

平成 30 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14116

研究課題名(和文)電子熱音響波動のエネルギー輸送とイメージング

研究課題名(英文)Energy Transfer of electron-induced thermal acoustic wave and its imaging

研究代表者

澁谷 陽二 (SHIBUTANI, YOJI)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：70206150

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：高周波に断続された電子線照射により材料表面近傍に生成する熱波と音波(弾性波)の連成波動と、その音波による圧電効果を利用した非破壊欠陥検出のプロセスを、非フーリエ熱伝導、熱弾性、圧電特性の3つのマルチフィジクスモデルとして近似し、波動のエネルギー輸送とそのイメージング(仮想EAI)手法の構築を行った。その結果、(1)一様な温度場、一様な応力場に加えて一様な電磁場のもとでは、欠陥部での位相の変化を増大させる増幅機能の可能性を確認した。(2)集束イオンビーム加工機を用いた欠陥導入により、深さの変化に対する実体EAIを取得した。底面に開放された孔の観察は弾性波の検出が困難であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：The nondestructive observation using thermoelastic and piezoelectric couplings by the chopped electron beam has been proposed as a scanning electron acoustic microscope (SEAM). Our own built SEAM has successfully provided some nondestructive observations of microdefects as the electron acoustic images (EAIs). In order to investigate the thermal and acoustic wave properties, a computational model was proposed, being multiphysically coupled among non-Fourier heat conduction, dynamic elasticity and piezoelectricity. The piezoelectromotive output to the cyclic surface temperature change was estimated and Fast Fourier Transformation of that wave gives us the clear phase difference disturbed by the circular vacancy in the model. In conclusion, (1)the external uniform stress, temperature and electromagnetic fields can enhance the phase difference at the boundary of defect. (2)The sample with an artificial vacancy on the back side can't be detected as the actual EAI.

研究分野：固体力学, 計算力学

キーワード：電子熱音響 非破壊検査 マルチフィジクス イメージング 仮想EAI

1. 研究開始当初の背景

材料を破壊することなく、非破壊的に欠陥や内部構造を観察する手段は従来より種々提案されてきた。それは、欠陥や内部構造が周囲環境に強く依存し、観察のためにその環境を破壊することが、観察対象の本来持つ形態を大きく変えてしまうからである。半導体チップの実装過程で生じる欠陥を対象とした新たな非破壊観察手段として、電子線誘起超音波顕微鏡 (Scanning Electron-induced Acoustic Microscope; SEAM) が 1980 年代に提案された。この手法は、電子線を高周波で断続化させることによりハンマー効果を引き出し、熱波動(熱波)の発生と、それに連成した熱弾性波動(音波)を利用した非破壊観察である。本報告者が自作した SEAM を用いて、これまで種々の非破壊観察に成功してきている。しかし、この観察された電子音響像 (EAI) には深さ情報が欠落しており、観察原理となる電子熱音響波動の不均質内部構造まわりのエネルギー輸送の解明が不可欠との着想に至った。

2. 研究の目的

本報告者のグループがこれまで開発してきた SEAM の波動の生成、信号の伝ば、超音波信号の位相差検出に至る全プロセスを、非フーリエ熱伝導特性、熱動弾性特性、圧電特性の 3 つのマルチフィジクスモデルとして近似し、その連成領域にある制御因子(連成係数)に着目しながら電子熱音響波動のエネルギー輸送の解明とそのイメージング手法の構築を行う。

3. 研究の方法

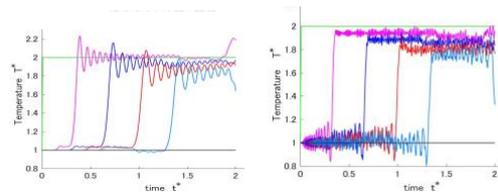
平成 28 年度では、3 つの物理のマルチフィジクス 2 次元軸対称モデルに対する解析手法を用いて、適切な欠陥モデルを導入した電子熱音響波動のエネルギー輸送を解析する。そして、観察された電子熱音響像(実体 EAI) を参照解として、解析により得られた電子熱音響像(仮想 EAI) の補正を行い、イメージングの構築と精度向上を行う。平成 29 年度では、3 次元解析への拡張を考え、かかる計算時間やメモリの大きさ等を考慮し適切な数値解析手法の検討を行う。そして、平成 28 年度と同様にその検証を実施する。

