

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18055

研究課題名(和文) 切削加工によるニオブ酸リチウム細線光導波路の作製

研究課題名(英文) Fabrication of Lithium Niobate waveguides using ultra-precision ductile-mode cutting method

研究代表者

多喜川 良 (Takigawa, Ryo)

九州大学・システム情報科学研究所・助教

研究者番号：80706846

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：大きな電気光学効果・非線形光学効果を有するニオブ酸リチウム(LNと略す)結晶で平滑な側壁を有する低損失な強い光閉じ込め導波路を実現するため、切削加工に着目した。これにより、平滑な垂直側壁加工(RMS:< 5nm)が可能となり直線・曲線光導波路作製に成功した。また、LN導波路をこれと熱膨張係数が一桁異なるSi上へ集積するため、高温プロセスを要しない大気中異種材料接合法の開発を行った。Siプラットフォーム上の強い光閉じ込めLN導波路型デバイスの実現に資するものとなる。

研究成果の概要(英文)：Lithium Niobate (LiNbO₃, LN) crystal is a promising photonic material because of its excellent electro-optical and nonlinear optical effects. In this study, we introduce the application of ultra-precision ductile-mode cutting method to the fabrication of strongly confined LN ridged waveguides. As the result, ridged waveguides with ultra-smooth sidewalls (RMS: < 5 nm) were obtained in LN crystals. In addition, we demonstrated preparation of bonded LN thin films on Si substrates by transfer bonding in air for LN/Si hybrid photonic devices.

研究分野：光マイクロマシン、異種材料低温接合、光集積デバイス

キーワード：低損失光導波路 ナノ・マイクロ加工 大気中異種材料低温接合 切削加工

1. 研究開始当初の背景

大きな電気光学効果や非線形光学効果など優れた光学特性を有するニオブ酸リチウム(LiNbO₃, 以下 LN と略す)結晶は高速光変調器、波長変換素子、光マイクロセンサなど導波路型デバイスとして幅広く利用されている。光マイクロシステムにおいて欠かせない LN 光デバイスではあるが半導体レーザ等他の光素子と比べサイズが大きく小型化が強く望まれている。この小型化を図るためには LN 結晶内に導波光をより強く閉じ込めることが有効となる。

従来の LN 光導波路はチタン(Ti)拡散法やプロトン交換法により形成される。比較的簡易なプロセスで低損失な埋め込み型光導波路の作製が可能となるが光の閉じ込めは屈折率差構造上弱い。そこでこの埋め込み導波路よりも強い光閉じ込め効果をもたらすリッジ型の高屈折率差細線光導波路への期待は大きい。しかしながら、従来の半導体エッチング技術を LN 導波路加工に適用した場合、エッチング速度、加工形状、側壁の表面粗さの制御ができず、平滑な垂直側壁加工に限界があり、低損失 LN リッジ型光導波路の作製は困難であった。ダイシング加工による LN リッジ光導波路も検討されているが曲線光導波路構造の作製が不可能なためアプリケーションが限定される。課題は、導波路作製に向けた LN 結晶のマイクロ・ナノ加工技術を開発することである。本研究では、脆性材料である LN 結晶のこの導波路加工に、これまで発想のなかった切削加工を適用する。結晶内への切削工具の切り込み量をナノレベルにし、高精度(±1 nm 以下)で繰り返し切削することで脆性破壊を回避し、平滑な垂直側壁加工ができると考えた。

次に、次世代の小型・高集積マイクロシステムには LN 光デバイスを加工性に優れた Si 基板上にハイブリッド集積する必要がある。熱膨張係数が一桁異なる LN と Si の場合、従来の高温アニールを要する従来の接合技術の適用は困難である。表面活性化接合法は常温接合を可能とするが一般に超高真空中で行われ、コストの点で課題である。一方、比較的低温接合とされる酸素プラズマアシストボンディングの場合、強固な接合強度を得ようとする 200 °C 以上のアニールを要する。これらに代わるウエハ加熱を行わない新しい大気中接合法を開発し、LN 光デバイスの集積技術として発展させる必要がある。

