

Определение длины волны отсечки фоточувствительности инфракрасных фотоприемников с использованием двух низкотемпературных излучателей

© В.В. Васильев, Ю.П. Машуков

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

(Получена 24 декабря 1997 г. Принята к печати 10 февраля 1998 г.)

Продолжено рассмотрение метода определения длины волны отсечки λ_c инфракрасных фотоприемников, основанного на облучении образца двумя черными телами с различными температурами. Чем выше λ_c , тем более низкие температуры излучателей целесообразно применять. Приводятся параметры системы, использующей два черных тела, которые располагаются внутри азотного криостата и имеют температуры 260 и 320 К соответственно. Показано, что ошибки в определении нижней или верхней из указанных температур на 1 К приводят к ошибке λ_c примерно на 0.3 и 0.2 мкм соответственно, если $\lambda_c = 10$ мкм. Измерения на фотодиодах, изготовленных на основе эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_{0.24}\text{Hg}_{0.76}\text{Te}$ ($\lambda_c = 8.1$ мкм), показали, что различие в величинах λ_c , полученных данным методом и из спектральных измерений, составляет не более нескольких десятых долей мкм. Предлагается использовать данный метод как стандартный.

Использование тепловых излучателей (модель абсолютно черного тела) широко применяется для тестирования инфракрасных (ИК) фотоприемников, например, для определения интегральной ампер-ваттной чувствительности [1]. Как было показано в [2], использование двух абсолютно черных тел, имеющих две различные температуры, дает возможность определить характеристику спектра фоточувствительности — положение длинноволновой границы (длину волны отсечки) λ_c .

Нами в [3] было показано, что для определения длины волны отсечки указанным методом следует применять тем более низкие температуры черных тел, чем больше величина λ_c . Для $\lambda_c \sim 10$ мкм эти температуры лежат в районе комнатной. В [3] нами использовалось черное тело, которое располагалось внутри азотного криостата, и температура которого изменялась в пределах $150 \div 450$ К.

В настоящей работе, во-первых, проводится дальнейший, по отношению к [3], анализ точности рассматриваемого метода — вычисляется ошибка в определении λ_c , связанная с неточным определением температур черных тел; во-вторых приводятся параметры системы, использующей два черных тела внутри криостата.

Анализ погрешности метода

Данный метод определения λ_c основывается на том, что измеряется отношение фотосигналов, создаваемых черными телами с температурами T_1 и T_2 , а λ_c определяется по теоретическим зависимостям, рассчитанным на основании формулы Планка. В отличие от [2], где использовалось распределение Планка для энергии излучения, мы будем использовать распределение Планка для числа фотонов. Такой подход в случае фотонных фотоприемников проще и нагляднее.

На рис. 1 показана идеализированная спектральная зависимость квантового выхода η для фотоприемника с $\lambda_c = 10$ мкм, а также распределение Планка для температур 260 и 320 К. Эти температуры были в дальнейшем выбраны в качестве рабочих на основании ряда соображений, рассмотренных в [3]. В частности, было учтено, что отношение фотосигналов от двух черных тел изменяется наиболее резко по отношению к изменению λ_c , если максимальная излучательная способность черных тел находится при большей, чем λ_c , длине волны. С другой стороны, температуры не должны быть очень низкими, так как в этом случае сигнал фотоприемника становится слишком маленьким.

Одним из наиболее существенных факторов, влияющих на точность определения λ_c рассматриваемым способом, является точность определения температур T_1 и T_2 . Чтобы оценить этот фактор, напишем выражение для

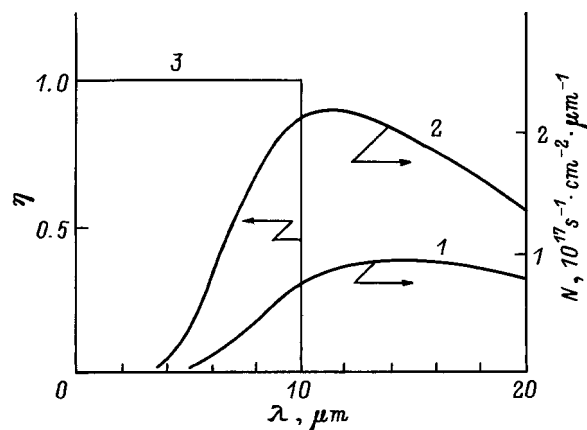


Рис. 1. Спектр излучения идеального теплового излучателя (N — число фотонов) при температурах 260 (1), 320 К (2) и квантовый выход η для идеального фотонного фотоприемника (3). 1 и 2 — правая шкала, 3 — левая.

