

## ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

*А.А.Карабутов, И.А.Кудинов, В.Т.Платоненко, М.А.Согоян*

*Московский государственный университет, физический факультет*

*119899 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 23 ноября 1993 г.

Экспериментально исследуется тепловое излучение металлических дифракционных решеток с различной глубиной и периодом рельефа. Обнаружены пики спектрального коэффициента излучения в условиях проявления аномалий Вуда.

Проблема взаимодействия излучения с периодическими поверхностями составляет один из интенсивно развивающихся разделов оптики. Интерес к проблеме возник еще в начале века, когда Р.Вуд обнаружил аномалии дифракции электромагнитного излучения на дифракционных решетках [1]. С тех пор этой проблеме было посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ [2, 3]. В условиях проявления аномалий Вуда происходит резонансное возбуждение поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ), которое изменяет протекание физических процессов на поверхности решетки. В частности, было предсказано [4] и наблюдалось полное подавление зеркального отражения (ППЗО) и практически полное поглощение падающего излучения [5,6] в условиях резонансного возбуждения ПЭВ.

Исследования, проведенные в среднем ИК диапазоне, показали наличие у решеток резких и узких максимумов поглощения излучения. Можно ожидать, что аномалии, обусловленные резонансным возбуждением ПЭВ, будут иметь место и в тепловом излучении периодических поверхностей. Теоретические исследования этой проблемы нам неизвестны. Настоящая работа посвящена экспериментальным исследованиям теплового излучения дифракционных решеток.

Кратко напомним, что аномалии Вуда в угловых зависимостях коэффициента поглощения металлических решеток наблюдаются при резонансных углах падения  $\theta_0$  [2, 3]:

$$\theta_{0P} \simeq \arcsin|1 - l\lambda/d| \quad - \text{ при } P\text{-поляризации излучения,} \quad (1)$$

$$\theta_{0S} \simeq \arcsin[1 - (l\lambda/d)^2]^{1/2} \quad - \text{ при } S\text{-поляризации излучения,} \quad (2)$$

где  $\lambda$  - длина волны излучения,  $d$  - период,  $l$  - номер фурье-гармоники рельефа, причем только когда вектор электрического поля  $E$  перпендикулярен штрихам решетки. Такую поляризацию будем называть резонансной. Угловая зависимость резонансного поглощения определяется сверткой Вудовского резонанса решетки, углового и частотного спектров излучения [2, 3, 5, 6]. Ширина и величина вудовского резонанса решетки определяется оптическими и геометрическими параметрами рельефа.

В экспериментах использовались металлические дифракционные решетки, на которых ранее нами наблюдались узкие (до  $10^\circ$ ) и эффективные (до 100%) пики поглощения в области длин волн  $\lambda = 10,6 \mu\text{м}$  [5, 6]. Исследуемая решетка закреплялась в специально изготовленной печи, расположенной на

поворотном столике. Температура нагрева объектов исследований варьировалась в пределах от 200 до 400°С и контролировалась с помощью термопары ХА. Точность измерения углов поворота столика была не хуже 20'.

На расстоянии 50 см от решетки располагалась собирающая линза с фокусным расстоянием  $f = 9$  см. В фокальной плоскости линзы располагалась входная щель монохроматора SPM2. С помощью линзы и входной щели монохроматора из углового спектра излучения нагретого объекта выделялся угловой спектр с шириной  $\Delta\varphi = b/f$ , где  $b$  – ширина входной щели монохроматора. Кроме того, с помощью монохроматора из частотного спектра излучения объекта выделялась узкая полоса  $\Delta\lambda = bs$ , где  $s$  – характеристика призмы монохроматора, в области  $\lambda = 5,0$  мкм. Изменяя ширину входной щели монохроматора, можно варьировать ширину углового и частотного спектров регистрируемого излучения. Поляризация излучения в экспериментах не выделялась.

Изображение выходной щели монохроматора фокусировалось на приемную площадку фотосопротивления ФСГ-223А2, размещенного в азотном криостате. Излучение объекта модулировалось с помощью механического прерывателя, расположенного перед входной щелью монохроматора. Модулированный сигнал с фотоприемника поступал на вход синхронного детектора с постоянной времени  $\tau = 7$  с. Показания детектора были пропорциональны мощности излучения, испускаемого нагретым объектом исследований в узком угловом и спектральном диапазонах на длине волны  $\lambda = 5,0$  мкм. Абсолютная калибровка коэффициента излучения объектов была проведена по излучению графита в предположении, что его коэффициент излучения на длине волны  $\lambda = 5,0$  мкм составляет 50% [7]. Нижний предел измеряемых мощностей излучения ограничивался шумами фотосопротивления. Этими же шумами определялась относительная ошибка измерений коэффициента излучения объектов.

