

平成29年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書
〔追跡評価用〕

平成29年4月21日現在

研究代表者 氏名	荒井 滋久	所属研究機関・ 部局・職 (研究期間終了時)	東京工業大学・量子ナノエレクトロニクス研究センター・教授
研究課題名	Si系LSI内広帯域配線層の為のInP系メンブレン光・電子デバイス		
課題番号	19002009	研究期間	平成19年度～平成23年度
研究組織 (研究期間終了時)	研究代表者 荒井 滋久（東京工業大学・量子ナノエレクトロニクス研究センター・教授） 研究分担者 丸山 武男（金沢大学・電子情報学系・准教授）		

【補助金交付額】（研究期間全体）（直接経費）： 438,300千円

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか

特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)～(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究の概要

(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

研究代表者である荒井滋久が行ってきた研究実施状況を、獲得した科学研究費とその成果として以下に記す。

① 研究種目：基盤研究 A

研究課題名：集積回路上光配線に向けた横方向電流注入型半導体薄膜レーザの研究

年度：平成 24 年度～平成 26 年度

研究期間全体の配分額：44,980 千円

- ・特別推進研究では、半導体層を 0.3 μm 以下の厚みの薄膜（メンブレン）構造にして、光を増幅する活性層の側面に n 形半導体層および p 形半導体層を形成して、横方向に電流を注入する「横方向電流注入（Lateral Current Injection: LCI）構造」の半導体レーザの実現に大変苦勞したが、「横方向電流注入（LCI）構造」における電流注入効率（内部量子効率とよぶ）を、基板面に垂直方向に電流を注入する通常の半導体レーザと同等の値である 70%まで高めることに成功した。期間中に初めて「横方向電流注入（LCI）構造」レーザの室温連続動作およびブラッグ回折格子を形成した分布帰還（Distributed Feedback: DFB）レーザの低しきい値電流化（3.8 mA）を達成した。しかし、集積回路上光配線に向けた極低電流動作にはまだ 1 桁以上の低電流動作化が必要であった。
- ・この基盤研究 A では、メンブレン構造をポリマー（Benzocyclobutene: BCB）を用いて Si 基板上に貼り付けた電流注入型メンブレン DFB レーザを初めて実現した。比較的深い回折格子を形成すると共に共振器長を 50 μm まで短縮することにより、しきい値電流を 0.23 mA まで低減化することに成功した。また、作製プロセスの改善により、内部量子効率を 75%に向上させた。

