Болометры: основные сведения.

Болометр (др.-греч. βολή — луч и μέτρον — мера) — тепловой приёмник излучения, чаще всего оптического (а именно — ИК-диапазона). Был изобретён Самуэлем Пирпонтом Лэнгли в 1878 году. На слайде 1 Рис. 1 представлен внешний вид и примерное устройство полупроводникового болометра (одного из существующих типов).

Принцип действия болометра основан на изменении электрического сопротивления термочувствительного элемента вследствие нагревания под воздействием поглощаемого потока электромагнитной энергии (слайд 2). В зависимости от типа термочувствительного элемента болометры имеют определенную классификацию, а также специфическую систему обозначений (слайд 2).

Первыми на практике стали использовать металлические болометры. Основной компонент болометра — очень тонкая пластинка (например, из платины или другого проводящего материала), зачернённая для лучшего поглощения излучения. Из-за своей малой толщины пластинка под действием излучения быстро нагревается и её сопротивление повышается. Для измерения малых отклонений сопротивления пластинки её включают в мостовую схему, которую балансируют при отсутствии засветки. В качестве материалов для металлических болометров используют платину, никель, золото, для полупроводниковых — германий, сурьма, а также окислы марганца, никеля, кобальта (слайд 3).

Следующим этапом развития стало использование полупроводниковых пленок вместо металлических из-за их большей температурной зависимости сопротивления (слайд 3: Рис 3.1, 3.2).

Первый полупроводниковый болометр был создан компанией Bell в годы Второй мировой войны. Он отличался простотой, надёжностью и высокой чувствительностью. Полупроводниковый болометр состоит из двух плёночных (толщиной до 10 мкм) термисторов (что такое термистр можно посмотреть на слайде 4). Один из термисторов, непосредственно подвергающийся облучению, является активным. Второй — компенсационный. Он экранирован от внешнего излучения и предназначен для компенсации изменений температуры окружающей среды. Оба термистора помещаются в общий герметичный корпус (слайд 1 Рис 1 *б*). Современные болометры исполняются, как правило, в композиционном виде, то есть в них разделяют функции абсорбера (элемента, который принимает излучение и согласовывается с излучением) и термометра. Полупроводниковые болометры применяются, например, в системах ориентации, для дистанционного измерения температуры объектов.

Болометр на основе кинетической индуктивности (KID)

Кинетическая индуктивность — это индуктивность материала, вызванная инерцией его носители заряда. Кинетическая индуктивность зависит от температуры, и она может быть использована для измерения температурных эффектов в тонких сверхпроводящих пленках (слайд 5). Это позволяет болометрически обнаруживать излучение, что и было первоначально предложено Д.Г. МакДональдом в 1987 году. КИД - это сверхпроводниковый детектор на принципах разрыва куперовских пар, за счет поглощения излучения и создания квазичастичных возбуждений в проводящий материал. Это иллюстрируется Рисунок слайда 5: фотоны разрушают куперовские пары в сверхпроводнике и создают квазичастицы. Делая сверхпроводник частью резонансного контура, можно прочитать изменения комплексного поверхностного сопротивления сверхпроводника из-за поглощения излучения в виде изменение в микроволновой передаче.

Одним из самых чувствительных на данный момент является болометр на краю сверхпроводящего перехода (Transition-edge sensor - TES) (слайд 6). Принцип работы основан на резкой зависимости сопротивления сверхпроводников от температуры вблизи критической температуры перехода в сверхпроводящее состояние. Критическая температура перехода такого сверхпроводника должна быть близка к рабочей температуре, используемых рефрижераторов. При работе, через БКП протекает постоянный ток, нагревающий поглотитель с помощью джоулевого тепла. В отсутствии внешнего излучения этот нагрев компенсируется отводом тепла в термостат; при поглощении фотона сопротивление болометра растет, а ток – падает, что приводит к снижению токового нагрева и дополнительном отводе тепла, добавленного фотоном в поглотитель. Считывание тока, протекающего через болометр, осуществляется СКВИДом (слайд 6, Рисунок 6). Первые демонстрации измерительного потенциала сверхпроводящего перехода появились в 1940-х годах, через 30 лет после открытия сверхпроводимости. Тем не менее, детектор TES не нашел широкого распространения в течение 50 лет, в основном из-за сложности считывания сигнала в такой системе с низким импедансом. Вторым препятствием для широкого применения детекторов TES была сложность достижения стабильной работы в узкой области сверхпроводящего перехода.

Еще один вид болометров представлен на слайде 7: болометры на горячих электронах. Принцип предложенного детектора основан на использовании резистивной области в узкой сверхпроводящей пленке. Поглощение фотона приводит к формированию лавины квазичастиц и локальному подавлению сверхпроводимости. Перераспределение электрического тока куперовских пар в окрестности образовавшейся нормальной области приводит к тому, что плотность тока в узком мостике начинает превышать критическую, сечение полоски переходит в нормальное состояние, что сопровождается появлением на ней электрического напряжения. Схема формирования области с нормальным состоянием приведено на Рис.7 слайда 7. Вследствие диффузии концентрация квазичастиц в нормальной области релаксирует к равновесному значению и сверхпроводимость восстанавливается.

На слайде 8 – основные параметры болометров.

Болометры чувствительны ко всему спектру излучения, и не чувствительны к фазе, то есть являются некогерентными приемниками излучений, поэтому они лишены фундаментальных ограничений чувствительности для когерентных приемников по шумовой температуре, равной квантовому пределу Tn>hf/k.

На основе болометров созданы самые чувствительные приемные системы в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне. Данные приемники необходимы для создания новых приборов медицинской диагностики, неразрушающего контроля качества материалов и систем безопасности (слайд 9) Но в основном их применяют в астрономии для регистрации излучения в субмиллиметровом диапазоне длин волн: для этого диапазона криогенные болометры — самые чувствительные детекторы. Источником теплового излучения может быть свет далёких звёзд, изучение удаленных туманностей, реликтовое излучение. Чувствительность болометра улучшается с понижением температуры чувствительного элемента. В связи с этим в высокочувствительных астрономических инструментах обычно используются болометры, охлаждаемые до температуры жидкого гелия и более низких температур.

Одной из важнейших задач современной радиоастрономии является исследование реликтового излучения (слайд 10)

В 1983 году был проведён первый эксперимент, РЕЛИКТ-1, по измерению реликтового излучения с борта космического аппарата. В 2001 году был запущен Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) - космический радиотелескоп НАСА (слайд 9), предназначенный в первую очередь для изучения реликтового излучения. С помощью этого инструмента удалось в 35 раз улучшить разрешение карты распределения по небесной сфере. Наиболее детальную на сегодняшний день карту флуктуаций температуры распределения микроволнового излучения на небесной сфере удалось построить по данным, полученным с радиотелескопа Plank. Планк — астрономический спутник Европейского космического агентства (ЕКА), запущенный в 2009г. и полностью закончивший свою работы в 2013г., но данные, полученные с помощью этого инструмента, обрабатывают до сих пор.

Для всех этих космических телескопов использовались охлаждаемые высокочувствительные болометрические приемники. Так же подобные приемники использовались и на ИК радиотелескопах (IRAS, Herschel Space Observatory и планируемом James Webb Space Telescope). Болометрические приемники планируются и в составе разных инструментов планируемой космической обсерватории Миллиметрон (2027). Для различных инструментов этой обсерватории требуются высокочувствительные детекторы с МЭШ до 10-19 Вт/√Гц, и рассматриваются детекторы на основе сверхпроводящих болометров (TES, KID).