

4. ТЕПЛОВЫЕ ПРИЕМНИКИ

Гершель обнаружил ИК излучение в 1800 г., используя в качестве приемника стеклянный жидкостный термометр, который и принято считать первым тепловым приемником. Тепловые приемники в качестве тепlopеленгаторов используются уже миллионы лет гадюками и удавами, которые ощущают небольшую разницу в температуре поверхности тела жертвы и окружающей среды, что помогает им обнаруживать добычу в полной темноте. У гадюк ниже глаз имеются особые углубления, содержащие чувствительные к ИК излучению органы, а у второго вида чувствительной к тепловому излучению является область вблизи челюстей. Известно, что эти органы представляют собой приемники излучения теплового типа.

Тепловые приемники делят на приемники, создающие термоэлектродвижущую силу (термо-ЭДС) при нагревании их падающим ИК-излучением, и приемники, изменяющие свои электрические свойства при колебаниях температуры приемной площадки. К первому типу приемников относятся термоэлементы, ко второму - болометры и пироэлектрические приемники.

4.1. Основные принципы работы.

При рассмотрении тепловых характеристик приемников излучения необходимо на первом этапе определить возрастание температуры его чувствительного слоя за счет падающего внешнего излучения, а на втором - как изменение температуры влияет на свойства приемника.

Простейшая схема тепловой цепи ИК-фотоприемника представлена на рис. 1.4. Детектор представлен здесь чувствительным элементом с теплоемкостью H , соединенным с теплоотводом, имеющим постоянную температуру T , и тепловым мостом, обладающим теплопроводностью G . В отсутствие внешнего излучения средняя температура приемника будет равна T , причем она флуктуирует возле среднего значения. Эти флуктуации являются причиной собственных шумов приемника, которые ограничивают пороговую чувствительность приемника. При наличии на входе детектора внешнего излучения, приращение его температуры можно найти из уравнения

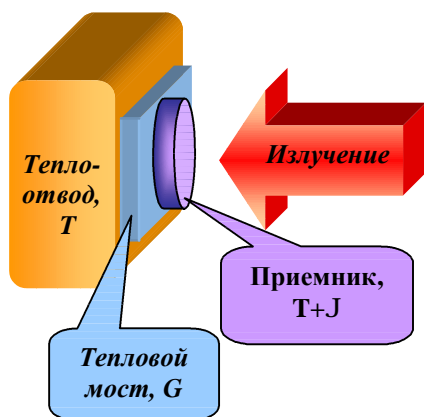


Рис. 1.4.

Детектор представлен здесь чувствительным элементом с теплоемкостью H , соединенным с теплоотводом, имеющим постоянную температуру T , и тепловым мостом, обладающим теплопроводностью G . В отсутствие внешнего излучения средняя температура приемника будет равна T , причем она флуктуирует возле среднего значения. Эти флуктуации являются причиной собственных шумов приемника, которые ограничивают пороговую чувствительность приемника. При наличии на входе детектора внешнего излучения, приращение его температуры можно найти из уравнения

$$e_n \Phi = H \left(\frac{d\Theta}{dt} \right) + G\Theta, \quad (4.1)$$

где Φ - поток излучения, попадающий на чувствительную площадку, e_n - коэффициент поглощения приемника. Через некоторое время установится стационарный режим, в котором температура приемника будет равна $T_n = T + Q$. Постоянная времени теплового приемника определяется скоростью нарастания выходного сигнала до уровня 63% от максимального значения. При использовании гармонической модуляции принимаемого потока

$$\Phi(w) = \Phi_0 + \Phi_w \exp(jwt), \quad (4.2)$$

где Φ_w - амплитуда переменного сигнала, решение уравнения (4.1) позволяет найти амплитудное значение гармонической модуляции температуры приемника

$$\Theta_w = e_n \Phi_w / \sqrt{G^2 + w^2 H^2}. \quad (4.3)$$

Обычно стремятся обеспечить максимально возможное значение Q_w , для чего необходимо сделать теплопроводность моста G минимальной, а частоту модуляции выбирать из усло-

вия $wH \ll G$. Другими словами, и теплоемкость фоточувствительного элемента и его тепловой контакт с окружающей средой должны быть сведены к минимуму. Для тепловых фотоприемников необходимо создавать условия для оптимального поглощения падающего излучения и одновременно уменьшать все другие виды теплового взаимодействия с окружающей средой.

