

## 2. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

### 2.6. ТЕПЛОВЫЕ ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

2.6.1.	Основные параметры тепловых приемников	1
2.6.2.	Элементы теории тепловых приемников	2
2.6.3.	Термоэлементы	3
2.6.4.	Болометр	4

Важными свойствами тепловых приемников, определяющими во многих случаях целесообразность их применения, являются пригодность для абсолютных измерений энергии излучения и постоянство чувствительности в очень широкой области спектра.

Принцип действия тепловых приемников основан на измерении мощности поглощаемого излучения по возникающему изменению температуры и зависящих от нее равновесных параметров материала – формы, проводимости... Для того чтобы падающее излучение поглощалось полностью, достаточно покрыть поверхность приемника каким-либо неотражающим покрытием. Существенно, что к этим покрытиям предъявляется *только* требование минимального отражения в возможно более широкой спектральной области.

Здесь наиболее удобны черни, состоящие из металлических микрокристаллов средним размером 2—5 нм. Они практически полностью поглощают излучение в диапазоне частот 50—50000 см<sup>-1</sup> (длины волн от 0,2 мкм до 200 нм).

В низкочастотной части этого диапазона, средней и дальней ИК-области спектра (частоты меньше 5000 см<sup>-1</sup>) тепловые приемники являются основным видом приемников для спектроскопии. В видимой и ультрафиолетовой области (частоты выше 13000 см<sup>-1</sup>) они используются только в специальных случаях как неселективные или абсолютные.

По принципу действия, т.е. способу преобразования температуры в измеряемый электрический сигнал, тепловые приемники делятся на термоэлементы, болометры, пироэлектрические и оптико-акустические (пневматические) приемники.

#### 2.6.1. Основные параметры тепловых приемников

**ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ** (вольт-ваттная чувствительность) может быть определена только коэффициентом преобразования световой мощности в электрический сигнал (В/Вт). Чем выше чувствительность, тем, обычно, проще усилительный тракт для работы с приемником.

**ОБНАРУЖИТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ** и **Пороговый Поток**. Мощность шумов приемника пропорциональна размеру приемной площадки и ширине регистрируемой полосы частот усилительного тракта, поскольку спектр шумов — сплошной. Измеряется, правда, не мощность выходного сигнала, а ЭДС, пропорциональная корню квадратному из мощности. Следовательно, шум пропорционален корню из полосы пропускания. Пороговая чувствительность обычно приводится к единичной площади приемника и к ширине полосы

## 2.6. Тепловые приемники излучения

пропускания измерительного тракта в 1 Гц. Для лучших тепловых приемников, работающих при комнатной температуре, пороговый поток составляет примерно  $10^{-10}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>, что близко к теоретическому пределу, обусловленному тепловыми шумами при этой температуре.

*ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ* ( $\tau$ ) тепловых приемников относительно велика, так что для регистрации быстропеременных процессов они непригодны. С другой стороны, даже постоянный световой поток желательно модулировать для того, чтобы уменьшить мощность шумов типа  $1/f$ . Для уменьшения  $\tau$  приемные площадки стараются делать как можно легче. Удастся изготавливать высокочувствительные тепловые приемники с постоянной времени порядка 0.05 с, что позволяет работать на частоте модуляции около 10 Гц.

## 2.6.2. Элементы теории тепловых приемников

Неосвещенный приемник находится в тепловом равновесии с окружением. Его приемная площадка имеет температуру  $T_0$ .

Поглощаемый световой поток повышает ее температуру до  $T_1$ , что сопровождается переносом тепла от приемной площадки к окружению. Перенос тепла тем больше, чем больше разность  $\Delta T = T_1 - T_0$ . Рост температуры освещенной приемной площадки прекратится, когда установится баланс (равенство) между потоком энергии, переносимой на площадку светом, и потоком тепла от нагретой площадки к окружению. Имеются три канала обмена тепловой энергией между приемной площадкой и окружением: тепловое излучение (в инфракрасной области спектра), теплопроводность газового окружения и теплопроводность элементов конструкции, поддерживающих площадку и обеспечивающих электрические соединения:

$$W = S\sigma(T_1^4 - T_0^4) + SA(T_1 - T_0) + B(T_1 - T_0). \quad (2.6.1)$$

Здесь  $W$  — мощность светового потока,  
 $S$  — полная площадь приемной площадки,  
 $\sigma$ ,  $A$ ,  $B$  — константы, характеризующие излучательную способность приемной площадки, теплопроводность газа и теплопроводность несущих элементов соответственно.