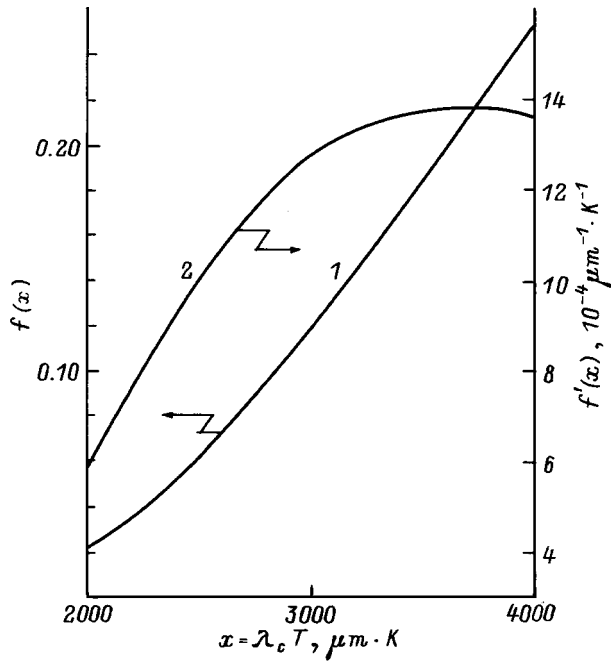


Рис. 2. Функция $f(x)$ — доля фотонов, испускаемых идеальным тепловым излучателем, приходящаяся на интервал длин волн от 0 до λ_c (1, левая шкала) и ее производная $f'(x)$ (2, правая шкала).

отношения фотосигналов:

$$F(\lambda_c, T_1, T_2) = \frac{\sigma' T_2^3 f(\lambda_c T_2)}{\sigma' T_1^3 f(\lambda_c T_1)}. \quad (1)$$

Здесь $\sigma' T^3$ — выражение из закона Стефана–Больцмана для числа фотонов [1], $f(\lambda_c T)$ — доля тех фотонов, которые имеют длину волны от нуля до λ_c [4]. Логарифмируя, а затем дифференцируя (1), находим выражение для относительного дифференциала

$$\frac{dF}{F} = \left[T_2 \frac{f'(x_2)}{f(x_2)} - T_1 \frac{f'(x_1)}{f(x_1)} \right] d\lambda_c - \left[\frac{3}{T_1} + \frac{f'(x_1)}{f(x_1)} \lambda_c \right] dT_1 + \left[\frac{3}{T_2} + \frac{f'(x_2)}{f(x_2)} \lambda_c \right] dT_2, \quad (2)$$

где $x_{1,2} = \lambda_c T_{1,2}$. Функция $f(x)$ и ее производная в интересующем нас диапазоне x показаны на рис. 2. Если подставить в (2) значения параметров, приведенных на рис. 1, получим выражение

$$\frac{dF}{F} = -0.0964 d\lambda_c - 0.0265 dT_1 + 0.0186 dT_2 \quad (3)$$

(λ_c выражено в мкм, а T — в К), из которого видно, что ошибка в одной из температур на 1 К приводит к ошибке λ_c на $0.2 \div 0.3$ мкм.

Следующим источником возможной ошибки метода является неточное определение отношения сигналов, т. е. функции F . Чтобы уменьшить эту ошибку, в частности

исключить влияние нелинейности ампер-ваттной характеристики фотоприемника, следует уравнивать сигналы, расположив черные тела на различных расстояниях (как в [2]) или изготовив их различной площади, как в настоящей работе. Нами принято отношение площадей 4:1; при этом для указанных выше температур равенство сигналов наступает при $\lambda_c = 9.5$ мкм.

