

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18729

研究課題名（和文）異種材料集積化に向けた活性化透明極薄膜による大気中室温接合への挑戦

研究課題名（英文）Low temperature bonding using activated transparent thin film in air

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） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：光デバイスの高集積・高性能化に向けて、従来のはんだ接合・バンプ接合法や有機接着剤に代わる新しい簡便な低温直接接合技術が要求されている。本研究は、活性化透明薄膜を利用した新しい大気・室温（ないし低温）下における疑似的な直接接合技術の可能性について調査・探索を行った。活性化透明膜形成・接合実験と従来の表面活性化接合実験等を通じ、接合メカニズムについて理解を深めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

真空・大気下における接合メカニズムの解明に向けて多くの知見を得ることができたため、本研究の学術的な価値は高い。また、将来の大気中室温接合の実現に寄与する可能性があり、簡便な光デバイス製造装置開発に繋がれば産業的にも価値があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, Low temperature chip bonding method using activated transparent thin films in air is investigated for heterogeneous optical devices. Formation method of activated transparent thin films is proposed. Findings of both bond characteristics obtained from the vacuum and atmospheric processes is useful for the mechanism of room temperature bonding and manufacture of future low-cost bonding machines.

研究分野：実装・集積・接合

キーワード：大気低温接合 光実装・集積

## 1. 研究開始当初の背景

将来の光学デバイスの高集積・高性能化に向けて、はんだや有機接着材を利用することなく、異種材料ないし同種材料を直接接合する技術が要求されている。光学デバイスの直接接合としては、ガラスなどの光学材料の平滑表面をそのままコンタクトするだけの簡易手法であるオプティカルコンタクトが古くより利用されている。この手法は、半導体等のウエハの仮接合にも適用され、高温かつ長時間のポストボンドアニールを施すことで強固な接合強度が得られる。これが、フュージョンボンディング法である。近年、エレクトロニクス分野を中心にこのポストボンドアニール温度の低温化に向けた研究が著しく進んでいる。しかしながら、一般的に実用化レベルの接合強度を確保するためには数百度以上のアニール処理を要するため、熱膨張係数が大きく異なる材料同士や耐熱性の低い材料の接合に適用すると熱応力やアライメント精度、素子劣化の観点から課題となる。これを克服するために、加熱プロセスを必要としない直接接合技術への期待は大きい。他の直接接合法としては、表面活性化常温接合法がある。これはアルゴン高速原子ビームの照射等による物理的なスパッタエッチングにより接合表面に付着する有機汚染層及び自然酸化膜を除去した後、材料固有の清浄表面同士を接触させ低温で強固な接合を達成する手法である。これまで、Si や金属材料等で本接合手法の有効性が報告されているが、通常超高真空中プロセスを要することが課題とされコストの面で低真空化が要求されている。

本研究では、光デバイス応用への適用可能な大気下での新規接合手法の開発に向けて、透明な活性化薄膜を介した疑似的な直接接合法の探索的な研究を行う。従来の高真空プロセスである表面活性化接合法とも比較し接合メカニズムについて理解を深めるとともに、将来の簡便な大気常温接合技術の開発に向けた基礎的なデータの取得を目指す。

## 2. 研究の目的

光デバイスの高集積・高性能化に向けて、異種材料集積技術は必要不可欠となる。この異種材料集積技術には、従来のはんだ接合・バンプ接合法や有機接着剤に代わる新しい室温(ないし低温)直接接合技術が有効なアプローチとなる。本研究では、簡便な光デバイスの異種材料集積法として活性化透明薄膜を利用した新しい大気・室温(ないし低温)下の疑似的な直接接合技術を提案し、その可能性を探索する。さらに、活性透明膜形成・接合実験と従来の表面活性化接合実験を通じ、接合メカニズムについて理解を深める。

## 3. 研究の方法

簡便な大気中プロセスで常温接合を行うために、大気開放下での活性化・接合プロセスを行うための装置機構の設計を行う。プラズマ照射(大気圧プラズマ照射を含む)や紫外線洗浄などの活性化手法について検討する。光学応用として重要な酸化物材料同士等の大気低温ないし(室温)接合に向け、活性化薄膜形成条件や接合特性を調査する。高真空プロセスとなる表面活性化接合法によるサファイア等の酸化物等の室温接合により得られた知見をベースに接合界面状態の考察を進める。

