

反射率極小現象とその膜厚測定への応用

Application of the Excitation of Leaky Sezawa Wave to the Layer-Thickness Measurement

竹 内 栄 治*・谷 泰 弘*

Eiji TAKEUCHI and Yasuhiro TANI

1. はじめに

反射型超音波顕微鏡には、 $V(z)$ と呼ばれる試料の弾性的性質をその形状(周期・振幅等)によく反映する反射強度曲線が存在することは、よく知られている。¹⁾ところが、従来この $V(z)$ 曲線を基板表面の薄膜の膜厚測定に利用しようとする試みについては、あまり多く報告されていない。^{1),2)} このため、薄膜を有する基板を超音波顕微鏡により観察した場合の、波動伝搬現象についてもよく知られていないのが現状である。^{3),4)}

一方、著者らはある基板の薄膜の厚みを制御したいという半導体関連分野からの要請を受けて、まずその膜厚を測定する方法について検討を行った。その結果、オンライン計測への適用の可能性・水中計測の許容性等の点から、超音波を媒体として使用することが最も妥当であることを確認した。またこのとき要求される方位分解能の点から、超音波を音響レンズにより集束する超音波顕微鏡の構造を採用することが望ましいことも判明した。

そこで反射型超音波顕微鏡を用いて、ある薄膜を有する基板を観察したところ、反射波の強度が他に比較して著しく低い膜厚が存在するのを見出した。^{5),6)} 本稿ではこの反射率極小現象の原因について究明すると共に、その膜厚測定への応用の可能性について検討する。

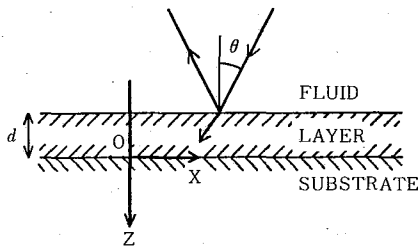


図1 反射関数の計算における座標系

2. 平面超音波での反射率極小現象の確認

【2-1】 弾性力学的解析

超音波顕微鏡で発生される集束超音波は、さまざまな入射角を有する平面波の重ね合わせであると考えることができる。そこで、超音波顕微鏡にて観察される反射率極小現象を解明するために、表面に薄膜を有する試料に超音波が入射される場合の反射率をまず調べることにした。

図1に示されるように、厚さ d の薄膜を有する半無限の基板に水が接している場合を考える。ここでは、周波数 f の平面超音波が入射角 θ で試料に照射されるときの反射率を、弾性力学的解析により求めてみる。それぞれの媒体においてスカラーポテンシャルとベクトルポテンシャルを導入すれば、各媒体で生じる変位と応力はこれらのポテンシャルによって表現できる。⁵⁾ すると、液体と薄膜との界面あるいは薄膜と基板との界面における変位および応力の境界条件を用いて、入射波のポテンシャルによって正規化された各ポテンシャルの値を決定することができる。⁷⁾ また反射率 R は、液体中における前進

