

氏 名	西 野 秀 郎		
授 与 学 位	博 士 (工 学)		
学 位 授 与 年 月 日	平 成 8 年 3 月 26 日		
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項		
研 究 科 , 専 攻 の 名 称	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 (博 士 課 程) 電 気 ・ 通 信 工 学 専 攻		
学 位 論 文 題 目	レ ー ザ ー 干 渉 縞 の 位 相 速 度 走 査 に よ る 超 音 波 励 起 法 と 材 料 評 価 に 関 す る 研 究		
指 導 教 官	東 北 大 学 教 授 櫛 引 淳 一		
論 文 審 査 委 員	東 北 大 学 教 授 櫛 引 淳 一	東 北 大 学 教 授 中 鉢 憲 賢	
	東 北 大 学 教 授 山 之 内 和 彦	東 北 大 学 教 授 中 村 僖 良	

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

高周波超音波計測においては、光や電子では得られない新しい情報を得る数々の手法が開発されている。特に最近では、新しい材料特性の定量計測技術として超音波マイクロスペクトロスコーピーが開発され、電子デバイス材料やデバイス作製プロセスの評価に応用されている。

しかしながらこの超音波計測においては、一般に超音波の発生源である圧電超音波デバイスと被検体の間に超音波伝搬物質として液体カップラーが必要であり、従って被検体が液体カップラーによって偏執あるいは溶解してしまうものの測定や、ドライ雰囲気あるいは液体カップラーの沸点を越える高温、真空等の環境中での適用は不可能であった。

一方で、レーザーを固体試料表面に照射し、熱弾性効果により超音波を励起させるレーザー超音波法は、非接触で計測が行えるという特徴をもち、その計測技術の確立が期待されている。しかしながら従来の単一のパルスレーザーを照射する方法では、音場の制御が不可能であり、超音波の励起変換効率が小さいために、高精度な定量計測には不向きであった。

このような中で単一モード・単一指向性の超音波を効率良く励起する方法として、試料表面に伝搬する超音波の位相速度でレーザービームを走査する方式の位相速度走査法が提案されたが、この方法の高周波数化が課題として残されていた。

本研究は上記の背景を踏まえ、位相速度走査法の高周波数化を行ない、非破壊非接触を特徴とするレーザー超音波法による新しい高精度材料評価技術の開発を行なおうとするものである。具体的には、周波数の異なる2本のレーザービームにより形成される走査干渉縞を用いた方式の位相速度走査法を提案し、この高精度材料評価技術の構築を目指したものである。

第 2 章 走査干渉縞による超音波励起原理

本章では、走査干渉縞による超音波の励起原理について述べている。

図1に走査干渉縞形成の原理図を示す。走査干渉縞は、周波数の異なる2本のレーザービームを試料面上で交差干渉させることで形成される。その走査速度 v_f は、レーザービームの入射角 θ とレーザービームの周波数差 $\omega_a = |\omega_1 -$

ω_2 | によって

$$v_f = \omega_a / 2 K \sin \theta$$

で示される。ここにKはレーザーの波数である。走査干渉縞による弾性表面波の励起は、この走査速度 v_f を弾性表面波の位相速度に等しくすることで振幅がコヒーレントに増幅され、高効率で行なわれる。またバルク超音波の場合には、走査速度 v_f をバルク超音波が試料表面に作る波面の位相速度に一致させることで、意図した方向に単一指向性のバルク超音波を励起伝搬させることが可能である。その伝搬方向 ϕ はバルク超音波の音速 c_{BAW} を用いて

$$\phi = \sin^{-1} (2 c_{BAW} K \sin \theta / \omega_a)$$

で示される。

さらに詳しい励起メカニズムの解明のため波動方程式と熱伝導方程式を用いた理論を展開し、以下の結果を得ている。

弾性表面波については、走査干渉縞の走査速度がその位相速度に整合したとき最大の効率が得られ、その振幅は干渉縞の走査時間に比例する。またその周波数は、2本のレーザービームの周波数差 ω_a で決まる成分と干渉縞の波数と弾性表面波の音速の積 $k_f v_{SAW}$ で決まる2つの成分からなり、特に $k_f v_{SAW}$ の成分が支配的である。

バルク超音波については、走査干渉縞と位相整合条件を満たす方向に伝搬し、その振幅は弾性表面波の場合と同様に走査時間幅に比例するものの1桁以上小さい。また伝搬方向による励起効率は、レーザーの線音源でバルク超音波を励起した際の放射パターン (Directivity Pattern) に比例し、特異な分布を持つ。バルク超音波の周波数は、2本のレーザービームの周波数差 ω_a に等しい。