2. 研究の目的

極めて困難とされた平滑な側壁を有する直線・曲線 LN 細線光導波路の実現に向け、機械的な切削加工技術を提案し、適用性を調査する。併せて、熱膨張係数が大きく異なる LN と Si の大気中接合技術を開発し、LN 薄膜光回路の Si 上への新しい集積技術として発展させる。

3. 研究の方法

(1) 切削加工による LN 細線導波路の作製

LN 結晶の脆性破壊回避のため単結晶ダイヤモンド工具の切り込み量をナノレベルにし、高精度に繰り返し延性モード切削する。導波路加工のための適切な条件を調査するとともに、平滑な垂直側壁を有する直線・曲線加工を行う。これにより、低損失 LN 光導波路の作製を目指す。

(2) 大気中接合技術による LN-Si 集積化

熱膨張係数が一桁異なる LN と Si 接合の場合、高温プロセスを施すことはできない。そこで、Au-Au 低温接合技術、ウエハ全体の加熱を要しない局所的レーザアニール利用した接合法を開発し、LN-Si 集積化を図る。さらに、将来の薄膜ナノ・マイクロデバイスのヘテロ集積化を可能とする移載接合へ展開する。

4. 研究成果

(1) 切削加工による低損失 LN 光導波路の作製

単結晶 LN(Z-cut)ウエハに切削加工により導波路加工(表面マイクロマシニング)を行った。図 1 に本切削加工の様子を示す。加工工具には鏡面加工が施された単結晶ダイヤモンドを用いる。工具加工面の表面粗さ(RMS)は 0.7 nm である(測定領域: 50 μm × 50 μm)。この工具を高精度に繰り返し切り込むことでリッジ・細線光導波路を作製する。工具切り込み精度の最小分解能は、1 nm(X, Y, Z), 0.00001 度()である。このレベルの高精度な切り込みを行えば平滑な側壁加工が可能と考えられる。LN 結晶の脆性破壊を回避し、平滑な垂直側壁の達成条件は、延性モード加工を高精度に繰り返し行うことである。そこで、延性モード切削条件を可能とする切り込み深さを調査した。工具の切り込み深さを 200 nm とした場合、LN 結晶の加工面に脆性破壊が起きる。切り込み深さを 100 nm 以下とした場合、加工部に欠けは見られず流れ型の切り屑が観察された。これは、適切な延性モード加工が行われていることを示唆する。LN 結晶の脆性-延性遷移点の切り込み深さは 100 nm 程度となることが今回の実験から分かった。

そこで、本研究はこの条件で直線・曲線型の導波路加工を進める。作製した直線型リッジ光導波路をレーザ顕微鏡により観察した結果を図 2 に示す。サンプル内に欠けが入ることなく、ほぼ垂直な側壁を有するリッジ型細線光導波路の作製が可能となることがわかった。導波路側壁の表面形状を白色干渉型顕微鏡により観察した結果を図 3 に示す。水平方向の痕は、加工時に工具で側壁を引っ掻いたため生じたのだと考えられる。表面粗さ(RMS)は約 4.6 nm(測定領域: 2.5 μm × 20 μm)となった。これは導波光の散乱損失を抑える上で十分に平滑な側壁である。

