

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：12608  
研究種目：基盤研究(B)（一般）  
研究期間：2020～2022  
課題番号：20H02200  
研究課題名（和文）大幅なデータ伝送エネルギーコスト低減を目指す高効率Si基板上半導体薄膜レーザ実現

研究課題名（英文）Highly Efficient Semiconductor Membrane Lasers toward Drastic Reduction of Data Transmission Energy Cost

研究代表者  
西山 伸彦（Nishiyama, Nobuhiko）  
東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：80447531  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：将来のCMOS回路上のオンチップ光配線実現に向け、低消費電力動作で期待される半導体メンブレンレーザの究極の高効率化を目指し、研究を行った。シリコンナノフィルムを利用した直接接合技術を実現する事で、従来の半分となる熱抵抗を実現し、100度を超える環境でも動作することを実証した。また、光閉じ込めを「適度」に高めることにより、ホールバーニングを避けつつ、しきい値を低減することに成功した。最後にこれらの技術を利用して、光集積回路を作製し、10Gbps以上でのチップ内データ伝送を実現した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果により、シリコン基板上のオンチップ光配線が効率よくデータ伝送が可能であることを示した。この成果は、近年問題になってくるトランジスタの小型化による、チップ内伝送距離の長尺化によるデータ伝送速度の制限をうち破り、トランジスタ自体が速くなればなるほど、チップの性能を向上できるという本来の流れに戻すことが可能となる。これは、今後も続いていく情報処理量の増加への要求に答えるため、重要な取り組みであると理解できる。

研究成果の概要（英文）：To realize on-chip optical wiring on future CMOS circuits, we conducted research to achieve the ultimate efficiency of semiconductor membrane lasers, which are expected to be used in low-power operation. By realizing a direct bonding technology using silicon nanofilms without any polymers, we have achieved a thermal resistance that is half that of conventional membranes, and demonstrated that it can operate in environments exceeding 100 °C. In addition, by increasing optical confinement to a "optimal" level, we succeeded in reducing the threshold while avoiding hole-burning. Finally, using these technologies, photonic integrated circuits were fabricated on Si substrate and intra-chip data transmission were achieved at over 10 Gbps.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：半導体レーザ 接合 半導体薄膜 オンチップ光配線

### 1. 研究開始当初の背景

インターネットなどで世界を変革してきた光通信技術を、コンピュータ「チップ」の中にまで導入することができる。CMOS 回路作製技術の進展によって微細化・高速化するトランジスタを、伝送距離増加による配線遅延・ジュール熱発生をほとんど無視できる「光配線」でつなぐ光電融合集積回路は、現在のコンピュータで標準となっている並列計算構成における限界（アムダールの法則）を超えることができる高性能回路となる。申請者のグループは、このための光源（電気-光変換素子）となるシリコン基板上薄膜レーザ（以下、メンブレンレーザ：図1）を提案、世界に先駆けてその性能を実証し、近年の世界複数機関での同様な取り組みのリーダー機関となってきた。メンブレンレーザは、図2に示すように、半導体活性層およびその周辺のみを薄膜(270 nm 程度)として残し、その上下を誘電体や空気によって挟み込む構造を有している。これにより、通常の半導体構造の3倍となる光を活性層に閉じ込めることができ、低消費電力化および小型化が可能となる。

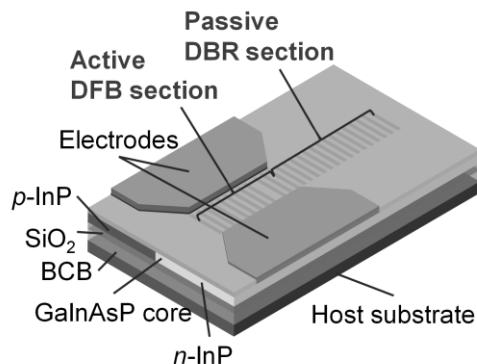


図1 メンブレンレーザ構造図

これまででこの構造を利用して、分布帰還形（以下 DFB : Distributed FeedBack）レーザでは、世界最高となる  $15 \text{ GHz}/\sqrt{\text{mA}}$  の変調効率(1mA の電流を注入すれば  $15 \text{ GHz}$  の変調帯域となる)を実現している。しかしながら実用的にはさらなる改善が必要である。

