

最近の技術から

光音響顕微鏡

小島 誠治

筑波大学理工工学系 〒305 つくば市天王台 1-1-1

1. はじめに

不透明物体の微小な欠陥を可視化する手段として、超音波やX線の伝播過程の乱れを映像化する方法は古くから知られている。一方この10年ぐらいでは、強度変調光により微小な熱源を設け試料の内部構造を熱波の反射、屈折、散乱、吸収によりとらえる光音響顕微鏡(photoacoustic microscope, PAM)もセラミクス、電子材料等の非破壊検査法として注目されている。さらにPAMでは微小試料や微小領域における光吸収スペクトルや熱拡散率の定量化が行なえるので分析装置としての機能も備えている。この特徴は大型単結晶の得にくい酸化物超電導体を始めとして各種の材料研究への応用にも期待が寄せられている。

2. 光音響効果とその検出法

物質に断続光を照射すると吸収による発熱により、表面付近に交流的な温度変化が生じる。このため表面に接した気体は膨張、収縮を繰り返し音響信号が発生する。これを光音響効果といい、物質固有の光吸収と熱拡散過程についての情報を担っている。この効果は音響センサーにより高感度でとらえられるところに特徴があり、その応用として光吸収スペクトルを調べる光音響分光法(PAS)と、光音響信号の空間的分布を表示する光音響顕微鏡がある。

信号の検出方式には、(1)ガス・マイクロフォン法、(2)光ビーム偏向法、(3)光熱ビーム偏向法、(4)圧電素子法、(5)光熱放射法、があり、いずれもPAMに応用されている¹⁻⁵⁾。(1)は密閉セル内に試料を入れ、中のガス圧の変化をマイクロフォンにより測定する方法である。開放型セルも考案されているが感度は低下する。(2)は照射領域付近のガスの屈折率変化を、試料表面に沿って進むプローブレーザー光の偏向としてとらえる方式であり、(1)のようなセルは不用であるが変調周波数は高くできない。(3)はプローブビームを照射領域に直接当てて反射ビームの偏向を調べる。高い変調周波数が

可能であるが、熱弾性歪みによる表面変形と空気の屈折率変化の両方による偏向なので定量的解析は容易ではない。(4)は熱弾性歪みに起因する試料内の弾性波を圧電素子で検出する方式であり真空中でも使用できる。以上の場合の空間分解能はビームのスポットサイズと熱拡散長 $\mu = \sqrt{\pi f l \alpha}$ (α : 試料の熱拡散率, f : 変調周波数)で決まる。実際には前者は十分に絞れるため後者で決まり、 $1\mu\text{m}$ の分解能では材料により $10^5 \sim 10^7 \text{Hz}$ である。(5)は光吸収による発熱を赤外センサーによりとらえる方式であり、感度が低いため空間分解能は高くないが半導体結晶の転位密度を調べることができる。

3. P A M

ここでは筆者らの試作したガス・マイクロフォン法によるPAMについてその概略と機能を述べる⁶⁾。ブロック図(図1)に示すように信号の励起にはHe-Neレーザーを用い強度変調はAO素子により行なっている。図中の光音響セルは温度可変型でプローブチューブを使用しているが、常温で画像を調べるには試料のサイズに応じて図2に示すような簡易型セルを用いれば十分である。音響信号はコンデンサマイクロフォンにより受信し増幅した後ロックインアンプに導かれる。画像を得るための二次元走査は一方向が直角プリズムの振動によるビーム走査、他の一方向はパルスステージによるセルの移動により行ない、画像情報はパーソナルコンピューターに取り込まれて処理される。

画像の例として表面下 $5\mu\text{m}$ に半径 $150\mu\text{m}$ の円筒形の空洞があるFe-Si系合金試料の光音響像を図3に示す。空洞直上の発熱では下方への拡散がないため光音響信号は増大する。一般にこの種のPAMでは図4に示すような固体材料のいろいろな構造を調べることができる。

次にPAMの定量機能であるが、扱える物理量としては(I)光吸収係数、(II)熱拡散率、(III)弾性率がある。このうち(I)はPASと同様でどの検出方式でも容易に行なうことができ、また(III)はレーザー走査型超音