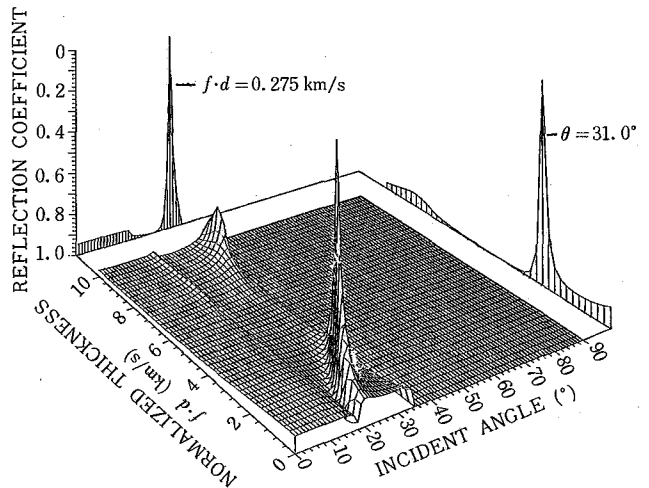


図2 金-42合金の場合の反射率の絶対値

* 東京大学生産技術研究所 第2部

研 究 速 報

波のポテンシャル ϕ_1 と後退波のポテンシャル ϕ_2 との比として、以下のように定義される。

$$R = \phi_2 / \phi_1$$

ここでは、仮りに液体を水、薄膜を金、基板を 42 合金 (Fe-42%Ni) とした場合の反射率 R を、入射角 θ および周波数と膜厚との積 $f \cdot d$ をパラメータとして計算した。 θ を 0° から 90° まで 1° 間隔で変化させ、 $f \cdot d$ を 0 km/s から 10 km/s まで 0.25 km/s 間隔で変化させた場合の、反射率 R の絶対値の変化を図 2 に示す。なお、各媒体の音響特性は表 1 に示されるとおりである。はたして、 $\theta \cdot f \cdot d$ 平面において、基板の横波の臨界角内で反射率の絶対値は連続した極小値分布を描くことが判った。また、それらの極小値分布に沿って位相の急激な変化も見られた。この組み合わせの試料の場合には、 $f \cdot d = 0.275 \text{ km/s}$ 、 $\theta = 31^\circ$ において反射率の絶対値は極小となる。

音響特性の異なるさまざまな媒質について、同様の計算を行ったところ、反射率の振幅が先に述べたような極小値を示すのは、以下に述べる条件が満たされたときに限られることが明らかになった。すなわち、表層の膜における横波の音速が基板における横波の音速より小さい

場合に限って、反射率極小現象は発生する。

【2-2】 平面超音波による確認実験

前節の解析により明らかとなった反射率極小現象を、平面超音波を用いて実験的にも確認することとした。実験は図 3 に示されるような構成で行った。すなわち、比較的広い周波数帯域 (2~13 MHz) を有する短パルス (半値幅にて約 15 ns) の平面超音波を層状構造の試料に照射し、その反射波を周波数分析してスペクトル分布を求めた。試料としては、上述の反射率極小現象が生じるための条件を満足する (表 1 参照) ように、 $71.4 \mu\text{m}$ の厚さの銅メッキを施した鉄を用いた。

まず、平面波を銅メッキを施した試料とメッキしていない試料の両者に入射角 27.5° で照射した。上述の計算によれば、この 27.5° は最も著しい極小現象が現れると予想される入射角である。周波数分析の結果、図 4 に示されるようなスペクトル分布が得られた。メッキされた試料からの反射波のスペクトル密度は、 $f = 9.44 \text{ MHz}$ で極度に小さくなっており、平面超音波を用いた実験にて反射率極小現象が確認された。

表 1 各媒体の音響特性

	DENSITY (g/cm ³)	LONGITUDINAL WAVE VELOCITY (m/s)	TRANSVERSE WAVE VELOCITY (m/s)
H ₂ O	1.0	1483	—
Au	19.32	3240	1220
Fe-42%Ni	8.1	4860	2600
Cu	8.9	4800	1900
Fe	7.7	5940	3230

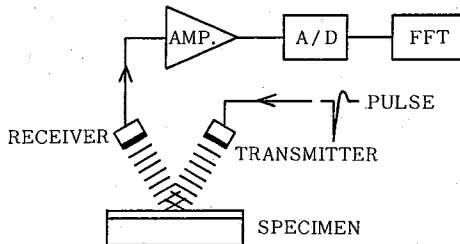


図 3 平面超音波を用いた確認実験の構成

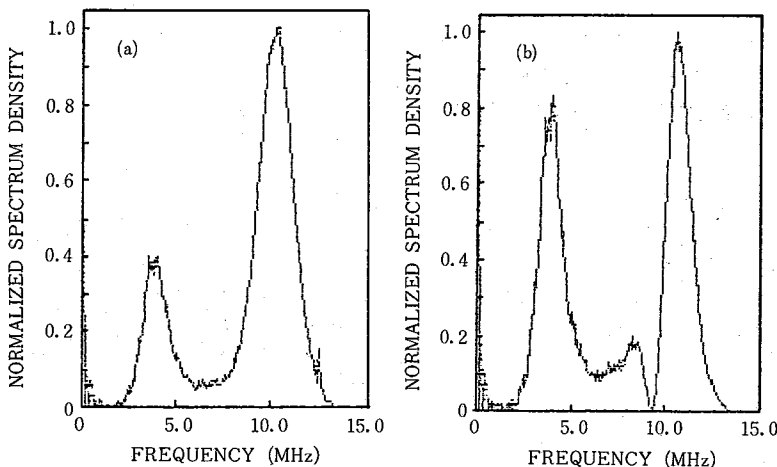


図 4 平面超音波を照射したときの反射波のスペクトル分布 (a)メッキしていない鉄 (b)銅メッキ (71.4 μm) を施した鉄

3. 反射率極小現象の原因の究明

反射率が極小となる $\theta-f \cdot d$ 領域での振動振幅の様子を調べたところ、表面近傍の振幅が非常に大きくなっていることが判った(図5参照)。したがって、反射率極小現象は試料表面に励起された表面波の一種の伝搬現象に起因すると考えられる。そこで、この現象の原因を究明するために、表面波の分散関係を調べることにした。

