

博士論文(要約)

平滑な金薄膜の形成と大気中低温接合への  
応用に関する研究

山本 道貴

---

# 目次

<b>1 章 序論</b> .....	1
1.1 はじめに.....	2
1.1.1 異種材料の低温集積化.....	2
1.1.2 集積化光マイクロデバイスの作製方法と課題.....	2
1.2 低温接合手法.....	4
1.3 表面活性化接合の特徴と課題.....	6
1.4 Au-Au 表面活性化接合と近年の研究動向.....	7
1.4.1 Au-Au 表面活性化接合と他の Au-Au 接合手法の比較.....	8
1.4.2 Au-Au 表面活性化接合の先行研究.....	10
1.4.3 極薄 Au 薄膜を用いた Au-Au 表面活性化接合.....	10
1.4.4 平滑化した Au 表面を用いた Au-Au 表面活性化接合.....	12
1.5 Au-Au 表面活性化接合の現状と課題.....	16
1.6 本研究の目的.....	17
1.7 本論文の構成.....	18
<b>2 章 Au 薄膜の膜厚・平滑性の接合・封止への影響</b> .....	25
2.1 はじめに.....	26
2.2 実験方法.....	26
2.2.1 試料作製.....	26
2.2.2 表面形状の評価.....	27
2.2.3 接合方法・接合強度の評価方法.....	28
2.2.4 封止接合及び封止の可否の判断方法.....	28
2.3 Au の膜厚・表面粗さのウェハ接合への影響.....	29
2.4 Au の膜厚の違いによる封止への影響.....	32
2.5 封止性能の評価.....	37
2.6 考察.....	39

2.6.1 膜厚・表面粗さと接合・封止の関係性.....	39
2.6.2 極薄 Au 薄膜を用いた封止性能 .....	40
2.7 本章のまとめ .....	42
<b>3 章 極薄 Au 薄膜を用いた Au-Au 表面活性化接合 : Ar プラズマと O<sub>2</sub> プラズマの比較...</b>	<b>45</b>
3.1 はじめに.....	46
3.2 実験方法.....	47
3.3 プラズマ照射前後の Au 表面の分析.....	48
3.3.1 AFM 分析結果.....	48
3.3.2 接触角測定結果.....	50
3.3.3 シート抵抗測定結果.....	51
3.3.4 XPS 分析結果.....	52
3.3.5 TDS 分析結果.....	53
3.4 接合強度の比較.....	53
3.5 考察.....	56
3.6 本章のまとめ .....	59
<b>4 章 大気圧プラズマによる Au-Au 表面活性化接合.....</b>	<b>61</b>
4.1 はじめに.....	62
4.2 実験方法.....	62
4.2.1 大気圧プラズマ装置.....	62
4.2.2 プラズマの分析 .....	63
4.2.3 接合サンプルおよび接合実験方法 .....	63
4.2.4 光素子の実装.....	66
4.3 プラズマの分析.....	67
4.3.1 発光分光分析.....	67
4.3.2 AFM 測定結果.....	68
4.3.3 XPS 分析結果.....	69
4.3.4 接合実験結果.....	71
4.4 光素子の実装 .....	73
4.5 考察.....	74
4.6 本章のまとめ .....	76
<b>5 章 複数回転写による Au 表面の平滑化 .....</b>	<b>79</b>
5.1 はじめに.....	80
5.2 実験方法.....	81
5.2.1 熱酸化膜上の Au の成長過程の観察.....	81
5.2.2 転写による平滑化 .....	82
5.3 熱酸化膜上の Au の成長過程の観察.....	84
5.4 転写条件の影響の調査.....	86

---

5.5 複数回転写による粗い Au 表面の平坦化 .....	89
5.5.1 複数回の転写による平滑化 .....	89
5.5.2 複数回転写により平滑化した Au 表面の接合 .....	92
5.6 考察 .....	94
5.7 本章のまとめ .....	96
6 章 総括 .....	99