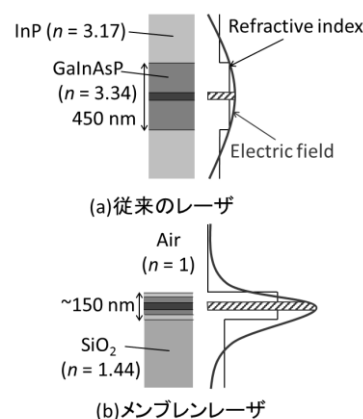


図2 断面構造比較

### 2. 研究の目的

将来的な CMOS 回路上オンチップ光配線の実現を目指し、従来の 1/10 となるデータ伝送エネルギーコストを実現しうるメンブレンレーザを実現することを目的とする。具体的な項目として下記を挙げる。

1. メンブレンレーザにおける「最適」な光閉じ込め構造の提案
2. Siナノフィルムを利用した直接接合によるシリコン基板上メンブレンレーザ熱抵抗低減
3. エネルギーコストを大幅に低減したデータ伝送の実証

### 3. 研究の方法

まず、項目1の構造提案に関して、従来構造に比べ、共振器への光閉じ込め量を調整するためには、2つの観点がある。一つは横方向に関する閉じ込め、二つ目は共振器方向に関する閉じ込めである。横方向に関しては、従来平坦であった表面を、メサ構造にする。これは、結晶再成長の成長条件で制御可能である。再成長膜厚が薄くなることによって、横方向電流における抵抗が増大することが懸念されるが、光閉じ込めが強まることにより、電極をより活性領域（5QWs）に近づけることが可能であるため、相殺することができる。共振器方向に関しては、従来はレーザ上部に均一な回折格子を導入することによって特定の光のフィードバックを発生させレーザ

発振を実現してきた。これに対し、回折格子の位置周期に波長の 1/4 となる長さを加える  $\lambda/4$  シフト構造を導入することによって共振器方向の光閉じ込めを強くできることが、レーザ分野では昔から知られているが、メンブレンレーザではこの構造を導入した場合、特性が逆に劣化する。これは、強すぎる光閉じ込めによるホールバーニング (キャリアが不均一になり屈折率やスペクトル分布も不均一になる現象) の影響であり、これを緩和するためある範囲に渡ってシフト量を少しずつ調整する ACPM (Asymmetric Corrugation Pitch Modulation) 構造を導入し、自在に閉じ込め量を調整できるようにする。

次に項目 2 に関して、メンブレン構造は、III-V 属半導体構造の上に  $\text{SiO}_2$  を成膜し、それをひっくり返した状態で、ポリマー材料であるベンゾシクロブテン(BCB)を糊剤としてシリコン基板上に接合している。しかしながらこの BCB の熱抵抗は高いため、レーザで発生した熱が逃げずに内部温度が上昇するという問題を抱え、結果として特性の劣化を引き起こしていた。このため、この BCB を使わず接合する方法として Si ナノフィルム (スパッタ効果で極薄 Si 膜を形成) を  $\text{SiO}_2$  上に成膜し、これを介して Si 基板と常温で接合する方法を導入する。

項目 3 としてメンブレンレーザを作製するが、これらの改善により大きなしきい値の低減が期待される。このプロセスを確立した後、実際にデバイス作製を行う。作製後は、静特性、温度特性および熱抵抗算出、そして変調実験を行う。

#### 4. 研究成果

実際の研究順序としては、項目 2 が先行した。図 3 のようなプロセスフローにより、Si ナノフィルムを接合界面に有するシリコン基板上メンブレンウェハを作製した。この構造では、有限要素法によるシミュレーション結果では、従来構造の 52% の熱抵抗の低減を実現できると予想された。実際にこの構造で、作製したファブリペロー型のメンブレンレーザ特性を図 4 に示す。

比較のため、従来の BCB で接合した場合のメンブレンレーザ特性も併せて示す。特徴的なのは、光出力が発熱により飽和する電流値が、接合手法を変更することによって、高い値を示していることである。これは、従来に比べて内部発熱による温度上昇が低いことを示している。発振スペクトルの推移から熱抵抗を算出できるが、従来の BCB 接合を使った素子では、240 K/W であったのに対して、今回の構造では 120 K/W であり、50% の低減を実現した。これは、前述したシミュレーション結果である 52% とほぼ一致する結果であると言える。これにより、熱抵抗の低減を実際に成功した。

