость объекта определяется средним числом фотонов, излучаемых единицей площади объекта. На детектор попадает часть этих фотонов, зависящая от входной апертуры прибора и расстояния его до объекта. Поскольку интервал времени между эмиссией последовательных фотонов изменяется статически, то их среднее число, регистрируемое элементарной площадкой детектора за определенный интервал времени, будет иметь флуктуации. Предельное ограничение по шуму достигается тогда, когда различие между числом фотонов, регистрируемое соседними элементами, больше не может быть отделено от шума, вызываемого флуктуациями.

Для того чтобы подойти как можно ближе к этому пределу, детектор должен удовлетворять двум важным требованиям:

регистрировать как можно больше падающих квантов света;

как только детектор уловил фотоны и связанный с ними квантовый шум, то любое уменьшение отношения сигнал/шум, вызванное фоновым шумом детектора или дополнительным шумом, вводимым при усилении сигнала, должно быть возможно меньше.

Начальным процессом детектирования является фотоэмиссия, при которой поглощенный фотон вызывает эмиссию фотоэлектронов в окружающий вакуум из вещества фотокатода. Этот процесс может сочетать сравнительно высокий квантовый выход в ближних ультрафиолетовой и видимой частях спектра с очень низким темновым током в несколько сот электронов на 1 см^2 в 1 с. Кроме этого, возможно усиление потока полученных фотоэлектронов еще внутри вакуумных приборов с незначительным ухудшением отношения сигнал/шум до уровня, когда сигнал, соответствующий каждому первоначальному фотоэлектрону, может обеспечить индивидуальную регистрацию.

Хотя при детектировании с помощью фоторезистора или фотогоальванического приемника могут быть достигнуты более высокий квантовый выход и более высокий спектральный диапазон, в этих случаях гораздо труднее сохранить достигнутый уровень отношения сигнал/шум. Это объясняется трудностью получения низкого темнового тока при условии низкого внутреннего усиления генерированных фотоэлектронов. Сравнительно недавно были разработаны эффективные способы внутреннего усиления. Однако процессу фотоэмиссии в настоящее время отдается предпочтение из-за наибольшей чувствительности и сравнительной легкости низкошумного усиления фотоэлектронов с помощью вторичной электронной эмиссии.

Явление вторичной эмиссии является важнейшим атрибутом фотоэлектронного умножителя — самого чувствительного приемника излучения [2]. В нем первичные электроны, вылетевшие с фотокатода, ускоряются и фокусируются на первом диноде, изготовленном из материала с высоким коэффициентом вторичной эмиссии. Вторичные электроны, в свою очередь, ускоряются и фокусируются на втором диноде. Этот процесс повторяется до достижения необходимой величины тока (реально до 16 раз), при этом каждый первичный электрон создает до 10^8 вторичных электронов.

В конце 60-х годов в США, Англии и бывшем СССР возникла идея создания непрерывного динода в виде полого канала с однородным электрическим полем в нем. Канал представлял собой, как правило, стеклянную трубку, имеющую достаточную электропроводимость стенок для установления и поддержания однородного электрического поля, создаваемого двумя электродами. Электроны, входящие в канал со стороны катода, ударяются о стенку и выбивают вторичные электроны. Под действием ускоряющего поля внутри канала эти электроны перемещаются вдоль трубки, описывая параболические

траектории. Электроны ударяются о противоположную стенку канала с более высоким потенциалом, выбивая вторичные электроны. Описанный процесс повторяется многократно и зависит от отношения длины канала к его диаметру и от общего приложенного к его концам напряжения. Каждый воспринятый квант или первичный электрон, входящий в канал, может давать большее количество электронов, выходящих из анодного конца канала. Одним из основных ограничений процесса умножения является возникновение пространственных зарядов, или зарядов на стенках канала, деформирующих ускоряющее поле и ограничивающих в дальнейшем умножение.

Основными параметрами канала являются длина l , диаметр d (или отношение длины канала к его диаметру) и общая разность потенциалов, приложенная к концам канала V .

Расчет показывает, что для каждого значения разности потенциалов V существует оптимальное значение отношения α (линейно зависящее от), при котором коэффициент усиления канала G максимален [1]. Незначительные отклонения характеристик вторичной эмиссии и диаметра каналов, обусловленные качеством исполнения при изготовлении, оказывают значительное влияние на коэффициент усиления каналов.

Если пренебречь тем фактом, что искажение поля изображения, вызванное пространственными или поверхностными зарядами, увеличивается с уменьшением размеров, то абсолютная величина размеров не имеет значения. Отношение l/d является наиболее важным геометрическим параметром, связанным с общим напряжением, приложенным к каналу, которое является важнейшим электрическим параметром.

