

УДК 621.372.2, 537.876.45

АНАЛИЗ РАБОТЫ ПАССИВНОГО ЛУЧЕВОДНОГО СПЕКТРОМЕТРА С ОХЛАЖДАЕМЫМ СЕЛЕКТИВНЫМ ПРИЕМНИКОМ

В. В. Завьялов

**Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН,
Московский физико-технический институт (государственный университет)**

Статья получена 3 января 2015 г.

Аннотация. Представлена методика расчета потоков излучения и выведены формулы для вычисления коэффициентов отражения (R) и пропускания (T) образцов при использовании пассивного спектрометра, состоящего из холодной (с температурой жидкого гелия) и теплой (с комнатной температурой) камер, соединенных между собой лучеводом. Селективный приемник располагается в холодной камере. В теплой камере, перекрывая апертуру многоволновой моды лучевода и по нормали к ней, помещен механический зеркальный обтюратор, позволяющий использовать модуляционную методику и синхронное детектирование сигналов. При измерениях с образцом, он устанавливается а) перед обтюратором и б) после обтюратора. Полученные при этих позициях сигналы от селективного приемника позволяют вычислить коэффициенты R и T образца. Данная методика предназначена для работы со слабым тепловым излучением терагерцового диапазона длин волн, в котором охлаждаемые приемники практически не имеют альтернативы, а активная спектроскопия с использованием интенсивного источника излучения затруднена или нежелательна.

Ключевые слова: терагерцовая спектроскопия, пассивная спектроскопия, радиометрия, тепловое излучение, лучевод.

Abstract. The procedure of measurements and the formulas for calculating the sample's reflection (R) and transmission (T) coefficients with the use of a passive terahertz spectrometer are presented. The passive spectrometer comprises of cold and room-temperature chambers interconnected via a multimode waveguide (light pipe).

Spectral selective liquid helium-cooled detector is placed at the cold side, and a specular disk shutter is positioned near the room-temperature end of the light pipe. The metered coefficients R and T can be calculated as a result of the two consecutive synchronous detection measurements — with the specimen placed before and after the shutter. Passive terahertz spectrometry based on the selective cooled detectors is a good alternative to active one when the use of a sophisticated terahertz radiation source is difficult or undesirable.

Key words: Terahertz spectroscopy, passive spectroscopy, radiometry, thermal radiation, light-pipe.

Спектрометр называют пассивным, если для определения спектральных зависимостей оптических свойств образца он использует лишь собственное тепловое излучение самого образца. Пассивные спектрометры применяются, например, для изучения атмосферы и ее загрязнения [1,2].

Отдельный интерес представляет случай, когда образец имеет температуру окружающей среды («комнатную» температуру) и находится с ней в тепловом равновесии. При этом справедлив закон Кирхгофа, согласно которому «в любой точке спектрального диапазона излучательная способность тела равна его поглотительной способности и не зависит от формы и химической природы тела». В результате, идущее от образца излучение имеет универсальное, описываемое формулой Планка «черно тельное» спектральное распределение и не несет информации о характеристиках самого образца. Чтобы обойти это ограничение достаточно, чтобы приемник, регистрирующий тепловое излучение от образца, находился при иной, лучше низкой температуре. В терагерцовом диапазоне длин волн для этой цели хорошо подходит, например, перестраиваемый селективный приемник [3], основанный на эффекте циклотронного резонанса электронов в кристалле InSb, работающий при температуре жидкого гелия. Использование терагерцового спектрометра в рассматриваемой нами конфигурации описано в работе [4]. Особый интерес представляет использование неселективных болометров совместно с

охлаждаемым фурье-спектрометром.

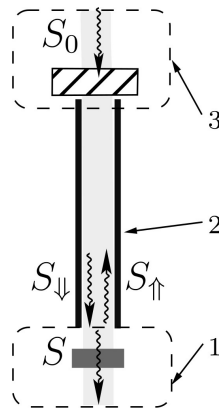


Рис 1. Схема потоков. 1 – холодная зона с селективным приемником излучения, 2 – многолучевой волноводный канал (лучевод), 3 – теплая зона для размещения объектов в спектрометре (образца, механического обтюратора, зеркала). S_0 – поток равновесного теплового излучения в апертуре волновой моды, S_{\downarrow} , S_{\uparrow} – потоки излучения, идущие по направлению к холодной (дьюар) и теплой (комната) зонам, S – поток излучения, поступающий на приемник в холодной зоне.

