

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02207

研究課題名（和文）低温ナノ接合界面における光学機能発現と集積フォトニクス応用

研究課題名（英文）Low temperature bonding for integrated photonics application

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・准教授

研究者番号：80706846

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、集積フォトニクス基盤製造技術として透明性を有する高機能接合界面を利用した光学酸化物の低温ウエハ接合技術を開発し、Siウエハ上への酸化物電気光学結晶からなる光導波路型変調器の集積化に成功した。さらに、上記酸化物以外の他材料に対しても本低温接合技術の適用性を調査し、その有効性を示すことにも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により得られた透明性接合界面を利用した光学酸化物の低温ウエハ接合技術は、次世代の異種材料集積フォトニクス具現化のための基盤製造技術として期待される。また、形成された多様な異種材料間のナノ接合界面近傍における原子スケール解析を通じて得られた知見は、将来の接合メカニズム解明に向けて学術的な意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：As next-gen manufacturing technology of integrated photonics, we have developed a low-temperature wafer bonding technique of oxides using a highly transparent bonding interface, and successfully integrated an optical waveguide-typed modulator consisting of an electro-optic crystal on Si platform. The applicability of this low-temperature bonding technique to other materials was also investigated and its effectiveness was demonstrated.

研究分野：低温接合技術と集積フォトニクス

キーワード：低温接合 透明性接合界面 集積フォトニクス 電気光学デバイス LNO1光変調器

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

将来の高度情報化社会では、データセンタ等の情報量増加に伴い、通信速度向上・低消費電力化が課題となる。その中で、電気信号と光信号の変換を行う光変調器がキーデバイスの一つとなる。この光変調器用の材料として、大きな電気光学効果を有し、テラヘルツ帯にも及び超高速電気信号に応答可能な酸化物電気光学結晶である  $\text{LiNbO}_3$  (LN) への期待は大きい。

近年、強い光閉じ込め及び効率の良い電界印加という観点から光変調器の小型・低駆動電力化が期待される薄膜 LN on insulator (LNOI) 構造が注目されている。この LNOI 光導波路型光変調器の Si プラットフォーム上への異種材料集積化が次世代の小型・高集積光マイクロシステムに向けて有効なアプローチとなる。これには、LN 薄膜と Si 熱酸化膜 ( $\text{SiO}_2$ ) を直接接合する必要があるが、熱膨張係数が大きく異なる LN と  $\text{SiO}_2$  の接合には残留応力によるクラック回避等のため 100 以下の低温接合技術が必要となる。低温接合技術としては、表面活性化接合法が有力な手法の一つとなるが、これら酸化物を含む光学結晶には適用が困難とされ、光デバイスに重要な材料系に適用可能な新しい低温接合技術の開発が課題となる。

本研究では、Si プラットフォーム上への酸化物電気光学結晶等からなる低損失な強い光閉じ込め導波路型変調器の集積化に向け、透明性接合界面形成及び光学酸化物の低温接合技術の開発を進め、次世代の異種材料集積フォトニクス基盤製造技術としての確立に繋げる。

### 2. 研究の目的

次世代の集積フォトニクス基盤技術としての展開を見据え、透明性接合界面を利用した酸化物の低温ウエハ接合技術の開発とともに、Si 上への LNOI 光導波路型変調器の集積化を目指す。さらに、他の酸化物材料等に対しても本接合法の適用性検証を行い、汎用的なデバイス製造技術としての可能性を検討する。

### 3. 研究の方法

密着性と透明性を有する高機能接合界面形成のためのナノ中間層材の選定・形成条件等の検討を通じ、LN や  $\text{SiO}_2$  をはじめとした酸化物等の低温接合技術の開発を行う。各種分析法を駆使し、ナノ中間層近傍における原子拡散挙動・結晶構造等の界面状態を原子スケールで把握し、接合界面形成のメカニズム解明を進める。

研究分担者である情報通信研究機構と東京都立大学の研究者との綿密な連携のもと、デバイス設計・作製プロセス検討を通じ Si ウエハ上に LNOI 高速光変調器の作製を進め、基礎的なデバイス特性の評価を行う。これにより、本低温接合技術の次世代集積フォトニクス基盤製造技術としての適用性を検討する。