Постоянную времени отклика фотоприемника при использовании (4.3) можно представить в виде

$$t_T = H / G. \quad (4.4)$$

Для типичных тепловых приемников величина этой постоянной лежит в интервале от миллисекунд до секунд и существенно больше типичного времени отклика фотонных фотоприемников.

Предельная пороговая чувствительность тепловых приемников определяется радиационными шумами, возникающими при его теплообмене с окружающей средой

$$\Delta\Phi_p^2 = 8e_n k(T_\phi^5 + T_{nu}^5) s s_{np} \Delta f, \quad (4.5)$$

где $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹ - постоянная Больцмана, $s = 5,67 \cdot 10^{-12}$ Дж·см⁻²·К⁻⁴ - постоянная Стефана-Больцмана, s_{np} - площадь чувствительной площадки, T_ϕ - температура фона. Для стандартных условий при $T_{nu} = T_\phi = 290$ К, $s_{np} = 1$ см² и $\Delta f = 1$ Гц удельная пороговая чувствительность (4.5) равна $5 \cdot 10^{-11}$ Вт и совпадает с пороговой чувствительностью идеального приемника в режиме ограничения фоном при полусферической апертуре. Это значение используют при сравнении с параметрами реальных приемников, которые у лучших неохлаждаемых приемников по порядку величины близки к нему. Рабочей температурой теплового приемника не обязательно является комнатная. Если глубоко охлаждаемый (до 3 К) тепловой приемник тщательно заэкранирован тепловыми экранами, охлажденными до такой же температуры, то при наблюдении открытого космического пространства (температура фона 3 К), то его $\Delta\Phi_p^2 = 5,5 \cdot 10^{-16}$ Вт. Правда, на практике такого значения $\Delta\Phi_p^2$ достичь не удается.

На втором этапе, т.е. при определении зависимостей каких-либо свойств приемников от температуры чувствительного слоя, необходимо рассматривать конструкцию разных типов приемников.

4.2. Термопара.

Термопары (термоэлементы) были первыми приемниками для обнаружения и измерения ИК-излучения. Основным элементом термопары является переход на контакте между двумя различными полупроводниками с большим коэффициентом Зеебека Q . Лучшими элементами для приемника на основе термопары являются материалы с максимальным значением термо-ЭДС, которая возникает из-за разности температур между двумя спаями. На рис. 4.2,а приведена схема простейшего термоэлемента (термопары), со-

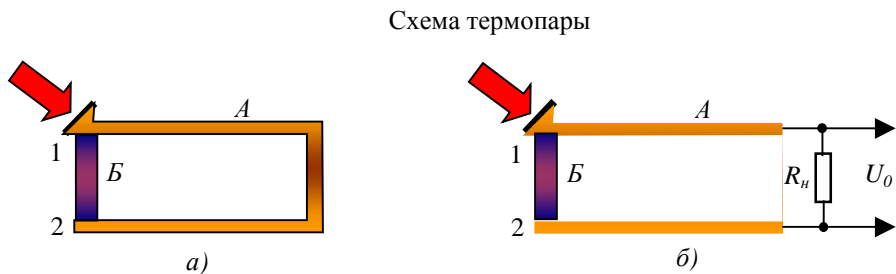


Рис. 4.2.