4. 研究成果

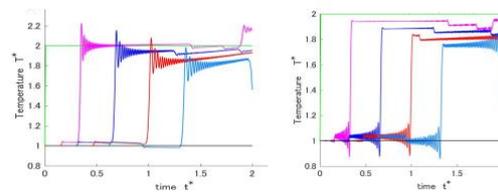
(1) 非フーリエ非定常熱伝導、動弾性、圧電特性の 3 つの物理のマルチフィジクス問題としての 3 次元無次元化定式化を行い、その連成問題の数値解析手法の検討を行った。有限差分法を用いた 1 次元及び 2 次元軸対称の解析手法を用いて、2 次元軸対称物体中に欠陥を有する場合の解析を行った。実際の非破壊観察手法に基づく熱電子音響イメージング(実体 EAI) のモデルを解析対象にし、圧電素子(PZT)の電圧変化のフーリエ変換により、周期

的温度波の周波数の変化に応じた振幅と位相を求めた。適切な欠陥モデルを導入した解析結果から、本手法は実際のプロセスに相当する解析手法であり、仮想 EAI を求めることのできるモデルであることがわかった。

さらに、有限差分法の解析結果の検証のために、1 次元(x 方向)ではあるが有限要素解析手法を同様に開発し、双方で比較検討を行った。その結果、実用的な解析時間を考慮すれば、有限差分法の方が妥当であることがわかった(図1及び図2参照)。



(a)差分法 (b)有限要素法  
図1 熱波の伝ば挙動( $\Delta x^* = 0.01$ )



(a)差分法 (b)有限要素法  
図2 熱波の伝ば挙動( $\Delta t^* = 2 \times 10^{-3}$ )

(2) シミュレーションに基づくイメージング(仮想 EAI) と比較検討するために、参照解としての実体 EAI の観察データ取得を行った。当初計画にしたがい、面内寸法 10mm×10mm で板厚 1mm のアルミニウム板に、最小直径 0.4mm の穴加工を面内方向と平行に試料内部に設けたサンプルを試作したが、境界が不鮮明になることがわかった。つぎに、シリコン単結晶の表面に集束イオンビーム加工機により段差を設けるサンプルを試作することにより、その段差に基づく有意な位相変化を実験的に得ることができた(図3参照)。そして、深さを変化させて試料により、その実体 EAI を取得し、深さ  $h$  と位相強度の相関を求めることができた(図4参照)。

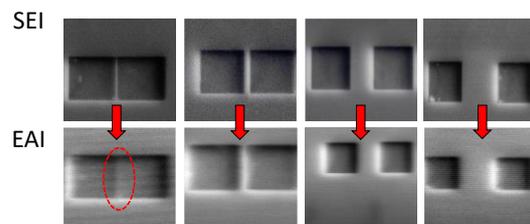


図3 二次電子像(SEI)と熱電子音響像(EAI)

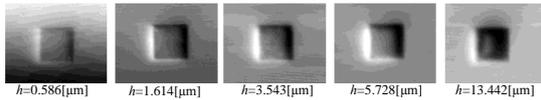
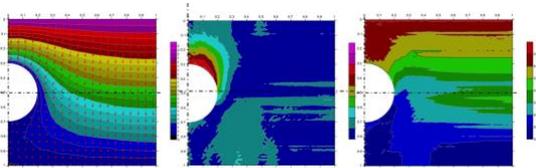


図4 深さを変化させた試料の実体EAI

(3) マルチフィジクス問題に関する数値解析手法の3次元化を目指し、仮想EAIの取得を行った。3次元化については定式化までにとどめ、従来の熱伝導・弾性・圧電の物理に加えて新たに電磁波との連成を解くための解析手法を確立し、有限差分法を用いて解析を行った。その結果、一様な温度場、一様な応力場に加えて一様な電磁場のもとでは、円孔欠陥部での位相の変化を増大させる増幅機能の可能性を確認した。この知見は、実体EAIの高分解能化に重要な情報となった(図5参照)。



