

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 27 日現在

機関番号：32638

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420057

研究課題名(和文) 弾性表面波定在波の合成によるMHz帯域の微小振幅超音波接合装置の開発

研究課題名(英文) A Study on Power Accumulation Method of Surface Acoustic Standing Wave for Precise Joining by using MHz-band ultrasonic Oscillation

研究代表者

渡辺 裕二 (Watanabe, Yuji)

拓殖大学・工学部・教授

研究者番号：30201239

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：精密な金属接合の実現のため、PZT圧電基板を用いたMHz帯域弾性表面波(SAW)による超音波接合法を開発した。PZT基板は振動発生力および耐荷重の高いハード材とした。電極配置は発振器と反射器を組み合わせたファブリペロー共振器型で設計した。その結果から、幅30mm、厚さ20mm、長さ90mmのPZT基板上に、発振器電極16対、反射器電極34対の2.7MHzのSAW素子を製作した。電極位置の振動変位は約40nm(P-P値)であった。さらに十分な変位振幅を得るため、め正八角形基板の表面に45°ずつ角度間隔をあけた4組のSAW共振器を構成してパワー合成を行った結果、金箔接合において接合強度が得られた。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is applying ultrasonic joining method to “flip chip bonding”. The advantage of usage of a SAW device for the joining method is follows: Damages of joined parts can be avoided and positioning accuracy becomes higher, because displacement amplitude should be small at higher frequencies. On the other hand, it is very difficult to get wider area of joining parts by using conventionally used longitudinal-mode transducer at higher frequencies. However, we can get a wider work area on a SAW device. Here, we tried using PZT substrate, because PZT substrate is very harder than LiNbO3 substrate. However, oscillation amplitude of PZT will be very low. So, we redesigned of the resonator, and we changed patterning process of resonator to photoetching method from vacuum deposition. In this study, we designed a SAW power accumulator to obtain the sufficient displacement amplitude, and we joined a couple of Au-foil.

研究分野：超音波工学

キーワード：弾性表面波 超音波接合 超音波金属接合 超音波精密加工 超音波精密接合 高周波強力超音波

1. 研究開始当初の背景

(1) 社会的要請： L S I など電子部品の微細化に対する「精密溶接」への期待

在来の超音波金属溶接では、主として15 kHz～60kHzの縦振動工具を用い、その先端部側面を試料に押し当てて溶接しているが、最近では、電子部品の高密度化に対応できなくなりつつある。たとえばLSIにおいては、外部との接続端子はバンプと呼ばれる多数の突起状端子として素子面に2次元的に設けられており、その端子数の多さから、1点ずつ接続する従来の超音波ワイヤーボンダーでは対応が困難である。さらに現在は、基板上的配線パターンと素子面上のバンプを重ね合わせて一発で接続するフリップチップ方式が主流となっており、ワイヤーボンダーでは構造上の理由から接続が不可能なため、加熱、加圧および超音波振動を組み合わせている。現在、バンプ間隔は10 μ m程度にまで高密度化しており、加圧・加熱によるバンプの変形や損傷、超音波振動による接続部のずれや溶接むらが顕在化している。接合時間の短さなど、超音波溶接の利点はよく知られており、この分野への適用のため、精密かつ一様な接合を実現するアイデアが強く求められている。しかし、超音波加工に用いる振動系を新しい発想で開発できる研究機関は、世界的に見て極めて少ない。

(2) 国内外の研究動向について： MHz帯の強力超音波振動子の出現と応用（弾性表面波（SAW）の利用）

図1に示すすだれ状電極を用いたSAW素子は、もっぱら中間周波数フィルタなどの回路部品として使われてきた。しかし近年、SAWによる液体の霧化やアクチュエータなど、SAWの強力超音波応用に関する研究が始まった。これらの結果は「超音波応用加工」への利用価値を認識させるものであった。従来の縦振動子による超音波接合では、20 μ m～50 μ m程度の変位振幅が使われてい