стоящего из проводников A и B . Один из концов проводника A служит приемной (чувств-

вительной) площадкой с площадью s_{np} . При облучении этой площадки излучение поглощается и площадка нагревается. Верхний спай 1 приобретает более высокую температуру относительно нижнего спае. При этом между спаями 1 и 2 возникает разность температур $\Delta T = T_2 - T_1$. Энергия и скорость электронов в нагретом спае увеличиваются по сравнению с холодным спаем, в результате чего электроны из нагретого спае будут переходить в холодный и появится диффузия электронов сверху вниз. Избыток электронов в холодной части спае создает отрицательный заряд, а в горячей части остается положительный некомпенсированный заряд. Возникает термо-ЭДС и в цепи 1-2 появляется ток. Если цепь проводников A и B замкнуть через сопротивление нагрузки R_n (см. рис. 4.2,б), то на нем образуется напряжение U_c . Количественно термо-ЭДС определяется соотношением

$$\Delta U_c = a_T \Delta T, \quad (4.6)$$

где a_T - коэффициент термо-ЭДС, численно равный разности потенциалов, возникающей при разности температур спаев в 1 К.

Материалами для термопар служат металлы и полупроводники. Из металлов наиболее часто используют медь, никель, висмут, платину, кобальт, сплавы меди и никеля (константан). Из полупроводниковых материалов применяют сурьму, кремний, теллур, селен.

Чувствительность с учетом свойств материалов термоэлемента может быть записана в виде

$$S_T = \frac{1}{G} a_T e_n, \quad (4.7)$$

где G - теплопроводность спае. Из (4.7) видно, что для увеличения крутизны преобразования термоэлемента необходимо обеспечивать максимально возможный коэффициент поглощения e_n . Достигается это путем покрытия приемной площадки платиновой чернью, сажей и другими веществами с коэффициентом поглощения близким к единице. Теплопроводность материалов должна быть как можно меньше. Для уменьшения величины G чувствительную площадку помещают в вакуумный баллон. Величина S_T для термоэлементов находится в пределах нескольких десятков В/Вт.

Коэффициент полезного действия h определяет степень преобразования падающего потока в термо-ЭДС и равен

$$h = P / \Phi, \quad (4.8)$$

где P - мощность, снимаемая с нагрузки, Φ - мощность принимаемого излучения. Величина h не превосходит долей процента для металлов и нескольких процентов для полупроводников, вследствие чего обнаружительная способность термоэлементов значительно хуже других приемников. Так лучшие термоэлементы позволяют фиксировать минимальные (пороговые) мощности излучения $10^{-9} \dots 10^{-10}$ Вт в полосе частот 1 Гц. Однако простота, надежность и высокая механическая прочность позволяют использовать термоэлементы в различной аппаратуре. Кроме того термопары широко используют для тарировки источников ИК-излучения и при сравнении различных приемников излучения.

Инерционность t определяется скоростью нарастания термо-ЭДС и для большинства термоэлементов находится в пределах от десятых долей до нескольких секунд.

Внутреннее сопротивление R_T определяется материалом элементов термопары и конструкцией термоэлемента. Так как удельное сопротивление указанных выше материалов очень мало, то и общее сопротивление термоэлемента не превосходит нескольких десятков Ом.

4.3. Болметры.

Болометр представляет собой приемник лучистой энергии, действие которого основано на изменении электропроводности чувствительного элемента при нагревании его

вследствие поглощения излучения. Болометры бывают металлические, полупроводниковые и сверхпроводящие.

Металлические болометры. Для их изготовления используют платину, никель, висмут, сурьму. С целью уменьшения теплопроводности G приемная площадка делается очень тонкой - от 0,05 до нескольких микрометров. Приемная площадка покрывается золотой или платиновой чернью, что обеспечивает неселективное поглощение излучения от видимого спектра до 20 и более микрометров.