Конструкция установки и методика измерений

Остановимся на конструктивных особенностях изготовленного нами макета установки, которая была размещена в том же самом криостате, что и ранее [3]. Черные тела представляли собой медные цилиндры диаметром 18 мм и высотой тоже 18 мм, в которых проделаны цилиндрические углубления диаметром соответственно 10.5 и 5.5 мм. Цилиндрические полости служили источником излучения; их поверхность была покрыта клеем БФ-2 с порошком графита. Нагревателями служили обмотки из медной проволоки поверх цилиндров, приклеенные к ним тем же клеем. Черные тела были окружены сплошным металлическим экраном, в котором напротив их излучающих отверстий находились диафрагмирующие отверстия диаметром 10 и 5 мм соответственно. Экран был присоединен к двум хладопроводам, уходящим в жидкий азот. Снаружи экрана перед диафрагмирующими отверстиями располагалась подвижная заслонка с отверстием 11 мм, которая могла либо закрывать оба тела, либо открывать одно из них. Экран, хладопровод и заслонка были изготовлены из алюминия, который является металлом с хорошей теплопроводностью и малой излучательной способностью. Вследствие этого испытуемый фотоприемник не подвергался действию какого-либо дополнительного, кроме тестирующего, излучения. Создать такие условия в случае, когда черные тела находятся вне криостата, весьма затруднительно.

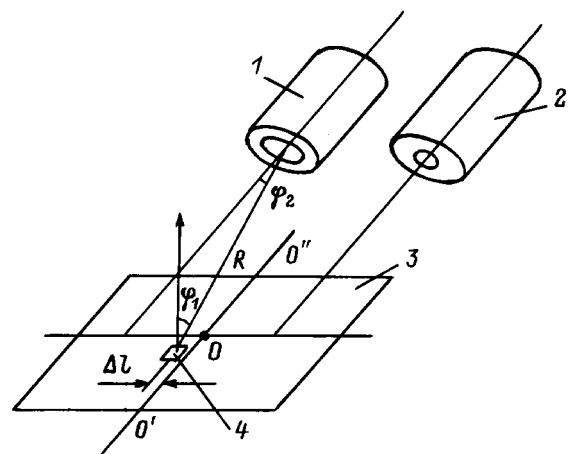


Рис. 3. Схема расположения черных тел. 1, 2 — черные тела с температурами 260 и 320 К соответственно, 3 — плоскость матрицы фотодиодов, 4 — измеряемый фотодиод.

Черные тела располагались рядом друг с другом (рис. 3), и их излучающие отверстия лежали в одной плоскости. Образец располагался на горизонтальной поверхности охлаждаемого столика. Расположение черных тел и экрана позволяло (как и в [3]) наблюдать образец сверху в бинокулярный микроскоп, что было необходимо для наведения управляемого зонда на контактную площадку выбранного элемента. С этой целью плоскость, проходящая через оси излучателей, составляла с горизонтальной плоскостью угол не 90, а 58°. Исследуемые элементы находились в окрестности точки *O*, которая лежала на прямой пересечения двух указанных плоскостей и на равном удалении от центров излучающих отверстий черных тел (назовем эту точку средней точкой).

Для поддержки рабочих температур 260 и 320 К требовалась суммарная мощность около 8 Вт. Измерение температуры осуществлялось медь-константановыми термопарами, припаянными к черным телам; вторые концы термопар находились снаружи, и их температура контролировалась ртутым термометром. По-видимому, неоднородность температуры в медном основании черных тел, а также температура их внутреннего покрытия не отличаются более чем на 1 К от измеряемой температуры. Такое предположение можно сделать исходя из значений рассеиваемой телами мощности, теплопроводности медного основания и покрытия, а также направления тепловых потоков. Ошибка λ_c за счет этого фактора не должна превышать 0.1:0.2 мкм. Температура медных оснований черных тел определялась с точностью до долей градуса. Методика не предусматривала точную установку именно указанных выше температур T_1 и T_2 , они могли отличаться от базовых на несколько градусов.

