

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ БОЛОМЕТРЫ

И. Д. Конозенко

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует несколько типов приёмников инфракрасной радиации (ИКР), в основе действия которых лежат совершенно различные физические явления. К их числу принадлежат и болометры, действие ИКР на которые сводится к нагреванию чувствительного элемента, в результате чего его сопротивление изменяется.

Поскольку нагревание может происходить не только за счёт поглощения ИКР, постольку приборы типа болометров применяются и для измерения мощности проходящего через них тока, а также в качестве термометров сопротивления.

Среди различных приёмников ИКР болометры, наряду с термоэлементами, обладают наибольшими достоинствами. Напомним, что широкое развитие инфракрасной спектроскопии стало возможным впервые именно в результате применения болометров (1880 г.).

Однако проблему создания высококачественного приёмника ИКР ещё нельзя считать решённой. Существующие приёмники радиации по своим характеристикам далеко не удовлетворяют всем требованиям современной спектроскопии. Поиски решения этой задачи путём создания металлического болометра до сих пор не дали вполне удовлетворительных результатов. Поэтому в настоящее время в литературе всё чаще можно встретить работы, посвящённые полупроводниковым приёмникам ИКР и имеющие целью решить задачу создания высококачественных приёмников из полупроводниковых материалов, обладающих высоким температурным коэффициентом сопротивления. Отметим, что одновременно ведутся работы по созданию диэлектрических болометров¹.

В отличие от фотосопротивлений, обладающих резко выраженной селективностью, болометры сохраняют свою чувствительность в широком диапазоне длин волн электромагнитного излучения; красной границы чувствительности для них не существует, и в этом состоит одно из их существенных преимуществ перед другими приёмниками излучения.

Качество современного болометра определяется его чувствительностью, величиной порога чувствительности, быстротой реакции на действие ИКР и быстротой восстановления начальной температуры. Последнее свойство болометров характеризуют величиной, которую называют «постоянной времени», или «временем температурной релаксации».

Интенсивность излучения, попадающего на радиационный приёмник в спектрометре с достаточно высокой разрешающей силой, составляет от $5-10^{-7}$ до $5-10^{-9}$ *вт*. Поэтому важно, чтобы порог чувствительности приёмника ИКР лежал в указанном интервале мощностей.

Чувствительность болометров Z , в основном, зависит от трёх величин^{1, 2, 3}: термического коэффициента сопротивления (т. к. с.) α материала, из которого изготовлен чувствительный элемент болометра, приложенного к болометру напряжения V и размера поверхности чувствительного элемента S приёмника, а именно:

$$Z \sim \frac{\alpha V}{S}. \quad (1)$$

С уменьшением толщины слоя d , образующего чувствительный элемент, чувствительность болометра увеличивается и уменьшается его инерционность. Как для металлических, так и для полупроводниковых болометров значение S может быть одинаковым. Что касается α и V , то для полупроводниковых болометров они почти на порядок величины больше, чем у металлов. Теоретически, таким образом, полупроводниковые болометры должны обладать чувствительностью, которая на два порядка превышает чувствительность металлических болометров. В настоящее время эта возможность полностью реализована^{5, 8}. В некоторых случаях полупроводниковые болометры обладают чувствительностью свыше 100 *в/вт*, тогда как чувствительность металлических болометров равна ~ 1 *в/вт*.

Это однако, не означает, что полупроводниковые болометры вытесняют металлические. Каждый приёмник инфракрасной радиации обладает собственным уровнем шума, от которого зависит минимальная обнаруживаемая мощность потока ИКР, т. е. порог чувствительности приёмника. Так как полупроводниковые болометры обладают сопротивлением, превышающим 10^6 *ом*, то у них, как правило, уровень собственных шумов лежит не ниже 10^{-7} *в*, а большей частью он равен 10^{-6} *в*. В результате этого порог чувствительности у них обычно выше, чем у металлических болометров, у которых он равен 10^{-8} — $5 \cdot 10^{-9}$ *вт*. В то же время в отдельных случаях оказывается возможным создавать образцы полупроводниковых болометров², которые имеют порог чувствительности, достигающий до $5-10^{-10}$ *вт*. В случае металлических болометров такого порога чувствительности пока не удавалось достигнуть.

Так как полупроводниковые болометры обладают высоким сопротивлением, имеется возможность использовать усилительные лампы. Тем самым отпадает необходимость применять в качестве регистраторов сигнала исключительно гальванометры, а можно пользоваться и другими приборами: катодным вольтметром, катодным осциллографом и т. п. Недостатком полупроводниковых болометров является их меньшая, чем у металлических болометров, устойчивость, следствием чего является непостоянство нулевой точки индикатора. Однако, если отказаться от применения схемы моста Уитстона, а, пользуясь ламповым усилителем, применять обычную схему с нагрузочным сопротивлением (см. ниже рис. 4), то этот дефект полупроводниковых болометров можно свести к минимуму.

В настоящее время полупроводниковые болометры дают возможность регистрировать изменение температуры чувствительного элемента на 10^{-6} — 10^{-7}°C . Такое изменение температуры вызывает появление сигнала ~ 1 мкВ, который легко может быть зарегистрирован.

Конструкция приёмников с твёрдой подложкой и без подложки довольно прочна и исключает возможность возникновения микрофонного эффекта. Ниже будут описаны различные конструкции полупроводниковых болометров, их особенности и характеристики.

2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ БОЛОМЕТРА И СХЕМЫ ЕГО ВКЛЮЧЕНИЯ

Наиболее распространённой схемой включения болометра является схема моста Уитстона, одним из плеч которого является чувствительный элемент болометра (рис. 1). Инфракрасная радиация, поглощаемая чувствительным слоем болометра, нагревает и тем самым изменяет его сопротивление, нарушая равновесие моста. Для моста постоянного тока, у которого все четыре плеча имеют одинаковые сопротивления, изменение падения напряжения на диагонали моста AB в случае полупроводниковых болометров равно

$$\Delta V = -\frac{1}{4} \frac{B}{T^2} V \Delta T, \quad (2)$$

где $-\frac{B}{T^2} = \alpha$, ΔT — изменение температуры чувствительной поверхности болометра под действием потока ИКР мощностью W . При линейном в первом приближении температурном законе сопротивления изменение температуры ΔT может быть определено при

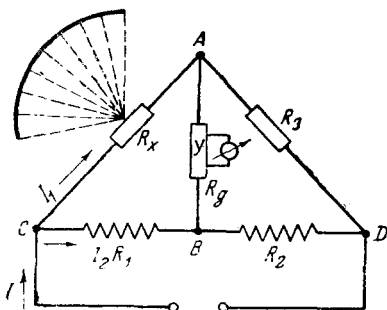


Рис. 1.

помощи следующего соотношения:

$$\Delta T = \frac{\chi W}{4\sigma S \varepsilon T^3 + P_0}, \quad (3)$$

где χ — показатель поглощения ИКР, $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$, ε_1 и ε_2 — излучательные способности фронтальной и тыловой поверхностей приемника, P_0 — потери тепла через теплопроводность, T — температура чувствительного элемента, σ — постоянная.

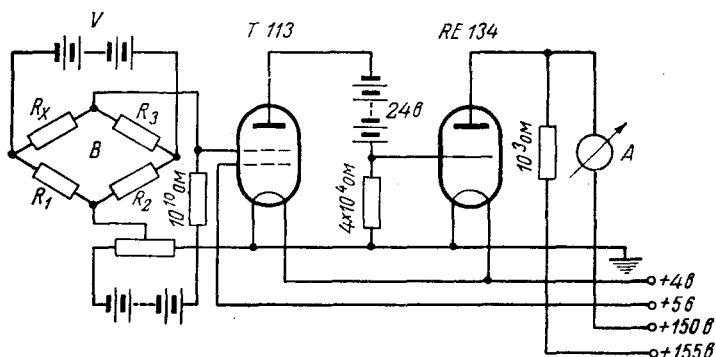


Рис. 2.