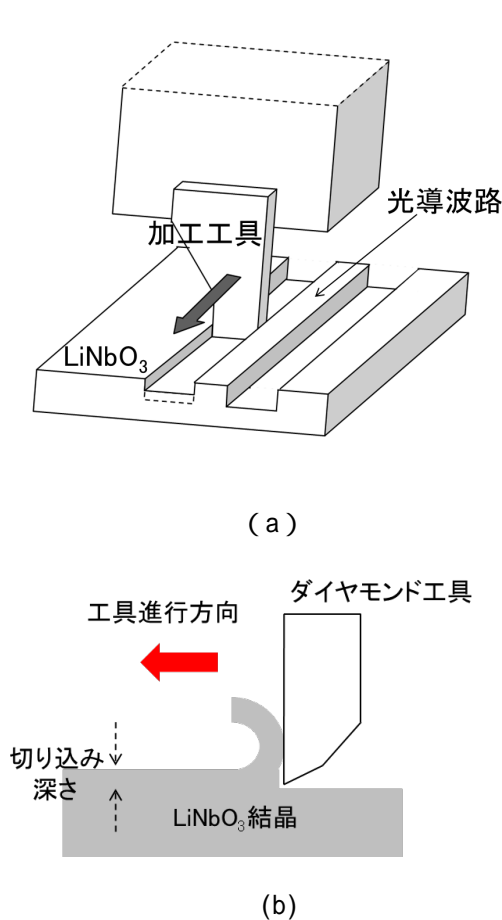


図 1 . 切削加工の様子

平滑な垂直側壁を有する曲率半径 $300\ \mu\text{m}$ 以下の急峻な曲線導波路の作製も同条件で可能となることが分かった。図 4 に直線導波路と曲率半径 $300\ \mu\text{m}$ の曲線導波路を組み合わせた導波路の光学顕微鏡写真を示す。直線と曲線リッジ導波路、さらにつなぎ目においても欠け等は観察されず導波路構造の健全性が確認できた。また、今回の実験では導波路幅 $800\ \text{nm}$ の加工は困難であった。この原因の一つに加工機に取り付けたサンプルの傾斜の影響があると考えられる。この傾斜を適切に検出し補正する機構を取り付けることが今後の課題となる。そのため本実験での導波路幅は $4\ \mu\text{m}$ から $10\ \mu\text{m}$ とした。直線光導波路の伝搬損失を測定した結果、 $1\ \text{dB/cm}$ 以下と低損失な光伝播が確認された(測定波長: $1550\ \text{nm}$)。なお、基板垂直方向は Ti 拡散を行うことで光閉じこめを行っている。

(2)大気中接合技術による LN-Si 集積化

LN と Si 接合の場合、 $150\ \text{nm}$ 以上のアニールプロセスを加えることは困難であった。そこで、レーザ照射を用いた局所的アニールを利用した。ウエハ全体ではなく接合界面を局所的にアニールすることが狙いである。LN 結晶には透明で Si 結晶によく吸収する波長 $1064\ \text{nm}$ の Q スイッチ YAG レーザを利用した。パルス幅は $4\ \text{ns}$ 程度で、繰り返し周波数は $10\ \text{Hz}$ である。

