

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04925

研究課題名（和文）切削加工と常温接合によるヘテロフォトニクスチップに関する研究

研究課題名（英文）Heterophotonics fabricated by ultra-precision cutting and room-temperature bonding

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） 25,120,000 円

研究成果の概要（和文）：ニオブ酸リチウム（LN）結晶に切削加工を適用し、強い光閉じ込めを可能とするLNOI光導波路を作製し、これをSiプラットフォーム上へ常温接合し集積化することに成功した。LN結晶の導波路切削加工条件の明確化を行い、低損失LNOI（直線・曲げ・マイクロリング型）作製を実証した。また、表面活性化接合法というアプローチから新しい常温接合技術の開発を行い、熱膨張係数が一桁異なるSi上へのLNOI光導波路集積・実装を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果により、光通信等の幅広い分野で利用されるニオブ酸リチウム(LN)光デバイスの大幅な小型・低消費電力・高効率化とともにこれを常温接合することでSiプラットフォーム上への集積・実装の道を拓いた。LN高速光変調器に展開した場合、将来のLSIチップ間・内の大容量・低消費電力データ伝送に役立つ可能性があり、電子機器の性能向上に繋がる。また、提案する導波路切削加工の確立と常温接合のメカニズム解明は学術的な意義のみならず、将来の広範なマイクロデバイス基盤製造技術としての展開も期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, lithium niobate on insulator (LNOI) waveguide for strong optical confinement integrated on Si platform was demonstrated by ultra-precision cutting and room-temperature bonding method. These room-temperature bonding and cutting methods are expected to fabricate various heterogenous devices with large coefficient of thermal expansion mismatch between dissimilar materials, not just LNOI waveguide/Si devices.

研究分野：光実装・集積

キーワード：常温接合 導波路切削加工 LNOI 異種材料集積 LN/Siハイブリッド構造

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

LiNbO₃(以下 LN)結晶は、大きな電気光学・非線形光学効果を有し超高速光変調器や波長変換素子等の光導波路型デバイスとして幅広く利用されている。これら LN 光デバイスの課題の一つ目は、素子サイズが大きいことである。小型化に向けて結晶内により強く光を閉じ込めなければならないが、LN 結晶の微細加工技術の未熟さから強い光閉じ込め導波路加工が極めて困難である。課題の二つ目は、熱膨張係数が大きい LN 結晶の Si プラットフォーム上への集積・実装手法が確立されていない点である。近年、光集積のための低温ウエハ接合技術として主流になりつつあるプラズマアシスト接合法(接合温度:通常 200 以上)もこの材料への適用は困難である。

そこで本研究では、従来の半導体エッチングではなく切削加工に着目し、LN 結晶からなる低損失な強い光閉じ込め導波路(LN on Insulator: LNOI 導波路)を作製する手法の開発を行う。また、表面活性化接合法というアプローチから熱膨張係数の問題を回避できる常温(ないし低温)接合技術を開発し、将来の LNOI 光導波路型デバイスの Si 上に集積・実装へ資する。

2. 研究の目的

切削加工と常温接合技術により、低損失な LNOI 光導波路(曲げ・リング構造)型デバイスを作製し、Si プラットフォーム上へこれの集積・実装を目指す。そこで、LN 結晶の導波路加工・接合技術の開発を行い、基礎的な検討を行う。LN 薄膜に延性モード切削加工を適用し、曲げ・リング LNOI 光導波路を作製する。LN 結晶の異方性を考慮しながら切り込み量、切り込み角、加工速度等をパラメータとし、側壁形状・表面粗さ等を評価する。平滑な曲げ・リング側壁が得られる加工条件の明確化が目的の一つとなる。また、加工時に結晶内に生じる残留歪み等についても評価し、最適な加工条件を考察する。次に熱膨張係数が一桁異なる Si 上への集積・実装に向けて、表面活性化接合法というアプローチから新しい常温接合技術を開発する。

3. 研究の方法

Si プラットフォーム上に LNOI 光導波路型デバイスの実現に向け、導波路加工技術と接合技術を開発する。

従来の半導体エッチングプロセスを LN 結晶へ適用した場合、平滑な導波路側壁加工ができないことが課題となる。そこで、高精度微細加工が不可欠なこの光導波路加工に切削加工を適用する。切削用ダイヤモンド工具の切り込み深さをナノレベルにし、高精度(± 1 nm)で繰り返し切削することで脆性破壊を回避し、平滑な側壁加工が可能と考えられる。加工条件を詳細に調査し、手法の有効性を実証する。