たが、SAWでは1 μ m以下であることから、前項で示した「精密溶接」の解決策の有力候補としてSAWに着目するに至った。

現在までに、代表者らはニオブ酸リチウム圧電結晶基板を用いた2.5MHz、振動変位振幅150nm_{p-p}のSAW共振器による金リボン同士の溶接を試み、接合状態に至った。

MHz帯域の固体振動子による金属の超音波接合において世界初の成果である。しかしながら圧電結晶は高い静荷重や熱応力に対して脆く、また高価であることから、安価で堅牢な圧電セラミックの利用が望まれる。

一方、現状では周波数自体がMHz帯にようやく届いたところであり、波長もバンプ間隔に対して1.6mmときわめて長い。さらに、共振させて定在波を発生させることから、半波長ごとに現れる振動の節のため、0.8mmごとに振動不感領域が現れる。また、定在波は面に垂直な方向の振動であることから、接合試料内の伝搬も厚さ方向が主であり、試料内を斜め方向に伝搬する波による広範囲の接合は困難な状況にある。

これらの解決が本研究に課せられた課題である。

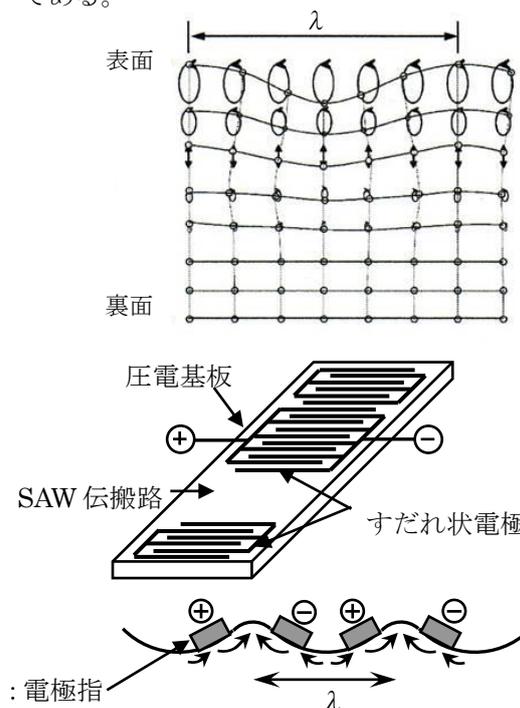


図1 SAWの振動軌跡と励振方法

2. 研究の目的

本研究では、代表者の提案した弾性表面波による超音波接合法について、数 MHz 以上の高周波超音波接合に適用するための、一様な振動変位振幅をもつ振動工具を開発する。

本研究の到達目標は、超音波による金属の「微細接合技術」の確立である。その手段として、本研究では MHz 帯域の「弾性表面波 (SAW : Surface Acoustic Wave)」を利用する。SAW 素子はフィルタなど電子部品として広く使用されているが、代表者らは、その伝搬路において幅広く一様な一方向波面が得られることに着目し、伝搬路全体を広い面積をもつ溶接工具面として利用するという着想を得た。微小変位振幅の SAW により、溶接時の損傷・位置ズレの回避を実現する。

3. 研究の方法

(1) 実験環境ならびに素子作成法の確立

① 機材の整備および圧電セラミック (PZT) 基板材料の検討

まず基板材料の選定においては、以下の手順で接合用基板としての性能を評価する。PZT 基板には、同じ印加電圧に対して変位振幅が大きいソフト材と、力が大きいハード材があるため、双方について購入・検討し、接合に適切な PZT 材を決定する。

PZT 圧電セラミックと圧電結晶の電気機械変換効率率は概ね同じであることと、予備実験として試行した研究室所有の PZT 基板による一軸型 SAW 素子の霧化実験から、PZT 基板によっても接合可能な振動変位振幅は得られると考えられた。