В мостовых схемах с высоким (10^6 — 10^9 ом) омическим сопротивлением плеч важное значение имеет подбор гальванометра. Практически должны выполняться условия, при которых критическое

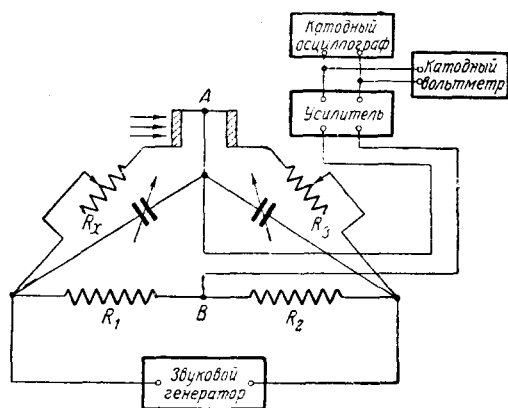


Рис. 3.

сопротивление гальванометра $R_{кр}$ значительно больше сопротивления болометра, что не всегда легко осуществить. С этой целью Бауэр⁵

применил соединение моста с усилительной схемой (рис. 2). Это своего рода двухступенчатый ламповый вольтметр, при помощи которого легко было регистрировать изменения напряжения, возникающие на диагонали моста. В случае высокоомных болометров ($R \sim 10^6 \text{ ом}$) часто пользуются схемами моста переменного тока (рис. 3) ⁶.

Для измерений обычно применяется компенсационная схема. Так как трудно изготовить два совершенно идентичных чувствительных элемента болометра, то последовательно с ними включаются реостаты. Питание моста осуществляется при помощи звукового генератора с частотой 500—800 гц , что значительно уменьшает температурные колебания в цепи на протяжении одного периода.

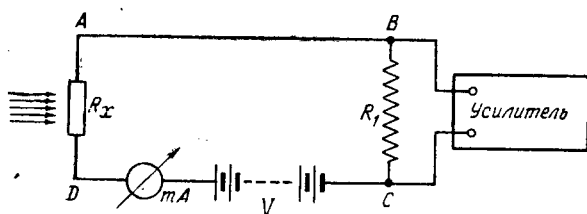


Рис. 4.

Вместо схемы Бауэра, часто пользуются более удобной схемой, изображённой на рис. 4. Для этой схемы изменение падения напряжения на сопротивлении R_1 определяется при помощи следующего соотношения:

$$\Delta V = -\frac{B}{T^2} \frac{R_1 R_x V}{\left(R_1 + R_x + \frac{B R_x \Delta T}{T^2}\right) (R_x + R_1)} \quad (4)$$

Исследование этого уравнения показывает, что при условии $R_1 = R_x$ получаем максимальное значение сигнала ΔV . В этом случае формула (4) принимает вид

$$\Delta V = -\frac{B}{T^2} \frac{V}{4 + \frac{2B\Delta T}{T^2}} \quad (5)$$

Схема включения болометра, представленная на рис. 4, удобна при условии модуляции излучения с последующим резонансным усилением сигнала. В то же время мостовая схема пригодна и в том случае, когда модуляция излучения не применяется, а регистрация сигнала производится непосредственно при помощи гальванометра или с применением усилителя Б. П. Козырева ¹⁶.

Из формул (2) и (5) видно, что при повышении температуры чувствительного элемента под действием ИКР его сопротивление

в случае полупроводниковых болометров будет уменьшаться (следовательно, будет уменьшаться и разность потенциалов ΔV), а не увеличиваться, как это имеет место для металлических болометров, которые обладают положительным значением т. к. с.

3. О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ВРЕМЕНИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ РЕЛАКСАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ БОЛОМЕТРОВ

Под чувствительностью приёмника обычно понимают отношение выходного напряжения к мощности излучения, поглощённого приёмником, и выражают её в вольтах на ватт. Легко видеть, что сочетание формул (2) и (3) даёт нам уравнение для определения чувствительности полупроводникового приёмника при действии немодулированной радиации

$$Z = \frac{\Delta V}{\sqrt{W}} = - \frac{B}{T^2} \frac{V}{16\sigma S \epsilon T^3 + P_0} \quad (6)$$

Аналогичная формула была получена Бауэром⁵ для расчёта чувствительности болометра из закиси меди. Для уравнения (6) характерны два случая: если $R_x = R_3$ (см. рис. 1) и R_3 не зависит от температуры, то чувствительность не зависит от поправочного члена (P_0). Когда R_3 зависит от температуры, поправочный член равен

$$P_0 = - \frac{B}{T^2} \frac{V^2}{R_x S} \quad (7)$$

Выражение (7) в формуле Бауэра характеризует собой тепловой эффект тока. При малых напряжениях этот поправочный член мал и им можно пренебречь. При больших напряжениях необходимо также различать два случая: а) если т. к. с. положительный, тогда знаменатель будет меньше, а чувствительность больше; б) при отрицательном т. к. с. знаменатель будет больше, а чувствительность меньше. Поэтому для болометров с отрицательным т. к. с. выгоднее первое условие $P_0 = 0$, а для болометров с положительным т. к. с. — второе условие ($P_0 \neq 0$).

На рис. 5, заимствованном из работы Бауэра⁵, представлены результаты исследования чувствительности болометров из закиси меди в зависимости от V и T чувствительного элемента болометра. При высоком напряжении вследствие нагревания током чувствительность болометра заметно падает (уменьшается т. к. с.).

Формула (6) и приведённый выше её краткий анализ справедливы для чувствительности приёмника, действующего от немодулированного потока ИКР. В случае действия модулированного потока чувствительность полупроводникового болометра может быть вычислена при помощи приближённой формулы, предложенной Браттаином

и Беккером⁸. Однако с практической точки зрения она мало пригодна. Более приемлемую формулу для случая симметричности сопротивлений плеч моста (с учётом потерь тепла на передачу подложке, окружающей среде и металлическим электродам) получил Ворсер:

$$Z = \frac{1}{2} \alpha x V \left[\frac{1}{c_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) + \frac{1}{c_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) + \frac{1}{c_3} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_3}} \right) \right], \quad (8)$$

где c_1 , c_2 и c_3 — постоянные потерь тепла через подложку, электроды и окружающую среду соответственно, t — время действия излучения, τ_1 , τ_2 , τ_3 — постоянные времени тепловых потоков.

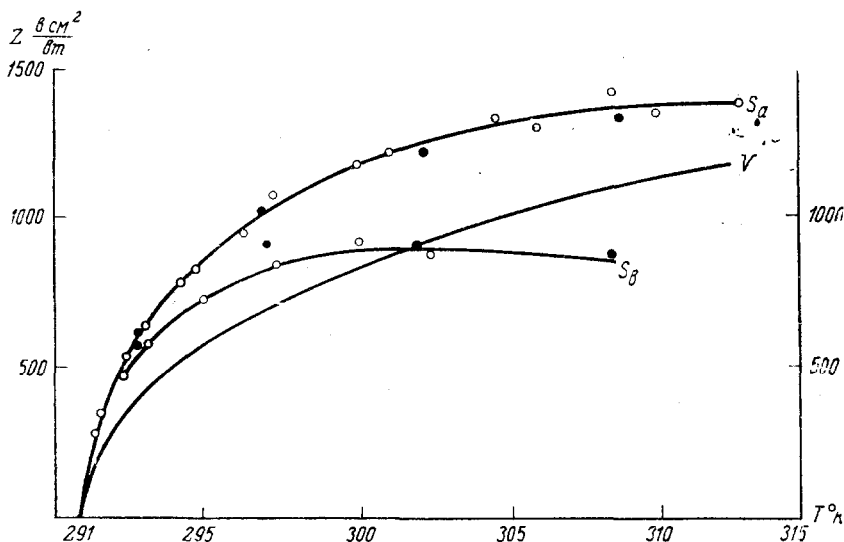


Рис. 5. Чувствительность приёмника из закиси меди в зависимости от температуры чувствительного слоя и приложенного напряжения. Кривая S_a — некомпенсационный приёмник, но при $R_x = R_3$. Кривая S_b — компенсационный приёмник. Кривая V — приложенное напряжение.