### 4. 研究成果

#### 高機能接合界面の創成

Si プラットフォーム上への酸化物電気光学結晶からなる低損失な強い光閉じ込め導波路型デバイス集積化の実現に向け、透明性接合界面形成及び低温ウエハ接合技術の開発を進めた。具体的には、LN 結晶と  $\text{SiO}_2$  の常温接合を行った。密着性と透明性を有する接合界面形成のための中間層材の選定・形成条件等の検討を通じ、結晶方位に関係なく常温下でもウエハレベル接合に成功した。引張り試験機、ブレード挿入法、ダイシングテストの結果、実用化レベルの強固な接合強度が得られ、光導波路応用として要求される機械研磨による均一な薄膜化まで耐えることができた。結果として、Si ウエハ上に大きなクラックや剥がれのない厚さ約 3 マイクロメートル以下の高品質な電気光学結晶薄膜が形成された。

透過型電子顕微鏡 (TEM) による接合断面観察及びエネルギー分散型 X 線分析により、ナノ中間層近傍における原子拡散挙動・結晶構造等の界面状態の把握に務めた。図 1 に形成された LN/ $\text{SiO}_2$  接合界面の断面 TEM 観察の結果を示す。結果として、接合界面近傍の電気光学結晶へのダメージは見られなかった。接合界面の透明性については、分光光度計による測定結果及び後述のリッジ型光導波路作製後の光伝搬特性測定により評価を行った。さらに、接合体ウエハにブレードを挿入し剥離させた後、この剥離面を X 線光電子分光法、飛行時間型二次イオン質量分析法、原子間力顕微鏡等の諸分析を通じ、原子スケール解析を行った。剥離位置特定、ナノ中間層の密着性及び元素分析、接合界面近傍の原子拡散挙動等に関しても多くの知見を得ることに成功した。

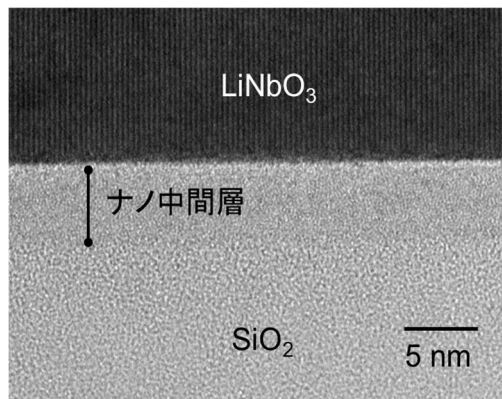


図 1 LN/ $\text{SiO}_2$  接合界面

### その他材料への本接合技術の適用性検証

本低温接合技術が、上記の LN、 $\text{SiO}_2$  のみならず  $\text{LiTaO}_3$  (LT)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  などの他の酸化物や InP や SiC などの化合物半導体にも適用できることが分かってきた。例として、図 2 に LN/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  接合界面、図 3 に InP/ $\text{SiO}_2$  接合界面の断面 TEM 観察結果を示す。いずれも界面近傍でポイドは見られず、原子レベルの密着性とともに強固な接合強度が確認できた。各種材料間において、界面機能を含む接合界面状態に関して、詳細な分析による原子スケール解析が今後の課題となるが、LT on insulator (LTOI) や InP on insulator (InPOI) 等のハイブリッドウエハの作製にも本接合技術の有効性を示すことができた。