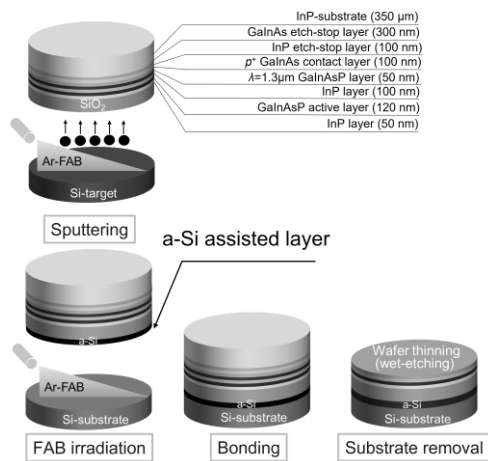


図 3 接合プロセス手順

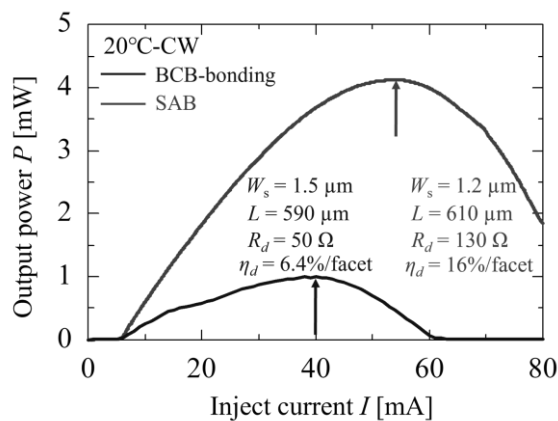


図 4 I-L 特性の比較

この接合技術を基本として、項目 1 に取り組んだ。横方向の閉じ込めについては、BRW (Buried Ridge Waveguide) 構造として、再成長時間の調整により図 5 のように、コアとクラッドの高さに差をつけた。また、縦方向に関しては、ACPM 構造を取り入れ、図 6 のような、シフトを一括ではなく徐々にずらしていく方法を取り、共振器内の電界を緩やかにした。図 7 には、作製したメンブレン DR(Distributed Reflector) レーザの(a)I-L 特性と(b)スペクトル特性を示す。しきい値電流は 0.13 mA となり、従来に比べ、しきい値電流の低減を実現した。また、しきい値の 30 倍の電流値でのスペクトル特性においては、横モード抑圧比が 50dB となり、高い電流値にも関わらず、良好な単一モード性を示した。これらの結果は、横方向の閉じ込めをあげると同時に、「適度な」縦方向閉じ込めを実現したことによる効果であると考えている。

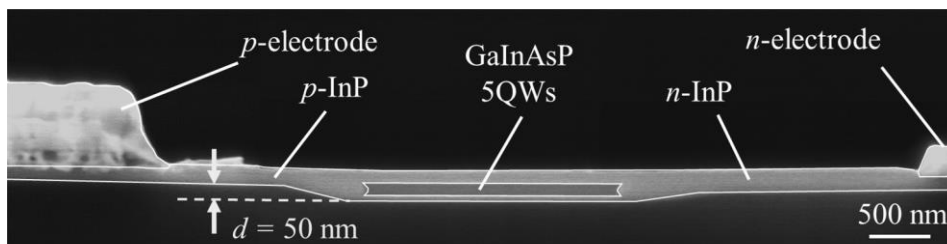


図 5 BRW 構造をもつメンブレンレーザの断面電子顕微鏡写真

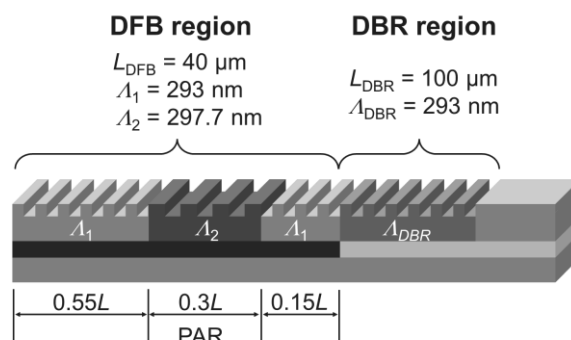
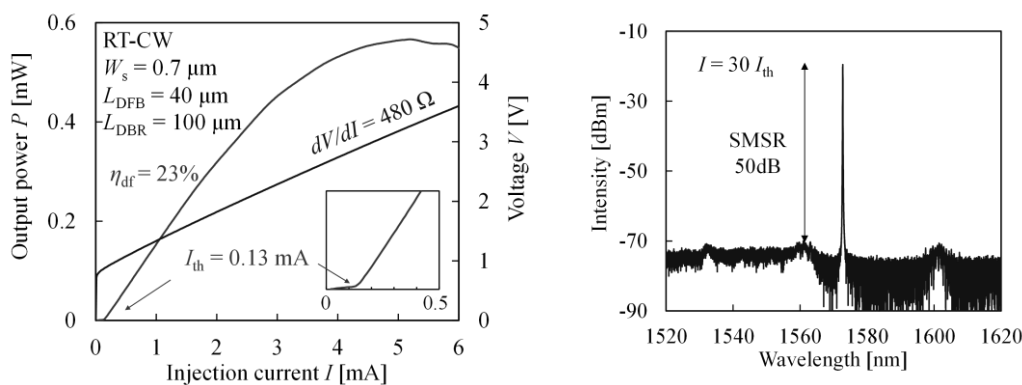


