**Фотоэлектрический метод измерения энергетических параметров лазерного излучения**

Основой фотоэлектрического принципа измерительного преобразования энергетических параметров оптического излучения является поглощение фотона, сопровождаемое электрически регистрируемым переходом носителей заряда на более высокие энергетические уровни. В качестве первичного измерительного преобразователя (ПИП) используются фотоприемники (ФП), которые обычно делят на две группы: с внешним и с внутренним фотоэффектом. Внешний фотоэффект заключается в испускании электронов под действием фотонов в вакуум, внутренний - в переходе электронов из связанного состояния под действием фотонов в свободное, т. е. в возбужденное состояние внутри материала. Речь идет в обоих случаях о прямом взаимодействии квантов излучения с электронами, поэтому ФП такого типа называют еще квантовыми. Выходной электрический сигнал таких ФП зависит не от мощности падающего излучения, а от количества квантов излучения и энергии каждого кванта.

Общее выражение преобразования входного оптического сигнала в выходной электрический сигнал можно записать в следующем виде:

, (1)

где I - полный ток, протекающий через ФП, А; Iфп - ток через ФП, вызванный падающим потоком излучения, А; Iт - темновой ток, А; Sл - спектральный коэффициент преобразования или абсолютная спектральная чувствительность ФП, А/Вт; Р - мощность падающего на ФП излучения, Вт.

ФП как ПИП в средствах измерения параметров лазерного излучения требуют детального исследования ряда свойств и характеристик, учитывающих их работу в реальных условиях. Основными характеристиками ФП являются спектральный диапазон, чувствительность, динамический диапазон, быстродействие, шумовые свойства, стабильность чувствительности, зависимость чувствительности от угла (падения потока излучения, зонная неравномерность чувствительности.

Рассмотрим коротко существующие ФП с точки зрения возможности их применения в качестве ПИП в СИ энергетических параметров лазерного излучения с учетом. перечисленных выше характеристик.

**Фотоприемники на основе внешнего фотоэффекта**

К фотоприемникам на основе внешнего фотоэффекта относятся вакуумные приборы: фотоэлементы (ФЭ) и фотоэлектронные умножители (ФЭУ).

Спектральный диапазон вакуумных ФП зависит от материала фотокатода. Наиболее широко распространены приборы с сурьмяно-цезиевыми мультищелочными и серебряно-кислородно-цезиевымн фотокатодами.

Коротковолновая граница чувствительности, определяется главным образом прозрачностью входного окна прибора, длинноволновая зависит от материала фотокатода и определяется работой выхода электронов. В настоящее время разработаны фотокатоды на основе двойных и тройных полупроводниковых соединений (GаАs, InАsР) для расширения спектрального диапазона вакуумных ФП в длинноволновую область.

Одну из основных метрологических характеристик ФЭ - абсолютную спектральную чувствительность - для *hн>E0* (h – постоянная Планка, н – частота излучения) можно представить следующим образом:

 (2)

где Qэф - эффективный квантовый выход, л -.длина ваяны излучения, мкм.

Абсолютная чувствительность ФЭ в максимуме спектральной характеристики 10-3-10-1 мА/Вт и меняется в зависимости от типа и конструкции прибора.

Динамический диапазон, в котором сохраняется линейность преобразования оптического сигнала в электрический, для ФЭ сравнительно большой. Нижний предел ограничен шумами и темповым током ФЭ, верхний Ї влиянием пространственного заряда, продольного сопротивления фотокатода, его "утомлением". В режиме непрерывного облучения нижний предел может достигать 10-14 А, верхний не превышает 10-4 А. В импульсном режиме верхний предел может быть увеличен до десятков ампер.

Шумы и темновые токи ФЭ сравнительно невелики, однако из-за низкой чувствительности ФЭ нецелесообразно применять их для измерения малых уровней оптических сигналов. В таких случаях следует использовать другие типы ФП с большей чувствительностью. Временные параметры ФП в импульсном режиме обычно описываются параметрами импульсной (длительность импульса) и переходной характеристик (время нарастания фронта). Для линейных систем эти характеристики однозначно связали известными соотношениями и измерение одной из них позволяет точно определить остальные.