На рис. 4 построена расчетная рабочая зависимость, связывающая $\lg F$ и λ_c для базовых температур и при условии равенства площадей излучателей. Чтобы вос-

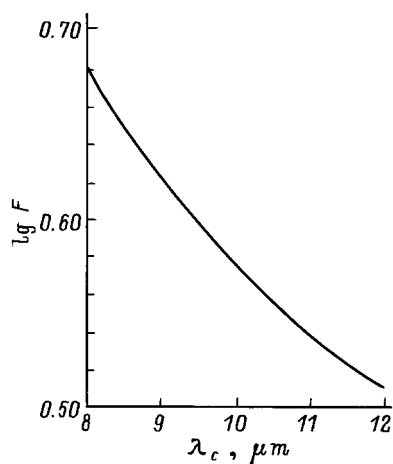


Рис. 4. Зависимость логарифма отношения фотосигналов, создаваемых в идеальном фотонном фотоприемнике двумя тепловыми излучателями с температурами 320 и 260 К соответственно, от длины волны отсечки фотоприемника.

пользоваться этой зависимостью, необходимо ввести поправки, учитывающие неравенство площадей, отличие температур от базовых и отклонение исследуемого фотоприемника от средней точки,

$$\lg F = \lg \frac{4I_0(T_2)}{I_0(T_1)} - 0.434 \frac{\partial \ln F}{\partial T_1} dT_1 - 0.434 \frac{\partial \ln F}{\partial T_2} dT_2 - 0.045 \Delta l, \quad (4)$$

где $I_0(T_2)$, $I_0(T_1)$ — фотосигналы, полученные от двух черных тел, 4 — отношение площадей излучателей; 0.434 — коэффициент, переводящий натуральный логарифм в десятичный; производные $\partial \ln F / \partial T_1$ и $\partial \ln F / \partial T_2$ определяются из (2); dT_1 и dT_2 — отклонения температур излучателей от базовых; Δl , выраженное в мм, — расстояние от исследуемого элемента до линии, которая лежит в плоскости образца и точки которой находятся на равных расстояниях от центров излучающих отверстий (линия $O'O''$); $\Delta l > 0$, если элемент смещен в сторону излучателя с большей температурой T_2 .

При вычислении последней поправки использовалось выражение для облученности фотоприемного элемента от любого из черных тел, которое пропорционально выражению $\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 / R^2$, где R — радиус-вектор, соединяющий центры излучателя и фотоприемника, φ_1 и φ_2 — углы между R и нормальными к плоскостям фотоприемника и излучателя соответственно. Отметим, что для средней точки $\cos \varphi_1 = 0.79$, $\cos \varphi_2 = 0.93$, $R = 28$ мм.

Поправки как бы приводят реальную ситуацию к той, для которой построена рабочая зависимость. Так как температурные поправки зависят от λ_c , которая заранее неизвестна, следует использовать метод последовательных приближений, т. е. сначала взять поправки для предполагаемой величины λ_c , а затем, после определения λ_c , их уточнить и определить λ_c еще раз.

Таким образом, процесс измерения одного элемента состоял из измерения: 1) темнового тока фотодиода; 2, 3) токов при облучении сначала 1-м, затем 2-м черным телом; 4, 5) показаний 1-й и 2-й термопары. Все это легко можно было проделать за время не более минуты, за которое температура черных тел не изменялась более чем на 0.1 К.