図 6 回折格子構造



(a) I-L 特性

(b) スペクトル特性

図 7 閉じ込めを最適化したメンブレン DR レーザの特性

これらの結果を受けて、最後に集積化によるデータ伝送に取り組んだ。レーザ、導波路、受光器を同時に形成した。基本的に導波路は、図 6 の DBR 領域の回折格子を取り除くことで形成可能であり、受光器は、回折格子のないレーザ部をそのまま利用すればよい。図 8 に作製した光集積回路基板を示す。このように 2 インチ基板全体での良好な素子作製に成功した。レーザと受光器の電氣的な分離を行うため、導波路のサイドクラッドは、光学特性上必要な部分のみを残し、

外側はエッチングして除去した。25 °C, 25 Gbps および 85 °C, 15 Gbps のアイダイアグラムを図9に示す。実用的に必要な85 °Cにおいても10 Gbpsを超えるデータ伝送を、シリコン基板上で実現することに、初めて成功した。今回の実験ではDR構造ではなくDFB構造を利用したこともあり、DR構造を導入することによって、さらに高いデータ伝送特性を示すことができる。

以上より、メンブレン光集積回路が、CMOS回路上オンチップ光配線の手法として、適用可能であることを示した。

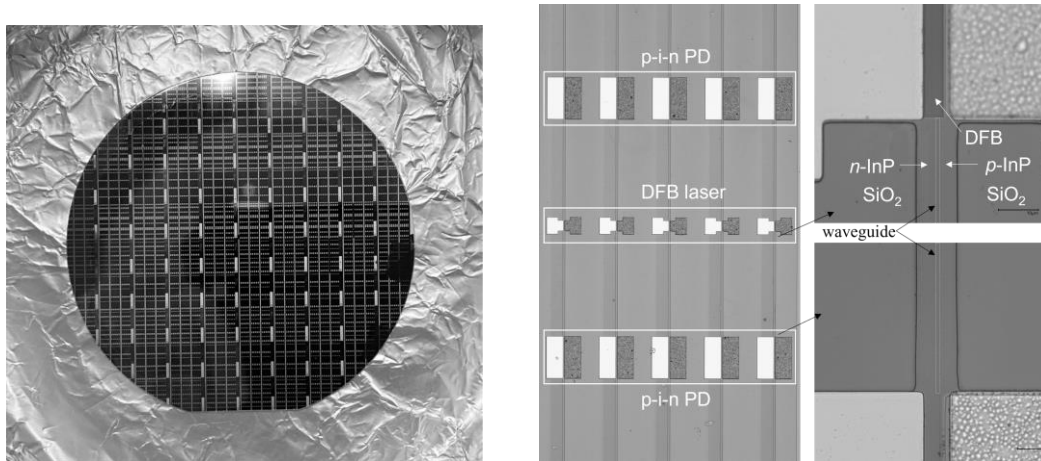
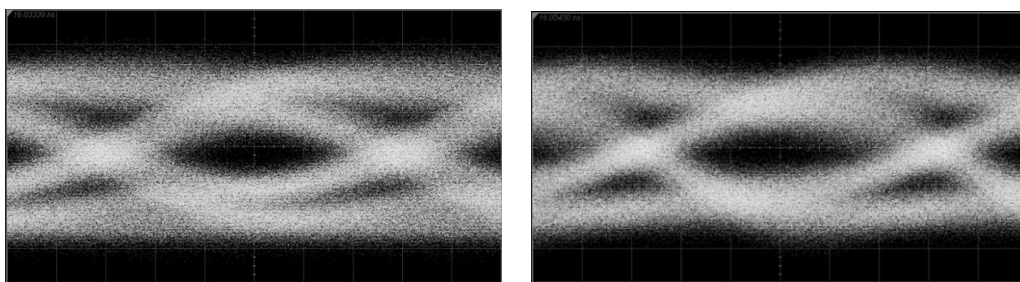