以上の理論結果は後章の検証実験での準備として述べられている。

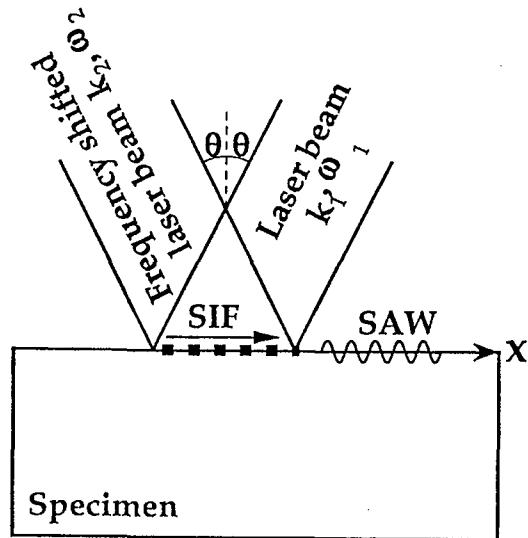


図1 走査干渉縞の形成原理

第3章 実験システム構成

本章では、第2章で述べた原理を具体化するためのプロトタイプの実験システムの詳細と光学系等の調整法について述べている。

走査干渉縞による超音波の励起では、走査時間が長いほど大きな振幅が得られることを第2章で述べた。そこで本システムでは、QスイッチNd:YAGレーザーを試作・開発し50ns~150nsのロングパルスが可能としている。

図2にシステムの概略図を示す。レーザービームはビームスプリッターで2本に分けられ、一方はTeO₂の音響光学素子に導入され周波数が変移する。周波数が変移していない他方のビームと試料面上で交差干渉され走査干渉縞が形成される。形成された走査干渉縞により励起された超音波は、ArイオンCWレーザーを用いた光学的ナイフエッジ法により検出される。

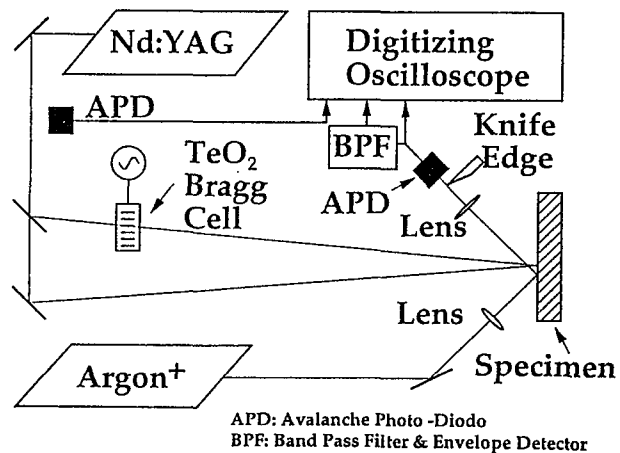


図2 実験装置の配置図

第4章 超音波励起の実験的検証

本章では、超音波励起の検証実験について述べている。はじめに、アルミニウム試料を用いた110MHz弾性表面波の励起検証実験の結果を示す。

- (1) 表面損傷しきい値の3.2%のレーザー尖頭パワー密度で励起を行なった結果、SN比30dB以上であった。
- (2) 1.5%のレーザー尖頭パワー密度で弾性表面波の励起を行なった結果から、その振幅の推定を行ない1.4nmの大

振幅が得られた。

(3) 周波数は、干渉縞の波数と弾性表面波の音速の積 $k_f v_{SAW}$ で決まる成分が支配的である。

以上の結果は第2章で述べた理論と良く一致しており、これまでにない大振幅の高周波弾性表面波の励起が、走査干渉縞によってレーザー超音波法としては初めて励起できることを実証した。

次に、 Si_3N_4 の焼結体を用いた 80MHz バルク超音波の励起検証実験の結果を示す。

- (1) 表面損傷しきい値の 41% のレーザー尖頭パワー密度で励起を行なった結果、SN 比が弾性表面波に比べ 20dB 小さい。
- (2) 周波数は 2 本のレーザービームの周波数差 ω_a に等しい。
- (3) 伝搬方向は、基本的には走査干渉縞とバルク超音波の位相整合条件によって決まる。
- (4) バルク超音波ビームはピストン音源並みにコリメートされている。

以上バルク超音波における実験結果も第2章で述べた理論と良く一致し、励起効率は弾性表面波に及ばないが、レーザー超音波法としてこれまでにない極めて優秀な特性を持つことを実証した。

第5章 定量計測への応用

本章では、走査干渉縞で励起した超音波の特徴に基づいて弾性表面波及びバルク超音波の音速測定原理の提案を行ない、その検証実験について述べている。

弾性表面波の周波数 ω_{SAW} は、2本のレーザービームの周波数差 ω_a と、走査干渉縞の波数と弾性表面波の音速の積 $k_f v_{SAW}$ で決まる2つの周波数成分から成るが、 $k_f v_{SAW}$ で決まる周波数成分が支配的である。以上の特徴を元に弾性表面波の音速測定法の原理の提案を行なった。

上記の原理を検証するため、弾性異方性を有するシリコン単結晶(100)面の各方向の音速の異方性を測定した。その結果を図3に示す。図3中の●は実験値を示し、実線と点線は弾性表面波(SAW)と擬似弾性表面波(PSAW)の音速の理論値を示す。理論計算値に比べ絶対誤差0.6%、相対誤差0.1%で音速が測定できた。さらにシリコン単結晶(100)面の[100]方向から $\pm 15^\circ$ に存在する伝搬速度の異なる2つのモードを同時に励起・検出して、2つのモードの音速を一度に測定出来ることを示した(図3中の■)。