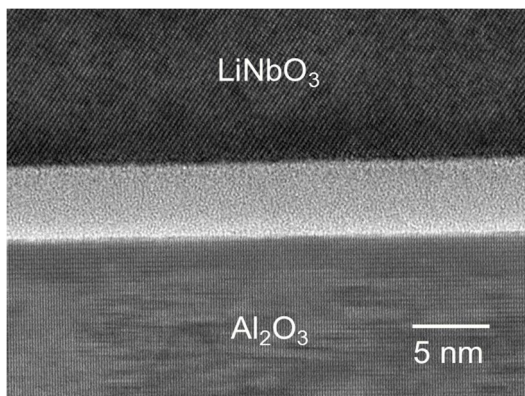


図 2 LN/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  接合界面

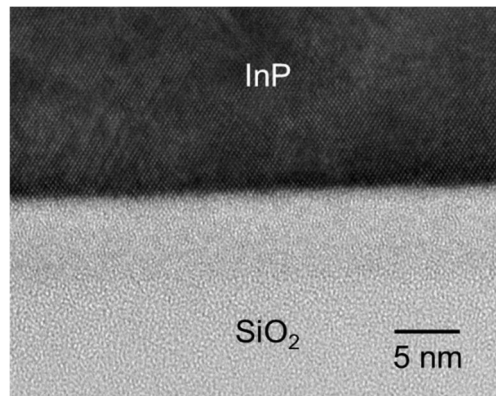


図 3 InP/ $\text{SiO}_2$  接合界面

### 大口径ハイブリッドウエハの作製

本低温接合技術により、大口径 LNOI ウエハの作製についても検討した。図 4 に、本技術により作製した 8 インチウエハレベルの LNOI/Si ウエハを示す。従来のアニール処理を要する親水化接合法ではウエハサイズが大きくなるにつれこの影響が深刻になるため、熱膨張係数が大きく異なるこれら材料系の大口径ウエハレベル接合は困難であると予想される。本低温接合技術を用いることで、ウエハ全体で割れや大きな反りが抑えられポイドフリーな大口径接合体の実現に寄与する可能性を示した。

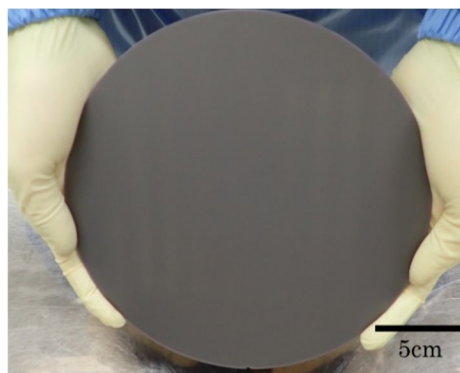


図 4 大口径 LNOI/Si ウエハ

### Si 上 LNOI 光デバイスの試作・特性評価

シングルモード光伝搬可能な LNOI リッジ光導波路形成のため、作製した 4 インチ LN/熱酸化 Si ウエハ接合体の LN ウエハ側を  $3\ \mu\text{m}$  以下まで薄膜化した後、フォトリソグラフィ及びドライエッチングで リッジ導波路を形成した。その後、電界メッキにより Au 高周波進行波電極を形成し、マッハツェンダー干渉計型 LNOI 光変調器を Si 上に作製した。図 5 に、実際に 4 インチ Si ウエハ上に作製した LNOI 光変調器アレイを示す。これをチップ化した後、光ファイバによる入光のため導波路端面出しをダイシングプロセスにより行った。接合界面での大きな光吸収は見られず、良好な低損失光導波路特性が確認できた。作製したこの光変調器の ON-OFF 変調特性 (変調曲線) 評価を行ったところ、駆動電圧 (半波長電圧  $V_\pi$ ) 約 1 V が確認でき、目標の低駆動電圧動作が Si 上で実証された。また、光信号出力波形が入力電圧信号のパルス波形とほぼ一致しており、小振幅動作範囲内において、入力電気信号 (電圧) に対する光信号のほぼ線形な電気 - 光応答がみられた。これらの測定結果よりウエハレベルで作製した LNOI 光変調器の良好な電気光学変調が実証された。