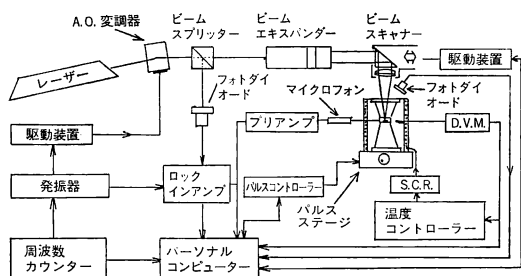


図 1 光音響顕微鏡のブロック図

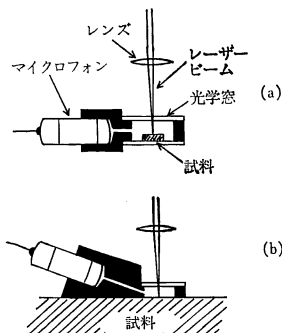


図 2 簡易型光音響セル
(a)小型試料用, (b)大型試料用

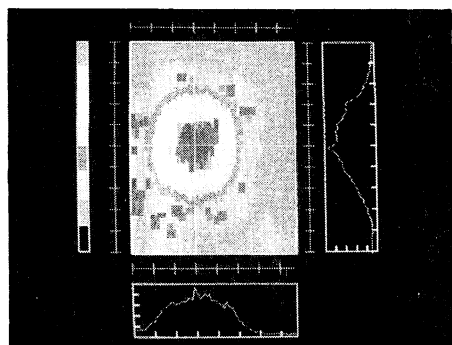


図 3 表面下に半径 150 μm の空洞があるインコネル試料の光音響画像

波頭顕微鏡 (SLAM)⁷⁾ のほうが精度的に優れている。(II) について定量化できる検出方式は前者の(1)(2)(4)である。(2)はプローブビームの方向を回転させることにより異方性をとらえることができる有力な方法であるが、測定系の設定条件はきわめて厳しい⁸⁾。(1)(4)により試料の厚み方向の熱波の位相遅延を測る方法は比較的よく研究されており、多層膜試料への拡張も試みられている。筆者は試料の縁で強度が増大するエッジ効果を(1)の方法により高い精度で調べることを行なっている。図5はアモルファス FeNi リボン (厚み 40 μm) のエッジ付近における光音響信号のふるまいである⁹⁾。横軸 270 μm の極大がエッジでありそれより左側は試料に

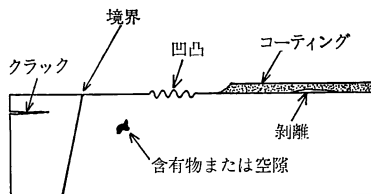


図 4 光音響顕微鏡により調べることのできる固体試料の構造

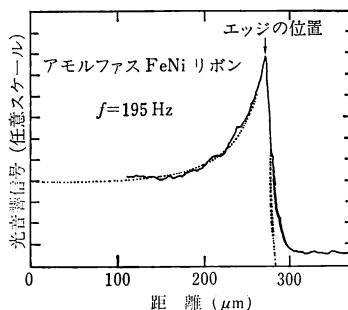


図 5 アモルファス FeNi リボン (厚さ 40 μm) のエッジ効果
実線は実験値, 点線は熱拡散率 $\alpha = 1.7 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{s}$ での計算値。

よる信号である。試料側の曲線の解析より熱拡散率 $\alpha = 1.7 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{s}$ が求まる。

4. む す び

光音響効果の検出方法とガス・マイクロフォン法による光音響顕微鏡の一端を述べたが、この方式に限らず画像を出すという点でのハードはすでに完成の域に入っている。今後は固体素子、材料の評価法として異方性を含めた熱拡散率の高精度の定量化や、それらの多層膜試料への拡張などが望まれており、さらにこれらの定量性に基づく画像の統計処理ならびに認知のソフトウェアの開発も重要であると考えている。

文 献

- 1) A. Mandelis (ed.): *Photoacoustic and Thermal Wave Phenomena in Semiconductors* (North-Holland, Amsterdam, 1987)
- 2) A. C. Tam: *Rev. Mod. Phys.*, **58** (1986) 381.
- 3) 杉谷嘉則: *光学*, **14** (1985) 108.
- 4) 坪内和夫, 御小柴宣夫: *応用物理*, **56** (1987) 883.
- 5) 沢田嗣郎, 笠井正信: *分光研究*, **33** (1984) 307.
- 6) S. Kojima: *Proc. Toyohashi Int. Conf. Ultrasonic Technology* (1987) p. 141.
- 7) 大石 学, 野口健一: *固体物理*, **22** (1987) 543.
- 8) G. Changming and Z. Xiaorong: *Proc. 5th Int. Meet. Photoacoustics and Photothermal Phenomena* (Springer-Verlag, Berlin, Heiderberg, 1988) p. 335.

(1988年5月7日受理)