

## Использование низкотемпературного излучателя для исследования спектральных характеристик инфракрасных фотоприемников

© В.В. Васильев, Ю.П. Машуков, В.Н. Овсяк

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

(Получена 8 июля 1996 г. Принята к печати 25 октября 1996 г.)

Рассматривается метод определения длины волны отсечки  $\lambda_c$  спектра фоточувствительности инфракрасных фотоприемников, использующий измерение двух фотосигналов, полученных от двух тепловых источников излучения, имеющих различные температуры. Показано, что для  $\lambda \simeq 10\text{--}14\text{ мкм}$  целесообразно использовать тепловые источники с пониженной температурой. Проведено измерение фотосигнала элемента фотодиодной линейки на  $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  с  $x = 0.225$  для теплового излучателя, температура которого изменялась в пределах 150–450 К. Из сравнения экспериментальной кривой с расчетной вычислены значения  $\lambda_c$  для нескольких температурных диапазонов. Вычислены поправки к  $\lambda_c$ , связанные с отклонением реального спектра фоточувствительности от идеализированного. Высказаны соображения по поводу выбора оптимального температурного диапазона для излучателей.

Многоэлементные фотоприемные устройства, предназначенные для работы в средней ИК области (5 ÷ 14 мкм), получили в настоящее время широкое распространение [1]. При измерениях фоточувствительности таких устройств приходится сталкиваться со следующими особенностями: а) малая величина площади отдельного элемента; б) заметное несоответствие легированной области и площади сбора фотоносителей; в) возможное взаимное влияние элементов друг на друга.

Точные измерения фотоэлектрических характеристик данных структур с применением монохроматора часто оказываются затруднительными как с точки зрения сложности оборудования, так и с точки зрения дефицита мощности излучения, падающего на отдельный элемент. Вследствие этого применение для облучения непосредственно теплового излучателя, без монохроматора, также широко распространено. В частности, в работе [2] предложен простой метод определения длины волны края фоточувствительности с использованием двух излучателей с двумя различными температурами. Особенностью данной работы является то, что для исследования фоточувствительности использовалось черное тело, температура которого изменялась в широких пределах, в том числе была ниже комнатной. Использование низкотемпературного излучателя для исследования длинноволновых фотоприемников с краем фоточувствительности  $\lambda_c \sim 10\text{ мкм}$  и выше имеет определенные преимущества. При достаточно низкой температуре, когда максимум излучательной способности располагается при большей, чем  $\lambda_c$ , длине волны, наблюдается более резкая зависимость фотосигнала от  $\lambda_c$ .

Для определения  $\lambda_c$  удобно взять отношение двух фотосигналов при двух температурах излучателя. При этом исключаются из рассмотрения ряд величин: площадь фотоприемника, потери на отражение, квантовый выход. Отношение двух фотосигналов при двух температурах излучателя как функции  $\lambda_c$  построены на рис. 1. При расчетах предполагалось, что фотоотклик пропорциона-

лен числу фотонов, имеющих длину волны меньше  $\lambda_c$ , а это число определялось интегрированием формулы Планка [3,4]:

$$Q(\lambda_c) = \int_0^{\lambda_c} \frac{c_1 d\lambda}{\lambda^4 (e^{c_2/\lambda T} - 1)}, \quad (1)$$

где  $c_1 = 1.88365 \cdot 10^{23} \text{ мкм}^3/\text{с} \cdot \text{см}^2$ ;  $c_2 = 1.43879 \cdot 10^4 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ .

Видно, что зависимости на рис. 1 достаточно резкие, особенно при пониженных температурах, чтобы можно было весьма точно определить  $\lambda_c$ . Однако реальная точность зависит от того, насколько точно настоящая спектральная зависимость ампер-ваттной чувствительности соответствует идеализированной, и то того, насколько точно удастся выполнить измерения. Чтобы

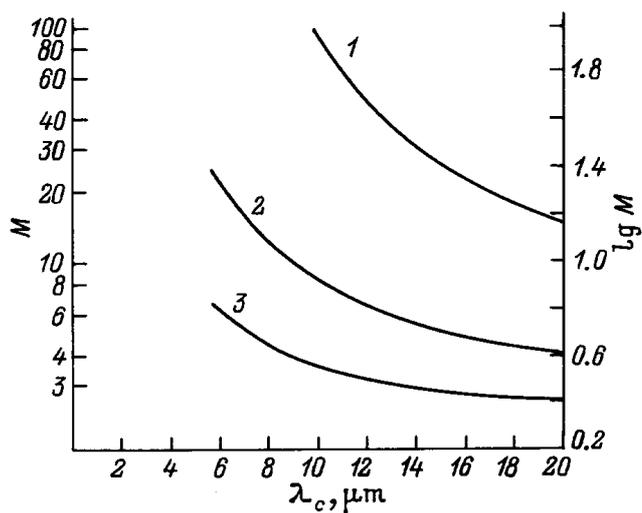
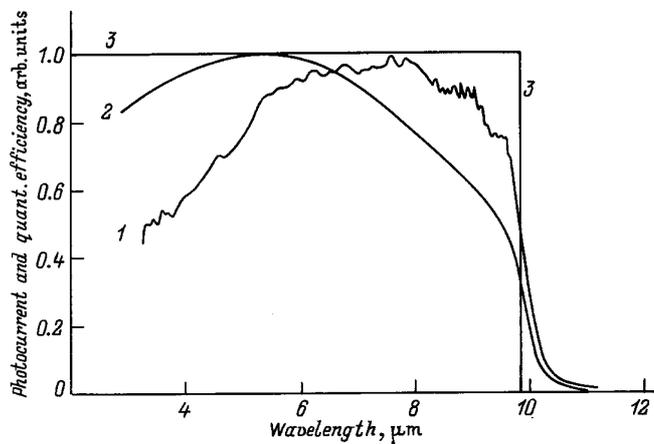


Рис. 1. Расчетные зависимости для отношения фотосигналов идеального фотонного фотоприемника при двух температурах идеального теплового излучателя в зависимости от длины волны отсечки фотоприемника. 1 — 250 и 150 К; 2 — 350 и 250 К; 3 — 450 и 350 К.



**Рис. 2.** Спектральная зависимость ампер-ваттной чувствительности (1) для одного из элементов фотодиодной линейки  $2 \times 64$  на  $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  с  $x = 0.225$ ; принятая для расчетов (2) и идеализированная (3) спектральная зависимость квантового выхода.

провести соответствующий анализ, рассмотрим рис. 2 и 3, где приведены данные измерений для одного из элементов фотодиодной линейки  $2 \times 64$  элемента, изготовленной на подложке  $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  с  $x = 0.225$ , в которой  $n-p$ -переходы формировались методом ионной имплантации бора.