② 研究種目：基盤研究 S

研究課題名：オンチップ光配線のための超低消費電力半導体薄膜光回路の構築

年度：平成 27 年度～平成 30 年度

研究期間全体の配分額：153,200 千円（予定）

- ・この基盤研究 S では、上述の基盤研究 A の成果を元に、低電流・高効率動作化を推進すると共に、実際に低電流動作かつ 10 Gbit/s 以上の超高速変調動作を両立すると共に、オンチップ光検出器を集積して、従来にない極低消費電力動作可能な半導体薄膜光回路を構成することを目的とした研究を推進している。
- ・上述した基盤研究 A で作製した Si 基板上メンブレン DFB レーザの直接変調を行い、1 mA の動作電流で 10 Gbit/s の高速直接変調をビット誤り率 10 のマイナス 9 乗で実現した。さらに、このメンブレン DFB レーザと同一の薄膜ウェーハ上にメンブレン光検出器を集積した光リンクを構成し、10 Gbit/s の信号伝送を行った。
- ・このメンブレン DFB レーザでは、しきい値電流は 0.23 mA と低いが、しきい値以上における光出力の効率（外部微分量子効率）は 10%程度であり、集積回路上光配線に向けた極低消費電力動作光源としては不十分であった。一様周期のブラッグ回折格子を有する DFB レーザではレーザ光が左右対称に出力されるため、一方向に高い外部微分量子効率で光出力を取り出すことができない。そこで、DFB 共振器の後ろ側にもう一つのブラッグ回折格子反射器（Distributed Bragg Reflector: DBR）を集積した分布反射型（Distributed Reflector: DR）レーザをメンブレン構造で実現し、DFB 領域長 32 μm 、DBR 領域長 50 μm の素子において、しきい値電流 0.21 mA、外部微分量子効率 32%という低電流・高効率動作を実現した。消費電力に対して取り出された光出力の比率である電力変換効率は 12.5%に達しており、従来報告されてきたメンブレン構造を用いる半導体レーザ（NTT 研究所のフォトニック結晶レーザ）で報告されている値の 2 倍以上であった。
- ・このメンブレン DR レーザの直接変調を行い、1 mA の動作電流で 15 Gbit/s の高速直接変調が可能であることを実験的に明らかにした。光信号出力のピーク値は 10 Gbit/s 信号伝送に要求される光強度を越えるものであり、特別推進研究で計画した極低消費電力光源の性能を満たす性能を得ることができた。
- ・本基盤研究 S では、電気信号を光信号に変換する極低消費電力光源のみならず、受光した光信号を高効率で電気信号に変換する光検出器の研究も含めた光回路の構築を目指しており、低いバイアス電圧で動作可能なフォトダイオードに高い負荷抵抗を接続し、増幅回路を必要としない高速光検出器を実現することを提案した。

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(2)論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

特別推進研究期間終了後に研究代表者である荒井滋久が発表した国際学術論文は、IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, Optics Express, Applied Physics Express 等に 55 編が掲載されており、他に 2017 年度掲載決定の論文が 4 編ある。

【論文発表】2012 年 4 月～現在までに掲載された査読付き英文論文 55 編

2012 年度：8 編、2013 年度：6 編、2014 年度：14 編、2015 年度：14 編、2016 年度：13 編

特別推進研究期間終了後に研究代表者が著者となる国際会議論文は 166 件、そのうち下記 10 件が招待講演である。特別推進研究終了後 2014 年度までは、しきい値電流 1 mA 以下の極低電流動作が得られていなかったが、2015 年の国際会議からは約 0.2 mA の極低電流動作が実現され、低しきい値電流化および低消費電力高速動作の成果が得られるようになり、招待講演依頼が増えている。

2016 年 9 月に神戸で開催された第 25 回 IEEE 半導体レーザ国際会議（ISLC 2016）では、3 件の基調講演の 1 つとして招待講演を依頼された。この国際会議は 2 年毎にアジア、欧州、米大陸で開催され、半導体レーザ研究者にとっては最も権威ある国際会議として位置づけられており、特別推進研究の中核的研究課題であった「オンチップ光配線のための超低消費電力半導体薄膜レーザ」の研究が半導体レーザ分野で重要なトピックとして認識されたものと考えられる。

【国際会議招待講演】2012 年 4 月～現在までに発表の招待講演 9 件、今後発表予定の招待講演 1 件

- (1) “Long Wavelength Membrane Lasers for Optical Interconnects,” International Nano-Optoelectronics Workshop 2012 (iNOW 2012), Su 2.2, San Francisco, USA, August 8-14, 2012.
- (2) “Membrane DFB Lasers toward On-chip Optical Interconnection,” The 23rd IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2012), Workshop on Silicon Photonics, San Diego, USA, October 7-10, 2012..
- (3) “Lateral Current Injection Type Membrane DFB lasers,” The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR 2013), Kyoto, Japan, ThK2-1, June 30- July 3, 2013.
- (4) “Semiconductor Membrane Photonic Devices for Ultra-low Power Consumption Operation,” IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting, WA1.1, Hawaii, USA, July 8-10, 2013.
- (5) “Membrane Photonic Devices toward On-chip Optical Interconnects,” International Nano-Optoelectronics Workshop 2015 (iNOW 2015), TuB2, Tokyo, Japan, August 3-7, 2015.
- (6) “Integrated Membrane-based DFB and DR lasers,” SPIE Photonics West 2016 (LASE), San Francisco, USA, February 13-18, 2016.
- (7) “GaInAsP/InP Membrane Lasers,” The Conference on Lasers and Electro-Optics 2016 (CLEO 2016), SF2L.3, San Jose, USA, June 5-10, 2016.
- (8) “Membrane Distributed-reflector Lasers,” The 21st Opto Electronics and Communications Conference (OECC 2016), WD3-1, Niigata, Japan, July 3-7, 2016.
- (9) “In-plane Semiconductor Membrane Lasers for Photonic Integrated Circuits,” The 25th IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2016) (Plenary talk), TuA2, Kobe, Japan, September 12-15, 2016.
- (10) “Low-threshold Membrane DFB and DR Lasers,” The 30th Annual conference of the IEEE Photonics Society (IPC 2017), Lake Buena Vista, Florida, USA, October 1-5, 2017.

