エバネッセント光による超音波音場の計測

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 電子情報通信学会 公開日: 2020-05-27 キーワード (Ja): 超音波パルス, エバネッセント波, 音場, 音響光学 キーワード (En): 作成者: 清水, 壮, 崔, 博坤 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/20883

社団法人 電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
TECHNICAL REPORT OF IEICE.
US96-95, EA96-99(1997-01)

エバネッセント光による超音波音場の計測

清水 壮、崔 博坤
明治大学理工学部物理学科
214 川崎市多摩区東三田1-1-1
044-934-7437 E-mail:ae00087@isc.meiji.ac.jp

あらまし： 超音波パルス波形を広帯域で検出できる新しいタイプの音響光学トランスデューサーを試作した。このトランスデューサーは、レーザー光が境界で全反射される際に発生するエバネッセント光を利用している。ピエゾ素子トランスジューサーのような共振特性を持たないため、超広帯域の検出特性を持ち、また、微小部分での音場を計測することが可能である。本報告では、ガラス中を伝搬する3.5MHz超音波パルスを検出し、その音場を計測した結果を報告する。直進波とエッジ波との干渉についても議論した。
キーワード： 超音波パルス、エバネッセント波、音場、音響光学

Measurements of Ultrasonic Fields with an Opto-Acoustic Transducer using Evanescent Waves

Soh Shimizu, Pak-Kon Choi

Department of Physics, School of Science and Technology
Meiji University
1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki 214, Japan
E-Mail: ae00087@isc.meiji.ac.jp

ABSTRACT We have developed a new type of opto-acoustic transducer utilizing optical evanescent waves for detecting ultrasonic pulse. Contrary to the conventional piezoelectric transducer which has resonance characteristics, our transducer detects broadband ultrasonic pulse with a small detection point. We have measured sound fields of 3.5 MHz ultrasonic pulse propagating in a glass. The interference between direct waves and edge waves is discussed.

Key words: Ultrasonic pulse, Evanescent waves, Sound fields, Opto-acoustics

key words

1．はじめに

超音波パルス波形を広帯域で検出できる新しいタイプの光学トランスデューサーを試作した。このトランスデューサーは、レーザー光が境界で全反射される際に発生するエバネッセント光を利用している。ピエゾ素子トランスデューサーのような共振特性を持たないため超広帯域の検出特性を持ち、また微小部分での音場を計測することが可能である。本報ではガラス中を伝搬する3.5MHz超音波パルスをこの光学トランスデューサーで検出し、その音場を計測した結果を報告する。

2．エバネッセント光

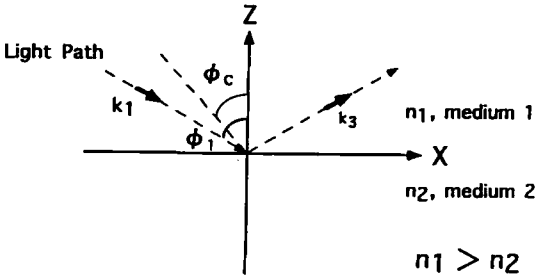


Fig.1. Optical structure with two layers

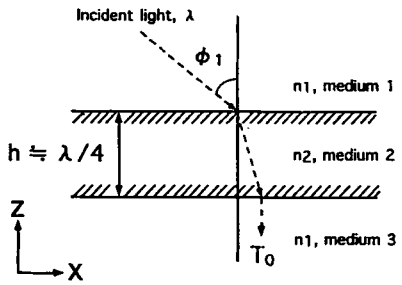


Fig.2. Optical structure with three layers

屈折率の大きい媒質から屈折率の小さい媒質に進む光は、その境界面で全反射を起こすことがある。すなわちFig.1における入射角ϕ_1が全反射を起こす臨界角ϕ_c以上のとき、もはや光は媒質２に入り込めない。しかし連続の条件より境界面近傍では「-z方向に進むにつれて急激に減衰するが、境界面近傍では有限の大きさをもつ波動」の存在が予測される。全反射の条件を満たすとき、Fig.1における媒質２中の光電場ベクトルEは次式で与えられる。

$$
\begin{aligned}
\mathbf{E} &= A_2 \exp\left(i\left\{k_x x + k_z z - \omega t - \varphi_2\right\}\right) \\
&= A_2 \exp\left(\pm k_2 \left\{\sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2(\varphi_1) - 1}\right\} z\right) \\
&\quad \times \exp\left(i\left\{k_2 \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \sin(\varphi_1)\, x - \omega t\right\}\right)
\end{aligned}
$$