Повышение температуры вызывает увеличение сопротивления металла

$$R = R_0 [1 + b_0 (T - T_0)], \quad (4.9)$$

или в относительных единицах

$$\Delta R / R = b_T / T, \quad (4.10)$$

где b_0 - температурный коэффициент сопротивления (ТКС) при T_0 , а b_T - при температуре T . Для большинства металлических болометров $b_0 = (0,3 \dots 0,4) \cdot 10^2$ 1/градус, а b_T - в широком диапазоне температур обратно пропорционален температуре, т.е. $b_T = 1/T$.

С помощью современных металлических болометров можно фиксировать изменение температур до 10^{-7} градуса и обнаруживать пороговые потоки излучения до 10^{-11} Вт/Гц^{1/2} вплоть до субмиллиметровых волн. Работает болометр обычно в мостовой схеме, питаемой постоянным или переменным током. Для исключения влияния изменения температуры окружающей среды применяют компенсационную схему из двух болометров B_1 и B_2 (см. рис. 4.3).

Схема включения компенсационного болометра

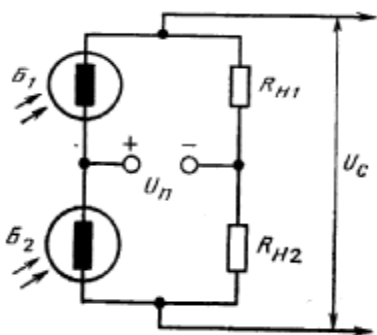


Рис. 4.3.

В этом случае при изменении окружающей температуры оба болометра одинаково изменяют свое сопротивление, благодаря чему равновесие моста сохраняется. При облучении одного из болометров, например B_1 , нарушается равновесие моста и появляется сигнал U_c , равный

$$U_c = U_n \frac{R_n}{R_T + R_n}, \quad (4.11)$$

где U_n - напряжение питания; R_T - сопротивление болометра; R_n - сопротивление нагрузки.

Чувствительность металлических болометров составляет 10...25 В/Вт, а пороговая чувствитель-

ность - 10^{-11} Вт.

Сверхпроводящие болометры. Для увеличения крутизны преобразования болометра необходимо уменьшать теплоемкость материала чувствительного слоя. Исследования показали, что теплоемкость чувствительного элемента при охлаждении пропорциональна T^3 . Охлаждение также приводит к уменьшению внутренних шумов болометра. В совокупности это позволяет улучшить пороговую чувствительность. Например, охлаждение никелевых болометров до температуры жидкого азота позволяет повысить пороговую чувствительность более чем в 5 раз.

При дальнейшем охлаждении болометров наблюдается явление сверхпроводимости, при котором удельное сопротивление материала резко падает, а температурный коэффициент b_T становится очень большим (примерно в $10^3 \dots 10^4$ раз больше, чем у металлов при комнатной температуре). Это приводит к резкому возрастанию чувствительности болометра. В качестве материалов для сверхпроводящих болометров применяют тантал, у которого сверхпроводимость наступает при температуре 3,22...3,23 К, ниобий (9,2 К), сплав олова и ниобия (18 К) и т.д.

На рис. 4.4 показана одна из современных конструкций сверхпроводящего болометра. Чувствительный элемент представляет собой тонкий слой олова, напыленный на поверхность пленки Al_2O_3 , полученной при анодном окислении алюминиевой подложки. Алюминиевая подложка соединяется с находящимся в контакте с гелиевой ванной латун-

Конструкция сверхпроводящего болометра

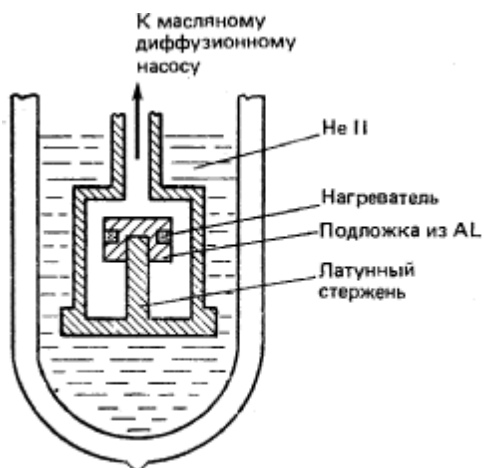
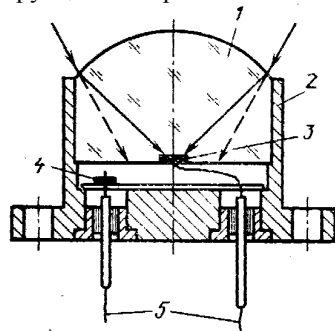


