

光热辐射技术中二次谐波的特性研究*

王钦华 李佩赞

(苏州大学物理系, 苏州 215006)

提 要

本文从理论和实验上讨论了光热辐射技术中二次谐波振幅和位相的频率特性, 随样品厚度的变化特性以及随激励光功率的变化特性并与基波信号作了比较.

关键词 光热辐射, 二次谐波.

1 引 言

近年来, 光热辐射测量(PTR)技术作为一门新的材料光学和热物理参数的测量方法或无损检测的手段, 已经得到了许多重要应用^[1~3]. 在光热辐射理论的建立过程中, 一个基本的假设就是认为样品材料的热导率是一个不随温度变化的常数. 因而所探测的是与激励光的调制频率相同的红外辐射变化量. 文献[4]给出了这个基波温度场的表达式. 实际上, 样品材料的热导率并不是常数^[5], 尤其当激励光功率较大时, 热导率随温度变化而产生的非线性效应就不能忽视. 文献[6]首次建立了非线性的光热辐射理论模型, 导出了二次谐波的表达式. 本文将进一步详细讨论二次谐波的基本特性, 并与基波信号进行比较, 揭示出光热辐射二次谐波的独特性质. 最后, 进行了实验验证.

2 理论分析

仅考虑一维热传导情形(如图1). 设有一束波长为 λ 、光强为 $I = I_0[1 + \exp(j\omega t)]$ 的调制光照射样品(其中 I_0 为入射光强幅值, ω 为入射光的调制频率), 光被样品吸收后导致样品表面温度上升 δT , 因而样品热辐射的增量为 $\delta w = 4\epsilon\sigma T_0^3\delta T$ (ϵ 为样品的发射率, T_0 为表面静态温度, $\sigma = 5.67 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$). 由于样品热导率的温度依赖性, 在 δw 中含有多种频率成分的热谐波. 在温度变化范围不太大时, 可设样品的热导率为:

$$K_s = K_0[1 + b\phi_s(x, t)] \quad (1)$$

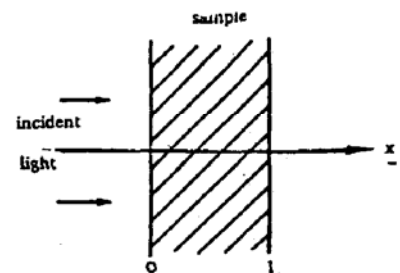


Fig. 1 Schematic diagram of the one-dimensional configuration

收稿日期: 1992年7月7日

* 国家自然科学基金资助的项目.

其中 K_0 为稳态温度下样品的热导率, b 为热导率的温度系数 ($b \ll 1$). 将(1)式代入热波方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_s \frac{\partial \phi_s(x,t)}{\partial x} \right] = \rho c \frac{\partial \phi_s(x,t)}{\partial t} - S(x,t),$$

经简单运算, 并忽略 b^2 项, 即可得一非线性热波方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \phi_s(x,t)}{\partial x^2} = & \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \phi_s(x,t)}{\partial t} - \frac{b}{\alpha_s} \phi_s(x,t) \frac{\partial \phi_s(x,t)}{\partial t} + b \phi_s(x,t) \frac{S(x,t)}{K_0} \\ & - b \left[\frac{\partial \phi_s(x,t)}{\partial x} \right]^2 - \frac{S(x,t)}{K_0}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $\phi_s(x,t)$ 为样品中的温度场, ρ, c 分别为样品的密度和热容量, $S(x,t) = \beta(1 - \beta') I_0 \exp(-\beta x) \exp(j\omega t)$ 为样品中的内热源, $\alpha_s = K_0/\rho c$ 为样品的热扩散率, β 为样品的体吸收系数 (cm^{-1}), β' 为样品的表面吸收率. 利用逐步近似法求解. 设解为:

$$\phi_s(x,t) = \phi_{s1}(x,t) + \phi_{s2}(x,t) + \dots, \quad (3)$$

其中 $\phi_{s1}(x,t)$, $\phi_{s2}(x,t)$ 分别表示基波和二次谐波的温度场. 将(3)式代入(2)式后, 可得到描述二次谐波的热波方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \phi_{s2}(x,t)}{\partial x^2} = & \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \phi_{s2}(x,t)}{\partial t} - \frac{b}{\alpha_s} \phi_{s1}(x,t) \frac{\partial \phi_{s1}(x,t)}{\partial t} + b \phi_{s1}(x,t) \frac{S(x,t)}{K_0} \\ & - b \left[\frac{\partial \phi_{s1}(x,t)}{\partial x} \right]^2 + \frac{b}{K_0} S(x,t) \phi_{s1}(x,t), \end{aligned} \quad (4)$$

与(4)式对应的边界条件可表示为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \phi_{s2}(0,t)}{\partial x} &= \frac{b\beta' I_0}{K_0} \phi_{s1}(0,t) \exp(j\omega t), \\ \frac{\partial \phi_{s2}(l,t)}{\partial x} &= -\frac{b\phi_{s1}(l,t)}{K_0} \beta' (1 - \beta') I_0 \exp(-\beta l) \exp(j\omega t). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

对于光学上不透明的样品或金属样品, 有 $\exp(-\beta l) \rightarrow 0$, $|\beta/\sigma_s| \gg 1$, 则从(4)、(5)式可解得样品前表面和后表面的二次谐波温度场为:

$$\left. \begin{aligned} \phi_{s2}(0) &= \frac{bI_0\phi_{s1}(0)[\exp(d_s l) + \exp(-d_s l)]}{K_0 d_s [\exp(d_s l) - \exp(-d_s l)]} - \frac{bI_0^2 [\exp(2\sigma_s l) + \exp(-2\sigma_s l)]}{K_0^2 \sigma_s^2 [\exp(\sigma_s l) - \exp(-\sigma_s l)]^2}, \\ \phi_{s2}(l) &= \frac{2bI_0\phi_{s1}(0)}{K_0 d_s [\exp(d_s l) - \exp(-d_s l)]} - \frac{2bI_0^2}{K_0^2 d_s^2 [\exp(\sigma_s l) - \exp(-\sigma_s l)]^2}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中 $\phi_{s1}(0)$ 为样品前表面的基波温度场^[4], $\sigma_s = (j\omega)/\alpha_s$, $d_s = \sqrt{2} \sigma_s$. 式中涉及的参数包括: 调制频率 ω , 样品的热物理参数和厚度以及激励光强度. 通过对(6)式进行复数运算, 可分别得到二次谐波温度场的振幅和位相.

2.1 二次谐波随激励光强度的变化特性

方程(6)式表明: 二次谐波信号不仅来源于激励光强度 I_0 , 还来自样品前表面的基波温度场 $\phi_{s1}(0)$. 二次谐波信号与激励光强度 I_0 的平方成正比, 而基波信号与激励光强度 I_0 成线性关系. 这一特性也是非线性光热偏转技术中二次谐波的一个基本特性^[7~8].

2.2 二次谐波的频率特性

限于篇幅, 下面主要讨论后表面二次谐波的特性. 图 2(a), 2(b) 分别给出了样品后表面温度场的振幅和位相的频率特性. 选用的紫铜样品的参数为: 热导率 $K_0 = 386 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, 热扩散率 $\alpha_s = 11.234 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{S}$. 可以看出: 第一是随着调制频率逐渐增大, 二次谐波的振幅逐渐减小,

位相延迟逐渐增大. 同时, 对于不同的样品厚度 l , 其振幅和位相的频率特性也各有差异, l 较小时, 基波和二次谐波的振幅特性差异较大, 反映在二次谐波的振幅随频率的变化率比基波大. 而当 l 增大时, 则表现在二次谐波的位相随频率的变化率显著增加; 第二是随着 l 的变化, 基波的振幅随频率的变化率几乎不变, 而二次谐波的振幅随频率的变化率则表现出较大差异. 这反映了二次谐波对样品厚度变化的敏感性. (图中①、②所对应的样品厚度分别为 0.1 mm 和 0.47 mm)