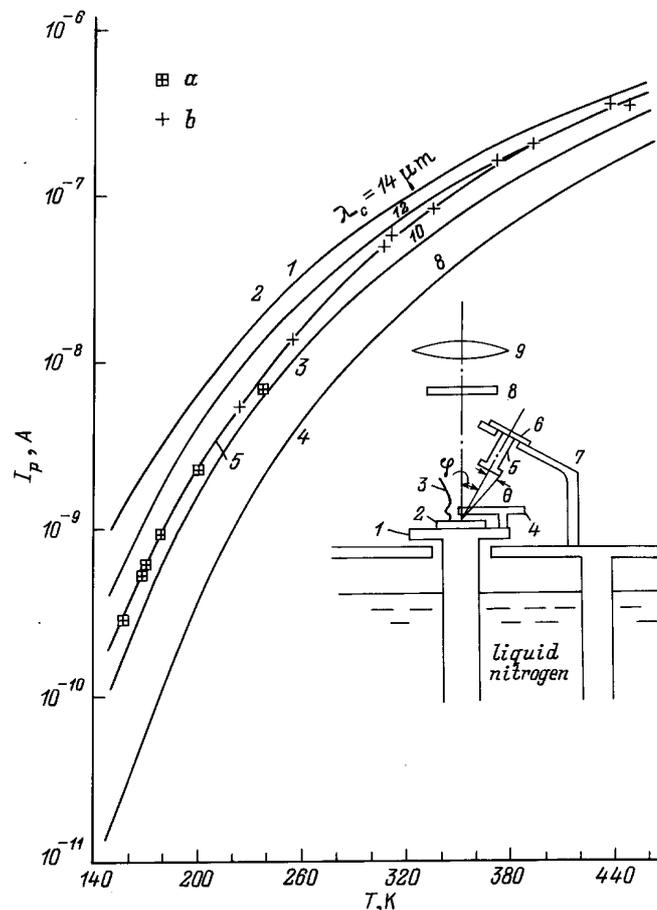
### Методика эксперимента

На рис. 2 показана истинная спектральная характеристика ампер-ваттной чувствительности, которая существенно отличается от идеальной. Измерения были проведены при температуре образца 78 К. На рис. 3 приведена экспериментальная зависимость фототока от температуры излучателя, а также ряд теоретических зависимостей, построенных при тех же предположениях, что и кривые на рис. 1. Кроме того, было принято, что потери на отражение составляли 30%, площадь сбора носителей равна площади  $p-n$ -перехода  $50 \times 70 \text{ мкм}^2$ , излучательная способность черного тела  $\alpha = 0.95$ , а эффективный угол обзора  $2\theta_{\text{eff}} = 15^\circ$ . Измерения проводились в азотном криостате, в рабочем объеме которого находились образец, модель черного тела, а также устройство для перемещения зонда. Черное тело было изготовлено из латуни и имело излучающую поверхность диаметром 8 мм, почерненную клеем БФ-2, смешанным с порошком графита. Нагревателем служила обмотка из медной проволоки, приклеенная к телу для лучшего теплового контакта тем же клеем. Так как поверхность образца располагалась под углом  $\varphi$  к оси излучателя, для определения облученности следует применять выражение

$$\sin^2 \theta_{\text{eff}} = \sin^2 \theta \cdot \cos \varphi, \quad (2)$$

где  $\theta$  и  $\varphi$  — углы, показанные на вставке рис. 3. Использовались два расположения черного тела по отношению к образцу, дальнее ( $2\theta_{\text{eff}} = 15^\circ$ ) и ближнее ( $2\theta_{\text{eff}} = 49^\circ$ ). При этом на рис. 3 отложены либо экспериментальные значения фототока для дальнего расположения, либо пересчитанные соответствующим образом — для ближнего. Ближнее расположение излучателя применялось для наиболее точных измерений в области низких температур.

Между излучателем и элементом линейки находилась подвижная охлаждаемая заслонка, которая использовалась при измерениях фототока. Нижний предел измеряемой величины фототока был  $\sim 1 \cdot 10^{-10}$  А. Температура тела измерялась с помощью термопары медь-константан термопары, припаянной к телу, другой конец которой находился в жидком азоте.



**Рис. 3.** Зависимость фототока одного из элементов фотодиодной линейки от температуры излучателя. 1–4 — расчетные зависимости, 5 — экспериментальная; а — ближнее расположение излучателя; б — дальнее. На вставке показана схема измерений: 1 — столик образца, 2 — образец, 3 — управляемый зонд, 4 — подвижная заслонка, 5 — излучатель, 6 — фторопластовый теплоизолятор, 7 — холодный экран, 8 — одно из трех стекол окна криостата, 9 — объектив бинокулярного микроскопа.