Рис. 4.4.

Для их изготовления используются материалы, температурный коэффициент сопротивления которых отрицателен и на порядок выше, чем у металлов.

Для большинства полупроводников $b_T = -3 \cdot 10^3 / T^2$. Чувствительные элементы изготавливаются на основе окисей никеля, кобальта, марганца, а также из пленок германия и кремния. В смесь порошкообразных окислов добавляют органическое связывающее вещество, после чего наносят пасту на стеклянную подложку или прессуют в виде таблеток или столбиков. В том и другом случае приводят термическую обработку при высокой температуре. Поверхность чувствительного слоя чернят для увеличения коэффициента поглощения, а сам слой закрепляют на цоколе из стекла или кварца и помещают в герметический корпус. Сопротивление полупроводниковых болометров обычно составляет от 1 до 10 МОм, а инерционность от 250 мкс до 40 мс. Пороговая чувствительность болометров обычно лежит в интервале $10^{-9} \dots 10^{-11}$ Вт.

Конструкция иммерсионного болометра



- 1 - иммерсионная линза; 2 - корпус;
- 3 - чувствительный элемент; 4 - компенсационный элемент; 5 - контакты

Рис. 4.5.

Охлаждение полупроводниковых болометров повышает их обнаружительную способность. Применение интегрирующей полосы (см. рис. 4.6) позволяет добиться почти полного поглощения принимаемого излучения. Тепловой контакт чувствительного элемента с хладагентом обычно осуществляется при монтаже последнего на какой-нибудь детали конструкции, имеющей хороший тепловой контакт с гелиевой ванной. Теплопроводность при этом определяет как постоянную времени приемника, так и компоненту шума, связанную с температурными флуктуациями. Наиболее существенные источники шумов охлаждаемых болометров связаны с фоновым излучением, попадающим в апертуру приемника, и шумами предусилителя.

ным стержнем, который обеспечивает охлаждение подложки до температуры несколько ниже критической точки. Нагреватель, вмонтированный в подложку, служит для поддержания рабочей температуры вблизи критической температуры олова (3,7 К). Пороговая чувствительность этого болометра составляет 10^{-13} Вт/Гц^{1/2}. Поскольку переход к сверхпроводимости наблюдается в очень узком температурном интервале, то рабочая температура чувствительного слоя должна поддерживаться с точностью около 0,0001 К. Это исключает пока применение таких приборов вне лабораторных условий.

Полупроводниковые болометры. Более широкое распространение по сравнению со сверхпроводящими получили полупроводниковые охлаждаемые и неохлаждаемые болометры.

Для повышения чувствительности болометров применяют иммерсионные линзы. В иммерсионном полупроводниковом болометре, показанном на рис. 4.5, чувствительный элемент 3 расположен в фокальной области сферической иммерсионной линзы 1 с высоким показателем преломления (германий). Иммерсионная линза позволяет в 3...4 раза улучшить пороговую чувствительность за счет уменьшения приемной площадки болометра при сохранении заданного поля зрения, или получить ту же чувствительность, что и у обычного болометра, используя в оптической системе приемный объектив вдвое меньшего диаметра.