Поскольку  $\Delta T = T_1 - T_0$  всегда мало, из (2.6.1) имеем

$$W \approx (4S\sigma T^3 + SA + B)\Delta T = \beta \Delta T, \quad (2.6.2)$$

где  $\beta = 4S\sigma T^3 + SA + B$  — коэффициент, характеризующий суммарную теплоотдачу. Или

$$\Delta T = W/\beta. \quad (2.6.3)$$

Очевидно, чем меньше  $\beta$ , тем выше вольтваттная чувствительность приемника. При изготовлении высокочувствительных приемников стремятся уменьшать площадь приемной площадки, помещают ее в вакуум, уменьшают теплопроводность элементов конструкции. Уменьшение площади и вакуумирование приемника понижает также шумы, а с ними — пороговый поток.

Однако одновременно увеличивается инерционность приемника:

## 2.6. Тепловые приемники излучения

$$\tau = ct/\beta, \quad (2.6.4)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость приемной площадки,  $m$  — ее масса.

Для уменьшения постоянной времени используют конструкции с минимальной теплоемкостью, но иногда приходится искусственно увеличивать теплопроводность элементов конструкции или увеличивать конвекционное охлаждение, отказываясь от вакуумирования.

## 2.6.3. Термоэлементы

Термоэлементы — наиболее распространенный вид тепловых приемников. В простейшем варианте термоэлемент представляет собой термопару, один из спаев которой находится в тепловом контакте с приемной площадкой (рис. 2.32). При нагревании площадки в цепи возникает термо-ЭДС ( $V_t$ ), пропорциональная разности температур нагреваемого и холодного (на баллоне) концов термопары:

$$V_t = E_t \Delta T = E_t W/\beta, \quad (2.6.5)$$

где  $E_t$  — дифференциальная термо-ЭДС.

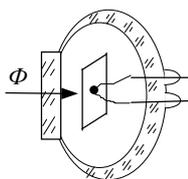


Рис. 2.6.1. Схематическое изображение вакуумного термоэлемента.

Световой поток  $\Phi$  нагревает приемную площадку; ее температура измеряется термопарой.

Вольтваттная чувствительность термопары тем больше, чем больше  $E_t$ . Любая пара разнородных проводящих материалов характеризуется определенным значением  $E_t$ , обычно очень малым, меньше 1 мкВ/К. Но некоторые сочетания обнаруживают большие значения  $E_t$ . Для металлов и сплавов с металлическим типом проводимости максимальные значения  $E_t$  достигаются для термопар висмут–сурьма (100 мкВ/К) и хромель–копель (60 мкВ/К). Для контактов с полупроводниками термо-ЭДС могут быть еще выше (для  $\text{CuO} - \text{Cu}_2\text{O}$   $E_t = 1900$  мкВ/К), однако растут и шумы.

Чувствительность практически используемых термоэлементов достигает 2—20 В/Вт. Учитывая реальные значения чувствительности, порогового потока ( $\sim 10^{-10}$  Вт) и термо-ЭДС, легко убедиться, что изменение температуры приемной площадки имеет порядок  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  К даже при световых потоках в 1000—100 раз превышающих пороговый уровень. Очевидно, что необходимо принимать специальные меры для уменьшения влияния нестабильности температуры окружающей среды на выходной сигнал приемника. Практически всегда используется метод компенсации: приемник выполняется как комбинация двух идентичных термоэлементов, включенных навстречу друг другу. Измеряемое излучение направляется на приемную площадку одного термоэлемента, в котором генерируется термо-ЭДС полезного сигнала. Термо-ЭДС, вызванные нестабильностью температуры, генерируются в обоих термоэлементах и компенсируются тем точнее, чем ближе их характеристики. Флуктуации температуры принадлежат к обширному классу шумов со спектральной плотностью  $1/f$  ( $f$  — частота). Наибольшую амплитуду в таком шуме имеют