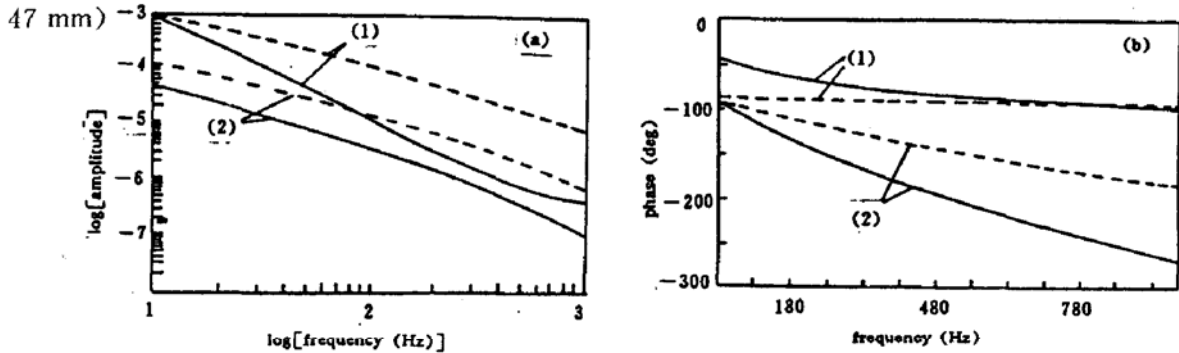


Fig. 2 The frequency characteristics of second-harmonic normalized amplitude (a) and phase (b) of the sample rear-surface. ---, fundamental; —, second-harmonic

2.3 二次谐波随样品厚度的变化特性

图 3(a), 3(b) 给出了样品后表面的振幅和位相随样品厚度变化的特性. 可以看出, 无论是振幅还是位相, 二次谐波随样品厚度的变化率都比基波信号的变化率大. 利用这一特性, 可以预期二次谐波将比基波有较高的检测灵敏度. (有关这方面的结果将另文发表). 从图中还可以看到, 随着频率的增大, 位相随厚度的变化率增大, 这预示着位相的检测灵敏度随频率的增加而增加. 但同时, 二次谐波的振幅却随着频率的增加而下降, 这意味着测量的信噪比下降. 因此, 在测量过程中, 要选择合适的调制频率. (图中①、②对应的调制频率分别为 15 Hz 和 40 Hz).

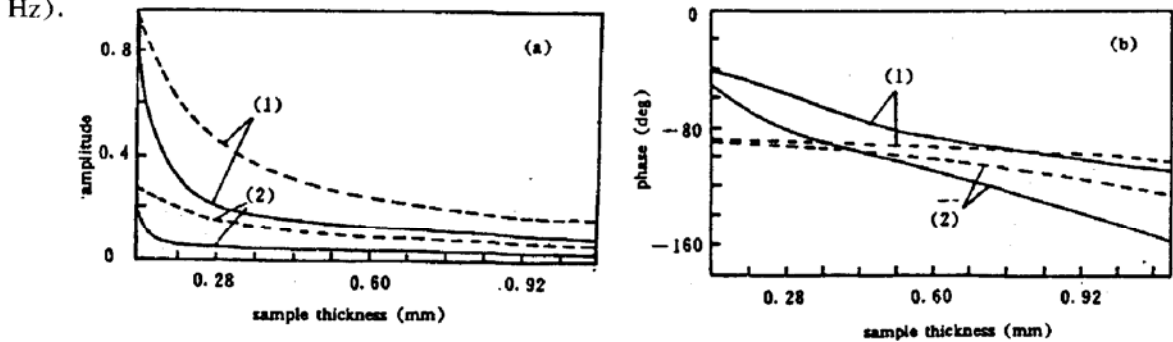


Fig. 3 The second-harmonic normalized amplitude (a) and phase (b) of the sample rear-surface versus sample thickness. ---, fundamental; —, second-harmonic