熱膨張係数差が一桁異なる LN 結晶と Si 結晶の集積化には常温接合(ないし 150 以下の低温接合)が有効である。表面活性化接合法というアプローチから常温接合技術を開発する。金属を介した接合法と直接接合法を提案する。接合達成条件の調査・接合メカニズムの解明とともに、Si プラットフォーム上への LN 等の異種材料光導波路集積技術としての有効性を実証する。

4. 研究成果

以下が、本研究で得られた成果である。

LN 結晶にダイヤモンド工具でナノレベルの高精度で繰り返し切り込む延性モード切削により、平滑な側壁を有する曲げ・リング導波路作製条件を明確化した。平滑な導波路側壁加工が可能となり、散乱損失の小さい LNOI 光導波路が期待される。また、動力計とレーザ顕微鏡を利用することで LN 結晶の方位ごとの延性モード切削加工条件(工具の切り込み深さを中心に)を調査した。LN 結晶の物性は強い異方性を示すことで知られ、特にリング導波路構造等の作製には、重要な基礎データとなるはずである。加えて、透過型電子顕微鏡(TEM)観察により導波路加工時の LN 結晶内に生じる残留歪みの調査も行った。加工条件によっては、数十 nm から 100 nm 程度の結晶表面の歪みと切り込みごとの加工痕が結晶内にまで生じることも分かってきた。また機械的加工であるゆえ、加工サンプルや工具の装置への取り付け方法も非常に重要であり、多くの知見・ノウハウを得ることに成功した。

熱膨張係数が大きく異なる LN-Si 集積化のためには常温(ないし 150 度以下の低温)接合技術が求められる。大気中でも酸化しづらい金(薄膜・電子ビーム蒸着によるマイクロバンプ構造等)を利用した表面活性化低温接合技術の開発を進めるとともに、LN と Si 熱酸化膜等の直接接合の開発も試みた。前者は、活性化手法として Ar プラズマ・紫外線等の照射を検討し、大気中低温接合を行った。活性化前後の Au の表面粗さ・濡れ性・結合状態等を評価し、接合達成条件の調査を行った。活性化という点では、Ar プラズマ照射が紫外線照射に比べ大きく有効であることが分かった。ただし、Au マイクロバンプを利用すれば紫外線照射でもある程度の接合強度は確保できることも分かってきた。本大気中接合法は、金電極を接合面に配置できるデバイスアプリケーションには強力なツールとなると考えられる。加えて、これを応用した薄膜移載接合プロセスの確立も進めた。一方後者については、極薄蒸着層を利用した接合技術を開発し、疑似的に直接接合する手法を開発した。これまで、Si 熱酸化膜や LN の常温接合は極めて困難であるとさ

れてきたが、引張り試験・ダイシング試験・ブレード試験による接合強度評価の結果、後工程プロセスに耐えられる強固な接合強度が常温でも得られることが分かった。接合強度のみならず光伝搬特性を考慮し、密着層の材質・膜厚・堆積条件等をパラメータに光導波路集積に向けた接合条件の検討を行った。比較的簡易なダイシング法により作製された接合型直線光導波路を伝搬損失評価用として利用した。伝搬損失を測定したところ約 2 dB/cm となり低損失接合界面が確認できた。LN と SiO₂ の常温接合界面を図 1 に示す。ポイドなく原子レベルの密着が確認でき、強固な接合が達成された。本常温接合技術により残留応力の影響を受けない LN01/Si ハイブリッドウエハを実現した。

近年、本接合技術が LN/ Si 熱酸化膜の組み合わせに限らず、その他の酸化物や化合物半導体（ガリウムナイトライド、シリコンカーバイド）等の組み合わせにも有効であることも分かってきた。接合のメカニズムについては、未だ解明ができていないところもあり、今後も研究を進めていく必要があると考えられる。

上述の で得られた切削加工・常温接合技術の知見を活かし、Si 上にマイクロメートルスケール（半径：300 マイクロメートル程度）の LN01 曲げ・リング光導波路の作製に成功した。図 2 に切削加工による Si 上 LN01 光導波路作製の様子と、図 3 に実際に作製した Si 上曲げ LN01 光導波路の走査型顕微鏡（SEM）で観察した写真を示す。リング光導波路の光学特性評価が今後の課題となる。低損失なシングルモードのリッジ型光導波路を可能とする加工条件の詳細検討も行った。図 4 に、作製した LN01 光導波路と光ファイバをカップリングさせ測定したニアフィールド写真を示す。近年注目されるスマートカットにより作製された LN 薄膜への、本加工・接合の適用性検証も今後の課題の一つとなるであろう。得られた結果は、熱膨張係数が大きく異なり、従来困難とされてきた Si プラットフォーム上への LN01 導波路型デバイス集積・実装に有効であることが実証された。