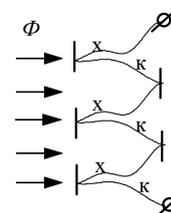
## 2.6. Тепловые приемники излучения

низкочастотные составляющие, и без фильтрации шум этого типа проявляется как “дрейф” показаний регистрирующего прибора. Его величина и знак изменяются во времени. Эффективным средством подавления такого шума является регистрация предварительно модулированного излучения с узкополосным усилением на частоте модуляции. Для этого необходимо использовать достаточно малоинерционные приемники (см. выше).

Разумеется, наряду с термокомпенсацией и модуляцией излучения используются обычные средства термостатирования: герметизация и экранирование приемника с помощью подходящего кожуха. Для долговременного поддержания вакуума в баллоне он обычно снабжается адсорбционным поглотителем, который играет роль постоянно действующего насоса.

Если световой поток нельзя или неудобно фокусировать на малую приемную площадку, делают так называемые термостолбики (термобатарей), соединяя последовательно необходимое число термоэлементов, чтобы перехватить весь световой поток (рис. 2.6.2).

Рис. 2.6.2. Термостолбик — несколько соединенных последовательно термопар. Левые (на рисунке) спаи хромель (х)—копель (к) соединены с приемными площадками, перекрывающими весь световой поток  $\Phi$ .



Усиление электрического сигнала от термоэлемента представляет непростую задачу, поскольку малое выходное напряжение термоэлемента сочетается с малым внутренним сопротивлением, порядка десяти Ом. Для усиления постоянных микровольтовых напряжений от таких источников используются гальванометрические (фотокомпенсационные) усилители; при усилении на переменном токе — специальные избирательные усилители.

## 2.6.4. Болومتر

Другим распространенным типом неселективных приемников излучения является болومتر. В сущности, болومتر — это терморезистор, т. е. резистор, сопротивление которого зависит от температуры.

В простейшем варианте болومتر имеет конструкцию, проще которой уже трудно что-нибудь придумать: это закрепленная на двух электродах тонкая черненная металлическая ленточка. На худой конец, в качестве болометра может быть использована лампа накаливания.

При облучении ленточка нагревается и изменяется ее сопротивление, что и служит мерой поглощаемой световой мощности:

$$r_{ph} = r(1 + \alpha \Delta T) = r(1 + W\alpha/\beta), \quad (2.6.6)$$

где  $r$  — сопротивление неосвещаемой ленточки болометра,

$r_{ph}$  — ее сопротивление при освещении,

$\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления материала ленты.

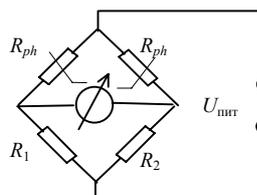
Если болومتر подключить к источнику напряжения  $U$  последовательно с большим сопротивлением  $R$ , на нем возникнет напряжение “сигнала”:

## 2.6. Тепловые приемники излучения

$$U_{ph} = r_{ph}U/(R+r) \cong r(1+W\alpha/\beta)U/R = r(1+W\alpha/\beta)I. \quad (2.6.7)$$

Однако такой способ включения болометра сколь прост, столь же и неудобен, так как обычно величина  $W\alpha/\beta \ll 1$  и малый полезный сигнал, несущий информацию о световом потоке, оказывается стоящим на большой бесполезной и, следовательно, вредной “подставке”. “Подставка” не остается строго постоянной, так как величины  $U$ ,  $R$ ,  $I$ ,  $\beta$ ,  $r$  зависят от температуры окружающей среды, от напряжения сети и целого ряда других плохо контролируемых факторов. В том числе — от наличия или отсутствия сквозняков в помещении, что влияет на теплообмен баллона болометра с окружением.

Рис. 2.6.3. Мостовая схема для измерений с двумя идентичными болометрами.