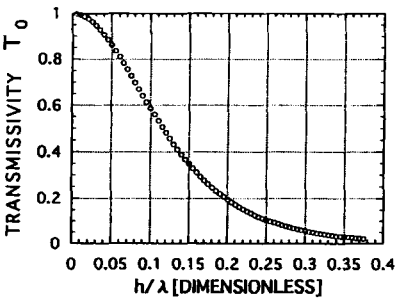
$k_i\ (i = x, z, 2)$ ・・・ wave number
φ_2 ・・・ initial phase
A_2 ・・・ complex amplitude

初めのExp部は、-z方向に電場分布が指数関数的に減衰し、エネルギーの流れがないことを示す。２番目のExp部は、波動がX方向に伝播することを示す。これをエバネッセント光という。

次に、Fig.2のような３層媒質を考える。この３層媒質の条件として、媒質１、３は同じもの、媒質２は媒質１、３よりも屈折率が小さく、その間隔ｈは入射光の波長の1/4

程度とする。この条件のもと、全反射の臨界角を超える入射角で媒質１に光が入射すると、エバネッセント光が媒質３にもれて光が透過するようになる。

我々はこの３層媒質の構成を用い、光学トランスデューサーを試作した。Fig.3に我々の光学トランスデューサー内のエバネッセント光のエネルギー透過率 T_0 とその理論式を示す1)。



$$T_0 = 1 - \left[\frac{(A+B)^2}{(A-B)^2 + 4AB\coth^2\left(\frac{C}{2}\right)}\right]$$

$$A = \left[\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \cos^2(\phi_1)\right]^{-1} \qquad B = \left[\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2(\phi_1) - 1\right]^{-1}$$

$$C = (4\pi h/\lambda)\left[\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2(\phi_1) - 1\right]^{-\frac{1}{2}}$$

Fig.3. Transmissivity vs h／λ

媒質１、２、３の屈折率 n_1, n_2, n_1 と入射角 ϕ_1 を決定すると、エバネッセント光のエネルギー透過率 T_0 は媒質２の間隔 h と入射光の波長 λ に依存することがわかる。またFig.3から媒質２の間隔 h が大きくなるにつれてエバネッセント光のエネルギー透過率 T_0 は減少し、h が λ/4 程度になると T_0 は10%程度まで減少することがわかる。もし間隔 h が音波の影響で変化すれば T_0 も変化するから、T_0 あるいはエネルギー反射率を測定することによって音波の検出が可能になる。

3. 実験方法

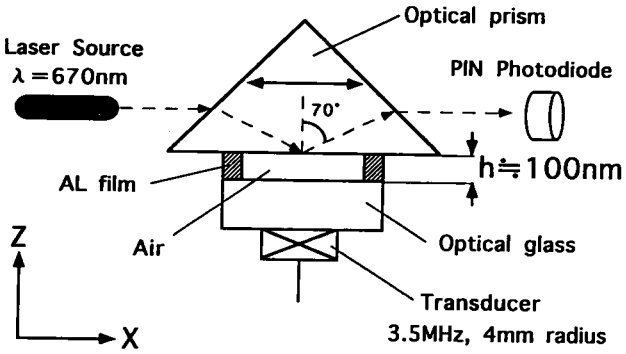


Fig.4. Optical transducer in Detecting Ultrasonic

我々の試作した光学トランスデューサーをFig.4に示し、この光学トランスデューサーによる超音波パルスの検出方法を説明する。

光学トランスデューサーにおけるFig.2の３層媒質の媒質１、３はそれぞれ同質のBK7

からなるプリズム、光学ガラスに対応し、それらの屈折率は等しい。媒質2は光学ガラス上にアルミニウム薄膜を蒸着することにより空気の層として形成した。その間隔hは入射光の波長670nmの1/4以下の100nm程度とした。

光学ガラスに入射された超音波パルスにより、空気の層の間隔hが変動する。このhの変動に伴いプリズム底面から透過するエバネッセント光のエネルギー透過率T_0が変化し、プリズム底面からの反射光の強度も変化する。つまり超音波パルスによる変位振幅がプリズム底面からの反射光強度の変化として検出される。レーザーの光学ガラス上での入射位置XをFig.4におけるx軸上で平行移動させて、各点での超音波パルスによるレーザーの反射光強度変化をオシロスコープで観測する。またその波形の振幅からエバネッセント光のエネルギー透過率T_0の理論式を用いて、超音波パルスの変位振幅の絶対値を$|dh|$として求めた。