研究業績

謝辞

第 1 章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

第 2 章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

第 3 章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

第 4 章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。



第 5 章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

第 6 章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

# 研究業績

## 査読付き学術論文 筆頭

- 1) M. Yamamoto, E. Higurashi, T. Suga, R. Sawada, T. Itoh, "Properties of various plasma surface treatments for low-temperature Au–Au bonding" Jpn. J. Appl. Phys., vol. 57, no. 4S, pp. 04FC12-6, 2018.
- 2) M. Yamamoto, T. Matsumae, Y. Kurashima, H. Takagi, T. Suga, T. Itoh, E. Higurashi, "Comparison of Argon and Oxygen Plasma Treatments for Ambient Room-Temperature Wafer-Scale Au–Au Bonding Using Ultrathin Au Films", Micromachines, vol. 10, no. 2, pp. 119-12, 2019.
- 3) M. Yamamoto, T. Matsumae, Y. Kurashima, H. Takagi, T. Suga, T. Itoh, E. Higurashi, "Growth Behavior of Au Films on SiO<sub>2</sub> Film and Direct Transfer for Smoothing Au Surfaces", Int. J. Autom. Technol., vol. 13, no. 2, pp. 254–260, 2019.
- 4) 山本道貴, 松前貴司, 倉島優一, 高木秀樹, 須賀唯知, 伊藤寿浩, 日暮栄治, "極薄 Au 薄膜を用いたウェハスケール・大気中常温接合のためのプラズマ処理方法の検討", 電気学会論文誌 E (センサ・マイクロマシン部門誌, vol.139, no.7, pp. 217-218, 2019.
- 5) M. Yamamoto, Y. Kunimune, T. Matsumae, Y. Kurashima, H. Takagi, Y. Iguhi, Y. Honda, T. Suga, T. Itoh, E. Higurashi, "Room-temperature pressureless wafer scale hermetic sealing in air and vacuum using surface activated bonding with ultrathin Au films", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 59, no. SB, pp. SBBB01-4, 2019

## 査読付き学術論文 共著

- 1) E. Higurashi, M. Yamamoto, T. Sato, T. Suga, R. Sawada, "Room-Temperature Gold-Gold Bonding Method Based on Argon and Hydrogen Gas Mixture Atmospheric-Pressure Plasma Treatment for Optoelectronic Device Integration" IEICE Trans. Electron., vol. E99-C, no. 3, pp. 339–345, 2016.03.
- 2) 申盛斌, 日暮栄治, 古山洸太, 山本道貴, 須賀唯知, 気学会論文誌 E (センサ・マイクロマシン部門誌), "水素ラジカル処理した銅表面の X 線光電子分光法(XPS)による酸化挙動解析", vol. 139. no.2, pp.38-39, 2019.

## 国際会議 Proceedings 査読有り 筆頭

- 1) M. Yamamoto, T. Sato, E. Higurashi, T. Suga, R. Sawada, "Low-temperature bonding of optical chips using coined Au stud bumps and its application to micro laser Doppler velocimeter", Proc. 2012 3rd IEEE Int. Work. Low Temp. Bond. 3D Integr.p.99, 2012.05.