Бесполезную “подставку” можно убрать либо использованием мостовой схемы с двумя идентичными болометрами (рис. 2.34), либо модуляцией (периодическим прерыванием) светового потока и измерением только переменной составляющей напряжения сигнала  $U_{ph}$ .

Обычно оба метода используются одновременно. При этом

$$U_{ph} = IrW\alpha/\beta. \quad (2.6.8)$$

### Несколько слов о конструкции реальных болометров, выборе материалов и величины питающего тока.

Ленточки болометра, так же, как и термоэлемент, монтируют обычно в стеклянном баллоне, снабженном “дежурным” адсорбционным насосом и окном из материала, прозрачного в нужной спектральной области. Баллон помещается в металлический экран.

Обсуждать выбор материалов и величины тока достаточно сложно, так как все коэффициенты, входящие в выражение для  $U_{ph}$ , взаимосвязаны. Попробуем все же это сделать, не претендуя на полноту рассуждений и, следовательно, на их абсолютную корректность.

Формулы легко показывают, что чем больше температурный коэффициент  $\alpha$  при прочих равных условиях, тем лучше. Обратившись к справочникам, мы без труда (но, может быть, не без удивления) обнаружим, что для подавляющего большинства чистых металлов температурный коэффициент сопротивления почти одинаков и составляет  $(4...5) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . Такое однообразие обусловлено одинаковостью механизма рассеяния электронов, ускоряемых электрическим полем. Для чистых металлов преобладающий механизм рассеяния — рассеяние на фононах. Концентрация же “фононного газа” растет с ростом температуры для всех веществ практически одинаково.

Таким образом, с точки зрения величины  $\alpha$  почти безразлично, какой из чистых металлов мы выбираем.

## 2.6. Тепловые приемники излучения

Для сплавов  $\alpha$  всегда меньше, чем для входящих в их состав металлов, так как в сплавах “подключается” другой механизм рассеяния электронов — рассеяние на дефектах кристаллической структуры, концентрация которых от температуры не зависит. Среди сплавов есть и такие, где рассеяние на фононах практически не играет роли по сравнению с рассеянием на дефектах. Это высокоомные сплавы с почти нулевым температурным коэффициентом сопротивления (константан, манганин), используемые для изготовления прецизионных резисторов, в частности, резисторов мостовой схемы болометра. Во всяком случае, на роль оптимальных материалов для изготовления ленточек болометра сплавы претендовать не могут. (Попутно отметим, что для изготовления прецизионных резисторов используется, главным образом, манганин, у которого температурный коэффициент  $\alpha$  больше, чем у константана, но зато он легко смачивается оловянными припоями и не имеет термо-ЭДС в паре с медью.)

Большой отрицательный температурный коэффициент сопротивления могут иметь полупроводники, где упомянутые выше причины зависимости (или независимости) сопротивления от температуры отступают на второй план по сравнению с экспоненциальной температурной зависимостью концентрации свободных носителей заряда. Проводимость полупроводника

$$\sigma \approx T^{3/2} \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right), \quad (2.6.9)$$

где  $\Delta E$  — ширина запрещенной зоны. В примесном полупроводнике вместо  $\Delta E/2$  фигурирует еще меньшая величина.

Однако полупроводниковые болометры применяются достаточно редко и обсуждать их подробно мы не будем.

Теперь о величине сопротивления  $r$  и выборе металла для его изготовления. Размеры ленточки болометра (длина, ширина) выбираются исходя из размеров сечения светового пучка на выходе монохроматора (т. е. исходя из размеров выходной щели монохроматора или размеров ее изображения), а толщина — из соображений достаточной механической прочности и жесткости. Таким образом, задача сводится к выбору металла, для которого величина удельного сопротивления  $\rho$  была бы максимальной, а теплопроводность (т. е. величина  $\lambda \cong 1/\beta$ ) — минимальной. К счастью, эти требования совпадают.

Дело в том, что и тепло- и электропроводность в проводниках определяются свойствами электронной подсистемы и прямо пропорциональны концентрации электронов и их подвижности. Отношение этих величин практически одинаково для всех проводников.