3 实验测量

实验装置如图 4 所示, 波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 、功率约为 8 W 的 CO_2 激光经调制器 C 照射到样品上, 引起样品内部周期性热效应, 并由此引起热辐射变化, 在样品后用一致冷的 HgCdTe 红外探测器 D 探测变化的辐射信号, 再经低噪声前置放大器 P, 输入双通道锁相分析器以检

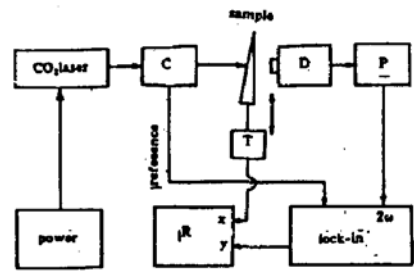


Fig. 4 Schematic of experimental setup

测光热辐射信号的振幅和位相. 样品可通过扫描控制器 T 作一维移动, 信号由记录仪 R 同步记录.

实验测量采用的是一楔形紫铜样品, 厚度为 $0.1 \sim 0.8$ mm. 图 5 给出了样品厚度为 0.35 mm 时, 后表面的二次谐波频率特性的实验曲线. 图 6 给出了频率为 10 Hz 时后表面二次谐波随样品厚度的变化特性的实验和理论曲线.

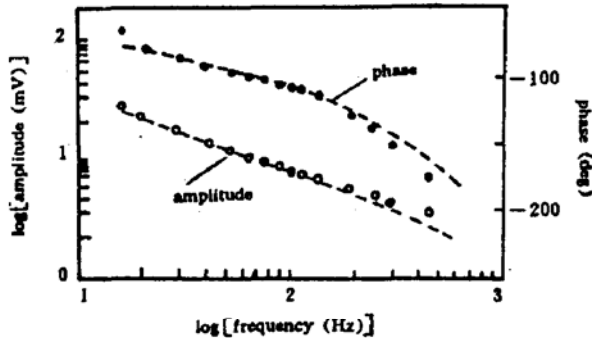


Fig. 5 Experimental curves of second-harmonic frequency characteristics
— — —, theoretical; •, experimental.

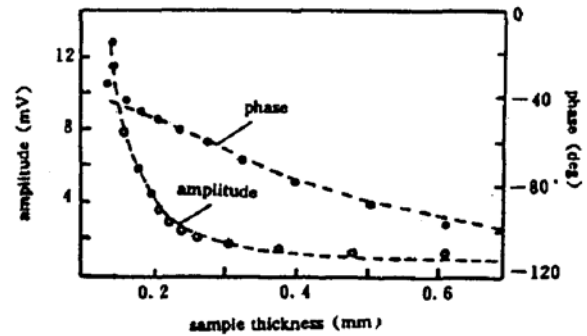


Fig. 6 Experimental curves of second-harmonic amplitude and phase versus sample thickness.
— — —, theoretical; •, experimental

4 结 论

无论是基波还是二次谐波, 其光热辐射信号都依赖于材料的光学性质、热物理性质、样品厚度以及调制频率和激励光强度. 但二次谐波的频率特性、随样品厚度的变化特性以及与激励光强度的关系都反映出其独特的性质. 特别是在振幅和位相的检测灵敏度上, 它明显优于基波信号. 虽然在测量过程中, 二次谐波的信号比基波弱, 但这可以通过电子技术予以补偿, 而电子技术则不能改变光热信号的性质. 因此, 这一非线性光热辐射技术作为光热测量的一个新发展, 必将在进一步的应用研究中显示出它的优越性.