- 
- 2) M. Yamamoto, T. Sato, E. Higurashi, T. Suga, R. Sawada, "Low-temperature bonding of laser diode chips using atmospheric-pressure plasma activation of flat topped Au stud bumps with smooth surfaces", Proc. 2012 2nd IEEE CPMT Symp. pp.1-4, 2012.12.
  - 3) M. Yamamoto, E. Higurashi, T. Suga, R. Sawada, "Surface Activated Bonding of Laser Diode Chips Using N<sub>2</sub> Atmospheric-Pressure Plasma", Proc. 2013 Int. Conf. Electron. Packag.pp.60-63, 2013. 04.
  - 4) M. Yamamoto, E. Higurashi, T. Suga, R. Sawada, T. Itoh, "Ar+H<sub>2</sub> atmospheric-pressure plasma treatment for Au-Au bonding and influence of air exposure on surface contamination", Proc. 2017 5th Int. Work. Low Temp. Bond. 3D Integr.p.64, 2017. 05.
  - 5) M. Yamamoto, E. Higurashi, T. Suga, R. Sawada, "Influence of different plasma treatments on low-temperature Au-Au bonding and its application to hermetic packaging", 2017 Int. Conf. Solid State Devices and Materials, pp. 411-412, 2017. 09.
  - 6) M. Yamamoto, T. Matsumae, Y. Kurashima, H. Takagi, T. Suga, T. Itoh, E. Higurashi, "Room-Temperature Wafer Bonding Using Smooth Au Thin Films for Integrated Plasmonic Devices", Proc. 2018 Int. Conf. Opt. MEMS Nanophotonics, pp. 64-65, 2018. 07.
  - 7) M. Yamamoto, T. Matsumae, Y. Kurashima, H. Takagi, T. Suga, T. Itoh, E. Higurashi, "Surface analysis of argon and oxygen plasma-treated gold for room temperature wafer scale gold-gold bonding", Proc. 2018 IEEE CPMT Symp. pp. 127-128, 2018. 11.
  - 8) M. Yamamoto, T. Matsumae, Y. Kurashima, H. Takagi, T. Miyake, T. Suga, T. Itoh, E. Higurashi, "Wafer-scale Au-Au surface activated bonding using atmospheric-pressure plasma", Proc. 2019 Int. Conf. Electron. Packag.pp.361-364, 2019. 04.
  - 9) M. Yamamoto, Y. Kunimune, T. Matsumae, Y. Kurashima, H. Takagi, T. Suga, T. Itoh, E. Higurashi, "Room-temperature pressureless wafer sealing using ultrathin Au films activated by Ar plasma", Proc. 2019 6th IEEE Int. Work. Low Temp. Bond. 3D Integr., p.62, 2019.05.
  - 10) M. Yamamoto, T. Matsumae, Y. Kurashima, H. Takagi, T. Suga, T. Itoh, E. Higurashi, "Room-temperature bonding of organic films using ultrathin Au intermediate layers for organic integrated optical devices", Proc. 2019 Int. Conf. Opt. MEMS Nanophotonics, pp. 170-171, 2019. 07.

#### 国際会議 Proceedings 査読有り 非筆頭

- 1) E. Higurashi, M. Yamamoto, H. Kawai, Y. Sasaki, T. Suga, Y. Shiratori, M. Ida, T. Akeyoshi, "InP/Si heterogeneous integration by low-temperature bonding using metallic interlayer" Proc. 2012 3rd IEEE Int. Work. Low Temp. Bond. 3D Integr.p.101, 2012.05.
- 2) E. Higurashi, M. Yamamoto, S. Ikeda, T. Suga, R. Sawada, "Low-temperature gold-gold

- 
- bonding using argon and hydrogen gas mixture atmospheric-pressure plasma treatment for optical microsystems”, Int. 2014 Conf. Opt. MEMS Nanophotonics, pp. 89-90, 2014. 08.
- 3) S. Matsuoka, M. Yamamoto, E. Higurashi, T. Suga, R. Sawada, “Low temperature Au-Au surface-activated bonding using nitrogen atmospheric-pressure plasma treatment for optical microsystems”, Proc. 2015 Int. Conf. Electron. Packag. IMAPS All Asia Conf.pp.850-853, 2015. 04.
  - 4) T. Matsumae, M. Yamamoto, Y. Kurashima, E. Higurashi, H. Takagi, “Room-temperature bonding of smooth Au surface of electroformed Cu substrate in atmospheric air”, Proc. 2019 Int. Conf. Electron. Packag.pp.115-116, 2019. 04.