В отличие от  $\alpha$  величина  $\rho$  для разных металлов может различаться почти на два порядка. Рекордсменом является, по-видимому, висмут, имеющий  $\rho = 1.2 \cdot 10^{-4}$  Ом·м. Минимальные для металлов значения  $\rho$  имеют серебро и медь,  $0.016 \cdot 10^{-4}$  и  $0.017 \cdot 10^{-4}$  Ом·м соответственно. Они же обладают наибольшей из всех металлов теплопроводностью. Теперь должно быть понятно, что ленточки болометров делаются из висмута, хотя он хрупок и потому не удобен в работе.

Несколько слов о величине питающего тока  $I$ . Дело в том, что питающий ток не безобиден, он нагревает ленточки болометра. Это нагревание допустимо до тех

пор, пока остается справедливым приближенное выражение вида

$$T_1^4 - T_0^4 \cong 4T^3 \Delta T. \quad (2.6.10)$$

В противном случае формула, описывающая работу болометра, становится неверной, его чувствительность падает, а при чрезмерном токе болометр превращается из приемника излучения в его источник — в обыкновенную лампу накаливания.

Таким образом, простота болометра по сравнению с термоэлементом иллюзорна. Неоспоримое же его преимущество заключается в том, что болометр можно питать переменным током достаточно высокой частоты и, следовательно, для усиления полезного сигнала использовать высокочувствительные резонансные усилители, которые легко конструируются на современной элементной базе. Однако усилитель оказывается довольно сложным, поскольку включает:

- а) усилитель “высокой” частоты (частоты питания болометра, обычно 4—10 кГц);
- б) детектор высокой частоты, выделяющий сигнал на частоте модуляции светового потока (обычно около 10 Гц);
- в) детектор — демодулятор, выделяющий постоянный “оптический” сигнал;
- г) фильтр, определяющий полосу пропускания усилительного тракта (для работы вблизи порога чувствительности ширина полосы пропускания должна быть 1—0.1 Гц).

Изготовление высококачественных тепловых приемников до настоящего времени остается искусством, секреты которого немногочисленные фирмы-изготовители (некоторые состоят из одного человека) тщательно охраняют. В зарубежных инфракрасных спектрометрах используются, как правило, вакуумные термоэлементы. Отечественные спектрофотометры типа ИКС производства ЛОМО имеют в качестве приемников висмутовые болометры. В дальней ИК-области (частоты меньше  $200 \text{ см}^{-1}$ ) обычно требуются приемники с гораздо большей приемной площадкой. В этом случае используют обычно пироэлектрические или оптикоакустические приемники.

### **Предупреждение для будущих молодых специалистов**

Высокочувствительные тепловые приемники — весьма субтильные создания. Ток порядка 10 мА их сжигает. Обычные причины выхода из строя спектрального прибора с термоэлементом или болометром:

- а) попытка проверить стандартным тестером, не перегорел ли приемник. Он перегорает в момент измерения. Тестер — довольно грубый прибор, не предназначенный для тонких работ;
- б) попытка паять схему усилителя, подключенного к приемнику, электропаяльником, подключенным к сети электропитания (даже через понижающий трансформатор). На жале паяльника из-за утечек часто возникает напряжение в несколько вольт, вполне достаточное для пережигания приемника.

### **Правила безопасности (для приемника)**

**2.6. Тепловые приемники излучения**

1. Для проверки целостности приемника собирать специальный пробник на базе достаточно чувствительного микроамперметра и предварительно проверять его в режиме короткого замыкания: ток через микроамперметр должен быть порядка нескольких микроампер.

2. При необходимости паять на усилителе, подключенном к приемнику, взять за правило включать паяльник в другом конце комнаты, так, чтобы длина шнура не позволяла дотянуться до схемы включенным паяльником. Паять на тепловой инерции разогретого паяльника.

**Содержание главы 2:****2. Оптические приборы****2.1. Призма****2.2. Дифракционная решетка****2.3. Интерферометры****2.4. Вспомогательные узлы спектральных приборов****2.5. Призмные и дифракционные спектральные приборы****2.6. Тепловые приемники излучения****2.7. Фотоэлектронный умножитель**