На рис.1 приведена схема, поясняющая принцип учета потоков излучения в пассивном лучеводном спектрометре. Селективный приемник 1 находится в холодной зоне. Многолучевой волноводный канал (лучевод) 2 ведет из холодной зоны в теплую зону 3. Измеряемый образец и прочие элементы спектрометра находятся в тепловом равновесии в теплой зоне, которая может быть заполнена теплообменным газом и имеет комнатную температуру.

При рассмотрении потоков излучения в спектрометре следует учитывать только те лучи, которые попадают в пределы многолучевой волновой моды. Диаграмма направленности этой моды формируется, в основном, исходя из условий распространения излучения в лучеводе, – благодаря малому поглощению параксиальных лучей при полном подавлении остальных, испытывающих множественные отражения от стенок лучевода, лучей. Такая модель хорошо подходит для металлических лучеводов и согласуется с результатами анализа литературных данных по их оптическим свойствам, – см., например, [5]. В формировании многолучевой волновой моды участвуют также

параксиальные лучи, отраженные от прочих объектов спектрометра. Эти объекты (приемник, измеряемый образец, окно, дополнительное зеркало), как предполагается, имеют форму пластин (пленок) и устанавливаются перпендикулярно оптической оси непосредственно у концов лучевода. Рассматриваемая волновая мода характеризуется площадью сечения Δs и величиной $\Delta\Theta$ эффективного телесного угла выходящего из лучевода пучка излучения. Далее мы будем считать, что угол $\Delta\Theta$ достаточно мал, чтобы оставаться в рамках параксиального приближения.

Определим величину потоков теплового излучения многолучевой волноводной моды вблизи холодного конца лучевода. Встречные потоки идущего по лучеводу излучения S_{\downarrow} и S_{\uparrow} выражаются так: $S_{\downarrow} = R_{\text{room}}p^2S_{\uparrow} + p(1-R_{\text{room}})S_0$, $S_{\uparrow} = R_cS_{\downarrow}$. Здесь R_{room} – энергетический коэффициент отражения от объектов, находящихся в теплой зоне над верхним концом лучевода, R_c – коэффициент отражения от элементов холодной зоны, p – коэффициент пропускания лучевода. Член $p(1 - R_{\text{room}})S_0$, записанный для потока равновесного теплового излучения объектов в теплой зоне, удовлетворяет волноводной форме закона Кирхгофа [6]. Что касается теплового излучения объектов в холодной зоне, то оно, при использовании охлаждаемых до гелиевых температур приемников, является несущественным, хотя в рамках данной модели его учет не представляет сложности. В результате, поток излучения, выходящий из лучевода в холодную зону на селективный приемник, можно записать в виде функции от R_{room} :

$$S \equiv \mathbf{S}(R_{\text{room}}) = (1 - R_c)S_{\downarrow} = S_0 \frac{p(1 - R_{\text{room}})(1 - R_c)}{1 - p^2 R_{\text{room}} R_c}. \quad (1)$$

Эта функция позволит нам далее проводить вычисления при различных сочетаниях устанавливаемых вблизи верхнего конца лучевода объектов в теплой зоне.