Выражая постоянные времени τ_1 , τ_2 , τ_3 через эффективную постоянную времени τ , формулу (8) можно представить в практически приемлемом виде:

$$Z = \frac{\alpha x V}{2} \left[\frac{1}{c} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right], \quad (9)$$

где c — общие тепловые потери. Следует отметить, что формула (9) справедлива при условии, что тепловой эффект тока не оказывает существенного влияния. Формула (9) указывает на то общее для

полупроводниковых болометров свойство, что их чувствительность к модулированному излучению нарастает по закону

$$Z \approx Z_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (10)$$

а спадает по закону

$$Z \approx Z_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (11)$$

Эти закономерности можно графически иллюстрировать кривой, представленной на рис. 6. Легко видеть, что время, в течение

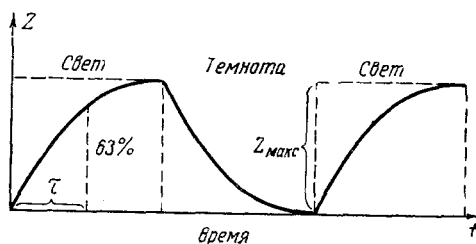


Рис. 6.

которого τ достигает 63% своего максимального значения или же убывает на 63% от своего максимального значения, и будет соответствовать постоянной времени болометра. Как показали В. П. Жузе и С. М. Рывкин⁷, Z связано с Z_0 , т. е. с чувствительностью при частоте модуляции $f=0$, частотой модуляции света и постоянной времени τ следующим соотношением:

$$Z = Z_0 \operatorname{th} \frac{1}{4\tau f}. \quad (12)$$

Эта формула справедлива в случае прямоугольной модуляции ИКР с одинаковой длительностью световых импульсов и промежутков между ними.

На основании (12) следует, что время температурной релаксации полупроводникового болометра можно определить при помощи следующей формулы:

$$\tau = \frac{1}{2 + \ln \frac{Z_0 + Z}{Z_0 - Z}}. \quad (13)$$

В случае действия немодулированной ИКР вопрос следует решать в более общем виде.

Для вычисления постоянной времени болометра необходимо решить уравнение теплопроводности для тонкой полоски, которая обычно применяется в качестве чувствительного элемента приём-

ника. Это уравнение при учёте внезапного действия ИКР и теплового эффекта электрического тока, проходящего по этой полоске, имеет вид

$$\frac{\partial q}{\partial t} - \frac{\lambda}{C_0} \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \left[\frac{4T^3 \varepsilon \sigma}{C_0 d} - \frac{I^2 \alpha \rho}{C_0 a^2} \right] = \frac{W}{C_0 d} + \frac{I^2 \rho}{C_0 a^2}, \quad (14)$$

где $q = T - T_0$, λ — теплопроводность полоски, C_0 — её удельная теплоёмкость, a — поперечное сечение полоски, x — расстояние от середины полоски, ρ — удельное сопротивление, W — мощность ИКР.

Из решения уравнения (14) получается следующая приближённая формула для определения τ :

$$\tau = \frac{4I^2 C_0}{\lambda \pi^2}, \quad (15)$$

где l — половина длины полоски.

Чувствительность полупроводниковых болометров была исследована в широком диапазоне мощностей ИКР — от уровня, равного уровню джонсоновского шума, до уровня, превышающего его в 1000 раз. В работе Ворсмера⁹ указывается, что во всём этом диапазоне чувствительность остаётся постоянной. Чувствительность измерялась также и для различных участков чувствительной поверхности болометра при помощи тонкого (сечением 0,01 мм) пучка инфракрасного излучения. При этом было обнаружено, что чувствительность возрастает у краёв чувствительной поверхности. Это явление объясняется, повидимому, тем, что у краёв имеет место более резкий перепад температур. Численное значение чувствительности полупроводниковых болометров изменяется в широком интервале от десятков до сотен вольт на ватт.

4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ШУМЫ И ПОРОГ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ БОЛОМЕТРОВ

К вопросу о пороге чувствительности радиационных приёмников различные авторы подходят по-разному^{2, 3, 15, 17, 19, 20, 21} и в силу этого получают противоречивые данные. Как в теоретических исследованиях этого вопроса, так и в практическом определении этой физической величины имеется много неясного и запутанного.

Порог чувствительности приёмников при достаточном постоянстве приложенного напряжения определяется рядом причин, а именно: а) колебаниями температуры чувствительного элемента радиационного приёмника в результате изменений температуры окружающей среды; б) колебаниями силы тока и напряжения в цепи болометра; в) помехами во входной лампе усилителя.

В работе Дяльке и Хеттнера³⁷ показано, что среднее колебание температуры ΔT чувствительного элемента, находящегося при тем-

пературе T и обладающего теплоёмкостью C , при условии теплообмена со средой равно

$$\Delta T = T \sqrt{\frac{k}{C}}, \quad (16)$$

где k — постоянная Больцмана.

В результате этих температурных колебаний, сказывающихся на сопротивлении чувствительного элемента, возникают флуктуации напряжения в электрической цепи болометра. Величина флуктуационных изменений напряжения может быть определена при помощи следующей формулы ⁵:

$$\Delta T_{\Phi} = \frac{\alpha T}{4} \left[\frac{4R\epsilon k\epsilon}{C_0} \sqrt{T^4 - T_0^4} \right]. \quad (17)$$

Вторым существенным фактором, влияющим на величину шума болометра, являются электрические флуктуации в замкнутой цепи болометра. Среднее их значение можно определить при помощи известной формулы ^{38, 39}:

$$\Delta I'_{\Phi} = \left(\frac{\pi k T}{R t} \right)^{1/2}, \quad (18)$$

а

$$\Delta V_{\Phi} = \left(\frac{\pi k T R}{t} \right)^{1/2}, \quad (19)$$

где t — время измерения.

Далее, вследствие колебаний напряжения накала ламп усилителя и дробового эффекта во входной лампе колебания напряжения могут составлять величину $\sim 10^{-8}$ в.

Первые два фактора особенно важно учитывать при конструировании невакуумных полупроводниковых болометров. Однако в большинстве случаев собственный уровень шума приёмника выше общего уровня шума всей электроизмерительной системы, и именно он ограничивает порог чувствительности радиационного приёмника.

К. С. Вульфсон ³ утверждает, что теоретический порог чувствительности радиационного приёмника любого типа ограничивается мощностью $7 \cdot 10^{-9}$ вт. С этим выводом нельзя согласиться уже хотя бы потому, что в настоящее время имеются приёмники, которые обладают порогом чувствительности $\sim 10^{-9}$ вт. Можно привести простой расчёт, который подтверждает эту величину порога чувствительности. Как выше указывалось, при помощи болометра можно обнаружить изменение температуры порядка $3 \cdot 10^{-7}$ °С. Будем рассматривать болометр как тепловую машину (хотя болометр действует как реле, которое управляет энергией источника тока) и, применяя второй закон термодинамики, вычислим его коэффициент полезного действия с помощью формулы

$$\eta = \frac{T - T_0}{T}. \quad (20)$$

Приняв $T = 300^\circ \text{K}$, а $T - T_0 = 3 \cdot 10^{-7}^\circ \text{K}$, легко видеть, что $\eta = 10^{-9}$. Если учесть, что минимальная мощность тока, обнаруживаемая при помощи гальванометра, порядка $2 \cdot 10^{-12} \text{ эрг/сек}$, то минимальная мощность, которую можно обнаружить болометром, будет равна

$$\Delta W = 2 \cdot 10^{-3} \text{ эрг/сек} = 2 \cdot 10^{-10} \text{ вт.}$$

При детальном анализе теоретических исследований К. С. Вульфсона³ оказывается, что порог чувствительности металлических болометров на основании его формулы равен

$$\Delta W = \frac{0.694n (1.5T_0)^{1/2}}{\kappa} \left(\frac{4\pi k \sigma \kappa S}{t} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho}{\alpha} \right)^{1/2}, \quad (21)$$

что составляет $4,8 \cdot 10^{-11} \text{ вт}$ при условии, что $S = 0,1 \text{ см}^2$, $T_0 = 290^\circ \text{K}$, $\kappa = 0,9$, $n = 100$, и значениях ρ и α для никеля соответственно $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$ и $6,2 \cdot 10^{-3} \text{ 1/градус}$.