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(3) 研究費の取得状況（研究代表者として取得したもののみ）

①研究種目：基盤研究 A

研究課題名：集積回路上光配線に向けた横方向電流注入型半導体薄膜レーザの研究

年度：平成 24 年度－平成 26 年度

研究期間全体の配分額：44,980 千円

②研究種目：基盤研究 S

研究課題名：オンチップ光配線のための超低消費電力半導体薄膜光回路の構築

年度：平成 27 年度－平成 30 年度

研究期間全体の配分額：153,200 千円（予定）

(4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

特別推進研究期間の研究代表者の研究は、主に「Si 系 LSI 内の広帯域光配線のための GaInAsP/InP 超低消費電力レーザ」の実現を目指して行われたものであり、その研究成果を元に下記の知見を得ることができた。

①半導体薄膜（メンブレン）構造への高効率電流注入構造実現

・厚さ 200-300 nm の半導体メンブレン構造の横方向に p-i-n 半導体二重ヘテロ接合構造を形成し、基板面に平行な方向である横方向に電流を注入する構造においても、基板面に垂直方向に電流注入を行う従来型半導体レーザと遜色ない電流注入効率（内部量子効率 70%）を実験から実証した。

本研究開始当初は、メンブレン半導体の表面での非発光再結合のために、光励起下での極低しきい値動作は得られても、集積回路上の光配線に必要な電流注入で動作する極低しきい値電流半導体レーザが実現可能であるのかという点で憂慮されていたが、長距離光ファイバ通信に実用化されている GaInAsP/InP 系材料においては本質的問題とならないことを実験的に明らかにした。

②LSI 内の広帯域光配線のための半導体レーザ光源の設計指針

・現状の LSI では信号伝送に使用される消費電力が信号周波数と共に大きく増大するため、クロック速度はほぼ 3 GHz で制限され、マルチコア化による並列処理が行われている。本研究では、信号速度 10 Gbit/s で電気配線を遙かに下回る低消費電力光配線を想定し、光検出器の最小受信電力を考慮した半導体レーザ光源に要求される光出力、およびその光出力を得るための動作電流での変調可能周波数の 2 つの条件を満たすレーザ構造の設計指針を明らかにした。

この指針から、フォトリソニック結晶構造を用いて共振器体積を極微化することは、低電流動作化および極低電流で超高速変調を達成することには有用であるが、光検出器の最小受信電力は通常の光ファイバ通信に用いられる値と同じため、その光出力を得るためには、デバイスの抵抗分での電力消費が最小となる適切な共振器サイズが必要となることを明らかにした。

③超低消費電力かつ高速変調可能な半導体レーザ光源の実証

・しきい値電流 0.21 mA、片側への光出力に対する微分量子効率 32%、電力変換効率 12%という低消費電力動作だけでなく、10 Gbit/s の光信号に対して十分な光出力（0.16 mW）を 1 mA 以下の駆動電流で得られる高速直接変調特性を有するメンブレン DR レーザを実現し、15 Gbit/s の高速変調を実証した。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 学界への貢献の状況（学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等）