#### 国際ワークショップ発表 筆頭

- 1) M. Yamamoto, T. Sato, E. Higurashi, T. Suga, R. Sawada, “Low-temperature Bonding of Laser diode Chips Using Atmospheric-pressure Plasma activation and Its Application to Micro Laser Doppler Velocimeter” JSPS Workshop, 2012.11.
- 2) M. Yamamoto, E. Higurashi, T. Suga, R. Sawada, “Low-temperature Au-Au bonding using atmospheric-pressure plasma activation for optical microsystems”, The 4th Japan-China-Korea Joint Conference on MEMS/NEMS (JCK MEMS/NEMS 2013),2013.08.
- 3) M. Yamamoto, E. Higurashi, T. Suga, R. Sawada, T. Itoh, “Effects of atmospheric-pressure plasma treatment on low-temperature Au-Au bonding for integrated optical microsystems”, 2017 Taiwan-Japan Workshop on Electronic Interconnection I, 2017.10.
- 4) M. Yamamoto, E. Higurashi, T. Suga, T. Itoh, “Comparison of Ar plasma treatment and Oxygen plasma treatment for wafer scale room temperature Au-Au bonding”, 2018 Japan-Taiwan Workshop on Electronic Interconnection II, 2018.04.
- 5) M. Yamamoto, T. Matsumae, Y. Kurashima, H. Takagi, T. Suga, T. Itoh, E. Higurashi, “Influence of Au film thickness on vacuum sealing quality of bonded wafer pairs prepared by room-temperature wafer-scale Au-Au surface activated bonding”, 2019 Taiwan-Japan Workshop on Electronic Interconnection III, 2019.10.

#### 国内学会発表・研究会発表 筆頭

- 1) 山本道貴, 佐藤丈史, 日暮栄治, 須賀唯知, 澤田廉士, “大気圧プラズマで活性化した Au スタッドバンプによる半導体レーザ素子の低温接合”, 2012 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, K38, 99. 759-760, 2012.
- 2) 山本道貴, 日暮栄治, 須賀唯知, 澤田廉士, “大気圧プラズマで活性化した Au スタッドバンプによる半導体光素子の低温接合と光マイクロセンサ応用”, 19 回「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム (Mate 2013), pp.

- 
- 425-430, 2013.01.
- 3) 山本道貴, 日暮栄治, 須賀唯知, 澤田廉士, "N<sub>2</sub> 大気圧プラズマによる表面活性化を用いた光素子の低温接合", 2013 年度精密工学春季大会学術講演会講演論文集, C24, pp. 161-162, 2013.03.
  - 4) 山本道貴, 日暮栄治, 北島和典, 須賀唯知, 小口寿明, "ワイヤグリッド偏光子を集積した小型偏光センサ", 第 23 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム(MES 2013), 1B2-2, pp. 65-68, 2013.09.
  - 5) 山本道貴, 日暮栄治, 須賀唯知, 澤田廉士, "窒素大気圧プラズマで活性化した Au バンプによる半導体レーザ素子の低温接合", 第 5 回「集積化 MEMS シンポジウム」(応用物理学会集積化 MEMS 技術研究会主催), 7PM1-E-6, pp. 1-4, 2013.11.
  - 6) 山本道貴, 日暮栄治, 須賀唯知, 澤田廉士, "大気圧プラズマによる表面活性化を用いた Au-Au 常温接合", 2014 年度精密工学春季大会学術講演会講演論文集, E19, p. 365-366, 2014.04
  - 7) 山本道貴, 日暮栄治, 須賀唯知, 伊藤寿浩, 松前貴司, 倉島優一, 高木秀樹, "熱酸化膜上の金薄膜成長過程の観察と金接合面平滑化への応用", 第 32 回エレクトロニクス実装学会講演大会, pp.171-172, 2018.03.
  - 8) 山本道貴, 松前貴司, 倉島 優一, 高木 秀樹, 須賀 唯知, 伊藤 寿浩, 日暮 栄治, "極薄 Au 薄膜を用いた大気中・常温ウェハ接合のためのプラズマ処理方法の検討", 電気学会センサ・マイクロマシン部門 部門大会 第 35 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 30pm2-C-3, 2018.11.
  - 9) 山本道貴, 松前貴司, 倉島優一, 高木秀樹, 三宅敏広 須賀唯知, 伊藤寿浩, 日暮栄治, "大気圧プラズマにより表面活性化した極薄 Au 薄膜による大気中常温ウェハ接合", 第 32 回エレクトロニクス実装学会講演大会, P11-08, 2019.03.
  - 10) 山本道貴, 松前貴司, 倉島優一, 高木秀樹, 須賀唯知, 伊藤寿浩, 日暮栄治, "極薄 Au 薄膜を用いた表面活性化接合による有機材料の常温集積化", 第 29 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム(MES2019), pp.301-302, 2019.
  - 11) 山本道貴, 松前貴司, 倉島優一, 高木秀樹, 須賀唯知, 伊藤寿浩, 日暮栄治, "極薄 Au 薄膜を用いた表面活性化接合におけるプラズマ処理効果の比較と封止応用", 第 10 回集積化 MEMS 技術研究ワークショップ, 2019.07.