Экспериментальные результаты

Для апробации были использованы фотодиоды, изготовленные на основе эпитаксиального слоя $Cd_xHg_{1-x}Te$ с $x = 0.24$, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs. Спектр фоточувствительности для одного из фотодиодов показан на рис. 5. Величина $\lambda_c = 8.1$ мкм определена как длина волны, при которой ампер-ваттная чувствительность S равна половине максимальной. При испытании матрицы по рассматриваемой методике измеряемый элемент располагался в средней точке. Предварительно, с целью

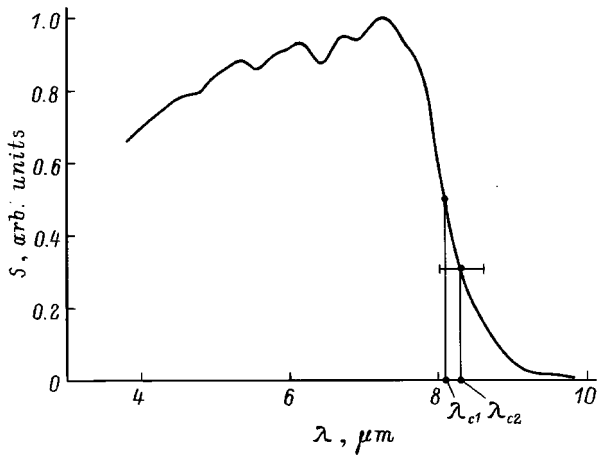


Рис. 5. Спектр ампер-ваттной чувствительности S одного из фотодиодов. λ_{c1} — длина волны отсечки, определенная по половине максимальной величины фоточувствительности, λ_{c2} — аналогичная величина, определенная рассматриваемым методом.

экспериментального подтверждения предполагаемого соотношения излучательных способностей двух черных тел, было измерено отношение фотосигналов при равенстве температур черных тел, которое оказалось равным 4.1 ± 0.1 ; это отношение использовалось далее как рабочее. Определение λ_c для элемента, показанного на рис. 5, дало результат (8.3 ± 0.3) мкм, т.е. наблюдалось хорошее совпадение с данными спектральных измерений.

Заключение

Таким образом, в работе показано, что идея использования низкотемпературных излучателей, расположенных в криостате, в рассматриваемом методе определения длины волны края фоточувствительности ИК фотоприемников с $\lambda_c \sim 10$ мкм с точностью в несколько десятых долей мкм может быть реализована весьма успешно. Необходимая для этого точность определения температур черных тел 0.2 К достаточно легко достижима. Использование холодного экрана, окружающего черные тела, позволило не допустить появления внутри криостата фонового излучения. Можно даже предложить использовать рассматриваемый метод определения λ_c как стандартный. Для этого надо только договориться, какую пару температур излучателей следует применять.

Благодарим В.Н. Овсюка за интерес к работе и полезные советы, а также А.О. Сусликова за спектральные измерения и плодотворные обсуждения.

Список литературы

- [1] Р. Хадсон. *Инфракрасные системы* (М., Мир, 1972).
- [2] R.M. Liberati, N. Sparvieri, M. Marini. *Infr. Phys.*, **31**, N 4, 361 (1991).
- [3] В.В. Васильев, Ю.П. Машуков, В.Н. Овсюк. *ФТП*, **31**, N 6, 749 (1997).
- [4] *Таблицы физических величин*. Справочник, под ред. И.К. Кикоина (М., Атомиздат, 1976).

Редактор Л.В. Шаронова

Determination of an infrared photodetector wavelength cutoff by applying of two low-temperature sources

V.V. Vasilyev, Yu.P. Mashukov

Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract Consideration of the method of the infrared photodetector wavelength cutoff λ_c determination, which based on irradiation of the pattern by two blackbodies, having different temperatures, is being continued. The larger λ_c , the lower temperature radiators are expedient to be applied. Parameters of a system, which uses two blackbodies placed in a nitrogen cryostat and having temperatures 260 and 320 K, respectively, are presented. It is shown, that errors in determination the lower or upper of mentioned temperatures of 1 K lead to the errors of λ_c approximately 0.3 or 0.2 μm , respectively, if $\lambda_c = 10 \mu\text{m}$. Measurements on photodetectors, prepared on $\text{Cd}_{0.24}\text{Hg}_{0.76}\text{Te}$ epitaxial layers and having $\lambda_c = 8.1 \mu\text{m}$, have shown, that differences between λ_c values obtained by the used method and those obtained from spectral measurements are no larger than some shares of μm . It is proposed that the present method should be used as a standart one.