

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20760043

研究課題名(和文) ピコ秒超音波顕微鏡技術によるナノスケール3次元内部構造の測定

研究課題名(英文) Nanoscale three dimensional imaging of inner structures by use of picosecond ultrasonic microscopy

研究代表者

友田 基信 (TOMODA MOTONOBU)

北海道大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：30344485

研究成果の概要(和文)：

この研究は、表面や内部にナノスケール・マイクロスケールの構造をもった試料に対して、光学的に非破壊・非接触でナノスケール空間幅・ピコ秒時間幅をもつ超音波パルスを発生・伝播・検出し、試料の音響的な特性や構造を評価するものである。この方法はフェムト秒パルスレーザーによるピコ秒超音波法をもとにしている。シリコンナイトライド薄膜(厚み100nm)上に蒸着したくさび状に厚みが分布している金薄膜(厚み0~2000nm)試料中を伝わる音響波や、シリコン基板上に微細加工した溝による音響波の反射を観測した。

研究成果の概要(英文)：

This work aims evaluation of structures and acoustic properties of samples which has nano/micro-scale structures on surface or innards by use of nanometer and picosecond widths' ultrasonic pulses which is generated and detected by nondestructive and noncontact optical method. This experiment bases on laser picosecond ultrasonic techniques by use of a femtosecond pulse laser. I measured ultrasonic fields in a gold wedge sample (0-2000 nm thickness) on a silicon-nitride membrane (100 nm thickness), and reflections of ultrasonic pulses at microstructures on a silicon wafer.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：光計測、フォノン物性

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用物理学一般

キーワード：音、計測工学、非破壊検査、逆問題解析

1. 研究開始当初の背景

超音波映像技術は、海洋調査や、超音波CTなどの医療診断、超音波顕微鏡による工業非破壊計測など、現代社会で幅広く利用されている。これらの超音波計測技術の空間分解能は、媒質内でのその超音波の波長に依存する。

回折理論により小さい対象を観察するにはその大きさと同程度に波長が短く高周波数の超音波が必要となる。現在の超音波顕微鏡で超音波発生源として主に使われている圧電トランスデューサと半球状のサファイアによる超音波レンズでは、数GHzの周波数で数 μm の波長の超音波までしか発生できない。

さらなる高分解能化のためには、圧電トランスデューサに代わる超音波源が必要となる。

より高周波数の超音波パルスを発生・検出する方法として、ピコ秒超音波法がある。フェムト秒パルスレーザー光を金属表面に照射すると、空間幅数 10 nm、時間幅数 10 ps、100 GHz~1 THz の周波数成分をもつ超音波パルスを励起できる。このピコ秒超音波法は実用化され、半導体工場の製造ラインで非破壊検査用に使われている。近年では、ポンプ光・プローブ光の光スポット走査により、深さ方向にナノメートル分解能で試料の内部構造を調べる研究もされている。しかし、その方法では横分解能は検出光のスポット径に依存し直径 1 μm 程度であり、ピコ秒超音波の波長の短さを生かし切れていなかった。

2. 研究の目的

本研究は、このピコ秒超音波法を利用した高分解能超音波顕微鏡技術を開発し、マイクロ構造・ナノ構造試料中を伝わる超音波を測定することにより、試料の 3 次元的な構造を画像化することを目的とした。

本研究で開発するピコ秒超音波顕微鏡技術の原理を示す。観測対象は半導体や金属、絶縁体などの構造や内部構造である。その表面や界面、内部構造に超音波が到達すると、そこで超音波が反射される。ピコ秒超音波パルスを励起するために表面に厚み数 10 nm の金属薄膜を蒸着する。その試料にフェムト秒光パルス（ポンプ光）を照射する。光を吸収した金属薄膜内に熱膨張によって熱応力が発生し、熱弾性的に超音波パルスが発生する。発生した超音波パルスは圧縮部分と膨張部分を組み合わせた縦波であり、深さ方向に伝播する。この超音波パルスは、界面などの内部構造や試料の裏面などで反射され、表面に戻ってくる。その反射超音波による表面のわずかな変位を時間遅延した別のフェムト秒パルス（プローブ光）によって測定する。この測定には干渉計を用いる。ポンプ光・プローブ光を表面に沿って走査することで、時間走査・2次元空間走査によって得られたデータをもとに、反射した超音波パルスの表面の各箇所への到着時間と縦波速度から、反射源の位置の推定を行う。

3. 研究の方法

(1) 評価用試料の作製

本研究の方法で構造が正しく見えているかを確認するためには、内部構造があらかじめ分かっている試料が必要となる。そのため評価用試料を作製する。次の 2 つの評価用

試料を作製した。

① シリコンナイトライド膜（厚み 100 nm）上に蒸着した金薄膜（厚み 0~2000 nm）試料

この試料は市販のシリコンナイトライド膜上にスパッタ装置で金を貼り付けたものである。スパッタ装置内に電動ステージを入れて数時間の蒸着中にシャッターを任意の位置に動かしながら試料を作製することで、金の厚みを場所によって連続的に変化させている。この試料では金薄膜側からとシリコンナイトライド膜からの両方の測定を行う。