Формула (21) выведена в предположении равноплечности моста с учётом потерь тепла через подводящие провода к чувствительному слою, который находится в вакууме. Однако здесь не учтено влияние изменения тока, проходящего по чувствительному слою при его облучении.

Спустя шесть лет после работ К. С. Вульфсона, Гевенс²¹ на основании своих исследований также пришёл к выводу о том, что теоретическим порогом чувствительности радиационных приёмников любого типа должна быть мощность порядка $3 \cdot 10^{-11} \text{ вт}$.

Бауэр для определения порога чувствительности полупроводниковых болометров приводит следующую формулу:

$$\Delta W = 8 \left[200 k \sigma \varepsilon \frac{T^7}{\Delta T^4} \right] \frac{T^2}{\lg \sqrt{S}}. \quad (22)$$

Приняв $T = 300^\circ \text{K}$, $S = 0,1 \text{ см}^2$ и $\varepsilon = 1$, получим $\Delta W \approx 2 \cdot 10^{-10} \text{ вт}$.

В таблице I представлены теоретические данные о пороге чувствительности, полученные в работах ряда авторов. Эти данные пересчитаны для значения $S = 0,1 \text{ см}^2$. Кроме того, в формуле Юлеса¹⁸ учтены некоторые дополнительные потери. Из этих данных можно сделать вывод о том, что теоретическим порогом чувствительности болометров является мощность $5 \cdot 10^{-11} \text{ вт}$.

Приведённые выше рассуждения о пороге чувствительности недостаточны, если мы переходим к случаю модулированного потока тепловых лучей. Здесь, как показал Черни²², порог чувствительности определяется при помощи следующей формулы:

$$\Delta W = \frac{4nV}{\kappa T R_x \alpha S} \left\{ k T R_x \Delta f \left[1 + 3 \left(\frac{\omega}{\omega_{1/2}} \right)^2 \right] \right\}^{1/2}, \quad (23)$$



где ω — угловая частота модуляции и Δf — ширина интервала частот, пропускаемого усилителем. Ясно, что порог чувствительности болометров в случае модуляции ИКР будет несколько отличаться от порога для немодулированного излучения. Но даже в этом случае некоторые образцы полупроводниковых болометров² обладают порогом чувствительности, достигающим до $5 \cdot 10^{-10}$ вт.

Таблица I

Автор	Значение порога чувствительности $\Delta W \cdot 10^{11}$ вт
К. С. Вульфсон *) ³	5
Р. Гевенс ²¹	3
К. Джонс ¹⁵	27,6
Картрайт ²⁷	50
Юлес ¹⁸	5,53
Бауэр ⁵	20
Беккер и Мур ²	5
Б. П. Козырев ²⁹	3

5. ВЫБОР ПОЛУПРОВОДНИКОВ ДЛЯ БОЛОМЕТРОВ

Вышеприведённые формулы (2) и (5) ясно указывают на то, что величина ΔV пропорциональна т. к. с. полупроводника, из которого изготавливается чувствительный элемент болометра, и приложенной разности потенциалов. Отсюда можно сделать вывод о том, какие полупроводники следует применять для изготовления болометров. Из литературы известно^{2, 5, 8, 9}, что основными полупроводниками, которые используются для изготовления болометров, являются окиси марганца, кобальта и никеля, а также закись меди. В таблице II приводятся данные для ряда полупроводников, из которых следует, что окиси в слоях толщиной 10^{-4} см имеют т. к. с., близкое к 3% на 1°C . С этой точки зрения они безусловно подходят. Но не только по величине т. к. с. определяют качество полупроводника для болометра. Необходимо учесть и другие его свойства.

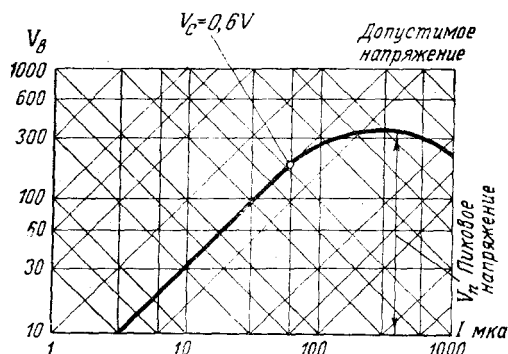
Как указывалось выше, ввиду высокого сопротивления полупроводникового болометра приходится применять и высокое напряжение, что как будто бы и не должно смущать, так как чувствительность пропорциональна напряжению. Однако здесь следует

*) $5 \cdot 10^{-11}$ вт получено нами при помощи формулы К. С. Вульфсона.

Таблица II

Вещество	ρ (ом·см) в куске при 18° С	ρ (ом·см) в слое при 18° С	α в куске при 18° С	α в слое при 18° С	Толщина слоя (см)
Cu ₂ O ⁵	10 ⁴	10 ⁴	—0,035	0,033	1,7·10 ⁻³
Окись Mn, Co и Ni ⁸	10 ⁴	10 ⁴	до —0,04	до —0,035	1,5·10 ⁻⁴
α -Sn ¹⁰	—	3·10 ⁵	—	до —0,07	2·10 ⁻⁵
Te ¹¹	—	3·10 ⁴	—0,006	—0,016	2·10 ⁻⁵
Cu ₂ Si ¹²	—	5·10 ³	—	—	5·10 ⁻⁵

обратить внимание на следующее обстоятельство. При исследовании зависимости силы тока от приложенного к полупроводнику напряжения было установлено, что нарушение закона Ома для различных полупроводников наблюдается при различных напряжениях.

Рис. 7. Зависимость $V = f(I)$ для болометра из окисей MnCo и Ni.

В случае таких полупроводников, как окиси марганца, кобальта и никеля, наблюдается картина, которая представлена на рис. 7, заимствованном из работы Ворсмера⁹. Пиковое напряжение определяется при помощи следующего соотношения, получаемого на основании закона охлаждения Ньютона:

$$V_p = C_T R_x (T - T_0)^{1/2}, \quad (24)$$

где C_T — установившаяся скорость теплового рассеяния в $вт/град$, T — температура болометра, T_0 — температура среды, R_x — сопротивление болометра. Оказывается, что в данном случае допустимое напряжение, при котором болометр будет нормально работать, составляет 0,6 пикового напряжения.

Джонс¹⁴ исследовал эффект нагревания полупроводниковых болометрических слоёв при прохождении через них электрического тока и установил условия получения кривых нагрузки для случая устойчивого состояния полупроводниковых болометров.

Экспоненциальный закон изменения сопротивления полупроводника с температурой можно представить в виде⁴

$$R = R_0 e^{\left(\frac{B}{T} - \frac{B}{T_0}\right)}. \quad (25)$$

Обозначая $\frac{T_0}{B} = a$, $\frac{R_0}{R} = b$, Джонс получил выражение для определения относительного изменения силы тока и напряжения при изменении сопротивления полупроводника в результате теплового действия тока.

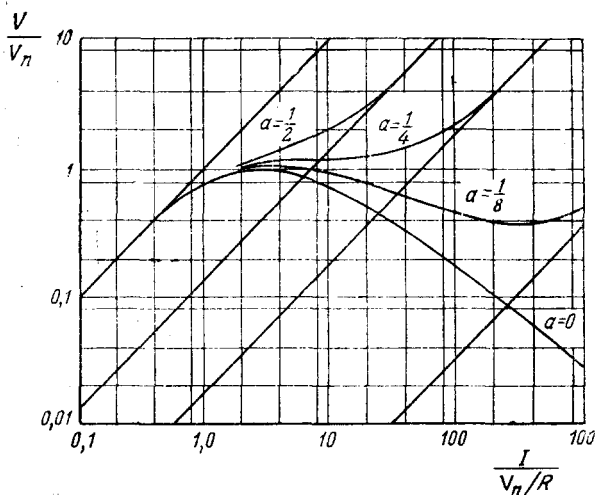


Рис. 8.