(a)温度 (b)応力 (c)電場

図5 円孔周辺の温度、応力、電場の分布

(4) 集束イオンビーム加工機(FIB)を用いた欠陥導入方法により、そのトポロジーの変化に対する実体EAIを取得した。そして、(3)の手法を用いて欠陥部で散乱されるエネルギー輸送を調査し、欠陥形態に応じたイメージングの元になる位相変化について詳細に検討した。材料として、表面性状の極めてフラットなシリコンウェハを用い、厚みが50ミクロンから500ミクロンまでのサンプルに対して、裏面に深さの異なる正方形孔群をFIBにより作成し、それらの実体EAIの取得を行ったが、明確な観察像は得られなかった。従来より断面中にある欠陥の同定はすでに取得されているが、底面に開放された孔の観察は絶縁板を介した圧電素子による弾性波の検出が困難であることがわかった。これらの知見から、孔加工を持つウェハと何ら加工を施さないウェハの2枚あわせたサンプルの作成を着想し、その実体EAIを取得するアイデアに至った。

(5) 円孔の存在を計算科学的に同定する仮想イメージングについて、成果(3)の手法を用いて構築した。その結果、図6、7そして8のように、位相差を用いたリング状、球状、柱状空孔に関する仮想EAIの検出ができ、このことから深さの同定の基本データの取得と実体EAIでの深さ同定のための参照データとしての適用が可能になった。

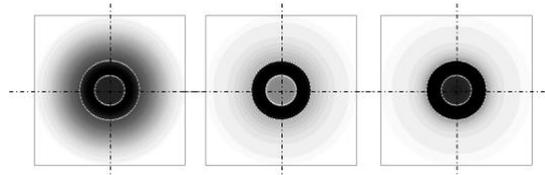


図6 仮想EAIによるリング状欠陥の同定

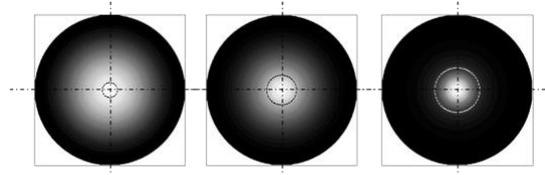


図7 仮想EAIによる球状欠陥の同定

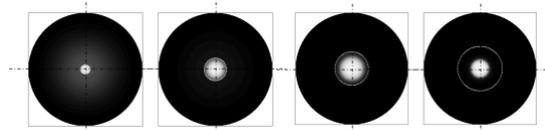


図8 仮想EAIによる柱状欠陥の同定

## 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0件)

[学会発表] (計3件)

- ① Y. Shibutani, Multiscale Modeling; Atomistic and Continuous Pictures in Mechanics, The 9th Asia Computational Materials Design Workshop (9th CMD Workshop), 2017年.
- ② 櫻井孝介, 渋谷陽二, 垂水竜一, 張 培駿, 界面を持つ熱電気弾性場の波動に伴うエネルギー輸送解析, 日本機械学会関西学生会平成27年度学生員卒業研究発表講演会, 2017年.
- ③ 張 培駿, 渋谷 陽二, 垂水 竜一, 界欠陥を持つ2次元熱電気弾性体のマルチフィジクス波動解析, 日本機械学会関西支部第92期定時総会講演会, 2017年.

[図書] (計1件)

- ① 渋谷陽二, 中谷彰宏, コロナ社, 材料力学, 2017, 335

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻 渋谷研究室

<http://www.comec.mech.eng.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

澁谷 陽二 (SHIBUTANI, Yoji)  
大阪大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：70206150

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

小山敦弘 (KOYAMA, Atsuhiro)  
長崎大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：40324800

(4) 研究協力者

張 培駿 (ZHANG, Beishun)