アルミニウム薄膜の蒸着による間隔hは一様ではなく、またゴミの影響のため光学ガラスとプリズムを平行に保つのは難しい。その場合Fig.3のエバネッセント光のエネルギー透過率の傾きがレーザーの入射位置Xにより異なっているので、検出される変位の大きさも位置により変化する。そのため同じ条件のもとで間隔hの変化分$|dh|$を比較できるようにFig.3の傾きから変位振幅の補正を行った。

4. 実験装置

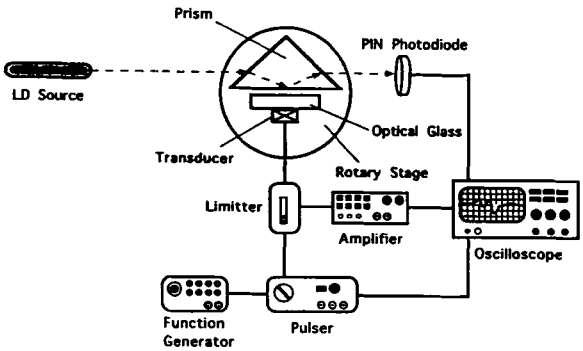


Fig.5. Mesurement System

我々の実験における測定系をFig.5に示す。回転ステージ上に光学トランスデューサーを固定してある。まずこの光学トランスデューサーに入射される超音波パルスとレーザーの経路について説明する。

DCパルサーで円形振動子（共振周波数3.5MHz, 半径4mm, PANAMETRICS製）をたたいて光学ガラス（半径7.5mm, 厚さ8mm）中に超音波パルスを放射する。光学ガラスのプリズム（45°/90°/45°,面精度λ/20）底面側からの反射波を観測するために途中にリミッターをはさみ、広帯域アンプ（NF回路, MODEL BX-7）にその信号を入れ信号を増幅する。そしてその波形をオシロスコープ（HP 54601B）で観測した。次にレーザーの経路について説明する。光源である半導体レーザー（波長670nm, 直線偏光）から出された入射レーザーは、光学トランスデューサーの中のプリズム底面に全反射の臨界角

41° を超える70° で入射させる。プリズム底面で超音波パルスの情報をのせたレーザーの反射光の強度変化をPINフォトダイオードで検出し、オシロスコープ上でその強度変化の波形を観測した。