Если при напряжении V_n сопротивление было R_0 и сила тока I_0 , а при V соответственно R и I , то для различных значений a (0; $1/8$; $1/4$; $1/2$) зависимость $\frac{V}{V_n}$ от $\frac{I}{I_0}$ будет такая, как показано на рис. 8. (График построен в логарифмическом масштабе.) Из этих кривых видно, что максимальный ток получается при некотором напряжении $V_{\max}$. Зависимость между $\frac{V}{V_{\max}}$ и $\frac{I}{I_{\max}}$ для двух значений $a = 0$ и $a = 0,085$ представлена на рис. 9. Если бы сопротивление чувствительного элемента болометра не изменялось, мы должны были бы получить прямую линию.

В общем случае зависимость между током, проходящим через болометр с отрицательным или положительным значением темпера-

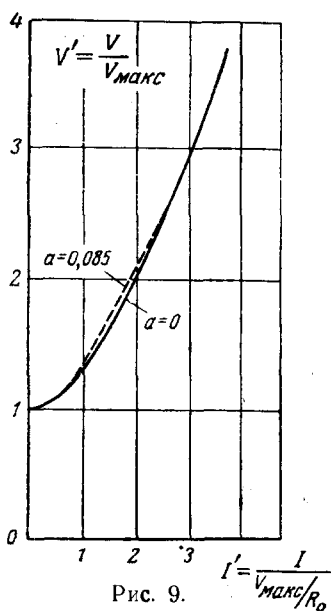


Рис. 9.

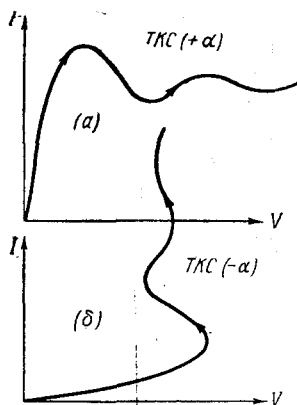


Рис. 10. Возможная зависимость $I = f(V)$ для болометра с положительным $(+\alpha)$ и отрицательным $(-\alpha)$ ТКС.

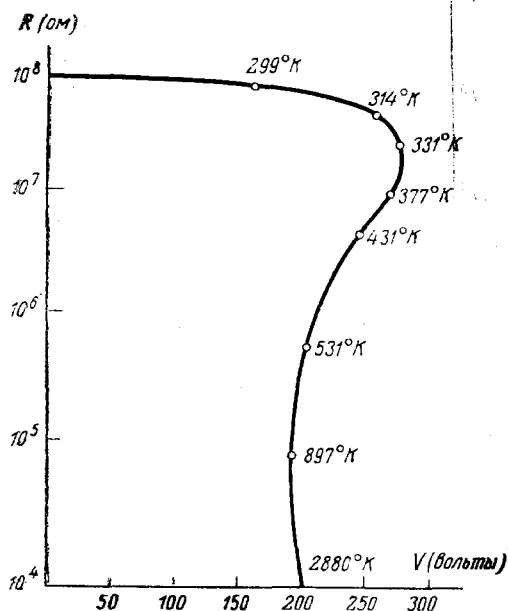


Рис. 11. Зависимость сопротивления R приёмника от напряжения на приёмнике V .

турного коэффициента сопротивления, и приложенным напряжением может быть иллюстрирована кривыми, представленными на рис. 10, а и б²³. Стрелка на кривой указывает на ход изменения зависимости I от V при повышении температуры чувствительного слоя болометра.

Правильность этих выводов можно иллюстрировать на конкретном полупроводнике, таком, как закись меди. Бауэр⁵ произвёл вычисления зависимостей $R=f(V)$ и $I=f(V)$ болометрических слоёв закиси меди толщиной в 17μ , поверхность которых была равна $F=0,1 \text{ см}^2$ и сопротивление слоя $R=10^8 \text{ ом}$ при $T=293^\circ \text{ K}$ ($B=3000^\circ \text{ C}$; $e_1 + e_2 = 1$). Слой находился в высоком вакууме.

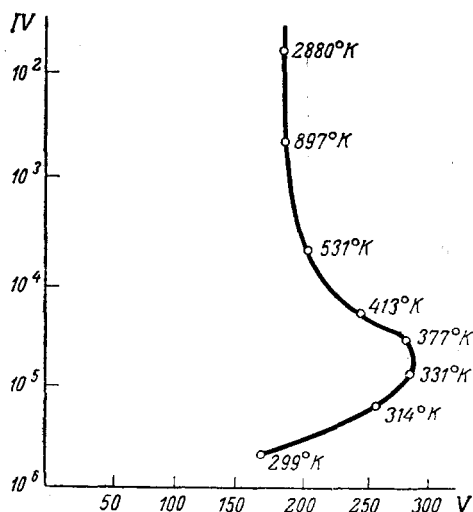


Рис. 12. Зависимость мощности тока, проходящего через слой приёмника, от напряжения на приёмнике V . В случае высокоомного болометра приёмник находится в высоком вакууме. $T^\circ = 293^\circ \text{ K}$, $R_{293} = 10^8 \text{ ом}$, $B = 3000^\circ$, $S = 0,1 \text{ см}^2$, $e_1 + e_2 = 1$.

Результаты этих исследований представлены на рис. 11 и 12. С уменьшением сопротивления соответствующее напряжение увеличивается, достигает максимума, затем падает до минимума и снова возрастает (см. рис. 10). С увеличением тока напряжение вначале возрастает, достигает максимума, падает до минимума и затем снова возрастает. Таким образом, в определённой области имеет место падающая характеристика. Поэтому напряжение, которое может быть приложено к болометру, ограничивается определёнными условиями (V_n). Желательно иметь чувствительные слои, у которых сопротивление не превышало бы $1\,000\,000 \text{ ом}$. В этом случае, как показывает опыт, шум первого каскада усилителя будет меньше джонсоновского шума.

6. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ БОЛОМЕТРЫ

Сведения о полупроводниковых болометрах начали появляться в литературе с 1942 г., хотя их разработка была начата значительно раньше. За это время опубликовано небольшое количество работ^{2, 5, 8, 9, 12, 14, 15}; на разборе некоторых из них мы кратко остановимся.

Трудности в изготовлении полупроводниковых болометров заключаются в сложности получения тонких ($5-15 \mu$) оксидных полупроводниковых слоёв с хорошими электрическими свойствами. В одних случаях авторы указывают, что окиси наносились на подложку — тонкую кварцевую пластинку, в других случаях изготовлялись слои без подложки.

Бреттаин и Беккер⁸ изготовили болометр из окисей марганца, кобальта и никеля. Соотношение компонент было таково, что полученные слои имели т. к. с. 4% на 1°C . Слои наносились на тончайшие кварцевые подложки размером $3 \text{ мм} \times 0,2 \text{ мм} \times 10 \mu$. Сопротивление слоёв было $4 \cdot 10^6 \text{ ом}$. При напряжении 400 в и частоте модуляции ИКР 300 гц порог чувствительности вакуумного болометра оказался равным $2 \cdot 10^{-8} \text{ вт}$, а постоянная времени составляла $3 \cdot 10^{-3} \text{ сек}$. Повышение температуры на $2 \cdot 10^{-6}^\circ\text{C}$ вызывало уменьшение сопротивления чувствительного слоя на 0,3 ом.

Беккер и Мур² достигли лучших результатов. Изготовленный ими болометр из окиси Mn, Co и Ni обладал порогом чувствительности, как утверждают авторы, $5 \cdot 10^{-10} \text{ вт}$, несмотря на то, что сопротивление этого болометра было $6 \cdot 10^6 \text{ ом}$. Болометр указанных авторов имел размеры чувствительного элемента от 1 до 5 мм в длину и от 0,1 до 1 мм в ширину. Толщина слоя колебалась от $2 \cdot 10^{-2}$ до 10^{-2} мм .

Контактные электроды наносились напылением в вакууме, и к ним припаивались отводящие проводники. В одних случаях такой элемент помещался в эвакуированный металлический баллон с окошком ТБИ-5 для инфракрасной радиации, в других случаях болометр действовал в воздухе. Питание моста осуществлялось переменным током, сигнал усиливался и на выходе усилителя регистрировался записывающим приспособлением. Болометр, который обладал сопротивлением $4 \cdot 10^6 \text{ ом}$, имел постоянную времени $3 \cdot 10^{-3} \text{ сек}$. и порог чувствительности 10^{-8} вт при модуляции излучения с частотой 30 гц, что имеет существенное значение.