## Обсуждение результатов

Сравним показанные на рис. 3 расчетные кривые с экспериментальной. Так как нам известно из рис. 2, что  $\lambda_c = 10$  мкм, проведем сравнение именно для этой кривой. Превышение экспериментальной кривой над расчетной на всем протяжении можно объяснить большей, чем предполагалось, площадью сбора фотоносителей. Если взять указанное превышение для средней температуры, то получаем, что площадь сбора носителей на 45 % больше, чем площадь легированной области. Этого слишком мало, чтобы было перекрытие для двух соседних элементов. Однако дополнительные измерения показали, что и в самом деле имеется некоторая оптическая связь между элементами линейки: сумма фототоков двух рядом расположенных элементов, включенных одновременно, оказалась несколько меньше, чем сумма фототоков для них, включенных по отдельности. Вместе с тем нет инверсионного проводящего канала, связывающего эти два элемента.

Определение  $\lambda_c$  с помощью кривых 1–3 на рис. 1 дает значения  $\lambda_c = 11.0, 9.7, 10.2$  мкм соответственно. Таким образом, разброс составляет 1.3 мкм или 13 % измеряемой величины. На наш взгляд, этот результат является в достаточной степени удовлетворительным, если учесть, что имел место целый ряд факторов, способствующих появлению ошибок: большой динамический диапазон измеряемой величины, возможная зависимость излучательной способности излучателя от длины волны и температуры, возможная нестабильность свойств фотодиода.

Оценим погрешность величины  $\lambda_c$ , связанную с отличием реальной спектральной зависимости от идеализированной. Исходя из рис. 2, введем величину квантового выхода  $\eta(\lambda)$ . Так как фототок пропорционален числу фотонов и квантовому выходу, а число фотонов в свою очередь пропорционально  $\lambda$  (для той же самой мощности излучения), можно написать

$$\eta(\lambda) = k \frac{I_p(\lambda)}{\lambda}, \quad (3)$$

где  $k$  — некоторый коэффициент, который определяется из условия нормировки. Мы пронормируем  $\eta(\lambda)$  на 1 в максимуме (рис. 2). Умножая  $\eta(\lambda)$  на функцию Планка и вычисляя соответствующий интеграл, получаем число фотоэлектронов. Вычислим далее число фотоэлектронов в идеализированном случае, т.е. считая  $\eta(\lambda) = 1$  при  $\lambda < \lambda_c$  и 0 при  $\lambda > \lambda_c$  ( $\lambda_c = 9.8$  мкм), а затем возьмем отношение числа фотоэлектронов, полученных в первом случае  $N_p$ , к числу фотоэлектронов, полученных во втором  $N_i$  (см. таблицу). Видно, что с понижением температуры излучателя расхождение результатов для идеализированной и реальной спектральной зависимости увеличивается. Вследствие этого кривые на рис. 1, если бы мы их построили для реального спектра, пошли бы выше нарисованных, вследствие чего значения  $\lambda_c$ , определенные с привлечением экспериментальных данных рис. 3,

$T, K$	$N_p/N_i$
150	0.705
200	0.720
250	0.741
300	0.767
350	0.792
400	0.811
450	0.828

оказались бы больше. Для вычисления поправки  $\Delta\lambda_c$  поступаем следующим образом: 1) определяем по рис. 1 наклон выбранной кривой в окрестности  $\lambda_c = 10$  мкм,  $f' = \frac{\Delta \lg M}{\Delta \lambda_c}$ ; 2) по таблице определяем логарифм отношения величин для соответствующей пары температур,  $\Delta \lg M$ ; 3) определяем  $\Delta\lambda_c = \frac{\Delta \lg M}{f'}$ . вычисления дают вместо прежних следующие значения для  $\lambda_c$  с учетом поправки: 11.2, 10.0, 10.8 мкм для кривых 1–3 на рис. 1 соответственно.