Охлаждение полупроводниковых боло-

Устройство охлаждаемого полупроводникового болометра

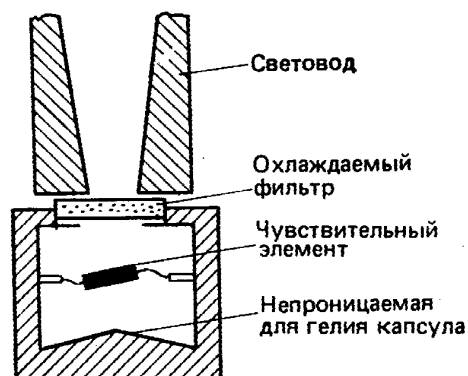


Рис. 4.6.

В последнее время разработаны болометры с очень малыми собственными шумами. Экспериментальные образцы болометра, охлаждаемого He^{III} до 0,5 К, имели пороговую чувствительность 10^{-14} Вт/Гц^{1/2}. При дальнейшем охлаждении до 0,1 К возможно улучшение пороговой чувствительности до 10^{-16} Вт/Гц^{1/2}. Однако такие параметры можно получить только при этих сверхнизких температурах, причем, необходим специальный глубоко охлаждаемый предусилитель.

4.4. Оптико-акустические приемники излучения.

До разработки термопарного приемника в качестве приемника излучения использовали чувствительный газовый термометр постоянного давления. Голей в годы предшествующие второй мировой войне усовершенствовал газовый термометр, применив гибкую зеркальную диафрагму. В приемнике Голея, показанном на рис. 4.7, падающее излучение поглощается внутренней поверхностью газонаполненной закрытой капсулы (обычно используют ксенон из-за его низкой теплопроводности), в результате чего происходит нагрев и расширение газа. Это, в свою очередь, приводит к деформации гибкой зеркальной диафрагмы. При ее повороте смещается и отражающийся от нее световой пучок, что вызывает изменение освещенности и тока на выходе оптического фотоэлемента, на который падает отраженный свет.

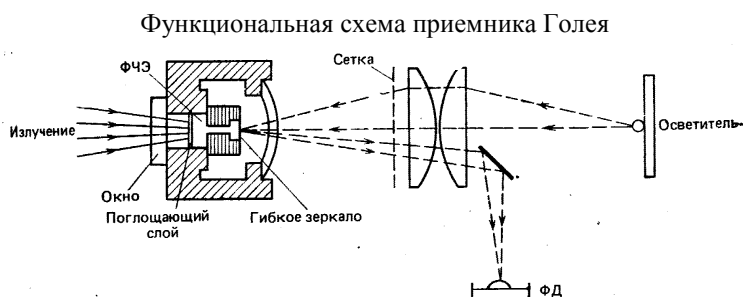


Рис. 4.7.

В современных конструкциях приемника Голея для освещения зеркала применяется светодиод, а приемником служит полупроводниковый фотодиод.

В основу принципа работы другого типа пневматического приемника положено изменение емкости конденсатора, одной из обкладок которого является металлизированная гибкая диафрагма газовой камеры. Поскольку емкость конденсатора можно достаточно точно определить с помощью моста переменного тока, то эти пневматические приемники достаточно широко используются в различной газоаналитической аппаратуре. На этом принципе работают ячейки Люфта, которые используют недисперсионные методы корреляционного определения концентрации анализируемого газа. Через одну газовую ячейку продувают анализируемую газовую смесь, освещая ее модулированным потоком излучения со спектральным составом близким к полосе поглощения анализируемого газа. При резонансном поглощении анализируемым газом излучения возникает периодический нагрев газовой смеси, что приводит к периодическому расширению и сжатию газа в камере, т.е. изменению давления. Периодические изменения давления хорошо фиксируются конденсаторным микрофоном. Вторая ячейка заполняется смесью нейтрального и контролируемого газа в определенной пропорции и освещается тем же, что и для первой ячейки, источником излучения. Сравнивая между собой сигналы от измерительной и опорной газовых ячеек, можно достаточно точно определять концентрацию контролируемого газа. Приемники, использующие этот принцип работы, называют оптико-акустическими. К их

недостаткам необходимо отнести повышенную чувствительность к вибрациям и положению камер, поскольку даже небольшие отклонения от заданного положения приводят к деформациям мембраны и соответствующему изменению показаний.