Канальный электрический умножитель идеально подходит для миниатюризации. Множество таких каналов, собранных в параллельный пучок в форме мозаики, образуют МКП. Первичные электроны или излучение, входя с одной стороны в такую канальную пластину, могут создавать пучки электронов, которые выходят с другой стороны пластины в соответствии с количеством падающих электронов или фотонов.

Это свойство микроканальной пластины является наиболее важным для любого устройства воспроизведения изображения, в котором электронное умножение является желательным.

Применение МКП. Технология изготовления и современные методы и средства контроля

Пластины канального умножения электронов имеют важное свойство, отличающее их от одноканальных умножителей и ФЭУ с дискретными диодами — это способность сохранить информацию, распределенную в пространстве и передаваемую потоком излучения или частицами. По этой причине МКП наиболее целесообразно использовать в тех случаях, когда предусматривается преобразование или усиление изображения.

Наиболее важным применением МКП является их использование в ЭОП, служащих для зрительного восприятия при очень низкой освещенности объекта. ЭОП сочетает в себе фотокатод, электронную линзу, МКП и флуоресцирующий экран. Такие ЭОПы имеют малые размеры и массу, кроме того, коэффициент усиления легко изменять регулировкой напряжения, приложенного к МКП. ЭОП можно использовать во многих приборах ночного видения, начиная с легких очков и кончая мощными телескопами для наблюдения объектов в ночное время. Типичным примером другого применения

ЭОПов с канальным усилением является высокоскоростная фотография [1; 3—7]. Встраивание МКП в электронно-лучевые трубки позволяет снизить ток луча, что уменьшает энергопотребление и время прогрева, а также облегчает отклонение электронного пучка на высоких частотах, что создает возможность для регистрации отдельных высокоскоростных переходных состояний с частотами до нескольких гигагерц.

Перспективным является применение МКП для преобразования рентгеновских изображений в медицинской диагностике. Однако изготовление таких приборов находится на уровне опытных образцов, в частности из-за экономических трудностей изготовления МКП большого размера.

Если учесть, что ЭОПы с МКП становятся все более доступными, то они, несомненно, будут находить новые области применения, где их малые размеры и масса, легкость эксплуатации, хорошие характеристики и сравнительно невысокая стоимость являются важнейшими преимуществами.

Первым требованием к электрическим параметрам является обеспечение равномерного ускоряющего электрического поля вдоль стенок каждого канала МКП. Для этой цели необходимо создать соответствующее сопротивление вдоль стенок каналов. Величина сопротивления должна быть достаточно низкой, чтобы пропускать требуемый постоянный ток (порядка нескольких микроампер на 1 см^2) во время работы при соответствующем напряжении на МКП. Этот ток должен быть на порядок выше требуемого максимального выходного тока. В то же время он должен быть достаточно малым во избежание перегрева пластины, вызванного рассеиванием энергии в стенках каналов. Типовое сопротивление стенок порядка $10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Второе требование — к геометрическим параметрам: отклонения диаметров каналов от требуемого должны быть минимальны, так как изменение отношения диаметра канала к его длине на 1 % приводит к изменению коэффициента усиления на 10 % и более. Наиболее подходящим материалом для изготовления МКП является стекло со специальными добавками и различными поверхностными покрытиями.

Наиболее широко распространены два метода изготовления МКП — метод полного стеклянного волокна и метод растворимой стеклянной сердцевины.

В первом случае полое стеклянное волокно получают путем протягивания через печь пучка стеклянных трубок из материала необходимого состава. Диаметр получаемого волокна определяется отношением выходной скорости вытягивания волокна из печи к входной скорости подачи пучка трубок в печь. Для получения нужной точности диаметров канала необходимо точно поддерживать выходную скорость. Рабочая температура печи ($500\text{—}700 \text{ }^\circ\text{C}$ в зависимости от состава стекла) также должна поддерживаться неизменной, так как ее изменение на 1° может привести к изменению диаметра волокна более чем на 1 %.

Отдельные волокна спекаются друг с другом с помощью специального порошка и отрезаются по длине. При необходимости волочение повторяется несколько раз до получения необходимого диаметра. Затем выполняются полировка пластин, покрытие стенок и нанесение электродов.

При использовании технологии полого стеклянного волокна основная задача состоит в том, чтобы избежать сплющивания отдельных каналов на краях пластины во время спекания. При этом изменяются эффективный диаметр каналов и соответственно их коэффициент усиления. Наиболее эффективным способом решения этой задачи является заполнение наружных каналов ка-

ким-нибудь твердым, но растворимым веществом, например стеклом с другими химическими свойствами. Это вещество предотвращает сплющивание наружных каналов при спекании и может быть растворено после того, как пластины отполированы. В этом заключается метод твердого наполнителя. Технология изготовления пластины полностью аналогична описанной выше. Основное различие заключается в том, что в печь подается не полая трубка канального стекла, а сплошной прут, внутри которого находится и плотно соприкасается со стенками канала стекло стержня. Два стекла соединяются вместе у концов и прикрепляются к протяжному механизму. Окончательное спекание жгутов может происходить при более высоком давлении, чем при полых волокнах, что позволяет устранить полые промежутки и неплотное прилегание на границах волокон.