参 考 文 献

- [1] P. E. Nordal and S. O. Kanstad, Photothermal radiometry, *Infrared Phys.*, 1985, **25**(2): 295~304
- [2] L. Qian and P. Z. Li, photothermal radiometry measurement of thermal diffusivity, *Appl. Opt.*, 1990, **29**(28): 4241~4243
- [3] G. Busse and P. Eyerer, Thermal wave remote and nondestructive inspection of polymers, *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**(4): 355~357
- [4] 管国兴, 郑小明, 李佩赞, 光热辐射技术中振幅和相位公式的推导及验证, *红外研究*, 1988, **7**(3): 201~204
- [5] Sadik Kakac and Yaman Yeuer, *Heat Conduction*. Springer-Verlag, Berlin, 1985, pp. 18
- [6] C. H. Wang, P. Z. Li, Nonlinear theory and experiment of photothermal radiometry, *Can. J. Phys.* (to be published)
- [7] Grover C. Wetsel, Jr. and James B. Spicer, Nonlinear effects in photothermal-optical-beam-deflection imaging, *Can. J. Phys.* 1986, **64**(7): 1269~1275
- [8] Y. N. Rajakarunanyake and H. K. Wickramasighe, Nonlinear photothermal imaging, *Appl. Phys. Lett.* 1986, **48**(3): 218~220

Study on the characteristics of second harmonic in PTR

WANG Chinhua LI Peizan

(Department of Physics, Suzhou University, Suzhou 215006)

(Received 7 July 1992)

Abstract

In this paper, the frequency characteristics, dependences of second-harmonic amplitude and phase on the sample thickness and the excitation power have been discussed theoretically and experimentally. The comparison between fundamental signal and second-harmonic signal also has been presented.

Key words: photothermal radiometry (PTR), second-harmonic signal.

世界光学大会在上海举行

世界光学大会于 1993 年 8 月 30 日~9 月 3 日在上海天马大酒店举行. 会议由中国科学院(北京)、光学学会(北京)、物理学会(北京)、光学工程学会(台北)和中华光电学会(洛杉矶)发起, 中国科学院上海光学精密机械研究所负责组织. 会议由学部委员、上海光机所所长徐至展教授任组织委员会主席, 学部委员王之江教授任节目委员会主席, 学部委员、中国光学学会理事长王大珩教授任名誉主席. 参加这次大会的代表主要是世界各地的华人和中国留学人员, 他们分别来自澳大利亚、加拿大、德国、日本、新加坡、瑞士、英国和美国等国家以及香港地区和海峡两岸的中国学者. 这是继 1985 年光学年会之后我国光学界著名人士的又一次盛会. 出席这次世界光学大会的除了王大珩、王之江、干福熹、母国光、匡定波、徐至展、侯洵等七位学部委员外, 还有许多高校和研究室的著名光学专家. 会议于 8 月 31 日上午开幕, 由组织委员会主席徐至展教授致开幕词、上海市副市长徐匡迪教授致欢迎词、中国光学学会理事长王大珩教授讲话, 来宾李齐湘教授和林敏雄教授代表来自世界各地的与会者发言. 共同预祝会议圆满成功. 接着代表们合影留念. 下午起即进入既紧张而又热烈的学术交流活动.

大会共收到来自世界各地投稿共 370 篇. 经组织委员会和节目委员会联席会议, 并邀请部份专家对来稿进行了认真评议, 选出其中 240 篇作为会议交流报告. 这些录用论文议题包括: 激光器件、激光光谱、非线性光学、光电器件、量子光学、导波光学、光学信息处理与光计算、技术光学和工程光学、生物医学、光学材料等. 学术交流分宣讲和张贴两种方式进行. 从这些录用报告中可以看到, 当前激光器的研究热门课题应推 CO_2 激光器和掺钛蓝宝石激光器; 在短波长激光研究领域, 人们对上海光机所在 LF12 高功率激光装置上完成的复合泵浦 x 射线激光研究的全面、深入、细致的工作, 给人留下深刻的印象; 而从论文论题来看, 光学信息处理与光计算是当前的光学前沿最活跃的领域, 人们为了进一步提高电子计算机运算速率正寄希望于

(下转 933 页)