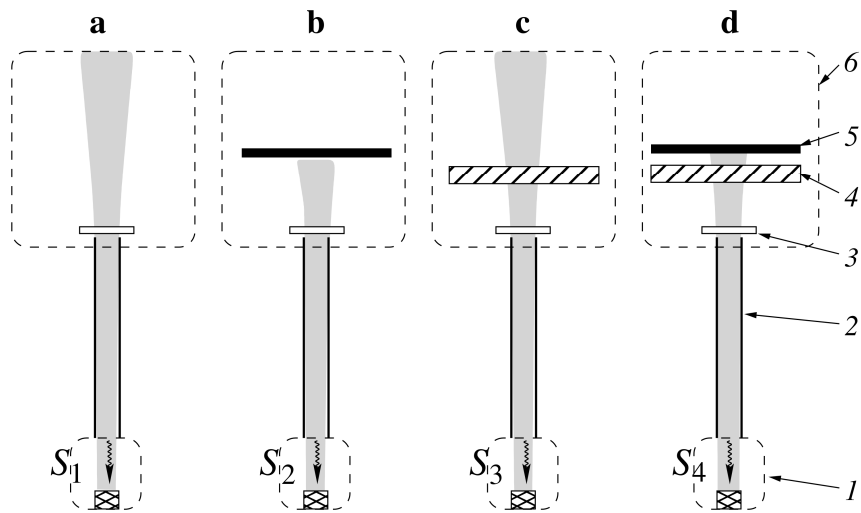


Рис. 2 Набор позиций, поясняющих работу спектрометра. 1– холодная зона с приемником излучения; 2– многолучевой волноводный канал; 3– окно; 4– образец в виде пластины или пленки; 5– зеркало. 6– зона равновесного теплового излучения комнаты. S_1, S_2, S_3, S_4 – потоки излучения, прошедшие на приемник.

Рассмотрим приведенные на рис.2 позиции объектов теплой зоны спектрометра и определим для каждой из них величину проходящего на приемник потока излучения. Измерив эти потоки, мы, далее, сможем вычислить спектральные энергетические характеристики измеряемого образца. При суммировании отраженных волн от объектов в теплой зоне спектрометра (образца, герметизирующего окна, дополнительного зеркала) мы будем для простоты считать излучение некогерентным, что справедливо, если длина когерентности, определяемая спектральным разрешением селективного приемника, достаточно мала. В то же время, спектральные характеристики самих элементов в спектрометре (измеряемый образец, окна), которые могут быть достаточно тонкими, могут проявлять интерференционный характер.

а) Верхний конец лучевода герметизирован окном, имеющим известные спектрально зависимые коэффициенты пропускания T_w и отражения R_w . Так как это окно в данной позиции является единственным установленным в теплой зоне объектом, то $R_{room} \equiv R_w$ и проходящее на приемник излучение, согласно (1), равно:

$$S_1 = \mathbf{S}(R_w) \quad (2)$$

b) На верхнем конце лучевода над окном добавлено зеркало. Расчет суммарного отражения этой пары дает $R_{\text{room}} \equiv R_w + T_w^2/(1 - R_w)$ и, следовательно,

$$S_2 = \mathbf{S} \left(R_w + \frac{T_w^2}{1 - R_w} \right). \quad (3)$$

c) На верхнем конце лучевода над окном установлен измеряемый образец, искомые коэффициенты пропускания отражения и поглощения которого: T_w , R_w , P_w . В этом случае

$R_{\text{room}} \equiv R_w + R_s T_w^2/(1 - R_s R_w)$ и, следовательно,

$$S_3 = \mathbf{S} \left(R_w + \frac{R_s T_w^2}{1 - R_s R_w} \right). \quad (4)$$

d) На верхнем конце лучевода над окном и измеряемым образцом поставлено зеркало. Вычислив коэффициент отражения от этой трехэлементной системы, получим аналогично:

$$S_4 = \mathbf{S} \left(R_w + \frac{\left(R_s + \frac{T_s^2}{1 - R_s} \right) T_w^2}{1 - R_w \left(R_s + \frac{T_s^2}{1 - R_s} \right)} \right). \quad (5)$$

Оптические характеристики образца можно вычислить из результатов отдельных измерений, проведенных при рассмотренных на рис.2 позициях объектов в теплой зоне спектрометра. Если вместо стационарного зеркала взять механический зеркальный обтюратор, то вся процедура сводится к трем измерениям (см. рис.3), в каждом из которых попеременно, с частотой модуляции обтюратора, регистрируется разностный сигнал от следующих пар позиций:

- $(S_1 - S_2)$ – «калибровка», – установлен только зеркальный обтюратор;
- $(S_3 - S_2)$ – «отражение», – образец поставлен перед обтюратором;
- $(S_3 - S_4)$ – «на проход», – образец установлен за обтюратором.

Следует отметить, что такая процедура, кроме всего прочего, позволяет использовать чувствительную модуляционную методику измерений с синхронным детектированием слабого сигнала с приемника.