В то же время болометр с сопротивлением $2 \cdot 10^6 \text{ ом}$ имел постоянную времени $5 \cdot 10^{-3} \text{ сек}$. и порог чувствительности $5 \cdot 10^{-10} \text{ вт}$ при модуляции с частотой 14 гц. Чувствительность таких болометров составляет от 300 до 700 в/вт в зависимости от приложенного напряжения.

Как выше было сказано, Бауэр³ для изготовления болометра использовал закись меди. Удельное сопротивление Cu_2O равно $3,3 \cdot 10^4 \text{ ом} \cdot \text{см}$, т. к. с. $\alpha = 3,3 \cdot 10^{-2} \text{ 1/градус}$, удельная тепло-

ёмкость $4,9 \cdot 10^{-3}$ *вт·сек/градус·см²*. Для изготовления чувствительного элемента болометра была взята медная фольга толщиной 0,001 см и термическим путём превращена в закись меди, причём

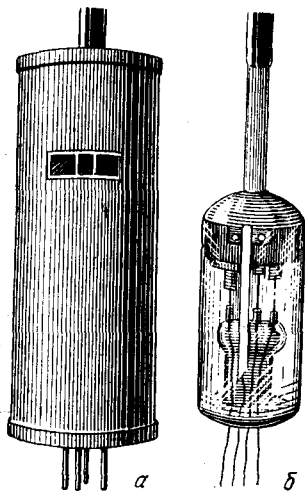


Рис. 13. *а* — внешний вид болометра; *б* — внутренняя вакуумная часть болометра, где вмонтированы два плеча моста из Cu_2O , одно из которых подвергается облучению.

её толщина стала равной 0,0017 см. Концы полоски Cu_2O были подвергнуты восстановлению в медь, что обеспечивало надёжность контакта слоя с отводящими проводниками. Две такие полоски давали возможность создать компенсационный болометр. Эти полоски монтировались на кварцевой пластинке, в которую были введены четыре металлических электрода, как показано на рис. 13, *б*. Полоски располагались параллельно на расстоянии 0,8 см друг от друга, причём одна из них была защищена экраном от облучения. Вакуумная часть болометра, в которой монтировались обе полоски: чувствительная и компенсационная, помещалась в металлический корпус, имеющий щель для пропускания излучения. Кроме того, для лучшей теплоизоляции болометр был помещён в трубку из пертиакса с толщиной стенок 0,6 см. Так как к болометру подводилось высокое напряжение, то цоколь был выполнен из

янтаря. Общий вид болометра показан на рис. 13, *а*. Чернение не применялось, так как к слою никакое чернение не приставало. Измерения производились при систематической откачке колбы болометра.

Изготовленный болометр имел общее сопротивление 10^8 ом. При напряжении 1200 в на мосте удалось зафиксировать чувствительность на площади 0,5 мм², равную 16 700 в/вт при температуре чувствительной поверхности 313° К. Порог чувствительности оказался равным $6 \cdot 10^{-8}$ вт, а постоянная времени 2,2 сек.

С практической точки зрения вышеприведённые характеристики болометра из закиси меди не представляют особенной ценности даже при столь высокой его чувствительности. Известно, что для полупроводников характерным является селективное поглощение света^{24, 25, 12}. В частности, закись меди в области длин волн от 1 до 13 мкм обладает резко выраженной селективностью²⁵, как это видно из рис. 14. Болометр Бауэра, таким образом, является селективным приёмником, а следовательно, это уже не болометр. Кроме того, известно⁴, что закись меди обладает фотоэлектрической чувствительностью (внутренний фотоэффект) в видимой области спектра. Максимум фотоэлектрической чувствительности

расположен в области длин волн примерно $0,6 \mu$. Свои опыты Бауэр производил, воздействуя на приёмник видимым излучением, поэтому вообще возникает вопрос: что же измерял автор — фотоэлектрический или болометрический эффект?

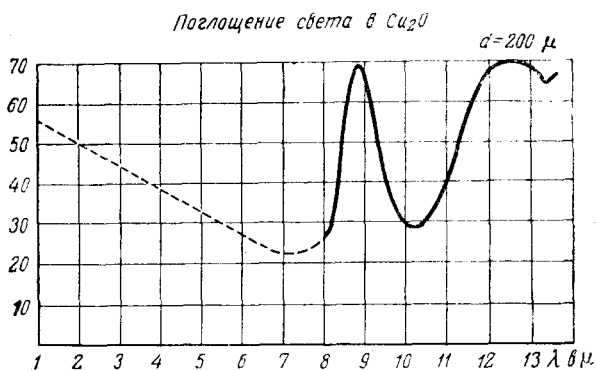


Рис. 14.

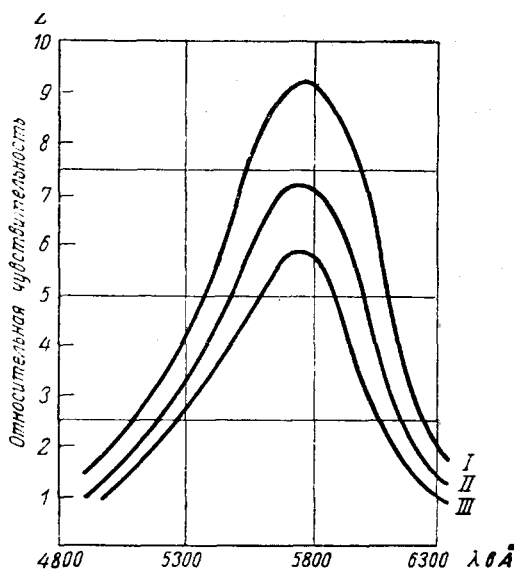


Рис. 15. Спектральные характеристики для слоя Cu_2O толщиной 12μ . I — частота $f_1 \approx 100 \text{ гц}$; II — частота $f_2 \approx 200 \text{ гц}$; III — частота $f_3 \approx 400 \text{ гц}$. Сопротивление образца $7 \cdot 10^7 \text{ ом}$.

Спектральная фоточувствительность тонких слоёв закиси меди в видимой области спектра по данным наших исследований представлена на рис. 15. Подсчёт фоточувствительности исследованных нами

образцов показывает примерно такой же порядок величин, какой указан в работе Бауэра. Совершенно ясно, что при наличии такого характера селективной фоточувствительности без чернения чувствительных элементов изготовить болометр из закиси меди нельзя.

Таблица III

Параметры	Кварцевая подкладка	Стекло- ная под- кладка	Без под- кладки с тыловой пластинкой
Постоянная времени в сек.	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$
Чувствительность в в/вт при 15 гц	705	585	1210
Напряжение в вольтах	212	130	81
Ширина полосы частот	62,5	35,7	8,33
Джонсоновский шум в микровольтах	1,7	1,3	0,62
Порог чувствительности в ваттах. .	$2,3 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-10}$

Большой интерес представляет работа Ворсмера⁹ по разработке полупроводникового болометра из комбинаций окисей Мп и Со, а также из Мп, Со и Ni. Для достижения малой инерционности

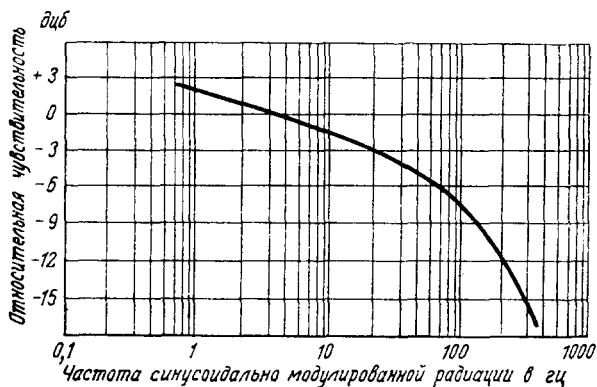


Рис. 16. Частотная характеристика чувствительности полупроводникового болометра на кварцевой подложке.