半導体薄膜（メンブレン）構造レーザ光源については、特別推進研究およびその後の成果として示した「LSI内の広帯域光配線のための半導体レーザ光源の設計指針」の影響を受け、フォトニック結晶構造を用いた極低電流動作半導体レーザを報告した NTT 物性基礎研究所の研究グループも、われわれと同じ構造のメンブレン DFBレーザおよびメンブレン DR レーザの研究を開始している。通常の半導体レーザに比べ高度の作製プロセス技術が必要であること、および Si-CMOS のようなファウンドリ・サービスが利用できないため、この研究を遂行できる研究機関は非常に限られている。この度、面内集積に適した半導体レーザとしては、動作電流・電力変換効率・低電流高速変調の観点で全て記録的な成果が得られたため、今後、このメンブレン構造レーザ光源を用いる低消費電力光回路に向けた研究が大きく進展するものと期待される。

テラヘルツ発振素子に関しては、研究期間に、LSI チップ間のテラヘルツ無線通信用光源として共鳴トンネルダイオード（RTD）発振素子の高周波化・高出力化の研究を行ったが、期間内（2010 年）に電子デバイスでは初めての 1 THz を超える室温発振に成功した。この成果はテラヘルツデバイスの多くの解説論文でとりあげられるなど、この分野に大きなインパクトを与え、RTD がテラヘルツ光源の候補として認識されるとともに、国内外（日本、英国、ドイツ、米国など）の研究機関で RTD テラヘルツ発振器の研究開発が開始される契機となった。欧州のプロジェクト FP7 では RTD によるテラヘルツ無線通信開発プログラム（Horizon 2020-iBROW）が英国を中心として 2015 年から開始された。現時点においても、1 THz 以上の室温発振が可能な電子デバイスは RTD 以外には報告されていない。本研究グループは RTD 発振素子の高性能化の研究を続けており、最近までに 1.92 THz の高周波発振、0.6 mW の高出力化、周波数可変機能の集積など大きな成果をあげている。これらにより、JST の CREST や産学共創プログラムテラヘルツテクノロジープラットフォームなどを中心として、無線通信だけでなく、室温テラヘルツ光源としてイメージングや分光分析など種々の応用研究が始まっている。

InP 系化合物半導体による MOSFET は、CMOS 回路用高移動度チャネルとして期待されているが、イオン注入で実現できるソースのキャリア濃度が不十分であったことから十分な電流量が出なかった。そこで高濃度ドーピングで高電流密度を再成長やヘテロ成長構造で実現した。この後に発表されている高電流密度動作を目指した InP 系 MOSFET は、すべて成長時にドーピングを行うようになっており、その波及効果は大きい。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況（続き）