図8 メンブレン光集積回路の光学写真



(a) 25 °C, 25 Gbps

(b) 85 °C, 15 Gbps

図9 メンブレン光集積回路のアイダイアグラム

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 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Fang Weicheng, Takahashi Naoki, Ohiso Yoshitaka, Amemiya Tomohiro, Nishiyama Nobuhiko	4. 巻 58
2. 論文標題 Reduced Thermal Resistance of Membrane Fabry-Perot Laser Bonded on Si Through Room-Temperature, Surface-Activated Bonding Assisted by a-Si Nano-Film	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Quantum Electronics	6. 最初と最後の頁 1~8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JQE.2022.3145870	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 Takahashi Naoki, Fang Weicheng, Ohiso Yoshitaka, Amemiya Tomohiro, Nishiyama Nobuhiko	4. 巻 38
2. 論文標題 Lateral confinement enhanced membrane laser on Si with a buried-ridge-waveguide structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America B	6. 最初と最後の頁 3340~3340
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/JOSAB.438329	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 Jiao Yuqing, Nishiyama Nobuhiko, van der Tol Jos, van Engelen Jorn, Pogoretskiy Vadim, Reniers Sander, Kashi Amir Abbas, Wang Yi, Calzadilla Victor Dolores, Spiegelberg Marc, Cao Zizheng, Williams Kevin, Amemiya Tomohiro, Arai Shigehisa	4. 巻 36
2. 論文標題 InP membrane integrated photonics research	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Semiconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 013001~013001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6641/abcadd	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 該当する

1. 著者名 Fang Weicheng, Takahashi Naoki, Ohiso Yoshitaka, Amemiya Tomohiro, Nishiyama Nobuhiko	4. 巻 59
2. 論文標題 High-quality, room-temperature, surface-activated bonding of GaInAsP/InP membrane structure on silicon	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 060905~060905
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ab958a	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 Wang Yuning, Nagasaka Kumi, Mitarai Takuya, Ohiso Yoshitaka, Amemiya Tomohiro, Nishiyama Nobuhiko	4. 巻 59
2. 論文標題 High-quality InP/SOI heterogeneous material integration by room temperature surface-activated bonding for hybrid photonic devices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 052004 ~ 052004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab8434	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9件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 W. Fang, N. Takahashi, R. Xue, S. Katsumi, Y. Ohiso, T. Amemiya, N. Nishiyama
2. 発表標題 110C high temperature operation of GaInAsP/Si membrane DFB Laser bonded by a-Si nano-film assisted surface activated bonding
3. 学会等名 2022年春季応用物理学学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋 直樹, Fang Weicheng, Xue Ruihao, 勝見 駿斗, 大磯 義孝, 雨宮 智宏, 西山 伸彦
2. 発表標題 リッジ埋め込み導波路構造およびACPM回折格子を導入した GaInAsP半導体薄膜レーザの発振特性
3. 学会等名 2022年春季応用物理学学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 N. Takahashi, W. Fang, Y. Ohiso, T. Amemiya, N. Nishiyama
2. 発表標題 Lateral Optical Confinement Enhanced GaInAsP Membrane Laser on Si for On-chip Optical Interconnection
3. 学会等名 2022 International Semiconductor Laser Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 W. Fang, N. Takahashi, Y. Ohiso, W. Wang, T. Amemiya, N. Nishiyama
2. 発表標題 Thermal Resistance Reduction of GaInAsP/Si Membrane Laser bonded by Room Temperature Si-nano-film Assisted Surface Activated Bonding
3. 学会等名 CSW 2021 ( 国際学会 )
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 W. Fang, N. Takahashi, Y. Ohiso, T. Amemiya, N. Nishiyama
2. 発表標題 Thermal resistance reduction of membrane FP laser bonded by a-Si nano-film assisted surface activated bonding
3. 学会等名 2021年秋季応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 N. Takahashi, W. Fang, W. Wang, T. Amemiya, N. Nishiyama
2. 発表標題 Buried-ridge-waveguide Type GaInAsP/InP Membrane Lasers for Reduction of Differential Resistance
3. 学会等名 The 10th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence ( 国際学会 )
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 W. Fang, N. Takahashi, W. Wang, T. Amemiya, N. Nishiyama
2. 発表標題 Investigation of thermal shunt structure of semiconductor membrane laser based on BCB bonding for enhancing heat evacuation
3. 学会等名 The 10th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence ( 国際学会 )
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 W. Fang, N. Takahashi, W. Wang, T. Amemiya, N. Nishiyama
2. 発表標題 Investigation of heat generation reduction effect of semiconductor membrane laser using thermal shunt structure
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西山 伸彦, 雨宮 智宏
2. 発表標題 ハイブリッド光集積回路のこれまでとこれから
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 非線形変換処理装置	発明者 西山伸彦、高橋直樹、雨宮智宏	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-061988	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

西山研究室ホームページ <a href="http://www.opto.ee.e.titech.ac.jp/">http://www.opto.ee.e.titech.ac.jp/</a>
--

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