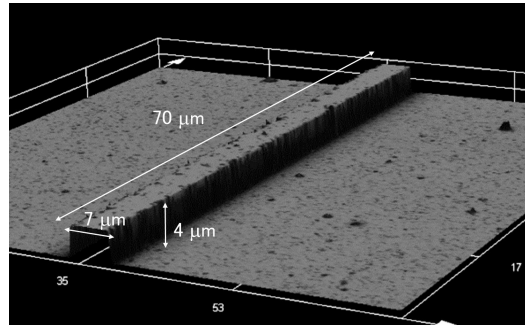


図 2 . 切削加工により作製した直線光導波路

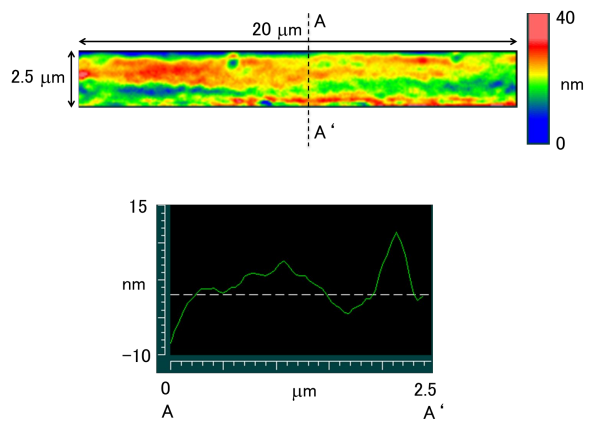


図 3 側壁の表面形状

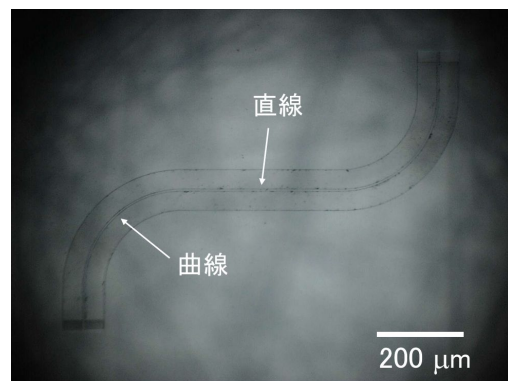


図 4 直線光導波路と曲線光導波路

まず、LN と Si それぞれに酸素プラズマもしくは紫外線照射を行った後仮接合を行う。その後レーザ照射をすることで強固な接合強度の確保を図る。図 5 にレーザ照射の様子を示す。接合強度は、引張り試験による評価を行った。結果としてレーザフルエンスが $0.5\ \text{J/cm}^2$ の時、強固な接合強度が得られることが分かった。クラックなくウエハレベル接合が達成されたことから従来のウエハアニールを要する接合法よりも有効であることが実験的に示された。

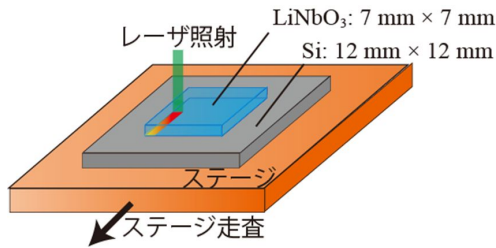


図 5. レーザ照射の様子

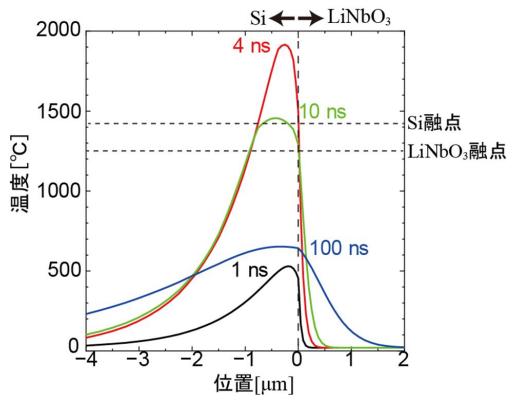


図 6. レーザ照射後の接合界面付近温度分布の解析結果

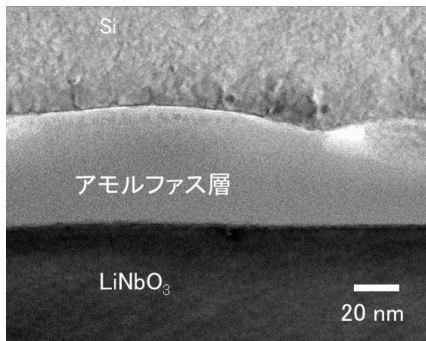


図 7. 接合界面の断面透過電子顕微鏡写真

レーザフルエンスを 0.5 J/cm^2 とし照射した時の熱解析を行った。図 6 に接合界面付近の温度分布の解析結果を示す。LN の融点は 1250 であり、Si の 1412 である。解析結果は 20 nm 程度の LN と 500 nm 程度の Si が溶融することが示した。次に接合界面の透過電子顕微鏡(TEM)・EDX 分析を行った。図 7 の TEM 写真より接合界面付近に 50~70 nm 程度のアモルファス層が介在していることが分かる。EDX 分析の結果、この層から Si、Nb、O 原子のピークが確認されたことからレーザ照射により LN と Si が溶融し混ざり固まることで接合が達成されたのだと考えられる。また、レーザフルエンスが 1 J/cm^2 を越えると接合強度が低下していくことも分かった。これは Si のアブレーションの影響であろう。また、塑性変形しやすい構造である Au 先鋭バンプと超音波接合を併用した大気中常温接合からも LN - Si 接合は成功した。

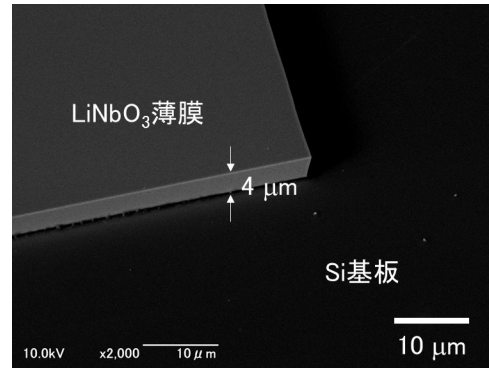


図 8. Si 基板上に移載接合した LN 薄膜 (膜厚: $4 \mu\text{m}$)