(2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

【研究期間中に発表した論文】

No	論文名・著者名・発行年・ページ数等	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	“Resonant Tunneling diodes for sub-terahertz and terahertz oscillators,” (Invited), M. Asada, S. Suzuki, and N. Kishimoto, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 47, No. 6, pp. 4375-4384, 2008.	共鳴トンネルダイオードを用いたテラヘルツ波発振素子について、理論解析により2THzを超える発振が可能であることを示すとともに、高周波化、高出力についての我々のグループの進展を紹介した。	229
2	“Fundamental oscillation of resonant tunneling diodes above 1 THz at room temperature,” S. Suzuki, M. Asada, A. Teranishi, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, Appl. Phys. Lett. Vol. 97, No. 24, 242102(1-3), 2010.	共鳴トンネルダイオードを用いたテラヘルツ発振素子を用いて、電子デバイスで初めての1THzを超える室温発振を達成した。	187
3	“Fundamental Oscillation of up to 831 GHz in GaInAs/AlAs Resonant Tunneling Diode,” S. Suzuki, A. Teranishi, K. Hinata, and M. Asada, Appl. Phys. Express, Vol. 2, No. 5, 054501 (1-3), 2009.	共鳴トンネルダイオードを用いたテラヘルツ発振素子を用いて、(発表当時において) 室温電子デバイスで最高周波数の831GHzの発振を達成した。	71
4	“Strongly index-coupled membrane BH-DFB lasers with surface corrugation grating,” S. Sakamoto, H. Naitoh, M. Ohtake, Y. Nishimoto, S. Tamura, T. Maruyama, S. Arai, IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electron., Vol. 13, No. 5, pp. 1135-1141, 2007.	半導体薄膜構造分布帰還レーザに深い表面回折格子を形成し、光励起室温連続動作とその低しきい値単一波長動作を達成した。	54
5	“InP/InGaAs composite metal/oxide/semiconductor field-effect transistors with regrown source and Al ₂ O ₃ gate dielectric exhibiting maximum drain current exceeding 1.3 mA/μm,” R. Terao, T. Kanazawa, S. Ikeda, Y. Yonai, A. Kato, and Y. Miyamoto, Appl. Phys. Express, Vol.4, No. 5, 054201(1-3), 2011.	再成長ソースを電子ビーム露光法による100nm程度の短チャネルと組み合わせることで、ドレインへの1V印加時に1.3 mA/μmを超える電流密度を初めて達成した。	47
6	“GaInAsP/InP membrane lasers for optical interconnects,” (Invited) S. Arai, N. Nishiyama, T. Maruyama, T. Okumura, IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electron., Vol. 17, No. 5, pp. 1381-1389, 2011.	将来の集積回路上の光配線を目的としたオンチップ光通信光源として、平面集積可能性および極低消費電力動作の観点から半導体薄膜構造レーザの優位性と研究進展を解説した。	47
7	“High drain current (> 2A/mm) InGaAs channel MOSFET at V _D =0.5 V with shrinkage of channel length by InP anisotropic etching,” Y. Yonai, T. Kanazawa, S. Ikeda, and Y. Miyamoto, Electron Devices Meeting (IEDM), 2011 IEEE International, 13.3 (1-4), 2011	InPソースをInGaAsと組み合わせることで選択エッチングによる成長ソース層の形成を可能にして、電子ビーム露光法による50nm程度の短チャネルと組み合わせることで、ドレインへの0.5V印加時に12.4 mA/μmという高電流密度を実現した。	44
8	“Lateral current injection GaInAsP/InP laser on semi-insulating substrate for membrane-based photonic circuits,” T. Okumura, M. Kurokawa, M. Shirao, D. Kondo, H. Ito, N. Nishiyama, S. Arai, Optics Express, Vol. 17, No. 15, pp. 12564-12570, 2009.	半導体薄膜構造レーザを電流注入動作することを目的として、基板面に平行な方向に電流注入構造を形成した初めての横注入レーザの室温発振を実現した。	37
9	“Low-loss amorphous silicon multilayer waveguides vertically stacked on silicon-on-insulator substrate,” J. Kang, Y. Atsumi, M. Oda, T. Amemiya, N. Nishiyama, S. Arai, Japan. J. of Appl. Phys., Vol. 50, No. 12, 120208, 2011.	Si細線光導波路を形成したSOIウェーハ上3次元光集積導波路構造を実現することを目的として、アモルファスSi層およびSiO ₂ 層を積層し、回折格子を形成して各層間の高効率光結合を達成した。	36
10	“GaInAsP/InP lateral-current-injection distributed feedback laser with a-Si surface grating,” T. Shindo, T. Okumura, H. Ito, T. Koguchi, D. Takahashi, Y. Atsumi, J. Kang, T. Amemiya, N. Nishiyama, S. Arai, Optics Express, Vol. 19, No. 3, pp. 1884-1891, 2011.	半導体薄膜構造分布帰還レーザの電流注入動作を目的として、半絶縁性InP基板上に、アモルファスシリコン表面回折格子を有する横注入構造を有する分布帰還レーザを作製し、低電流(7mA)・高効率(43%)動作を達成した。	30