② 電極構成および電極生成法の検討

電極構成は、加工に十分な変振幅を得るためにファブリペロー型の共振器の構成とする。また従来の当研究室の SAW 実験では、レーザ加工で作成したマスクパターンを用いて、真空蒸着装置によりアルミの電極パターンを生成してきた。しかし、加工精度の限

界から、本実験ではフォトエッチング法による電極生成を実施する。ここではまず、一軸の電極配置から始める。

③ 電気的特性の確認

申請のインピーダンスアナライザにより、SAW 素子のアドミタンスの周波数特性 (電気的共振特性) を測定する。(本来は設計周波数付近において、単峰性の特性となる。)

共振の鋭さならびに共振点の数や周波数間隔などの状況から、電極間隔のばらつきの有無など電極パターンの良否を判定する。不具合がある場合は成膜委託先と協議し、改善する。なお、共振周波数と電極間隔から、それぞれのセラミックの SAW 音速を算出して以後の設計の基礎データとする。

以上の手順で作成した SAW 素子の伝搬路に対して接合実験と同様の圧力を加え、加圧時の電気的特性変化ならびに SAW 振幅変化を評価する。特に、振幅変化が小さい材料の方が、接合に適していると考えられる。さらに、液体の霧化実験の結果を加味して、接合に適した PZT 材を選択する。

(2) 波面合成 (パワー合成) 方式の検討
共振現象を利用して大きな振幅を得る方法においては、「定在波」の存在が難点となる。すなわち、振動の節位置においては接合などの加工ができないからである。そこで、次のような解決法を試行する。

図 2 に示す定在波において、2つの定在波の交差角を 2θ とする。ここで、定在波の位

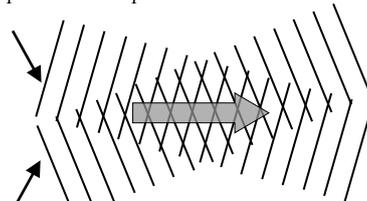
$$u_1 = A \sin k_1 x \cdot \sin \omega t$$

$$u_2 = A \cos k_1 x \cdot \cos \omega t$$

図 2 2つの定在波の合成による進行波成分の発生

位相が互いに $\pi/4$ だけずれるように交差部中心からの距離をずらして電極を配置し、さらに、それぞれの電極に印加する電圧の位相も $\pi/4$ だけずらすと、交差部には両方の定在波の重ね合わせとして、次のように進行波成分が現れる。

$$A \sin(k_1 x) \sin(\omega t) + A \cos(k_1 x) \cos(\omega t) \\ = A \cos(k_1 x - \omega t)$$

ここで $k_1 = k \cos \theta$: k は波長定数

(接合面として必要な面積に対しては図 2 開口幅と交差角 θ の調整が必要である。)

上式に基づいた進行波成分の発生を確認するために、以下の手順で評価を進める。

① (1) で決定した PZT 材料および共振器パターンを用いて、正八角形の PZT 基板上に SAW 共振器を作製する。

② この基板上に、隣同士で 45° だけ傾いた共振器が 4 対できる。ここでは、1 対を基準として、両隣の 2 対を空間的に同じ位相で駆動するよう電極を成膜する。残りの 1 対は、空間的に $\pi/4$ だけずれるよう成膜する。電極パターンデータの作成においては、研究協力者の成瀬氏に作成および確認を依頼する。

同位相の共振器は単純なパワー合成器として使用し、接合に要する変位振幅の測定に利用する。2 対および 3 対を同時に駆動することで、接合に必要な振幅が明確になる。 $\pi/4$ だけずらした共振器は、隣の 1 対と組み合わせで進行波の発生を確認するために使用する。

パワー合成においては、1 対の共振器に流れ込む電流と振動変位を測定し、2 対もしくは 3 対を同時に駆動した時に、交差部中央において変位が加算されていることを確認する。進行波駆動においては、交差部の全体にわたって変位分布を測定し、進行波の発生を確認する。