4.5. Пироэлектрические приемники.

Применение пироэлектрического эффекта для регистрации инфракрасного излучения, предложено еще до начала второй мировой войны. Комнатная рабочая температура, при которой обеспечиваются параметры лучшие, чем у термопар и болометров, и одновременно повышенная прочность пироэлектрических детекторов, отсутствующая у пневматических приемников, привело к их широкому использованию в промышленности и военной технике.

При тепловом воздействии на кристаллы сегнетоэлектриков, на их поверхности появляются электрические заряды. Это обусловлено тем, что сегнетоэлектрики обладают внутренним дипольным моментом и низким порядком кристаллической симметрии. При постоянной температуре возникшие заряды постепенно нейтрализуются за счет утечек. Поэтому для получения электрического сигнала сегнетоэлектрик необходимо облучать модулированным излучением. Кристаллы сегнетоэлектриков, в которых заряды возникают вследствие изменений температуры под воздействием лучистой энергии, получили название пироэлектрических.

Устройство и схема включения пироэлектрического приемника

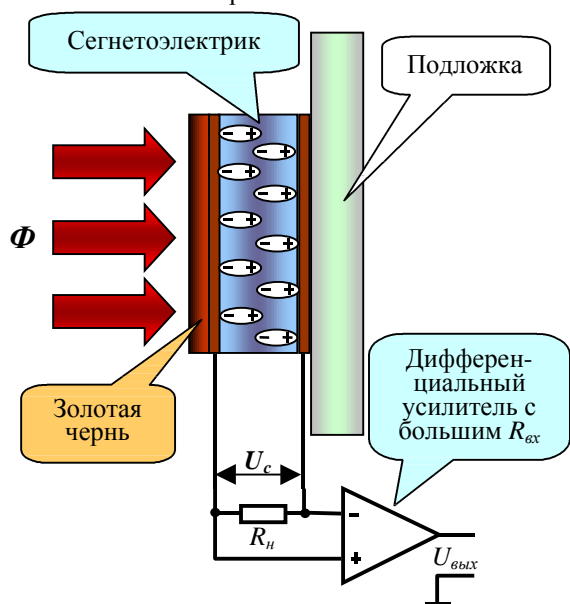


Рис. 4.8.

Пироэлектрический приемник (см. рис. 4.8) состоит из тонкого (единицы и десятки мкм) сегнетоэлектрического кристалла с поглощающим инфракрасное излучение покрытием. На сегнетоэлектрический кристалл напылением наносятся металлические электроды толщиной 0,01...1 мкм, к которым привариваются выходные контакты. Все это укрепляется на тонкой подложке. При попадании излучения на поглощающее покрытие происходит нагрев пироэлектрического материала, дипольный момент изменяется, и на поверхности кристалла появляются электрические заряды. Эти заряды вызывают в цепи нагрузки R_n электрический ток. Очевидно, что напряжение сигнала оказывается прямо пропорциональным сопротивлению нагрузки. Поэтому в пироэлектрических приемниках сопротивление нагрузки выбирается не меньшим,

чем 1 ГОм и используются дифференциальные усилители с большим входным сопротивлением на полевых транзисторах. С помощью пироэлектрических приемников излучения можно регистрировать температурные изменения $10^{-7} \dots 10^{-8}$ К при чувствительности 20 В/градус. Крутизна преобразования пироэлектрических приемников примерно в 10^5 раз больше, чем у термоэлементов. Пороговая чувствительность составляет примерно 10^{-9} Вт/Гц^{1/2}.