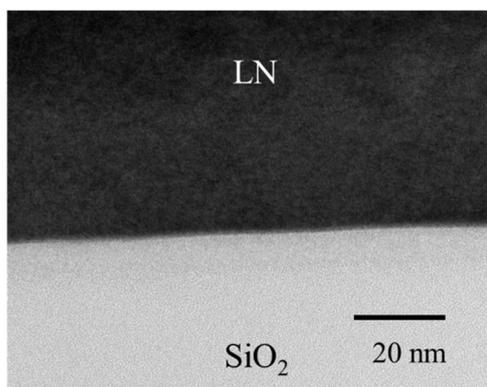


図 1 常温接合界面（TEM 写真）

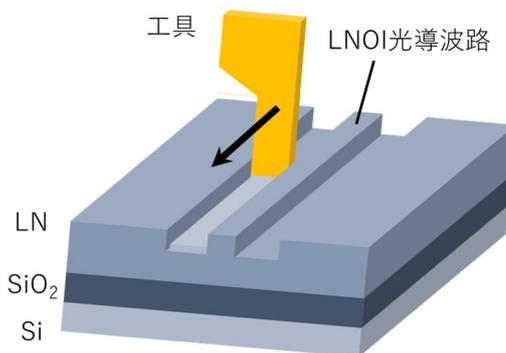


図 2 切削加工による Si 上 LN01 光導波路作製

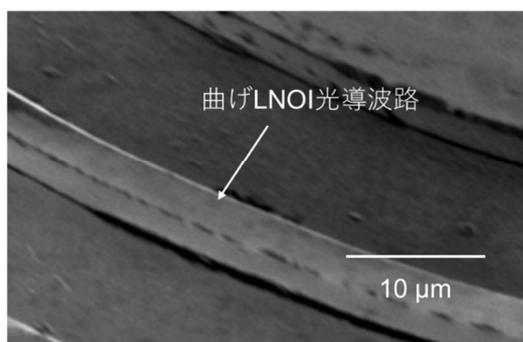


図 3 Si 上の曲げ LN01 光導波路（SEM 写真）

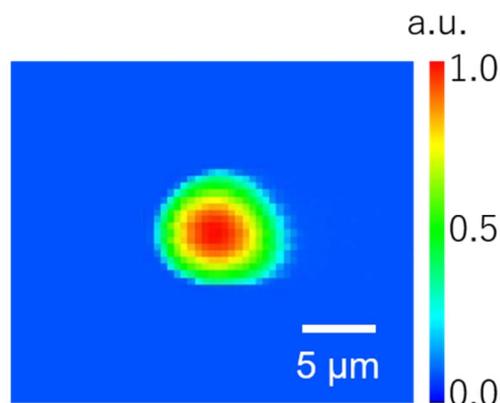


図 4 ニアフィールド測定結果

これら得られた成果は、将来の Si 上への超小型・低消費電力型 LN01 高速光変調器等の実現に向けて大きな第一歩となると考えられる。また、常温接合技術を今後より深化させれば、化合物半導体からなる光源などさまざまな素子の集積・実装も期待できる。