Правильность работы собранной установки проверялась измерениями угловой зависимости коэффициента излучения  $T$  алюминиевого зеркала. Результаты эксперимента изображены на рис.1 (кривая 1). Как видно из рисунка, данные эксперимента соответствуют френелевскому излучению гладкой металлической поверхности при наличии  $S$ - и  $P$ -поляризации излучения [2, 3, 5–7].

На рис.1 изображены угловые зависимости коэффициента излучения медной решетки с периодом  $d = 12,1$  мкм и глубиной рельефа  $h = 0,22$  мкм при резонансной  $P$ -поляризации излучения (кривые 2, 3). Как видно из графиков, в условиях проявления аномалий Вуда при  $P$ -поляризации излучения (1) наблюдается пик излучения:  $\theta_{0P}^{theor}(l=1) = 36^\circ$ ,  $\theta_{0P}^{exp}(l=1) = 40,5^\circ$ . Его угловая ширина по уровню 1/2 составляет  $4^\circ$ , что совпадает с расчетом, учитывающим ширину углового ( $\Delta\varphi \simeq 1^\circ$ ) и частотного ( $\Delta\lambda \simeq 0,45$  мкм) спектров регистрируемого излучения [2, 3, 5, 6]. Сужение входной щели монохроматора с  $b = 1,5$  мм (кривая 2) до  $b = 1$  мм (кривая 3), уменьшающее ширину углового и частотного спектров регистрируемого излучения, приводит к сужению наблюдаемого пика излучения и увеличению его амплитуды. Таким образом, наблюдаемый пик излучения определяется сверткой вудовского резонанса излучения решетки, углового и частотного спектров регистрируемого излучения. К сожалению, из-за недостаточной чувствительности системы регистрации не представлялось возможным определить амплитуду и угловую ширину вудовского резонанса излучения решетки. При дальнейшем сужении входной щели

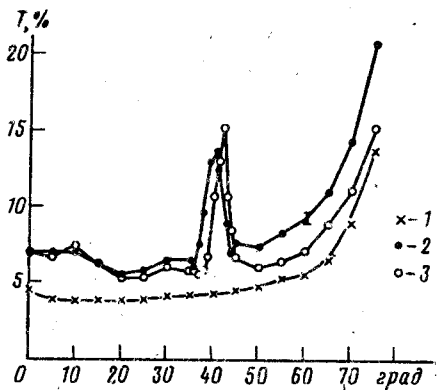


Рис.1

Рис.1. Угловая зависимость спектрального ( $\lambda = 5 \text{ мкм}$ ) коэффициента излучения: кривая 1 — алюминиевого зеркала; 2, 3 — медной дифракционной решетки при резонансной  $P$ -поляризации излучения и ширине входной щели монохроматора  $b = 1,5 \text{ мм}$  и  $b = 1 \text{ мм}$ , соответственно

Рис.2. Спектральная зависимость отношения  $K$  коэффициентов излучения медной решетки и алюминиевого зеркала при резонансном угле  $\theta_{0P}^{exp}(l=1) = 40,5^\circ$ .

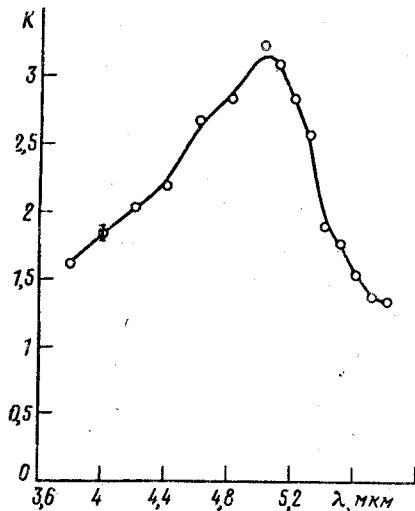


Рис.2

монохроматора сигнал исчезал на фоне шума фотосопротивления. Необходимо отметить, что вне условий проявления аномалий Вуда коэффициент излучения решетки соответствует френелевскому.