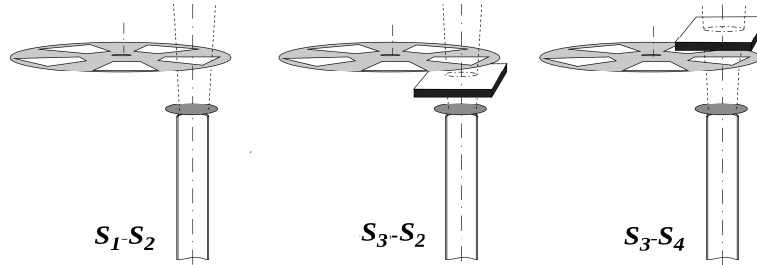


Рис.3 Процедура измерений с зеркальным обтюратором при различных позициях измеряемого образца.

Введем величины A и B , значение которых получаются в результате измерений:

$$A = (S_3 - S_2) / (S_1 - S_2), \quad B = (S_3 - S_4) / (S_1 - S_2), \quad (6)$$

Решая систему алгебраических уравнений (1,3-7) получаем:

$$R_s = \frac{(1 - p^2 R_c R_w) (1 - A)}{1 - R_w A - p^2 R_c ((T_w^2 - R_w^2) A + R_w)}, \quad (7)$$

$$T_s = \frac{(1 - R_w - p^2 R_c (T_w^2 - R_w^2 + R_w)) \sqrt{\frac{(1 - p^2 R_c R_w) AB}{1 - R_w (A - B) - p^2 R_c ((T_w^2 - R_w^2) (A - B) + R_w)}}}{1 - R_w A - p^2 R_c ((T_w^2 - R_w^2) A + R_w)} \quad (8)$$

Отметим, что в формулу для R_s входит лишь A , то есть данные в позиции $(S_3 - S_2)$ – «отражение», что позволяет производить непрерывный контроль за изменением отражения от образца без смены его позиции в спектрометре. При этом вначале достаточно измерить калибровочные данные в позиции $(S_1 - S_2)$.

Возможной альтернативой при выборе позиций может служить более сложное сочетание из четырех объектов с дополнительным зеркалом (на рис.2 и 3 не показано), а именно:

- $(S_4 - S_2)$ – «на проход с отражением», – окно → обтюратор → образец → зеркало.

В такой конфигурации измеряемым сигналом является $C = (S_4 - S_2) / (S_1 - S_2)$, а коэффициент пропускания вычисляется по формуле:

$$T_s = \frac{\left(1 - R_w - p^2 R_c (T_w^2 - R_w^2 + R_w)\right) \sqrt{\frac{(1 - p^2 R_c R_w) A (A - C)}{1 - R_w C - p^2 R_c ((T_w^2 - R_w^2) C + R_w)}}}{1 - R_w A - p^2 R_c ((T_w^2 - R_w^2) A + R_w)}, \quad (9)$$

которая совпадает с (8), потому что, как легко заметить, $C = A - B$.

Особый интерес представляет случай, когда величина p (коэффициент пропускания лучевода) мала. В этом случае многократно-отраженные лучи в лучеводе ослаблены и формулы (7-9) упрощаются:

$$R_s \xrightarrow{p^2 \rightarrow 0} \frac{1 - A}{1 - R_w A}, \quad T_s \xrightarrow{p^2 \rightarrow 0} \frac{1 - R_w}{1 - R_w A} \sqrt{\frac{AB}{1 - R_w (B - A)}} = \frac{1 - R_w}{1 - R_w A} \sqrt{\frac{A(C - A)}{1 - R_w C}}. \quad (10)$$

Замечательным свойством этого предельного случая является то, что результат, с точностью до членов разложения порядка p^2 , перестает зависеть от такой трудно-определимой спектрально-зависимой величины как R_c (коэффициент отражения от элементов холодной зоны). Однако на практике это означает, также, и сильное ослабление измеряемых приемником сигналов A, B, C .

Приложение.

При выборе приемника излучения полезно иметь представление об абсолютной интенсивности «чернотельного» теплового излучения S_0 (см. рис.1), поступающего из теплой зоны.