② シリコン基板上のマイクロ構造試料

この試料はマイクロ構造によって超音波がどのように反射するのかを実験的に確認するためのものであり、表面に電子線リソグラフィや選択的エッチングなどの微細加工技術を用いて μm スケールの溝が掘ってある。

(2) 光学系の作製

フェムト秒パルスレーザーを使ったポンプ・プローブ法の光学系を作製した。この光学系には、以下の特徴がある。

- ・遅延光路によってレーザーパルスの繰返し周期である 12ns 以上の遅延が付けられる。
- ・超音波による微小な表面変位を測定出来るように変形サニャック干渉計を組み込んでいる。
- ・レンズ対を使う事で対物レンズに入るプローブ光の角度を変化させ、ポンプ光の照射位置を固定し、プローブ光の照射位置を 2 次元走査できる。
- ・さらに試料も電動ステージに載せており、試料表面を 2 次元走査できる。
- ・自作の制御プログラムにより複数のステージや測定機器を連動させて測定できる。

(3) シミュレーション

実験で観測したデータと比較するために、市販の有限要素法ソフトウェアである PZFlex を使い、試料内部での音響波の伝播の時間発展を計算した。

4. 研究成果

金膜の厚みが 0~2 μm とくさび状に連続的に分布する試料（100nm のシリコンナイトライド膜上に蒸着した）において、超音波の伝播と、厚み分布の両方を測定出来る光学系を作製・実験した。この光学系の概念図を図 1 に示す。試料内部を伝わってきた音響波を測定する際には、レンズペアと 2 軸回転ミラーを利用した走査システムによってプローブ光の位置のみを走査することができる。この時、ポンプ光と試料の位置関係は固定されており、プローブ光の位置とタイミングを走査することでポンプ光スポット位置で発生し

た超音波が試料内部を伝播したり板波として伝わる様子を、試料の表面の位置で変位として観測することに成功した。金膜の厚みを測定する場合には、ポンプ光とプローブ光の位置を固定して、試料の位置を走査する。試料表面で発生した縦波が試料の反対面で反射して戻ってくるのを変位として観測した時刻と金の縦波音速から試料の厚みを計測した。

この際、試料上でのスポット径はポンプ・プローブ光とも $1\mu\text{m}$ 程度まで集光することができた。その際、およそ $400\mu\text{m}$ 角の範囲を一度に測定可能である。

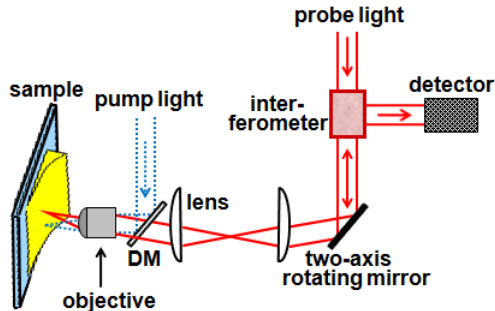


図1 金膜試料の実験の概念図

この厚み測定の方法で得られた信号例とそれによって構築した試料の厚み分布の例を図2に示す。

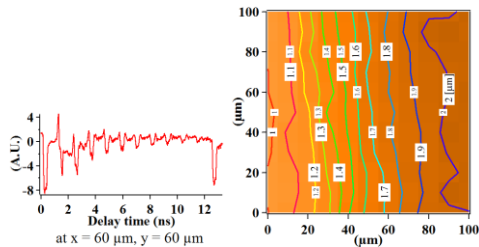


図2 厚み測定信号例と、その信号をもとに構築した試料の厚み分布。

また、図3にある時刻に測定した点波源で励起した音響波による試料表面での変位のイメージを示す。この例では波紋の間隔が図の左側になるほど短く、振幅が大きくなっている。この結果は板波である対称モードと反対称モードの Lamb 波の重ね合わせとして説明ができることが、時間空間フーリエ変換や、シミュレーション結果との比較からも示された。

この実験では金薄膜側から測定しているが、シリコンナイトライド薄膜側からの測定は、金膜蒸着時の歪みによって部分的にシリコンナイトライド薄膜が湾曲したり、透過率が変化したりすることがあり、困難であった。その作成条件の最適化を行い、金薄膜側に収束イオンビームによる微細加工でサブ μm サ