Однако реальный ФП в силу внутренних нелинейных эффектов нельзя считать идеальной линейной системой, и поэтому выбор того или иного параметра, характеризующего быстродействие, определяется конкретным применением ФП. Временные характеристики ФЭ, предназначенных для измерений в полосе частот до нескольких гигагерц, определяются следующими параметрами: временем ф1 пролета фотоэлектронов от фотокатода к аноду; дисперсией ф2 фотоэлектронов по времени пролета до анода за счет радиальных начальных скоростей и углового распределения выхода из фотокатода; временем ф3 вытекания заряда, образовавшегося на фотокатоде; инерционностью внешнего фотоэффекта ф4.

Оценку быстродействия (времени нарастания сигнала) ФЭ можно получить из выражения

 (3)

По опубликованным данным длительность фотоэмиссии (ф4) меньше 10-12 с, а время пролета от катода к аноду (ф1) определяется расстоянием между электродами н .приложенным напряжением и также может быть меньше 10-12 с, Таким образом, быстродействие ФЭ ограничено в основном разбросом времен пролета фотоэлектронов от катода к аноду .и переходными процессами о контуре фотоэлемент-нагрузка.

Современные сильноточные временные ФЭ благодаря коаксиальной конструкции позволяют получать время нарастания переходной характеристики (между уровнями 0,1 н 0,9 от максимального значения) порядка 10-10 с.

Исследования стабильности чувствительности для вакуумных ФП обычно сводятся к исследованию процессов "старения" и "утомления" и их влияния на чувствительность. Вопросы, связанные с кратковременной стабильностью (в течение времени, необходимого для проведения измерения энергетических параметров, обычно от нескольких минут до 1-2 ч), практически не рассматриваются. Поэтому при подготовке к измерениям энергетических параметров излучения с помощью ФЭ необходимо приводить исследования стабильности чувствительности ФЭ индивидуально.

При построении СИ энергетических параметров лазерного излучения следует учитывать зависимости чувствительности от угла падения и расходимости излучения и зонной неравномерности чувствительности.

3а.висимость чувствительности от угла падения и расходимости излучения объясняется, во-первых, зависимостью коэффициента отражения входного окна приборов, во-вторых, неодинаковой глубиной проникновения излучения в фотокатод. Зонная неравномерность чувствительности определяется неоднородностями материала фотокатода. Количественных данных о зонной неравномерности чувствительности и ее зависимости от угла падения и расходимости потока излучения для ФП практически нет, поэтому возникает необходимость индивидуального их исследования.

ФЭУ обладают высокой чувствительностью благодаря наличию умножительной (динодной) системы. Если коэффициент вторичной эмиссии i-го динода уi, коэффициент сбора электронов гi, а m Ї число каскадов усиления, то .коэффициент усиления ФЭУ

, (4)

а абсолютная спектральная чувствительность ФЭУ

, (5)

где Sлk Ї абсолютная спектральная чувствительность фотокатода ФЭУ, определяемая аналогично чувствительности ФЭ по формуле (2).

Чувствительность ФЭУ может достигать ~105 А/Вт в максимуме спектральной характеристики. В обычных ФЭУ линейность сохраняется до десятков миллиампер, у современных сильноточных Ї до единиц ампер.

При измерениях оптических сигналов большой мощности можно увеличить диапазон линейности ФЭУ в область больших потоков, частично используя динодную систему и снимая сигнал с промежуточных динодов.

Нижний предел динамического диапазона ограничен шумами и темновыми токами ФЭУ. Темновой ток ФЭУ (так же как и ФЭ) принципиально не может быть исключен, его минимальное значение определяется термоэлектронной эмиссией фотокатода, усиленной динодной системой. При среднем коэффициенте усиления 106 и площади фотокатода 1 см2 темновой ток ФЭУ составляет 10-11Ї10-5 А. Подбором конструкции ФЭУ и напряжения питания темновой ток можно свести к минимуму. Темновой ток и фототок ФЭУ подвержены флуктуациям вокруг среднего значения. Флуктуации анодного тока ФЭУ определяют минимальное значение потока излучения, которое может быть измерено при помощи ФЭУ.

На уровень шума анодного тока ФЭУ влияет много факторов, в зависимости от конструкции прибора и условий его применения. Поэтому при использовании ФЭУ в СИ малых потоков излучения необходимо исследовать его шумовые характеристики в рабочих условиях. Инерционность ФЭУ определяют его четыре основных узла: катодная камера (tk), входной каскад электронного умножителя (tвх), многокаскадный усилитель тока (tу) и выходной каскад (tвых). Время нарастания сигнала ФЭУ может быть выражено следующим образом:

 (6)

Временное разрешение катодной камеры определяются, главным образом, как и ФЭ, разбросом времен пролета электронов от катода к первому диноду. Временные свойства сходной камерой многокаскадного усилится, в основном, определяются разбросом времён пролета электронов в динодной системе. Исследованию факторов, определяющих временные характеристики ФЭУ, посвящены работы. Быстродействие современных ФЭУ 30Ї1 нс.