【研究期間終了後に発表した論文】

No	論文名・著者名・発行年・ページ数等	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	“Direct intensity modulation and wireless data transmission characteristics of terahertz-oscillating resonant tunnelling diodes,” K. Ishigaki, M. Shiraishi, S. Suzuki, and M. Asada, <i>Elecron. Lett.</i> , Vol. 48, No. 10, pp. 582-583, 2012.	共鳴トンネルダイオードの直接変調により、伝送速度 3Gbit/s のテラヘルツ無線通信を達成した。	83
2	“Fundamental Oscillation up to 1.31 THz in Resonant Tunneling Diodes with Thin Well and Barriers,” H. Kanaya, H. Shibayama, R. Sogabe, and M. Asada, <i>Appl. Phys. Express</i> , Vol. 5, No. 12, 124101(1-3), 2012.	共鳴トンネルダイオードを用いたテラヘルツ発振素子について、薄膜の量子井戸と障壁を用いることにより、(発表当時において) 室温電子デバイスで最高周波数の 1.31THz の発振を達成した。	61
3	“High-Power Operation of Terahertz Oscillators With Resonant Tunneling Diodes Using Impedance-Matched Antennas and Array Configuration,” S. Suzuki, M. Shiraishi, H. Shibayama, and M. Asada, <i>IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.</i> , Vol. 19, No. 1, 8500108(1-8), 2013.	共鳴トンネルダイオードを用いたテラヘルツ発振素子について、アンテナとダイオードのインピーダンス整合とアレイ構成により、620GHz で 0.6mW の高出力化を達成した。	56
4	“Operation of resonant-tunneling diodes with strong back injection from the collector at frequencies up to 1.46 THz,” M. Feiginov, H. Kanaya, S. Suzuki, and M. Asada, <i>Appl. Phys. Lett.</i> , Vol. 104, No. 24, 243509(1-3), 2014.	共鳴トンネルダイオードを用いたテラヘルツ発振素子について、トンネル障壁とコレクタ間の電子の運動を実験と理論で詳細に示すとともに、コレクタ構造最適化により(発表当時において) 室温電子デバイスで最高周波数の 1.46THz までの発振を達成した。	38
5	“InAs thin-channel high-electron-mobility transistors with very high current-gain cutoff frequency for emerging submillimeter-wave applications,” E. Y. Chang, C. I. Kuo, H. T. Hsu, C. Y. Chiang, Y. Miyamoto, <i>Appl. Phys. Express</i> , Vol.6, No.3, 034001(1-3), 2013.	電子ビーム露光法による微細ゲート作製法を InAs HEMT に応用して、HEMT としてはその当時世界最高である遮断周波数 710GHz を達成した。	36
6	“Low threshold current density operation of a GaInAsP/Si hybrid laser prepared by low-temperature N ₂ plasma activated bonding,” Y. Hayashi, R. Osabe, K. Fukuda, Y. Atsumi, J. Kang, N. Nishiyama, S. Arai, <i>Japan. J. of Appl. Phys.</i> , Vo. 52, No. 6, 060202, 2013.	窒素プラズマ処理による表面活性化接合を用いることにより、Si 細線光導波路上に III-V 族材料を 150°C という低温で貼り付けた半導体レーザを作製し、室温で量子井戸一層あたり 170 A/cm ² という低しきい値電流動作を達成した。	25
7	“Sub-milliamperere threshold operation of butt-jointed built-in membrane DFB laser bonded on Si substrate,” D. Inoue, J. Lee, T. Hiratani, Y. Atsuji, T. Amemiya, N. Nishiyama, S. Arai, <i>Optics Express</i> , Vol. 23, No. 6, pp. 7771-7778, 2015.	Si 基板上に BCB ポリマーを介して貼り付けた半導体薄膜構造分布帰還レーザを作製し、室温連続動作条件下のしきい値電流 023 mA という極低電流動作および良好な単一モード動作を達成した。	17
8	“Room-temperature continuous-wave operation of GaInAsP/InP lateral-current-injection membrane laser bonded on Si substrate,” D. Inoue, J. Lee, T. Hiratani, Y. Atsuji, T. Amemiya, N. Nishiyama, S. Arai, <i>Appl. Phys. Express</i> , Vol.7, No. 7, 072701, 2014.	半導体薄膜構造分布帰還レーザ BCB ポリマーを介して初めて Si 基板上に貼り付けることに成功し、室温連続動作条件下のしきい値電流 2.5 mA および外部微分量子効率 22% を達成した。	17
9	“High-modulation efficiency operation of GaInAsP/InP membrane distributed feedback laser on Si substrate,” D. Inoue, T. Hiratani, K. Fukuda, T. Tomiyasu, T. Amemiya, N. Nishiyama, S. Arai, <i>Optics Express</i> , Vol. 23, No. 22, pp. 29024-29031, 2015.	Si 基板上に BCB ポリマーを介して貼り付けた半導体薄膜分布帰還レーザにおいて、0.27 mA の低しきい値電流動作および注入電流 1 mA における直接変調応答周波数 9.5 GHz を達成し、分布帰還レーザとして世界最高の変調効率 9.9 GHz/mA ^{1/2} を実現した。	13
10	“Few-layer HfS ₂ transistors,” T. Kanazawa, T. Amemiya, A. Ishikawa, V. Upadhyaya, K. Tsuruta, T. Tanaka, and Y. Miyamoto, <i>Scientific reports</i> Vol. 6, 22277(1-9), 2016.	原子層状半導体として、高い移動度が期待される HfS ₂ において、電子ビーム露光法によるゲート作製を行い、トランジスタとしての初めての動作を確認した。	13