表面波の分散関係は反射関数の極から求めることができる。⁸⁾ 試料表面に水が無い場合と水が存在する場合とは反射関数の極の実部はほとんど変化しないので、ここでは計算の簡略化のため、試料表面に水が存在しない場合の分散関係を求めることとした。この条件のもとでの、レーリーモードと高次のモード、すなわちセザワモード⁹⁾の分散曲線を図6に実線で示す。セザワモードはカットオフ波数 k_c を持ち、 k_c 以下では反射関数の極は複素数になるので、図6では極の実部のみを示してある。表面膜中に励起された k_c より小さい波数を有するセザワ波の位相速度は、基板における横波の音速より大きいので、このようなセザワ波は基板中に漏洩する。

平面波を用いた実験からも、表面波の分散関係を求めることができる。図3の構成で、入射角を 18° から 35° まで 0.5° 間隔で変化させ、表面に膜厚 $71.4 \mu\text{m}$ の銅メッキを施した鉄に平面波を照射した。入射角と各媒質の音速とをスネルの法則にあてはめて表面波の音速を求め、この音速と反射波のスペクトル密度が極小になる周波数とを考慮すれば分散関係が求まる。このようにして得られた分散関係を図6に●印で示す。実験あるいは計算から求めたそれぞれの分散関係は極めてよく一致している。したがって反射率極小現象は、カットオフ波数より小

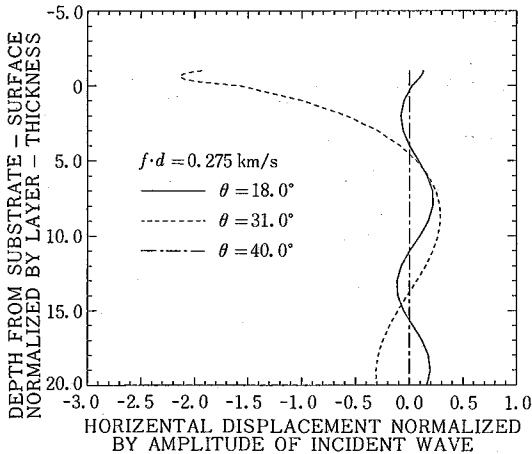


図5 金-42合金の場合の振動振幅の X 成分

い波数のセザワ波が励起され、基板中に入射波の一部が漏洩することにより、反射強度が小さくなるために生じることが判明した。

4. 超音波顕微鏡の正焦点での反射強度極小現象

上述のように、超音波顕微鏡で発生する集束超音波は、平面波が重ね合わさったものとみなすことができる。したがって、反射強度が極小になる前述の領域が集束超音波の最大入射角内であれば、 $V(z)$ 曲線も試料の膜厚に応じて、その反射強度が変化すると考えられる。そこで、反射型超音波顕微鏡を用いて以下のような実験を行った。試料としては、表面に $0 \mu\text{m}$ から $10.5 \mu\text{m}$ までの厚さの金メッキを施した 42 合金を用いた。音響レンズおよびトランスデューサは、反射率極小現象が f と d の積に依存することを確認するため、55 MHz 用と 120 MHz 用の 2 種類のものを用いた。両者とも音響レンズはアルミニウムで作られており、共に大きい Q 値を持ち、またその半開口角は 45° である。このとき、最大の入射角は 28° となり、図2で示される極小現象を生じる領域となる。