Очевидно, что аномалии Вуда должны проявляться не только в угловом, но и в спектральном распределении теплового излучения решетки. На рис.2 представлена зависимость от длины волны отношения  $K$  коэффициентов излучения медной решетки и алюминиевого зеркала при резонансном угле  $\theta_{0P}^{exp}(l=1) = 40,5^\circ$ . Как видно из графика, и в этой зависимости наблюдается пик, связанный с проявлением аномалии Вуда.

На рис.3 изображена угловая зависимость коэффициента излучения позолоченной решетки с периодом  $d = 10,0 \text{ мкм}$ , глубиной рельефа  $h = 4,7 \text{ мкм}$  и углом блеска около  $35^\circ$  при резонансной  $P$ -поляризации излучения. Как видно из графика, несимметричность рельефа приводит к несимметричности угловой зависимости коэффициента излучения относительно нормали к поверхности. Этот же факт отмечался и при исследованиях коэффициента поглощения таких решеток [6]. В угловой зависимости коэффициента излучения наблюдаются пики излучения в условиях проявления аномалий Вуда  $l = 1$  и  $l = -3$  порядков:  $\theta_{0P}^{theor}(l=1) = 30^\circ$ ,  $\theta_{0P}^{exp}(l=1) = 35^\circ$ ,  $\theta_{0P}^{theor}(l=-3) = 30^\circ$ ,  $\theta_{0P}^{exp}(l=-3) = 20^\circ$ . Как и в случае медной решетки, наблюдается некоторое расхождение экспериментальных и теоретических значений резонансных углов. Это объясняется тем, что приведенные формулы (1), (2) носят приближенный характер и не учитывают конечности оптических констант и формы рельефа поверхности. Учет конечности оптических констант и геометрических параметров рельефа приводит к сдвигу резонансного угла, причем с ростом глубины рельефа сдвиг увеличивается [2, 3].

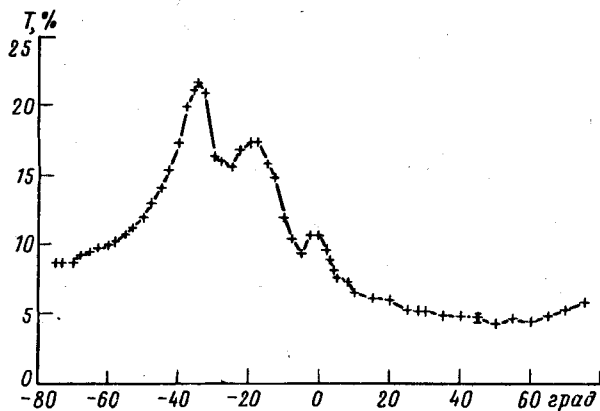


Рис.3. Угловая зависимость спектрального ( $\lambda = 5$  мкм) коэффициента излучения позолоченной дифракционной решетки с углом блеска при резонансной  $P$ -поляризации излучения

Большая угловая ширина гиков излучения золотой решетки свидетельствует о том, что они определяются вудовским резонансом излучения решетки, а его большая угловая ширина определяется большой глубиной рельефа, сравнимой с длиной волны [3,6].

Таким образом, в работе найдены пики коэффициента излучения металлических дифракционных решеток, связанные с проявлением аномалий Вуда. Амплитуда наблюдаемых пиков практически в два раза превышает фоновое излучение. Однако вопрос о том, какой величины могут достигать такие пики излучения, остается до конца не исследован ни теоретически, ни экспериментально.

1. R.W.Wood, *Phil. Mag.* **4**, 396 (1902).
2. В.И.Емельянов, В.Н.Семиногов, *Итоги науки и техники. Физические основы лазерной и пучковой технологии*, М.: ВИНТИ, **3**, 57 (1989).
3. В.Я.Панченко, В.Н.Семиногов, В.И.Соколов, *Итоги науки и техники. Физические основы лазерной и пучковой технологии*. М.: ВИНТИ **3**, 93 (1989).
4. D.Maestre and R.Petit, *Opt. Comm.* **17**, 196 (1976).
5. А.А.Карабутов, И.А.Кудинов, В.Т.Платоненко, М.А.Согоян, *Вестник Моск. ун-та, сер. 3, Физика. Астрономия* **33**, 45 (1992).
6. А.А.Karabutov, V.N.Seminogov, M.A.Sogoyan, and V.I.Sokolov, *Laser Physics* **3**, 1168 (1993).
7. Ж.Госсорг, *Инфракрасная термография*, М.: "Мир", 1988.