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報

次の(1)、(2)の項目ごとに、該当する内容について具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究成果の社会への還元状況（社会への還元の程度、内容、実用化の有無は問いません。）

半導体薄膜（メンブレン）構造光回路については、現時点でやっと当初目標に近い性能のレーザ光源が実現されたところであり、現在遂行している低消費電力動作の小型光検出器の研究によって集積化が進めば、非常に低電力の光配線を構築できる可能性がある。特別推進研究およびその後の研究費等で得られた知見を元に、文部科学省「ナノテクノロジープラットフォーム」を通して、SOI 基板とIII-V族半導体貼り付け技術やメンブレン構造光デバイス作製サービス等を行っている。

テラヘルツ発振素子に関しては、JST の産学共創プログラムテラヘルツテクノロジープラットフォーム、JST フェア、新技術説明会などを通して、本研究で得られた共鳴トンネルダイオードによる超小型室温テラヘルツ光源の種々の応用への試用をいろいろな企業に呼びかけており、いくつかの応用研究開発が行われている。

本研究遂行時に提案したダブルゲート縦型ヘテロ接合 MOSFET は、その後 SCOPE や基盤研究 (A) に採択されるなどの発展を行いつつあるが、いまだ研究段階である。

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）

(2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助教やポスドク等の研究終了後の動向を記述してください。）

本特別推進研究の研究分担者であった助教が、2008年4月から金沢大学 自然科学研究科 電子情報科学専攻 准教授に採用された。

本特別推進研究に関与した博士課程学生が、2009年に東京工業大学大学院 総合理工学研究科 物理電子システム創造専攻 助教に採用され、2014年には東京工業大学大学院 理工学研究科 電子物理工学専攻 准教授に昇任している。

また、本特別推進研究に関与した博士課程修了生は、フジクラ、日立製作所、韓国 Samsung、三菱電機、NTT 研究所、産業技術総合研究所（AIST）、韓国科学技術研究所（KAIST）、東芝に就職し、それぞれ研究活動を続けている。