Величину этого потока, зависящего от угловой апертуры $\Delta\Theta$ и сечения Δs в частотном интервале $\Delta\nu$ можно оценить в соответствии с [7]:

$$S_0 = \int_{\nu}^{\nu+\Delta\nu} \frac{2c^2 h \nu^3 d\nu}{\exp(\frac{hc\nu}{kT}) - 1} \Delta s \Delta\Theta \xrightarrow{\nu=x\frac{kT}{hc}} \frac{15}{\pi^5} \sigma_0 T^4 \int_{hc\nu/kT}^{hc(\nu+\Delta\nu)/kT} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} \Delta s \Delta\Theta, \quad (11)$$

где T – температура, $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} = 5.67 \cdot 10^{-5} \frac{\text{г}}{\text{с}^3 \cdot \text{град}^4}$ – постоянная

Стефана-Больцмана, а частоты ν измеряются в обратных длинах волн.

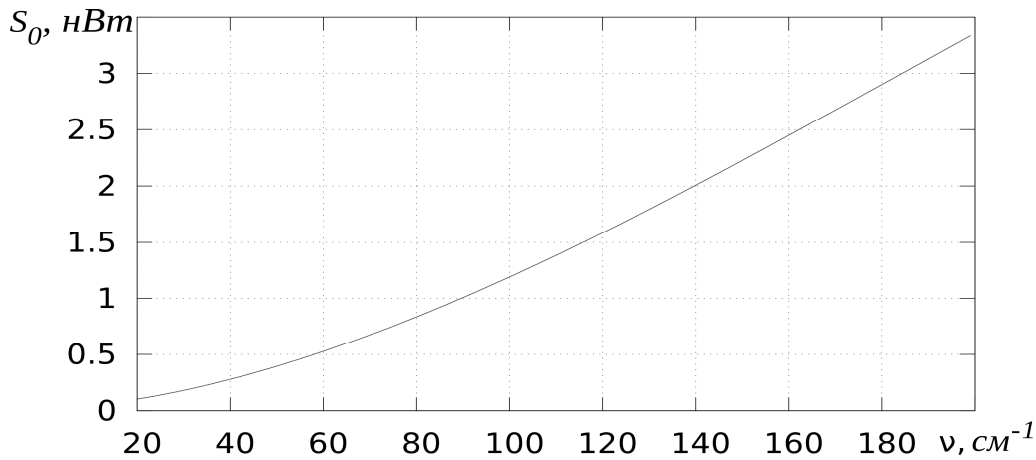


Рис 4. Спектральная зависимость мощности равновесного теплового излучения S_0 в полосе частот $\Delta\nu=15\text{см}^{-1}$ через площадку $\Delta s = 1.5 \text{ см}^2$ с угловой апертурой $\Delta\Theta=0.2$ стерadian.

На рис.4 приведен рассчитанный по этой формуле график спектральной зависимости мощности потока теплового излучения S_0 для типичных параметров апертуры лучевода реального прибора [3]: $\Delta s = 1.5 \text{ см}^2$, $\Delta\Theta=0.2 \text{ srad}$, $T = 300 \text{ К}$.

Литература

1. Rodgers C.D., «Retrieval of Atmospheric Temperature and Composition From Remote Measurements of Thermal Radiation» // Rev. Geophysics and Space Physics, vol. 14, pp. 609-624, Nov. 1976.

2. Kikuchi K., Kohjiro S., Yamada T., Shimizu N. and Wakatsuki A., «Compact terahertz passive spectrometer with wideband superconductor-insulator-superconductor mixer» //Rev Sci. Instr. Vol. 83, 023110, 2012.

3. Богомолов Г.Д., Завьялов В.В., Зотова Е.А., Шампаров Е.Ю., «Быстродействующий перестраиваемый детектор излучения субмиллиметрового диапазона на циклотронном резонансе в InSb» // ПТЭ 2002, вып. 1, стр.87-95.

4. Родэ, С.В., Шампаров Е.Ю. Установка для быстрой терагерцовой спектроскопии тонких диэлектрических материалов // Дизайн и технологии. 2010. № 18. С. 47-52.

5. Hawthorn D.G. and Timusk T., «Transmittance of skew rays through metal light pipes» // Appl. Opt., vol. 38, no. 13, pp. 2787—2794, May 1999.

6. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику, ч.2, гл.3, М.:Наука 1978.

7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: том V, Статистическая физика, 5-е изд., ч.1, §63. М.: ФИЗМАТЛИТ 2002.