接合界面に金属が入ることが許されるアプリケーションには有効となるであろう。さらに、将来の薄膜ナノ・マイクロデバイスの集積化に向けて、上述の接合手法を移載接合として発展させた。LN 薄膜集積化技術としてスマートカット法の報告が近年多いが本研究では研磨により形成された高品質な薄膜を Si へ接合する。本研究では、移載することで $4 \mu\text{m}$ 程度の LN 薄膜チップの接合に成功した(図 8)。

以上より、これまで困難とされていた LN 細線光導波路実現に向けて切削加工の有効性を示した。LN 薄膜にあらかじめ本切削加工により低損失な光回路を形成した後、Si 基板上に移載接合することも可能となるであろう。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5) 件)

Ryo Takigawa, Hiroki Kawano, Hiroshi Ikenoue, and Tanemasa Asano, Investigation of bonding interface of Lithium Niobate and Si wafer-bonded using laser irradiation, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有り, accepted.

Ryo Takigawa, Eiji Higurashi, Tetusya Kawanishi, and Tanemasa Asano, Demonstration of ultra-precision cutting method for Lithium niobate microring waveguide,” Japanese Journal of Applied Physics, 査読有り, vol. 55, no.11, pp.110304-1-110304-3, 2016, DOI:10.7567/JJAP.55.110304.

Hiroki Kawano, Ryo Takigawa, Hiroshi Ikenoue, and Tanemasa Asano, Bonding of Lithium Niobate to Si substrate using laser irradiation, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有り, vol.55, 8S3, pp.08RB09-1-08RB09-4, 2016, DOI:10.7567/JJAP.55.08RB09.

Hiroki Kawano, Ryo Takigawa, Hiroshi

Ikenoue, and Tanemasa Asano, Bonding of LiNbO₃ thin film on Si substrate on Si in ambient air using laser irradiation, 2015 20th Microoptics Conference (MOC), 査読有り, pp.1-2, 2015,

DOI:10.1109/MOC.2015.7416527.

多喜川 良, 強誘電体材料の切削加工によるリッジ型光導波路, MICROOPTICS NEWS, 査読無し, vol.33, no.2, pp.31-36, 2015.

〔学会発表〕(計 5 件)

Ryo Takigawa, Eiji Higurashi, and Tanemasa Asano, Surface Activated Wafer Bonding of LiNbO₃ and SiO₂/Si for LNOI on Si 2017 5th International Workshop on Low temperature Bonding for 3D integration (LTB-3D), May 17, 2017, Tokyo, Japan.

Ryo Takigawa, Demonstration of sternly confined optical waveguides using ultra-precision ductile-mode cutting, The 5th Joint Conference of Research Center for Advanced Biomechanics & Japan Institute of Electronics Packaging Kyushu Branch, March 3, 2017, Fukuoka, Japan.

Ryo Takigawa, Hiroki Kawano, Hiroshi Ikenoue, Tanemasa Asano, LiNbO₃/Si hybrid wafer bonded in ambient air using laser irradiation, 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (Late News), November 10, 2016, Kyoto, Japan.

Hiroki Kawano, Ryo Takigawa, Hiroshi Ikenoue, Tanemasa Asano, Bonding of LiNbO₃ thin film on Si substrate using laser irradiation”, 20th THE TWENTIETH MICROOPTICS CONFERENCE (Post Deadline), October 27, 2015, Fukuoka, Japan.

多喜川良, 強誘電体の切削加工によるリッジ型光導波路, 応用物理学会第136回微小光学研究会「材料を創る、活かす-適材適所の微小光学-」, 2015年5月26日、早稲田大学西早稲田キャンパス(東京都新宿区)。

〔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〕

ホームページ等

<http://fed.ed.kyushu-u.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

多喜川 良 (TAKIGAWA RYO)

九州大学・システム情報科学研究院・助教

研究者番号 : 80706846