走査干渉縞によって横波及び縦波の2つが同時に励起される条件に設定したときの波動の特徴と幾何学的な条件から4元連立方程式を構成し、その解からバルク超音波の音速を求める方法の原理を提案した。検証実験では、 Si_3N_4 の焼結体を用いて80MHzの横波及び縦波の音速計測を行い、1%以内の誤差で計測が可能であることを示した。

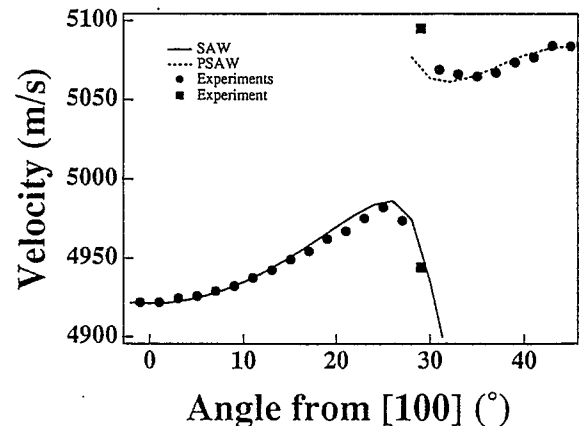


図3 Si (100) 面での SAW 音速測定結果

第6章 結論

本研究は、走査干渉縞を用いた位相速度走査法により超音波を励起する方法の提案と、それを用いた材料の定量計測のための基礎的技術の確立を図ったものである。この結果、110MHz 弾性表面波の励起では 1.4nm の大振幅が得られることを示した。また 80MHz バルク超音波の励起では、極めて高い指向性を持ったバルク超音波の伝搬方向が制御可能であることを示した。さらに本方法を用いた高周波定量計測の為の原理も示し、その応用への途を拓いた。

本方法は、非接触非破壊を特徴とし、様々な環境中やデバイス作製プロセス中での高周波超音波定量計測を高精度で可能とする全く新しい方法として実用化への期待は大きい。

審査結果の要旨

最近、熱弾性効果を利用したレーザー超音波励起法が非破壊・非接触的材料評価の観点から注目されている。この技術展開にあたっては、超音波励起の高効率化と高周波化が重要な研究課題である。著者は、周波数の異なる2本のレーザービームにより形成される干渉縞を用いた位相速度走査法を提案し、100MHz以上の単一モード・単一指向性の弾性表面波/バルク超音波を高効率・高SN比で励起することに成功し、その計測技術の基礎を確立した。本論文はその成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論で、本研究の背景を述べ、研究の目的を明示している。

第2章では、レーザー干渉縞の位相速度走査による超音波励起法の原理について述べている。波動方程式と熱伝導方程式を用いて、走査干渉縞による超音波の励起について理論を展開し、弾性表面波およびバルク波の選択性と高効率に励起する条件について検討している。すなわち、弾性表面波については、干渉縞の走査速度がその位相速度に整合したとき最大の効率が得られ、その振幅は干渉縞の走査時間幅に比例することを示している。また、バルク縦波・横波超音波については、走査干渉縞との位相整合条件を満たす方向に伝搬し、その振幅は弾性表面波の場合と同様に走査時間幅に比例するものの、1桁以上小さいことなどを明らかにし、次章以下の実験に備えている。

第3章では、プロトタイプの実験システムと光学系の設定・調整法について詳述している。システムは、QスイッチNd:YAGレーザー・音響光学素子・光学系からなる走査干渉縞形成系と、光学的ナイフエッジ法を用いた超音波検出系から構成されている。第2章で述べた原理を具体化するためには、干渉縞の走査時間を長くする必要があり、レーザーを試作し、50ns~150nsの長パルス幅を実現している。

第4章では、超音波励起の検証実験について述べている。弾性表面波およびバルク超音波のいずれの場合も理論通りの高効率励起が実現されている。弾性表面波については、アルミニウム試料面上で、表面損傷閾値の1.5%に相当する尖頭パワー密度のレーザーを照射したところ1.4nmの大振幅が得られ、高いSN比で検出できることを示している。バルク超音波については、縦波・横波はそれぞれ位相整合方向に伝搬すること、およびその伝搬方向のレーザー入射角依存性と極めて高い指向性を実験的に確認している。これらの成果は極めて高く評価される。

第5章では、走査干渉縞方式で励起した超音波の特徴を活かした新しい音速計測法について述べている。弾性表面波では、シリコン単結晶(100)面上の音速の異方性について測定を行い、理論値と0.1%の誤差で一致することを示している。また、バルク超音波においては、横波・縦波を同時に測定できる音速測定法を提案し、 Si_3N_4 に対してその測定精度は1%程度であることを示している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、レーザー干渉縞走査方式の新しい超高周波超音波の励起・計測技術の基礎を確立し、その材料評価への応用の道を開いたもので、超音波計測工学、材料工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。