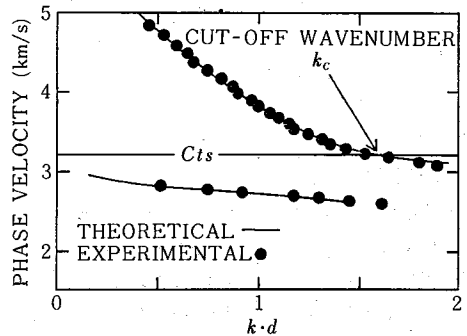


図6 銅-鉄の場合の表面波の分散関係

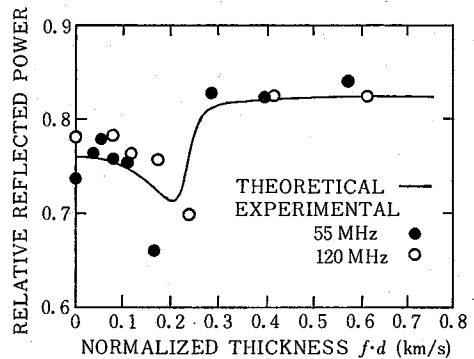


図7 超音波顕微鏡における金-42合金の場合の周波数と膜厚の積に対する正焦点における反射強度

研究速報

パルス打出し電圧の変動を除去するための参照信号として用いるため、 $V(z)$ 曲線の測定時に、レンズと水との界面における反射波であるレンズエコーの最大電圧値も同時に測定した。そうして、反射強度をレンズエコーの最大電圧値で割った値を正規化された反射強度とした。55 MHz と 120 MHz の場合について、 $V(z)$ 曲線を測定したところ、特に試料の正焦点における反射強度である $V(z=0)$ が、周波数と膜厚との積 $f \cdot d$ に依存した反射強度極小現象を呈することが明らかになった (図 7 参照)。

ここでは、2-1 で得られた平面超音波での反射率を用いて求めた、音響レンズの開口角内の領域における反射波の音圧を積分して得られた $V(z=0)$ の値を参考までに示している。

5. 反射強度極小現象の膜厚測定への応用

上述のように、層状構造を有する試料の $V(z=0)$ は、周波数 f と膜厚 d の積に依存した極小現象を示す。したがって、反射波のスペクトル密度が入射波の場合と比較して小さくなる周波数を測定すれば、膜厚を推定することができる。

このように、この膜厚測定法は f と d の積に依存した量を測定するので、測定可能な膜厚の範囲は使用するトランスデューサの周波数帯域によって決定される。たとえば、金と 42 合金の組み合わせの場合に、1 MHz~1 GHz の帯域でトランスデューサを用いれば、0.2~200 μm の範囲の膜厚を計測することができる。

この膜厚測定法は、現在よく使用されている蛍光 X 線法と比較すれば、以下のような特長を持っており、メッキ工程等におけるオンライン計測に極めて有効である。

- (1) 一点の測定時間が約 0.5 秒と短いため、リアルタイム計測が可能。(蛍光 X 線法では約 10 秒)
- (2) 水中にて計測できるため、メッキ工程等においてオンライン計測が可能。(蛍光 X 線法は乾燥した試料表面を必要とする)
- (3) 方位分解能が数 μm と極めて高い。(蛍光 X 線法では方位分解能を上げると測定精度が悪くなる)

6. おわりに

反射型超音波顕微鏡における反射強度極小現象を用い

れば、分解能・測定時間等の点で優れた表面層の膜厚測定法を構成することが可能となる。この反射率極小現象は、薄膜の横波の音速が基板の音速よりも小さい場合に、基板の横波の臨界角近傍の入射角で超音波が照射された時に発生する。その原因は、表面を伝搬する漏洩セザワ波が表面層に励起され、その音速が基板の横波の音速より大きいために、基板中に入射波の一部が漏洩するためである。

最後に、本研究の実験に対し全面的にご協力いただいた凸版印刷(株)中央研究所益田 斉 斎 主席研究員、塚原祐輔、林 栄作 両氏および超音波顕微鏡による計測に対し有益な助言をいただいた当研究所仙波卓弥 講師に深謝する。

(1984年12月22日受理)

参考文献

- 1) A. Atalar: An angular-spectrum approach to contrast in reflection acoustic microscopy, J. Appl. Phys., 49 (October 1978) p. 5130
- 2) R. G. Wilson et. al.: Acoustic microscopy of materials and surface layers, J. Appl. Phys., 55 (May 1984) p. 3261
- 3) K. Yamanaka: Surface acoustic wave measurements using an impulsive converging beam, J. Appl. Phys., 54(8), (August 1983) p. 4323
- 4) K. Liang et. al.: Precision measurement of Rayleigh wave velocity perturbation, Appl. Phys. Lett., 41(12), (December 1982) p. 1124
- 5) Y. Tsukahara et. al.: A new method of measuring surface layer-thickness using dips in angular dependence of reflection coefficients, Proc. of IEEE Ultrasonics Symposium (1984), to be published
- 6) E. Takeuchi et. al.: Application of reflection coefficient dips in acoustic reflection microscopy, JJAP Suppl. to be published
- 7) D. E. Chimenty et. al.: Leaky Rayleigh waves on a layered halfspace, J. Appl. Phys., 53 (January 1982) p. 170
- 8) L. M. Brekhovskikh: Waves in layered media, Academic Press, (1980)
- 9) K. Sezawa et. al.: Discontinuity in the dispersion curves of Rayleigh waves, Bull. Earthquake Res. Inst., 13 (1935) p. 238