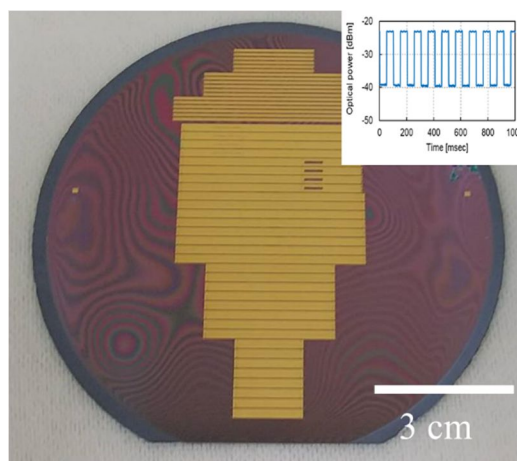


図 5 Si ウエハ上に作製した LNOI 光変調器

以上より、透明接合界面を利用した本低温ウエハ接合法による Si 上への LNOI 光変調器の集積化は成功し、次世代の異種材料集積フォトニクス製造技術としての可能性を示した。これら成果は、国際的な学術論文誌に採択されるとともに、国内外の学会で成果発表を行い、一部学会賞も受賞した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Watanabe Kaname, Utsumi Jun, Takigawa Ryo	4. 巻 60
2. 論文標題 Bonding of LiNbO3 and Si wafers at room temperature using Si nanolayers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SCCL14 ~ SCCL14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abf2d3	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 Takakura Ryo, Murakami Seigo, Watanabe Kaname, Takigawa Ryo	4. 巻 13
2. 論文標題 Room-temperature bonding of Al2O3 thin films deposited using atomic layer deposition	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-30376-7	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 Murakami Seigo, Watanabe Kaname, Takigawa Ryo	4. 巻 62
2. 論文標題 Investigation of the interface between LiNbO3 and Si fabricated via room-temperature bonding method using activated Si nano layer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SG1041 ~ SG1041
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acc2cb	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 Watanabe Kaname, Takigawa Ryo	4. 巻 620
2. 論文標題 Fabrication of heterogeneous LNOI photonics wafers through room temperature wafer bonding using activated Si atomic layer of LiNbO3, glass, and sapphire	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Surface Science	6. 最初と最後の頁 156666 ~ 156666
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apsusc.2023.156666	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 渡辺要、山口祐也、菅野敦史、多喜川良	4. 巻 143
2. 論文標題 常温ウエハ接合によりSi上に集積された低駆動電圧型LNOI光変調器	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電気学会論文誌E	6. 最初と最後の頁 -
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 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 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Kaname Watanabe, Ryo Takigawa
2. 発表標題 Room-temperature wafer bonding of LiNbO3 and Si using surface activation process with self-sputtering
3. 学会等名 33rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kaname Watanabe, Yuya Yamaguchi, Kannno Atsushi, Ryo Takigawa
2. 発表標題 LNOI photonics fabricated on Si wafer by room temperature bonding
3. 学会等名 7th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB-3D 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y Fan, Toshiki Maekawa, Kaname Watanabe, Ryo Takigawa,
2. 発表標題 Fabrication of InP/SiC structure using surface activated direct bonding,
3. 学会等名 7th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB-3D 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡辺要, 山口祐也, 菅野敦史, 多喜川良
2. 発表標題 室温接合により作製されたSi上LN on insulator光変調器
3. 学会等名 エレクトロニクス実装学会 第36回春季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前川敏輝, 範云翰, 渡辺要, 多喜川良
2. 発表標題 表面活性化によるInPとSiCの室温ウェハ接合
3. 学会等名 エレクトロニクス実装学会 第36回春季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高倉亮, 渡辺要, 多喜川良
2. 発表標題 原子層堆積法で成膜した酸化アルミニウム極薄膜同士の常温接合
3. 学会等名 エレクトロニクス実装学会第36回春季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zhang Gufei, Kaname Watanabe, Ryo Takigawa
2. 発表標題 Modified surface activated bonding of InP and SiO <sub>2</sub> at room temperature
3. 学会等名 35rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Seigo Murakami, Kaname Watanabe, Ryo Takigawa
2. 発表標題 Fabrication of LiNbO <sub>3</sub> /Si bond interface using room temperature direct bonding
3. 学会等名 35rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺要, 山口祐也, 菅野敦史, 多喜川良
2. 発表標題 常温ウエハ接合により Si 上に集積された低駆動電圧型LN01 光変調器アレイ
3. 学会等名 第39回「センサ・マイクロマシンと応用システム」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺要, 範云翰, 前川敏輝, 多喜川良
2. 発表標題 リン化インジウム/シリコンカーバイド常温接合界面の評価,
3. 学会等名 エレクトロニクス実装学会第37回春季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 章固非, 村上誠悟, 渡辺要, 多喜川良,
2. 発表標題 表面活性化室温接合法によるInP-on-Insulatorウエハの作製
3. 学会等名 エレクトロニクス実装学会第37回春季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村上誠悟, 渡辺要, 多喜川良
2. 発表標題 室温接合法により形成されたLiNbO3/Si接合界面の原子スケール解析
3. 学会等名 エレクトロニクス実装学会第37回春季講演大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

第39回「センサ・マイクロマシンと 応用システム」シンポジウム 奨励賞, 電気学会, 2022.11
--

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
研究分担者	山口 祐也  (Yamaguchi Yuya)  (30754791)	国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワーク研究所 フォトリックICT研究センター・研究員   (82636)	
研究分担者	坂本 高秀  (Sakamoto Takahide)  (70392727)	東京都立大学・システムデザイン研究科・准教授   (22604)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件



8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------