5．実験結果

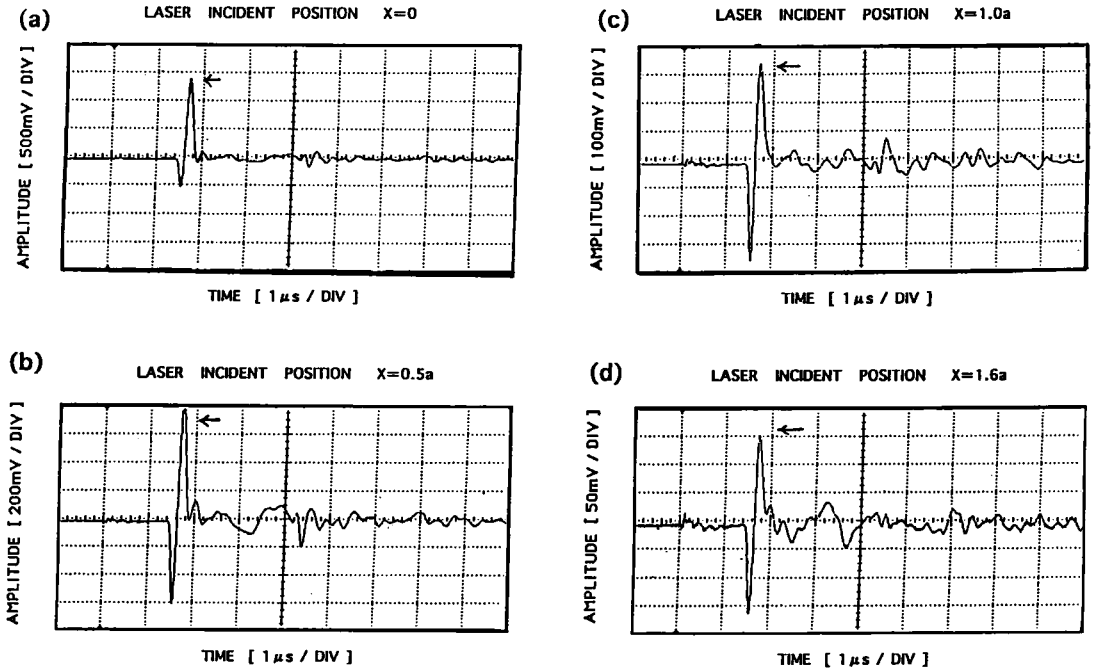


Fig.6. Ultrasonic shape detected by Photodiode

3.5MHz超音波パルスを励起したとき、プリズム底面からの反射光強度変化の波形をFig.6に示す。波形は超音波変位に対応すると考えられる。

Fig.6の(a)、(b)、(c)、(d)は、トランスデューサーの半径を a としてFig.5 におけるプリズム底面へのレーザーの入射位置 X をトランスデューサーの中心軸上から0.5a, 1.0a, 1.6a とずらしていったときの波形である。矢印のついた波形は超音波パルスの直進波の第一エコーによるものであり、我々はこの波形の振幅に着目した。(a)の5.5目盛り付近のパルスは第二エコーである。(b)、(c)、(d)と移るにつれて第一エコーの振幅が小さくなり、輪郭波の影響で波形が複雑になることがわかる。

Fig.6(a)で超音波パルスの第一パルスの後半部分に直進波と遅れてくる輪郭波の干渉が見られる。またレーザーの入射位置 X をトランスデューサーの中心軸上からずらすにつれて、直進波と輪郭波の干渉部分が長く複雑になっている。試作した光学トランスデュー

サーの帯域はフォトダイオードの帯域で決定され10MHz 以上である。このような広帯域であるため直進波、輪郭波を分離して検出することができた。

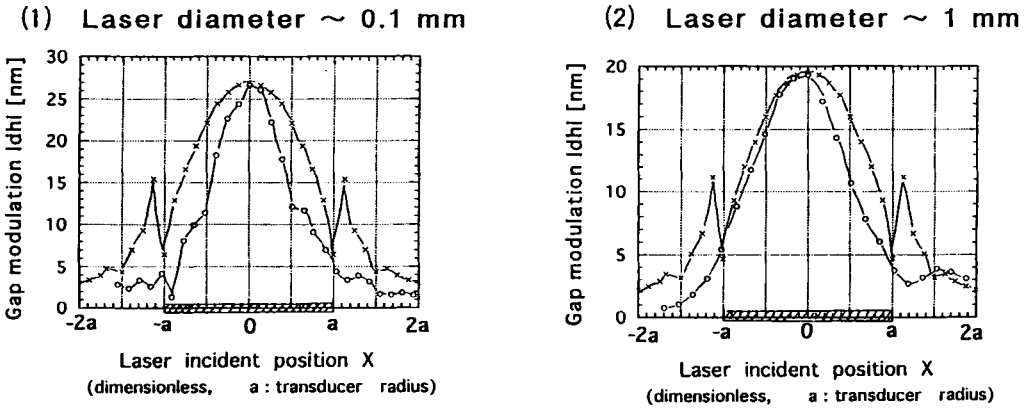


Fig.7. Gap modulation |dh| vs Laser incident position X

レーザーの入射位置 X を変えたときの超音波パルスの変位振幅の絶対値 |dh| のグラフをFig.7 に示す。絶対値は次のようにして求める。Fig.3で反射光のDC成分からT_0の傾きを求め、信号振幅から間隔 h の変位を求める。

プロット○は実験値であり、プロット×はピエゾ素子のトランスデューサーにより検出した超音波パルスから波形とパルス幅を決定し、それから計算した液体中での音圧分布を示している。グラフ(1)はプリズム底面に入射するレーザーの径を0.1mm に絞ったものであり、グラフ(2)はレーザーの径を1mm 位に広げたものである。Fig.7の斜線部分は円形振動子とその大きさを示している。

Fig.7から、実験から求めた超音波パルスの変位振幅の分布 は計算値とはやや異なっているが、固体中での音場計算を行えばより詳しい比較が可能である[2]。またレーザーの径を絞った(1)の場合は円形振動子の輪郭付近での直進波と輪郭波の強い干渉が見られるが、(2)のレーザーの径を少し広げた場合にはそれを観測できなかった。この理由としてレーザーの径を絞った(1)はレーザーの入射した微小な部分での超音波パルスの変位振幅を検出できるが、レーザーの径を少し広げた(2)はレーザーの入射した面積内の平均化した振幅変位を検出しているためと考えられる。

6. 結論

エバネッセント光を用いた新しいタイプの光学トランスデューサーを試作した。その特長は広帯域検出、微小領域の変位振幅の絶対値が測れることである。これを利用して音場分布の計測が可能である。

参考文献

1) Patrik J. Phillips and Olaf T. Ramm et all, J. Acoust. Soc. Am. 93(2), 1182(1993)

2) William L. Beaver, J. Acoust. Soc. Am. 56(4), 1042(1974)