болометра автор наносил слой смеси окисей полупроводника на срез кристалла кварца, перпендикулярный к оптической оси Z, чем достигалось хорошее сочетание теплопроводности и большого сопротивления изоляции. В других случаях применялись слои без подкладки, но в тыловой стороне активной части слоя помещалась металлическая пластинка. Между пластинкой и слоем имелся зазор.

Данные, которые были получены для болометров с различными вариантами слоёв, представлены в таблице III. Эти сведения были получены для болометров с размером чувствительной поверхности $S = 0,5 \text{ мм}^2$ и сопротивлением $R_x = 3 \cdot 10^6 \text{ ом}$ при $t^\circ = 25^\circ \text{С}$. Хотя данные этой таблицы были получены при различных напряжениях и ширинах полосы пропускаемых усилителем частот, однако они дают представления о тех возможностях, какие раскрываются перед экспериментаторами в изготовлении болометров.

Для более полной оценки качества современного полупроводникового болометра приведём полученную Ворсмером частотную характеристику чувствительности (рис. 16). Несмотря на то, что эти болометры обладают относительно большой общей теплоёмкостью, их инерционность невелика и чувствительность снижается к нулю только при частотах свыше 300 гц.

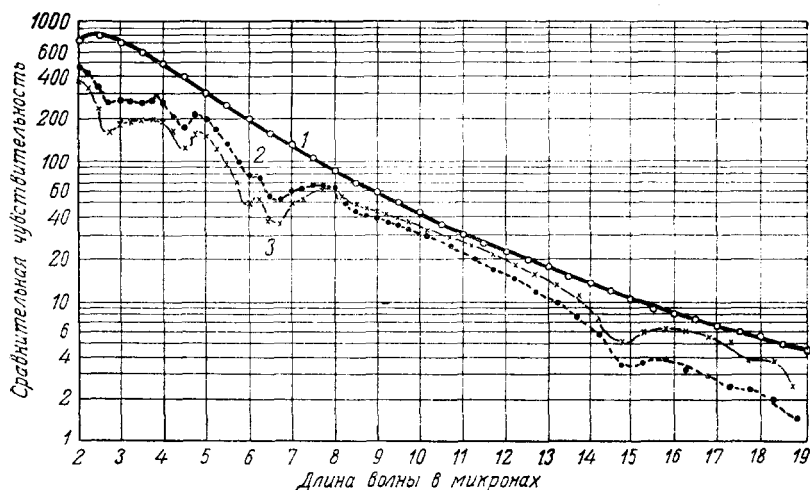


Рис. 17. Спектральная чувствительность зачернённого болометра ($0,6 \times 0,75 \text{ мм}$) и зачернённого термоэлемента ($0,75 \times 0,75 \text{ мм}$).
1 — чѐресе тело при 1183°K ; 2 — термоэлемент с окном из KBr;
3 — болометр с окном из KBr.

Так как использованные Ворсмером полупроводники обладают селективностью, применялось чернение. На рис. 17 представлены кривые спектральной чувствительности в диапазоне длин волн от 2 до 19 μ (излучение чѐрного тела) для зачернённого полупроводникового болометра (размер $0,6 \times 0,75 \text{ мм}$) и зачернённого золотом вакуумного термоэлемента (размер $0,74 \times 0,75 \text{ мм}$). Для сравнения детекторов уровень сигнала нормализован делением на джонсоновский шум. Общий ход зависимости спадаения чувствительности с увеличением длины волны таков: в интервале длин

№ п/п	Автор	Материал болометра	Поверхность S в мм^2	Толщина слоя болометра в мк	Сопротивление R в Ω	Постоянная времени $\tau \cdot 10^4$ в сек.
1	2	3	4	5	6	7
Металлические						
1	Гуртнер ¹⁵	Fe	10	15	—	8 000
2	Мун и Мильс ²⁸	Pt	4	4	—	45 000
3	Лерер ³¹	Pt	0,5	0,5	16	—
4	Ленгтон ³²	Pt/ц.	0,8	0,1	20	40
5	Брокман ³³	Ni	5,3	0,1	100	50
6	Стронг ²¹	Ni/ц.	5,7	—	—	53
7	Феликс ³⁰	Ni	17,2	0,8	16	20
8	Поляроидные болометры ³⁰	Ni	4,5	—	64	47
9	Б. П. Козырев ²⁹	Au	2,8	0,15	3	600
10	Айкен и др. ³⁴	Au/ц.	2,75	0,1	50	38
11	Черни ²²	Bi/ц.	—	0,1	150	50
Полупроводниковые						
12	Беккер и Мур ²	Окиси Mn, Co, Ni	0,5	10—20	$6 \cdot 10^5$	50
13	Бреттаин и Беккер ⁸	То же	0,6	10—20	10^5	30
14	Бауэр ⁵	Cu_2O	6	17	$1,5 \cdot 10^8$	22 000
15	Термисторный болометр ¹²	Окиси Mn, Co, Ni	0,6	—	$3 \cdot 10^5$	60
16	Термисторный болометр ¹²	То же без подложки	0,53	—	$3 \cdot 10^5$	1350
17	Ворсмер ⁹	То же	0,5	15	$2,5 \cdot 10^5$	230
Диэлектрические						
18	Юлес ¹⁸	Нитробензол	0,50	6	—	1000
19	Юлес ¹⁸	То же	0,5	6	$2 \cdot 10^3$	—
20	Найвен ³⁵	Целлофан	2	20	$2 \cdot 10^8$	—
21	Мун и Штейгарт ⁶	То же	400	23	$1,4 \cdot 10^4$	35 000
Сверхпроводящие						
22	Эндрус и Милтон ⁹	Нитрид Nb	1,25	25	5	5
23	Фьюсон ³⁶	То же	до 6	25	от 0,2 до 5	50
24	Милтон ²⁰	" "	0,8	—	—	3
25	Нельсон ³⁰	" "	0,8	—	—	18

Таблица IV

Чувствительность Z в $\text{в} \cdot \text{см}^2/\text{вт}$	Удельная чувствительность Z в $\text{вт}/\text{см}^2$	Порог чувствительности $\Delta W \times 10^{10}$ в вт	Рабочий ток или напряжение	Частота модуляции света в гц	Тип чернения	Вакуумный или газонаполненный	Примечание
8	9	10	11	12	13	14	15

болометры							
0,0045	—	350	—	—	—	—	
0,068	1,7	1200	—	—	Сурьмой	Вакуум	
0,0185	3,7	220	10 ма	20	Платиновой чернью	Воздух	
—	1	300	—	120	?	Водород	
0,076	1,4	90 000	—	—	—	Вакуум	
0,0347	0,61	12,4	—	30	—	Водород	
—	до 2,00	—	до 100 ма	—	—	Водород	
—	1,46	35	—	30	—	Газонаполн.	
0,028	1	200	до 20 ма	—	Сажей	Вакуум	
0,12	4,4	1000	—	30	Золотом	Азот	
—	—	—	—	30—40	—	Газонаполн.	

болометры							
3,5	до 500	5	100 в	15	Нет	Вакуум	Чувствительность определена при 313° K
1,5	250	200	200 в	30	Нет	Вакуум	
до 1000	—	600	1200 в	—	Нет	Вакуум	
—	730	30	—	15	—	—	
17,3	3460	11,4	—	15	—	—	
—	2110	50	80 в	8,5	Золотом	Газонаполненный	

болометры							
1,5	300	100	—	10	Зачернен	Воздух	
9	1800	100	—	10	То же	Вакуум	
—	—	—	—	—	—	—	
48	—	30	100 в	—	Акводагом	Вакуум	

болометры							
—	—	5	30 а	1000	—	Вакуум	
0,26	до 75	500	40 а	360	—	Вакуум	
—	—	10	—	—	—	—	
—	—	3,5	—	27	—	—	

волн от 2 до 7 μ чувствительность болометра составляет от 60 до 80% чувствительности термопары. В области 8—10,5 μ чувствительности обоих приёмников равны, тогда как в интервале 10,5—19 μ чувствительность болометра в 1,5—2 раза выше чувствительности термопары. Как видно, в этом диапазоне длин волн резко выраженной селективности у приёмника нет. Таким образом, при правильном применении чернения можно избежать проявления селективного эффекта у полупроводниковых болометров.