Вопросы изучения стабильности чувствительности ФЭУ обычно сводятся, так же как и для ФЭ, к изучению процессов "старения" и "утомления". Кратковременная стабильность чувствительности (за время, необходимое для измерения энергетических параметров) изучена слабо. Для некоторых типов ФЭУ при отборе лучших образцов удается достичь нестабильности ~1% в импульсном режиме. Зонная неравномерность чувствительности и чувствительность ФЭУ определяются теми же факторами, что и для ФЭ.

**Фотоприемники на основе внутреннего фотоэффекта**

К ФП па основе внутреннего фотоэффекта относятся фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, МДП-фотоприемники и другие полупроводниковые ФП. Для измерения энергетических параметров излучения более широкое распространение получили фотодиоды (ФД) и .фоторезисторы (ФР).

Общее выражение для абсолютной спектральной чувствительности ФР может быть представлено в виде

 (7)

где е — заряд электрона; V — объем освещенной части полупроводника; Q —квантовый выход внутреннего фотоэффекта; м — подвижность фотоносителей; ф — время жизни фотоносителей; *l* — расстояние между контактами; U —напряжение, приложенное к ФР, В.

Если время пролета между контактами носителей, генерируемых излучением, оказывается меньше времени жизни ф, ФР является ФП с внутренним усилением. Такой режим возможен при больших приложенных напряжениях и при определенной конструкции ФР.

Спектральный диапазон чувствительности ФП на основе внутреннего фотоэффекта (как ФР, так и ФД) определяется шириной запрещенной зоны материала, из которого изготовлен ФП, глубиной залегания примесных уровней и запрещенной зоне. Успехи в технологии полупроводниковых материалов и полупроводниковых приборов позволили создать ряд ФП, перекрывающих диапазон от УФ до дальнего ИК излучения.

В настоящее время хорошо отработана технология получения ряда двойных и некоторых тройных полупроводниковых соединений. Фотоприемники, изготовленные на основе тройных полупроводниковых соединений СdxHg1-xTe, РbxSn1-xТе позволяют плавно перекрывать диапазон длин волн от 0,5 до 25 мкм в зависимости от соотношения компонентов в соединении. Практически все такие ФП охлаждаемые, что вызывает дополнительные трудности при использовании их в измерительной аппаратуре в качестве ПИП.

Для более далекого ИК диапазона разработаны ФР на основе примесного Ge. В зависимости от легирующей примеси область спектральной чувствительности простирается до 150 мкм. Примесные германиевые приемники работают при глубоком охлаждении {4—5 К), и их применение в СИ широкого применения весьма затруднено.

Несмотря на столь широкий спектральный диапазон современных ФП, изготовленных на остове полупроводниковых соединений и примесных элементарных полупроводников, применение их для измерений энергетических параметров лазерного излучения ограничено. Это связано с их большой инерционностью, невысокой чувствительностью и сложностью применения в аппаратуре из-за низких рабочих температур.

В настоящее время благодаря разработке большого числа ФП (в основном ФД) на основе Ge и Si хорошо освоенным можно считать видимый и ближний ИК диапазоны оптического излучения.

Эти полупроводниковые приемники, в отличие от рассмотренных ранее, не требуют охлаждения. Вид типичных спектральных характеристик ФД, изготовленных из Ge и Si, показан на рис. 1.

Германиевые ФД работают в спектральном диапазоне 0,3—1,8 мкм, кремниевые — в диапазоне 0,4—1,2 мкм, максимум спектральной характеристики для германия — в области лmax=1,5 мкм, для кремния — в области лmax=0,8—0,9 мкм.

С помощью специальной технологии удается оптимизировать спектральные характеристики фотодиодов как в коротковолновой, так и в длинноволновой области спектра. Использование ФП с расширенным спектральным диапазоном в СИ весьма перспективно. Применение таких ФП с подобранными коррегирующими фильтрами позволяет сделать их малоселективными в определенном спектральном интервале и дает возможность измерять энергетические параметры без учета неравномерности спектральной чувствительности.