Спеченные многоволоконные блоки отрезаются на куски и полируются. После этого травлением удаляется стекло сердцевины и наносятся электроды.

Метод твердой сердцевины из растворимого стекла пригоден для получения МКП с высокой степенью однородности и устойчивости характеристик поперек пластины и с удовлетворительной воспроизводимостью от пластины к пластине в процессе изготовления. Однако этот процесс сравнительно дорог, особенно при изготовлении МКП больших размеров. Поэтому ведется поиск других способов изготовления МКП, а также других материалов для изготовления единичных каналов, таких как керамика или гибкие оптические полимеры.

В процессе производства МКП после отдельных стадий технологического процесса и в конце производственного цикла необходимо производить контроль параметров МКП для оценки факторов, влияющих на ее качество.

Основным критерием качества МКП является однородность параметров МКП по всей ее рабочей поверхности. Так как основное предназначение МКП состоит в том, чтобы усиливать пространственно распределенный электронный поток, то очевидно, что важнейшим параметром МКП является ее коэффициент усиления по току G . Для того чтобы МКП имела высокую разрешающую способность и не искажала усиливаемый пространственно распределенный сигнал, необходимо контролировать равномерность распределения коэффициента усиления по поверхности МКП.

Например, принцип действия одной из установок для контроля МКП, разработанный во ВНИИОФИ, заключается в следующем: исследуемый образец МКП помещается в лампу с разряжением 10^{-5} — 10^{-7} мм рт. ст., затем на МКП, фотокатод и ускоряющие электроды подается питание и вся поверхность МКП облучается однородным электронным потоком с фотокатода.

Усиленный МКП электронный поток под действием ускоряющего и фокусирующего напряжения попадает на экран с люминофорным покрытием. Те точки люминофора, на которые попадает электронный поток, будут светиться, причем яркость свечения каждой точки будет определяться плотностью электронного потока соответствующих каналов МКП. Таким образом, на экране лампы можно наблюдать изображение исследуемой МКП, промодулированное по яркости в соответствии с пространственным распределением коэффициента усиления МКП. По этому изображению проводится оценка качества МКП.

Основным недостатком этой и аналогичных установок является то, что они не производят метрологических измерений параметров МКП; таким образом, объективная оценка качества МКП практически невозможна.

В целях повышения производительности труда и увеличения выхода годных изделий необходимо в процессе производства проводить оперативный объективный контроль МКП. Этим обуславливается необходимость создания автоматизированных комплексов и систем контроля параметров МКП с использованием электровычислительной техники.

* * *

Разработаны технологические процессы изготовления и автоматизированного контроля параметров МКП, ЭОП и фотоприемников, позволяющие существенно повысить производительность труда и увеличить выход годных изделий.

Показаны основные принципиальные особенности внутреннего канально-го электронного умножителя, требования, недостатки и причины, ограничивающие процессы умножения.

Установлены преимущества применения ЭОП с МКП в новых областях науки, техники и медицины.

Л и т е р а т у р а

1. Берковский А. С., Гаванин В. А., Зайдель И. Н. Вакуумные фотоэлектронные приборы. — М.: Радио и связь, 1988.
2. Бутслов И. Н., Степанов Б. М., Фанченко С. Д. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. — М.: Наука, 1978.
3. Дулин В. Н., Аваев Н. А., Демин В. П. Электронные приборы. — М.: Энергоиздат, 1989.
4. Зайдель И. Н., Куренко Г. И. Электронно-оптические преобразователи. — М.: Сов. радио, 1970.
5. Соболева Н. А., Меламид А. Е. Фотоэлектронные приборы. — М.: Высш. шк., 1974.
6. Шульман А. Р., Фридрихов С. А. Вторично-эмиссионные методы исследования твердого тела. — М.: Наука, 1977.
7. Черкасов А. С., Николаев Д. П. и др. Разработка датчиков оптического диапазона для приема и передачи пространственно-распределенной информации: Научный отчет. — М., МГИЭМ, 1994.

Development of a physical model of shaping of an information signal; control by technological processes of manufacture and automated monitoring of parameters MCS, EOP and photoreceivers

D. P. Nikolaev

Moscow State Institute of Electronics and Mathematics, Moscow, Russia

In a paper the principle of work of electron-optical converters, principle of channel electronic multiplication is considered with the purpose of development of a physical model of control by technological processes of manufacture and automated monitoring of parameters of microchannel slices, electron-optical converters and photoreceivers.