#### 受賞・表彰等

- 1) 2018 Japan-Taiwan Workshop on Electronic Interconnection II "Award of student oral presentation", Michitaka Yamamoto, Eiji Higurashi, Tadatomo Suga, and Toshihiro Itoh, "Comparison of Ar plasma treatment and Oxygen plasma treatment for wafer scale room temperature Au-Au bonding", 2018.04.
- 2) エレクトロニクス実装学会 2018 アカデミックプラザ賞, 日暮栄治, 山本道貴, 須賀唯知, "平滑な金薄膜を用いた大気中でのウェハ常温接合とその応用", 2018.06.
- 3) 電気学会センサ・マイクロマシン部門 部門大会 第 35 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, 山本 道貴, "極薄 Au 薄膜を用いた

- 
- 大気中・常温ウェハ接合のためのプラズマ処理方法の検討”, 2018.11.
- 4) IEEE CPMT Symposium Japan 2018 Early Career Researcher Session Award, Michitaka Yamamoto, “Surface analysis of argon and oxygen plasma-treated gold for room temperature wafer scale gold-gold bonding”, 2018.11.
  - 5) JIEP Poster Award of ICEP 2019, M. Yamamoto, T. Matsumae, Y. Kurashima, H. Takagi, T. Miyake, T. Suga, T. Itoh, E. Higurashi, 2019.08.30 通知 (2020.04 受賞式).

# 謝辞

本研究を遂行するにあたりご指導を賜りました、  
東京大学大学院 新領域創成科学研究科 人間環境学専攻 伊藤 寿浩 教授  
に厚くお礼申し上げます。

また本論文に対し有意義なご助言をいただきました、  
産業技術総合研究所 集積マイクロシステム研究センター 日暮 栄治 研究チーム長  
東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻 金 範俊 教授  
東京大学大学院 新領域創成科学研究科 人間環境学専攻 高松 誠一 准教授  
東京大学大学院 新領域創成科学研究科 人間環境学専攻 米谷 玲皇 准教授  
に御礼申し上げます。特に日暮先生には、学部・修士課程の頃から合わせて6年間、親身になってご指導いただきました。ありがとうございました。

産業技術総合研究所 集積マイクロシステム研究センター MEMS 集積化プロセス研究チームの皆様、  
光マイクロナノシステム研究チームの皆様、ならびに集積マイクロシステム研究センターの皆様には、大変お世話になりました。第2章、3章、5章の実験は、産業技術総合研究所 つくば東事業所にてさせていただいたものになります。実験環境を与えていただいたこと、また装置の使い方のご指導をはじめ様々な形でサポートしていただいたこと、心より感謝申し上げます。

九州大学工学研究院機械工学部門の澤田 廉士教授、野上 大史助教、エクストコム株式会社 千野様、山辺様には本研究を進めるに当たり様々な場面でご協力いただきました。ありがとうございました。

共同研究にてお世話になりました、株式会社デンソー エレクトロニクス製品基盤技術部 三宅 敏広様に御礼申し上げます。

パナソニック株式会社様、オリンパス株式会社様、浜松ホトニクス株式会社様、協和界面科学株式会社様、日本電気硝子株式会社様、東洋紡株式会社様には、実験装置の貸与/サンプルの供与/試料測定等、数々のご協力いただきました。ありがとうございました。

東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻 須賀 唯知教授 (現 明星大学 連携研究センター)、藤野 真久 助教(現 産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門)をはじめとした実装工学研究室の皆様には、学部生の頃から現在に至るまで、研究を進める上で大変お世話になりました。ありがとうございました。

最後に、東京大学大学院 新領域創成科学研究科 人間環境学専攻 人間環境モニタリング分野研究室の皆様にお礼申し上げます。皆様のおかげで、とても楽しい3年間でした。ありがとうございました。