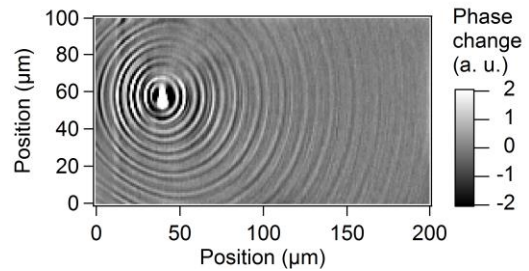


図3 シリコンナイトライド膜上の厚み変化する金薄膜試料での、ある時刻の音響波による変位イメージ。図の右側になるほど膜が厚くなっていく。

イズの穴をあけ、その穴による音響波の散乱の影響を測定することが、この研究の次の目標である。このくさび状金薄膜上のラム波の実験結果はシミュレーション結果と合わせて学術誌に投稿する準備中である。

次に、シリコン基板上に作ったマイクロ構造での音響波の反射や散乱をイメージした結果を図4に示す。

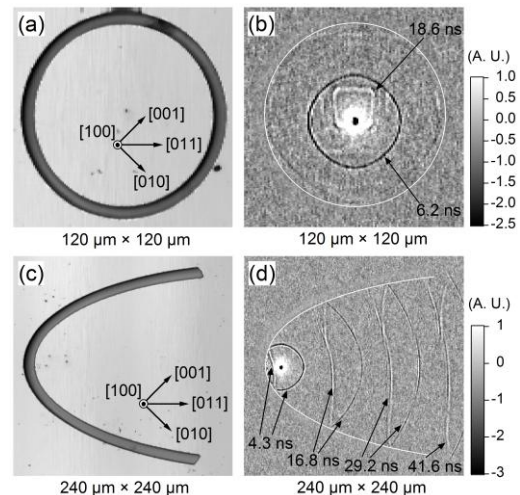


図4 シリコン基板上のマイクロ構造（左側）による音響波の反射イメージ（右側）

この試料のねらいは、まず形状がしっかりと分かっているマイクロ構造による音響波の反射・散乱を測定し、シミュレーション結果と一致することを確認することである。シリコンは異方性試料であるので、結晶方位と音響波の種類（縦波・横波・表面波）によって伝播や反射の仕方が異なる。さらに音響波を効率よく励起・検出するために表面に貼ってあるクロム膜（厚み約 10nm ）の影響も音響波の波長や周波数によって異なってくるので、それについても実験から確かめることができる。マイクロ構造は図4に示すように、円や放物線などのパターンとし、特徴的な点の近くを音響波の発生源とした。

この実験も図1に示した干渉計を含む光学系とほぼ同様の光学系で測定した。図4に示しているのは音響表面波による波紋である。シミュレーションによっても、この実験と同様の結果を再現することができた。この結晶方位による音響波の反射に焦点を当てた論文も準備中である。

将来的には、このようにして得られた試料表面で時間の関数としての音響波場のイメージから、散乱体である構造の形状や大きさなどを推定できることを確認するのが、本研究の最終的な目的であり、今後もそれに向けて研究を進展させていく。

他にも、本研究と関連の深い研究として半導体ナノ構造試料中のピコ秒超音波パルスの測定や、弾性表面波のイメージングに関連した研究も行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① T. Saito, O. Matsuda, M. Tomoda, O. B. Wright、Imaging gigahertz surface acoustic waves through the photoelastic effect、査読有、Journal of Optical Society of America B, Vol. 27、2010、pp. 2632-2638
- ② 佐久間洋宇、友田基信、松田理、福井孝志、富岡克彦、Oliver B. Wright、半導体ナノピラーの振動モード観測、超音波テクノ、査読無、Vol.21、No. 2、2009、pp. 64-67

[学会発表] (計8件)

- ① M. Tomoda、Optical tomographic imaging of picosecond ultrasonic pulses propagating in a transparent solid、口頭発表、2nd International Symposium on Laser Ultrasonics、2010年7月7日、フランス ボルドー
- ② 友田基信、Time-resolved imaging of confined Rayleigh and Lamb waves in microscopic resonators and wedges、第30回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム、ポスター発表、2009年11月20日、京都 同志社大学
- ③ M. Tomoda、Real time imaging of Lamb wave propagation on wedges、ICPPP15 International Congress on Photoacoustic and Photothermal Phenomena、口頭発表、2009年7月22日、ベルギー ルーベン
- ④ M. Tomoda、Tomographic reconstruction of photothermalinduced picosecond strain pulses in a transparent substrate、

17th symposium on Thermal Properties、口頭発表、2009年6月24日、アメリカ ボウルダー

- ⑤ M. Tomoda、Dynamic Imaging of Surface Acoustic Waves Reflection, Focusing and Confinement using Circular, Ellipsoidal and Parabolic Boundaryies、1st International Symposium on Laser Ultrasonics、口頭発表、2008年6月17日、カナダ モントリオール

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ

<http://kino-ap.eng.hokudai.ac.jp/j-index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

友田 基信 (Tomoda Motonobu)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：30344485

(2) 研究協力者

なし

(3) 連携研究者

なし