В настоящее время технология изготовления ФП из кремния освоена и отработана в большей степени, чем из германия. Это обусловило появление в последнее время широкого ассортимента кремниевых ФД различных типов.

Абсолютная спектральная чувствительность ФД

, (8)

где R — коэффициент отражения; Т— коэффициент пропускания окна прибора; Q — квантовый выход; г — коэффициент собирания носителей; л — длина волны излучения.

В рабочем спектральном диапазоне абсолютная спектральная чувствительность составляет десятые доли ампера на ватт. В литературе встречается очень мало данных о диапазоне линейности полупроводниковых ФД. Измерения линейности проводятся в разных условиях, критерий нелинейности также различный и чаще всего вообще не указывается. Поэтому не представляется возможным сопоставить литературные данные по линейности ФД. В каждом случае применения ФД в СИ энергетических параметров лазерного излучения необходимо исследовать их диапазон линейности в рабочих режимах и условиях.

Темновые токи ФД определяются концентрацией и диффузионной длиной неосновных равновесных носителей заряда и зависят от ширины запрещенной зоны материала и температуры. Темновые токи у кремниевых ФД примерно на порядок ниже, чем у германиевых. Темновой ток обычных кремниевых ФД, изготовленных методом диффузии, 10-5—10-7 А. Кремниевые р—i—n-фотодиоды благодаря высокоомному i-му слою обладают меньшими темновыми токами — порядка 10-9 А. Эпитаксиальные кремниевые ФД, не уступающие по своим фотоэлектрическим свойствам стандартным диффузионным ФД, имеют предельно низкие темновые токи — порядка 10-12 А. ФД обладают сравнительно низким уровнем шумов, что в сочетании с высокой чувствительностью делает их ФП с низким порогом чувствительности. Это позволяет использовать ФД для измерений весьма слабых потоков излучения до 10-12 Вт в непрерывном режиме.

Инерционность полупроводниковых ФД определяется временем диффузии неосновных носителей, генерируемых оптическим сигналом к p—n-переходу, временем пролета носителей в р—n-переходе, а также временем RС-релаксации. У обычных ФД, в конструкции которых нс предусмотрено специальных мер для повышения быстродействия, временное разрешение составляет 10-6—10-8 с в зависимости от площади р—n-перехода, глубины его залегания. Временное разрешение германиевых и кремниевых лавинных ФД достигает 1 нс, кремниевых р—i—n-ФД от 1 до 20 нс.

Зонная неравномерность чувствительности полупроводниковых ФП обусловлена неоднородностями материала. Сопоставить литературные данные, касающиеся зависимости чувствительности от угла падения излучения и зонной неравномерности чувствительности, не представляется возможным, так как, во-первых, таких данных мало, а, во-вторых авторы обычно не указывают условий измерений. Поэтому при разработке СИ энергетических параметров лазерного излучения необходимо исследовать эти характеристики для каждого типа ФП.

Зонная неравномерность чувствительности зависит от длины волны излучения, что связано, по-видимому, с зависимостью глубины проникновения излучения от длины волны.

Зависимость чувствительности от угла падения потока излучения полупроводниковых ФП обусловлена зависимостью средней глубины проникновения излучения от угла падения и угловой зависимостью коэффициента отражения.

Для измерения относительно больших уровней мощности и энергии целесообразно применять ПИП с невысокой чувствительностью, т. е. ФЭ. Для измерения средних уровнен энергетических параметров лазерного излучения можно .применять как вакуумные приборы (ФЭУ), так и полупроводниковые (ФР, ФД). Для измерения малых потоков требуются приемники с высокой чувствительностью и низкими уровнями шума. Фотодиоды уступают по чувствительности ФЭУ. Однако ФД обладают гораздо более низким уровнем шума. Это позволяет применять ФД для измерений малых потоков не непосредственно, а с помощью усилителя. В этом случае ФД вполне могут конкурировать с ФЭУ, а в ряде случаев и превосходить их по характеристикам.

Основные преимущества ФД по сравнению с ФЭУ: небольшие габариты, низковольтное питание, высокая надежность н механическая прочность, более высокая стабильность чувствительности, низкий уровень шумов, лучшая помехозащищенность от электрических и магнитных полей.

Недостатки ФД по сравнению с ФЭУ: меньшее быстродействие для большинства ФД, более сильною влияние внешних условий (особенно температура) на параметры и характеристики прибора.