Остановимся на вопросе о выборе оптимальной температурной области в рассматриваемом способе определения  $\lambda_c$ . Критерием оптимальности могло бы служить условие максимума производной от числа фотонов по  $\lambda_c$ , т.е.  $dQ(\lambda_c)/d\lambda_c$ . Указанная производная равна подынтегральному выражению в соотношении (1), для которого максимум определяется законом Вина [3]:

$$\lambda_{\max} \cdot T = a', \quad (4)$$

где  $a' = 3669.73$  мкм · К.

Таким образом, в нашем случае соответствующая температура составляет примерно 370 К. Однако, как показывают вычисления, относительное изменение числа фотонов, т.е. величина  $\frac{1}{Q(\lambda_c)} \frac{dQ(\lambda_c)}{d\lambda_c}$ , непрерывно увеличивается по мере уменьшения температуры от указанного значения, так что эффект зависимости от  $\lambda_c$  проявляется все ярче. Поэтому, по-видимому, разумно снижать температуру ниже указанного значения до тех пор, пока не начнут действовать новые ограничивающие факторы, такие как малая величина полезного сигнала, появление ложных сигналов от других частей криостата, влияние формы истинной спектральной зависимости, наличие заметной фоточувствительности за краем (напомним, что при температуре излучателя 150 К только 0.3 % всех фотонов приходится на область  $\lambda < 10$  мкм). Вполне возможно, что полученное нами наилучшее значение  $\lambda_c$  для кривой 2 на рис. 1, которая использует температурный диапазон 250 ÷ 350 К, подтверждает сказанное выше.

## Заключение

Из проведенного анализа и экспериментальных данных можно сделать вывод, что определение  $\lambda_c$  по методике, использованной в данной работе, не дает нам гарантий получения высокой абсолютной точности, которую можно оценить как  $\pm 0.5$  мкм в диапазоне  $\sim 10$  мкм.

Впрочем, само понятие  $\lambda_c$  для реального спектра не является вполне определенным. Однако использование простой конструкции модели абсолютно черного тела, расположенной внутри криостата, простота метода измерения являются заманчивыми. Метод, безусловно, может быть весьма эффективен при измерении большого массива элементов (линейка, матрица); при этом относительная точность будет уже гораздо выше ( $\sim \pm 0.1$  мкм). Как и в [2], следует, конечно, иметь два излучателя с различными температурами и устройство для их механического перемещения.

Благодарим А. Сусякова за измерение спектра фоточувствительности, а также полезные дискуссии.

## Список литературы

- [1] A. Rogalski, I. Piotrowski. Prog. Quant. Electron., **12**, 87 (1988).
- [2] R.M. Liberati, N. Sparvieri, M. Marini. Infr. Phys., **31**, 361 (1991).
- [3] Р. Хадсон. *Инфракрасные системы* (М., Мир, 1972).
- [4] *Таблицы физических величин. Справочник*, под ред. И.К. Кикоина (М., Атомиздат, 1976).

Редактор В.В. Чалдышев

## Utilization of a low temperature source for investigation of infrared photodetector spectral characteristics

V.V. Vasil'ev, Yu.P. Mashukov, V.N. Ovsyuk

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

**Abstract** In this paper is considered a method of the wavelength cutoff  $\lambda_c$  determination for spectral photosensitivity infrared (IR) photodetectors, which utilizes two photosignals received from two heat sources having different temperatures. It is shown that for  $\lambda_c \simeq 10\text{--}14\ \mu\text{m}$  a low temperature heat source is to be used. The photosignal measuring is performed for the element of a photodiode gage prepared on  $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  with  $x = 0.225$ , utilizing a heat source of which the temperature varied in the range 150–450 K. From comparison of experimental and calculated curves the value of  $\lambda_c$  for several temperature intervals is determined. The  $\lambda_c$  corrections is calculated due to photosensitivity spectrum deviations from the idealized one. Considerations in connection with optimal source temperature interval choice are formulated.