Из сказанного выше следует, что наряду с дальнейшим развитием и усовершенствованием металлических болометров как приёмников ИКР должны развиваться работы и по полупроводниковым болометрам. В настоящее время они находятся ещё в начальной стадии своего развития, однако уже получены довольно обнадеживающие результаты.

Чтобы судить о том месте, которое уже сейчас занимают полупроводниковые радиационные болометры среди других типов болометров, мы приводим сводную таблицу IV.

Данные, приведённые в таблице IV, заимствованы из различных литературных источников без соответствующих перерасчётов к единым условиям. Попытка подобных перерасчётов не дала положительных результатов. Конструкции приёмников и условия снятия характеристик столь различны, что трудно провести абсолютное сравнение их между собой. В связи с этим мы попытались собрать по возможности все имеющиеся в литературе данные о всех типах болометров. По этим данным в некоторой степени можно сделать суждение о качестве того или иного типа болометров.

В болометрической технике ещё до настоящего времени не выработаны стандартные критерии измерения тех или иных величин для оценки качества болометра. Почти отсутствуют данные о чувствительности как функции частоты излучения. Нам кажется, что для правильной оценки качества радиационного приёмника необходимы следующие сведения:

1. Относительная чувствительность и порог чувствительности. Эти данные должны быть получены при использовании стандартного источника ИКР, например чёрного тела при температуре 200° С.
2. Размер чувствительного элемента и его толщины.
3. Удельное сопротивление и т. к. с. чувствительного слоя.
4. Рабочее напряжение или сила тока питания электрической схемы болометра.
5. Частотная характеристика чувствительности болометра, действующего от модулированной ИКР.
6. Время температурной релаксации.
7. Зависимость чувствительности от длины волн.
8. Тип чернения, вакуумный или газонаполненный.

Только при наличии всех вышеуказанных данных, полученных при одинаковых условиях эксперимента, можно будет более пра-

вильно произвести сравнение между собой отдельных приёмников одного типа и затем различных типов, а следовательно, и дать оценку качества приёмников ИКР.

7. ВЫВОДЫ

1. Исследования электрических свойств полупроводников показывают, что полупроводники типа окисей при соответствующей температурной тренировке обладают т. к. с. $\sim 3-4\%$ на 1°C . При этом по своим электрическим свойствам они вполне подходят для изготовления приёмников ИКР.

2. Чувствительность полупроводниковых болометров значительно превышает чувствительность металлических, что позволяет изготавливать их с низким порогом чувствительности, несмотря на то, что они обладают высоким сопротивлением и уровнем шума. Инерционность их также невелика, а это даёт возможность применять модуляцию инфракрасной радиации.

3. Полупроводниковые болометры наряду с металлическими получают всё большее и большее применение в различных областях науки и техники. Опыт использования полупроводниковых болометров показывает^{1, 2, 9, 41}, что они по качеству не только не уступают металлическим болометрам, а иногда и превосходят их. Техника применения их проще, возможности использования шире.

4. Полупроводниковые болометры можно рекомендовать не только для спектроскопических исследований, но так же и для решения ряда задач по внедрению в производство автоматики и телемеханики, контролю температур и для решения других вопросов.

По инерционности и порогу чувствительности сверхпроводящие болометры обладают наилучшими объективными данными, тогда как диэлектрические болометры имеют наименее удовлетворительные характеристики.

Следует отметить, что из числа металлических болометров удовлетворительными частотными характеристиками обладают газонаполненные болометры и болометры, у которых металлические слои нанесены на тонкие целлулоидные плёнки. В этом случае тонкие слои имеют относительно высокое сопротивление (100—200 ом), что позволяет применять ламповые усилители. С другой стороны, они имеют малую общую теплоёмкость и поэтому малоинерционны.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. И. Д. Конозенко, ЖТФ **20**, 645 (1950).
2. Веккер, Моор, J. Opt. Soc. Am. **36**, 358 (1946).
3. К. С. Вульфсон, Труды ВЭИ, вып. 41 (1940).
4. А. В. Иоффе и А. Ф. Иоффе, ЖЭТФ **6**, 737 (1936).
5. G. Bauer, Phys. Zeits. **17**, 302 (1942).

6. Munn a Steinhardt Opt. Soc. Am. **28**, 148 (1938).
7. С. М. Рывкин и В. П. Жузе, Сборник, посв. 70-летию А. Ф. Иоффе, 1950 г.
8. Brattain a Becker, J. Opt. Soc. Am. **36**, 354 (1946).
9. E. M. Worsmer, J. Opt. Soc. Am. **43**, 15 (1953).
10. Н. А. Горюнова, И. Д. Конозенко, ЖТФ **21**, 815 (1951).
11. T. Sakurai a. S. Munesue, Phys. Rev. **85**, 921 (1952).
12. L. Eiseman, Ann. d. Phys. **10**, 130 (1952).
13. И. Д. Конозенко, УФН **52**, вып. 4 (1954).
14. C. Jones, J. Opt. Soc. Am. **36**, 448 (1946).
15. C. Jones, J. Opt. Soc. Am. **39**, 327 (1949).
16. Б. П. Козырев, УФН **173** (1951).
17. Cartwright, Zeits. f. Phys. **92**, 171 (1934).
18. Ewles, J. Sci. Instr. **24**, 57 (1947).
19. Andrews и др., J. Opt. Soc. Am. **36**, 518 (1946).
20. R. Milton, Chem. Rev. **39**, 419 (1946).
21. R. Hevens, J. Opt. Soc. Am. **36**, 355 (1946).
22. Cherny и др., Ann. d. Phys. **8**, 65 (1950).
23. C. Jones, J. Opt. Soc. Am. **43**, 3 (1953).
24. A. T. Gibson, Proc. Phys. Soc. **63**, 756 (1950).
25. H. Hinteberger, Zeits. f. Phys. **119**, 1 (1942).
26. Е. Гросс и П. Каррыев, ДАН СССР № 3 (1952).
27. Cartwright, Zeits. f. Phys. **92**, 15 (1934).
28. Moon a. Mills, Rev. Sci. Instr. **6**, 8 (1935).
29. Б. П. Козырев, Автореферат докторской диссертации 1950 г.
30. Nielson, J. Opt. Soc. Am. **36**, 355 (1946).
31. E. Lehrer, Zeits. f. techn. Phys. **18**, 393 (1935).
32. W. Langton, J. Opt. Soc. Am. **36**, 355 (1946).
33. F. Brocman, J. Opt. Soc. Am. **36**, 32 (1946).
34. Aiken и др., Rev. Sci. Instr. **17**, 377 (1946).
35. C. Niven, Can. J. of. Res. **6**, 93 (1946).
36. N. Fuson, J. Opt. Soc. Am. **38**, 845 (1948).
37. Dahlke и Hetteur, Zeits. f. Phys. **117**, 74 (1940).
38. Lernike, Zeits. f. Phys. **40**, 628 (1927).
39. Грановский, Электрические флуктуации.
40. В. Е. Киркин, Известия Воронежского госпединститута, т. 10, вып. 1 (1948).
41. Р. Клейтон, Д. Хаулдин и др., Применение болометров для измерения малых мощностей, 1947.

Успехи физических наук, том LVI, вып. 2.

Редактор Г. В. Розенберг.

Техн. редактор Н. Я. Мурашова.

Корректор Г. Г. Желтова.

Сдано в набор 19/IV 1955 г.

Подписано к печати 11/VI 1955 г.

Бумага 60 × 92/16.

Физ. печ. л. 10.

Условн. печ. л. 10.

Уч.-изд. л. 10,61,

Тираж 5620 экз.

T-04908.

Цена книги 8 руб.

Заказ № 189.

Государственное издательство технико-теоретической литературы.
Москва, В-71, Б. Калужская ул., 15.

Министерство культуры СССР.
Главное управление полиграфической промышленности.
13-я типография. Москва, Гарднеровский пер., 1а.