Для измерения временных параметров лазерного излучения следует применять наиболее быстродействующие фотоэлектрические приемники — ФЭ, для измерения малых потоком Ї ФЭУ и быстродействующие ФД.

При использовании фотоприемников в качестве измерительных преобразователей в СИ энергетических параметров лазерного излучения важным моментом является согласование ФП с электронной схемой преобразования электрического сигнала измерительной информации. Обычные схемы включения ФП представлены на рис. 2. Фотоэлементы включаются в схему аналогично фотодиодам. Обычно ФП включают последовательно с нагрузкой Rн и источником питания Е. В зависимости от подключения «земляной» точки и сопротивления нагрузки сигнал ФП может быть получен как положительной (рис. 2,а,д), так и отрицательной (рис. 2,б, г) полярности. ФР включают в электрическую цепь так же, как н ФД. Для получения сигнала положительной полярности с ФЭУ можно подключить нагрузку в разрыв между одним из последних динодов и точкой подключения делителя к этому диноду. В этом случае чувствительность ФЭУ несколько ниже, чем при обычном включении, так как отсутствует усиление в последних каскадах.

Конденсатор Сбл во всех случаях включается для уменьшения внутреннего сопротивления источника питания при импульсном сигнале. Обычно емкость Сбл выбирается довольно большой 0,01—1 мкф. Такие конденсаторы имеют паразитные индуктивности, и включение их в оконечных каскадах ФЭУ (см. рис. 2,в) может приводить к снижению быстродействия. Поэтому при работе в наносекундном диапазоне длительностей к указанным Сбл следует подключать параллельно небольшие малоиндуктивные емкости для обеспечения прохождения импульсов с короткими фронтами. Увеличение быстродействия ФЭУ достигается индивидуальным подбором режима питания, изменением сопротивлений делителя. При этом учитываются конструктивные особенности и несовершенства конкретного экземпляра ФЭУ. С помощью подбора режима питания добиваются и оптимизации отношения сигнал-шум.

Фотодиоды могут использоваться как в фотодиодном (с питанием), так и в фотовольтаическом (без питания) режиме. В СИ энергетических параметров обычно используют фотодиодный режим, так как при этом диапазон линейности и быстродействие гораздо больше, чем в фотовольтаическом режиме, важное значение для работы СИ энергетических параметров лазерного излучения имеет согласование с электронной схемой.

Для получения на нагрузке Rн сигнала, амплитуда которого пропорциональна энергии импульсного излучения, параллельно ей включают конденсатор Сн таким образом, чтобы постоянная времени ф=RэCн была больше длительности импульса излучения (здесь Rэ Ї эквивалентное сопротивление, составленное из параллельно подключенных Rн, внутреннего сопротивления ФП и входного сопротивления устройства преобразования .электрического сигнала).

Для получения на нагрузке Rн сигнала, амплитуда которого пропорциональна мощности импульсного излучения, выбирают с помощью параметров схемы постоянную времени фотоприемного устройства меньше длительности импульса, чтобы импульсный электрический сигнал воспроизводил форму оптического сигнала.

Для измерения мощности лазерного излучения в непрерывном режиме могут быть использованы как вакуумные, так и полупроводниковые ФП. В этом случае не требуется их высокого быстродействия, как в импульсном режиме. Важную роль при этом играют такие параметры, как чувствительность, уровень шума, нестабильность самих ФП, так как в непрерывном режиме техника измерений электрических сигналов хорошо отработана и на точность измерений метрологические свойства системы обработки и регистрации информации оказывают незначительное влияние.

Схема измерения энергетических параметров лазерного излучения в работе представлена на рис.1

Рис.1 Схема для фотоэлектрического измерения энергетических параметров

1- лазер; 2- светофильтр; 3- положительная линза; 4- матовое стекло; 5-фотоприемник; 6-усилитель; 7-осцилограф.

**Список использованных источников**

1. Иващенко П.А. Измерение параметров лазеров. – М.: Издательство стандартов, 1982.

2. Котюк А.Ф. Измерение энергетических параметров и характеристик лазерного излучения. – М.: Радио и связь, 1981.

3. Хирд г. Измерение лазерных параметров.: Пер. с англ.//Под ред. Ф.С. Файзуллова. – М.: Мир, 1970.

4. Андрушко Л.М., Байбородин Ю.В., Блохин С.В. и др. Справочник по лазерной технике. – Киев.: Технiка, 1978.