なお、研究成果を社会に還元するため学術論文誌（オープンアクセス誌を含む）への投稿や国内外の学会発表を積極的に行った。本成果の一部で、第 33 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会優秀賞をいただいた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Takigawa Ryo, Matsumae Takashi, Yamamoto Michitaka, Higurashi Eiji, Asano Tanemasa, Kanaya Haruichi	4. 巻 9
2. 論文標題 Demonstration of GaN/LiNbO3 Hybrid Wafer Using Room-Temperature Surface Activated Bonding	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ECS Journal of Solid State Science and Technology	6. 最初と最後の頁 045005 ~ 045005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/2162-8777/ab8369	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takigawa Ryo, Utsumi Jun	4. 巻 174
2. 論文標題 Direct bonding of LiNbO3 and SiC wafers at room temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 58 ~ 61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2019.08.027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takigawa Ryo, Kamimura Keigo, Asami Kenta, Nakamoto Keiichi, Tomimatsu Toru, Asano Tanemasa	4. 巻 59
2. 論文標題 Fabrication of a bonded LNOI waveguide structure on Si substrate using ultra-precision cutting	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SBBD03 ~ SBBD03
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab514e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ryo Takigawa, Toru Tomimatsu, Eiji Higurashi, Tanemasa Asano	4. 巻 10
2. 論文標題 Residual Stress in Lithium Niobate Film Layer of LNOI/Si Hybrid Wafer Fabricated Using Low-Temperature Bonding Method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MICROMACHINES	6. 最初と最後の頁 136-1-136-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/mi10020136	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryo Takigawa, Tanemasa Asano	4. 巻 26
2. 論文標題 Thin-film lithium niobate-on-insulator waveguides fabricated on silicon wafer by room-temperature bonding method with silicon nanoadhesive layer	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 24413-24421
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.26.024413	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryo Takigawa, Eiji Higurashi, Tanemasa Asano	4. 巻 86
2. 論文標題 Surface Activated Bonding of LiNbO3 and GaN at Room Temperature	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 207-213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/08605.0207ecst	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takigawa Ryo, Higurashi Eiji, Asano Tanemasa	4. 巻 57
2. 論文標題 Room-temperature wafer bonding of LiNbO3 and SiO2 using a modified surface activated bonding method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 06HJ12 ~ 06HJ12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.06HJ12	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 多喜川良	4. 巻 117
2. 論文標題 Auを用いた大気中低温接合によるLiNbO3光デバイス実装	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 7-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 多喜川良、日暮栄治、浅野種正
2. 発表標題 接合中間層がLN01光導波路特性に及ぼす影響調査
3. 学会等名 第33回エレクトロニクス実装学会春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上村啓悟, 多喜川 良, 中本圭一
2. 発表標題 超精密切削加工によるLN01光導波路の作製
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 多喜川良
2. 発表標題 紫外線洗浄を利用した 大気中Au-Au低温接合の検討
3. 学会等名 The 7th Joint Conference of Research Center for Advanced Biomechanics & Japan Institute of Electronics Packaging Kyushu Branch
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Takigawa
2. 発表標題 Low-temperature bonding for heterogeneous photonic integration
3. 学会等名 6th K-J Joint Syposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Takigawa
2. 発表標題 Surface activated bonding of LiNbO3 and Si for optical microsystem
3. 学会等名 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference(MNC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryo Takigawa, Eiji Higurashi, Tanemasa Asano
2. 発表標題 Room-temperature wafer bonding of LiNbO3 and SiO2 using sub-nanometer Fe films
3. 学会等名 23rd Microoptics Conference (MOC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 多喜川良、浅野種正
2. 発表標題 Siナノ密着層を利用したLiNbO3とSiO2の常温ウエハ接合と低損失LN01光導波路への応用
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryo Takigawa, Tetsuya Kawanishi, Eiji Higurashi, and Tanemasa Asano
2. 発表標題 Surface Micromachining Using Ultra-precision Ductile-mode Cutting Method for Strongly Confined Low-loss LiNbO3 Waveguides
3. 学会等名 Progress in Electromagnetics Research Symposium(PIERS) 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 多喜川良, 日暮栄治, 浅野種正
2. 発表標題 イオンビーム活性化接合法による Si上LN01導波路の作製と光伝搬特性評価
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久保木猛, 多喜川良, 加藤和利
2. 発表標題 LN変調器向け小型0.18 μm CMOS高速駆動回路
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 多喜川良, 日暮栄治, 川西哲也, 浅野種正
2. 発表標題 切削加工によるSi基板上LN01光導波路の作製検討
3. 学会等名 第32回エレクトロニクス実装学会春季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 多喜川良
2. 発表標題 Auを用いた大気中低温接合によるLiNbO3光デバイス実装
3. 学会等名 電子情報通信学会マイクロ波・ミリ波フォトンクス研究会(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ryo Takigawa, Eiji Higurashi, Tanemasa Asano
2. 発表標題 Room-temperature bonding of LiNbO3 and SiO2 using surface activated bonding
3. 学会等名 30th International of Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 多喜川良, 日暮栄治, 浅野種正
2. 発表標題 表面活性化と低温熱処理を併用したLiNbO3ウェハと SiO2/Si ウェハの直接接合
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考