③ 十分なパワー合成および進行波励起がない場合には、電極の質量を考慮した設計を行

うなどの改善を行う。質量により、電極部分だけ音速が遅くなることから、電極指幅と電極指間の寸法調整で解決できると考えている。

(3) 接合実験

金リボンを用いた接合実験を行い、接合に供することが可能かどうか考察する。また、既設の引張試験機と走査型電子顕微鏡を用いて接合強度の測定ならびに接合界面の破面観察を行い、接合状態を評価する。

4. 研究成果

(1) PZT 圧電基板の選択と電極パターンの構成

PZT 基板には、同じ印加電圧に対して変位振幅が大きいソフト材と、力が大きいハード材があるため、双方について SAW 発生用電極を表面に生成して検討した結果、本研究では周波数特性の先鋭度がより急峻なハード材を採用することに決定した。また、予備実験として試行した PZT 基板による一方向性 SAW 素子の霧化実験から、PZT 基板によっても接合可能な振動変位振幅が得られることを確認した。

以上を踏まえ、接合用素子として十分な振動変位振幅を得るために、SAW 発振器と SAW 反射器を組み合わせた共振器の構成を採用することとし、理論に基づくシミュレーションプログラムを作成し、最適設計値を求めた。まず、発振器部と反射器部の間隔に関しては、ファブリペロー共振器の構成を参考にし、反射器端部における位相変化を考慮して、往復で $(\text{波長}/4) + n$ 波長の間隔を採用することにした。この時点でニオブ酸リチウム基板にフォトエッチング法で電極を生成し、周波数特性を測定した結果、従来の設計法および蒸着により電極を生成した基板に対して、共振の先鋭度に大きな改善が見られた。次に、電極対数とメタライゼーションレシオ (電極 1 対における電極部分と基板部

分の長さの比) について検討した結果、幅 30mm×厚さ 20mm×長さ 90mm の PZT(富士セラミック : C-213) 基板にアルミニウム電極を 1 μ m 厚でフォトエッチングにて生成するという条件に対して、電極対数は 14 対、反射器対数 50mm とすることにより、副振動の発生が抑制できることを確認した。

(2) パワー合成方式の検討

前項 (1) で確認した 1 軸方向の SAW 共振器の電極パターンを使用して、正八角形の PZT 基板 (富士セラミック : C-213) の表面に、45° ずつ角度間隔をあけた 4 組の SAW 共振器を構成し、それぞれのパワーを合成する方式とした (図 3)。