Основные материалы для изготовления пироэлектрических приемников относятся к триглицинсульфатной группе (TGS). Также используются монокристаллы танталата и ниобата лития. Из поликристаллических пироэлектриков можно выделить керамики на основе титана-цирконата свинца и титаната бария. Получили распространение открытые недавно пленки полимеров на основе поливинилфлюоридов (PVF) и (PVF₂).

Материалы группы TGS растворимы в воде (их получают из водных растворов), в связи с чем фотоприемники, изготовленные из них, должны быть тщательно защищены от воздействия окружающей среды. Все они имеют сравнительно низкую температуру Кюри, что ограничивает сверху их рабочую температуру. При нагревании кристалла выше температуры Кюри его поляризация исчезает, причем деполяризация сохраняется и после охлаждения. Этот недостаток, связанный с необходимостью каждый раз после перегрева восстанавливать поляризацию, устраняется при использовании материалов, имеющих постоянную поляризацию. Замена части глицина на *L*-аланин приводит к определенной асимметрии гистерезисной кривой поляризации (зависимости поляризации от температуры материала) и появлению преимущественного направления поляризации. Легированные кристаллы имеют улучшенные диэлектрические свойства по сравнению с нелегированными. У них несколько выше пьезоэлектрический коэффициент и меньше диэлектрическая постоянная.

Широкое распространение пьезоэлектрики получили в тепловидении, где с их использованием изготавливают пировидиконы. Пировидикон представляет собой приемную телевизионную трубку, мишень которого изготовлена из пластины сегнетоэлектрика. На внешнюю сторону мишени напылен металл, создающий электрический контакт, поверхность которого наносится золотая чернь. Электронный луч, сканируя внутреннюю поверхность мишени, вызывает разряд образовавшихся пьезоэлектрических зарядов через нагрузочное сопротивление. Сигнал с нагрузки усиливается и поступает на монитор, на котором визуализируется тепловое поле, создаваемое приемным объективом на поверхности мишени пировидикона. Для уменьшения теплового растекания изображения на мишени образуют ячеистую структуру (путем травления канавок) с размерами островков 50 мкм. Наиболее перспективными материалами для создания пировидиконов являются дейтерированный триглицинсульфат. Недостатком пировидикона является необходимость модуляции изображения, поскольку при неподвижном тепловом изображении образовавшиеся заряды стекают через нагрузочное сопротивление при периодическом сканировании мишени электронным лучом и для их непрерывной генерации необходима модуляция падающего потока. Модуляция может осуществляться сканированием изображения по одной из осей или прерыванием потока с помощью механического obtюратора. На рис. 4.9 приведены типичные характеристики промышленных пировидиконов, а на рис. 4.10 - картина теплового изображения, полученного с помощью пировидикона типа P8092.

Разрешение промышленных пировидиконов

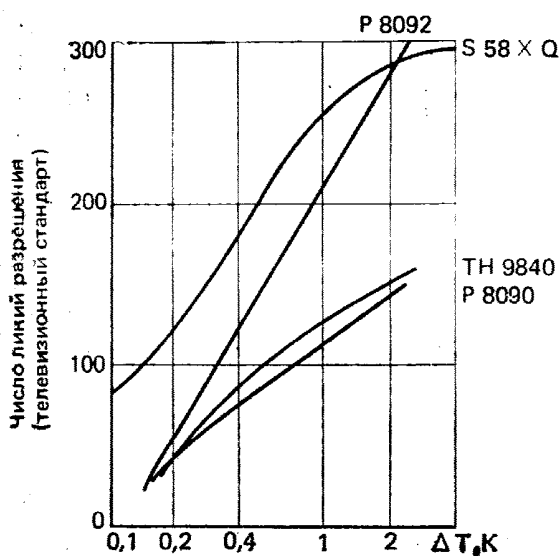


Рис. 4.9.

Тепловое изображение, полученное с помощью трехлинзового объектива Rank IRTAL и пировидикона аналогичного P8092 (см. рис. 4.9)



Рис. 4.10.