#### 4 . 研究成果

まず、超高真空中でアルゴン高速原子ビームにより表面活性化接合法を利用し、酸化物の室温接合を行った。一般的に、光学応用として利用される酸化物材料を室温で接合することは困難とされてきたが、活性化状態を制御すれば酸化アルミバルク結晶(サファイア)が常温で接合が達成することを確認した。界面の接合強度をブレード試験で評価したところ、 $1.5 \text{ J/m}^2$  以上の強固な接合強度が得られた。ナノ接合界面近傍の断面構造を透過型電子顕微鏡により観察したところ、界面にはナノレベルで空隙がなく原子レベルの密着が確認できた。その他、ニオブ酸リチウム、タンタル酸リチウム、酸化シリコン等のバルク体に本手法を適用し、接合強度、接合前活性化面、接合界面や剥離面を原子レベルで分析することで、常温接合達成条件を策定し、新たな知見を得ることに成功した。

次に、簡便な大気下プロセスで室温接合を行うために、大気下での活性化・接合プロセスを行うことができる装置機構の設計を行った。物品等の納期の遅れ等で当初の段階で検討していた接合実験系構築に時間を要すると判断し、装置機構の簡略化を行った。そこで本研究では、活性化された接合用サンプル(チップサイズ)の平滑な表面同士を直接コンタクト可能とする簡易的な接合実験系を利用することにした。これまで得られた酸化物材料の表面活性化接合実験の基礎データ、活性化薄膜等の表面形状(表面粗さ・粒径等)・形成条件等に関する知見・ノウハウを取得し、これらをベースに、大気下における室温(ないし低温)接合及びポストボンドアニールの影響について評価・検討を行った。接合体チップの接合強度評価には、ダイシェア試験を利用した。結果として、大気下で室温接合達成のための活性化透明薄膜形成は困難であり、現状では十分な接合強度が得られなかった。そこで、あらかじめ透明な極薄膜(酸化アルミ薄膜、酸化チタン薄膜など)を準備し、真空プロセスとなる表面活性化接合法を利用した室温接合実験に戻り、接合強度、薄膜特性(結晶性等)と接合強度の相関性及び接合界面状態の原子レベルでの把握に努め、より深く比較・検討することにした。実験結果から、酸化アルミの薄膜は、条件によっては強固な接合強度が得られることが分かった。これら比較・検討を行うことで、接合界面形成のための多くの新たな知見が得ることができた。

その他、大気下における直接接合手法であるプラズマ親水化接合プロセスや有機接着材を利用した接合プロセスを化合物半導体を含む多くの光学材料等に適用し、接合特性について調査・検討も行った。

以上、次世代の光電子デバイス製造のための簡便な大気低温接合技術の開発に向け、有意義な基礎的データの取得に成功した。大気・真空接合実験等の比較データは国内外を問わず関連分野の研究機関・民間企業の研究者と議論すると非常に関心を持たれていることが分かった。得られた知見をベースに培った人脈を活かし、国際共同研究に発展できるように努めていきたいと考えている。

今後は得られた成果を社会に還元するため、査読付き学術論文誌(オープンアクセス誌含む)への投稿、関連分野のトップ国内・国際学会への参加・発表、特許取得等を積極的に進めていきたい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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, 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 LiNbO <sub>3</sub> , 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 Murakami Seigo, Watanabe Kaname, Takigawa Ryo	4. 巻 62
2. 論文標題 Investigation of the interface between LiNbO <sub>3</sub> 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 Takakura Ryo, Murakami Seigo, Watanabe Kaname, Takigawa Ryo	4. 巻 13
2. 論文標題 Room-temperature bonding of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 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 3581
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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Seigo Murakami, Ryo Takigawa
2. 発表標題 Fabrication of LiTaO <sub>3</sub> /SiC hybrid wafer using surface activated bonding method
3. 学会等名 The 13th Japan-China-Korea Joint Conference on MEMS/NEMS (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kaname Watanabe, Ryo Takigawa
2. 発表標題 Fabrication of LN01/Si optical modulator using room temperature wafer bonding method
3. 学会等名 The 13th Japan-China-Korea Joint Conference on MEMS/NEMS (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 LiNbO3/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 Zhang Gufei, Kaname Watanabe and Ryo Takigawa,
2. 発表標題 Modified surface activated bonding of InP and SiO2 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 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 第37回エレクトロニクス実装学会春季講演大会
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 第37回エレクトロニクス実装学会春季講演大会
4. 発表年 2023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 第37回エレクトロニクス実装学会春季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toshiki Maeakawa, Kaname Watanabe, Hirofumi Nogami, Yuichiro Kurokawa, Yusuke Tahara, and Ryo Takigawa,
2. 発表標題 Surface activated bonding of Au thin microbumps using ultra-violet treatment
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------