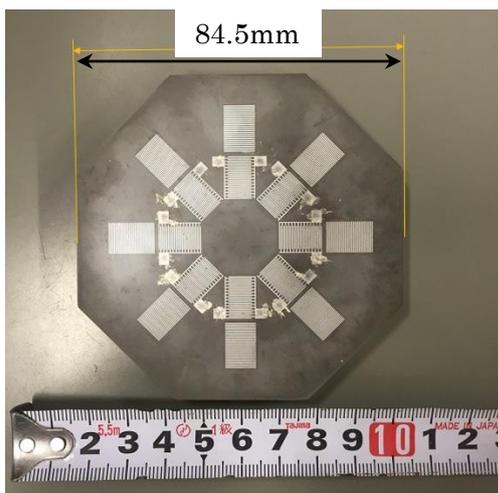


図 3 パワー合成型 SAW 共振器

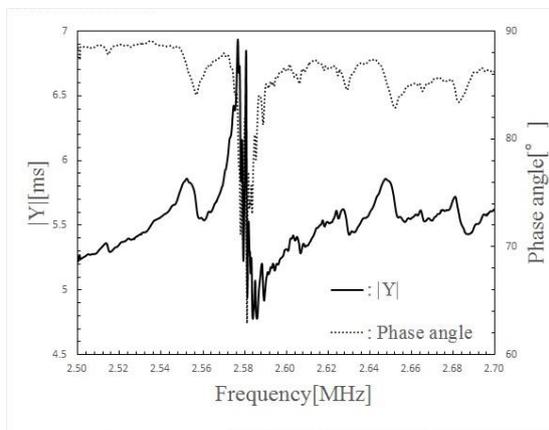
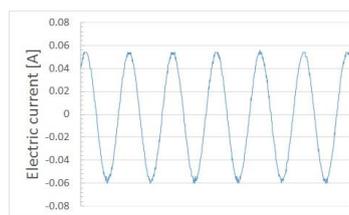
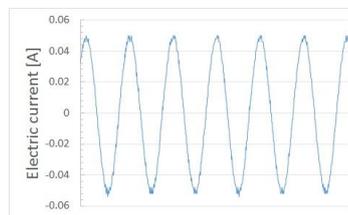


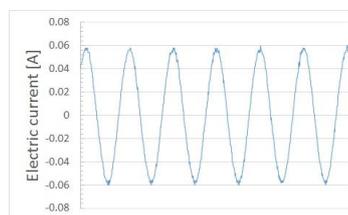
図 4 パワー合成器のアドミタンス特性



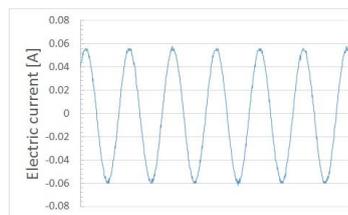
(a) Pair A



(b) Pair B



(b) Pair C



(b) Pair D

図 5 対向する各 1 軸方向 SAW 共振器における電流波形 (パワーの分担)

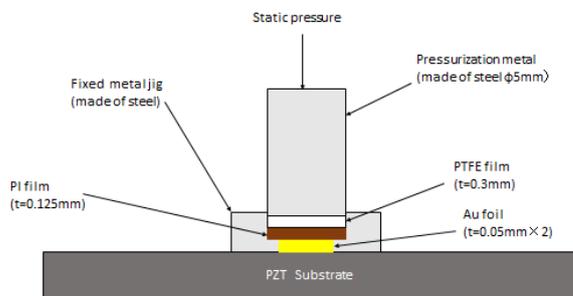


図 6 接合実験装置

図4は合成器全体のアドミタンス特性であり、各軸方向の SAW 共振器の共振周波数が良く一致していることが分かる。また図5は各共振器に流れ込む電流波形であり、振幅・位相ともに良く同期が取れている。つまり、パワー分散が均一に行われている証拠である。言い換えると、各軸の SAW パワーが効率よく合成されていることになる。

さらに、図6のような実験装置を構成し、接合実験を行った。その結果、微弱ではあったが金箔接合において強度が測定できた。ニオブ酸リチウム基板との特性の違いから、接合強度向上のためには、高い電極間電界地が必要と考えられるため、さらに高い周波数（つまり狭い電極間距離）が必要であるとの認識に至っている。

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)

[学会発表] (計3件)

① Ayesya Azreena Mohd Azhar, Yuji Watanabe, A study of Surface Acoustic Wave for Ultrasonic Applications, Malaysia-Japan Academic Scholar Conference 2014 (MJASC2014) p31(2014 Nov, Tokyo)

② Hiroki Nakamura, Yuji Watanabe, Kongo Naruse, A study on power accumulator of surface acoustic wave by using PZT substrate and its application to Au foil joining, Proc. The 37th Symposium on Ultrasonic Electronics (2P4-6) (Nov. 2016, Busan, Korea)

③ Hiroki Nakamura, Yuji Watanabe, Development of MHz band high-power ultrasonic oscillators, The 13th IEEE Transdisciplinary Oriented Workshop for Emerging Researchers (13th IEEE TOWERS) (C21) (Dec. 2016, Tokyo)

6. 研究組織

(1)研究代表者

渡辺 裕二 (WATANABE, Yuji)

拓殖大学・工学部・教授

研究者番号：30201239

(4)研究協力者

成瀬 健悟 (NARUSE, Kengo)

精電舎電子工業(株)技術部