

ACCEL「フォトリック結晶レーザの高輝度・高出力化」追跡評価報告書

1. 研究成果の発展状況や活用状況

本研究開発課題では半導体レーザ分野における独創技術「フォトリック結晶面発光レーザ(PCSEL)」を高輝度・高出力化し、光製造の産業分野に適用できるレベルまで発展させるため、技術的成立性証明(POC)として、10 W 級の高ビーム品質・高出力動作可能な単体デバイス、および 100 W 級動作可能な合波モジュール技術を目指した研究開発が行われた。研究期間中に 10 W 級の高ビーム品質動作(ビーム品質指数 $M^2 \leq 2$) 可能なデバイス技術の開発に成功。また、7 合波時ビーム品質 $M^2 = 5.5$ 、合波効率 90%の並列空間合波モジュールと、7 合波時ビーム品質 $M^2 = 8.4$ 、合波効率 95%のファイバコンバイナ方式の合波モジュールを実現し、本研究開発課題で目指した POC を達成した。

研究終了後、野田は内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の下で、超スマート社会(Society5.0)実現に向けて、PCSEL 技術のさらなる発展を目指した。まず、スマートセンシング分野への展開のため、ローム株式会社と連携し、ACCEL 研究期間中に開発したフォトリック結晶構造である 2 重格子構造を深化させ、かつ、PCSEL 裏面に反射鏡(DBR)を導入した新構造により、パルス動作で 20 W 超の出力と高輝度($1.5 \text{ GW/cm}^2/\text{sr}$)動作を達成した。これにより光源部のレンズフリー動作が可能となり、北陽電機株式会社との連携により、名刺サイズのクラス最小寸法の LiDAR を実現することに成功するとともに、その LiDAR を搭載した自動搬送ロボットのデモンストレーションにも成功した。こうした成果を背景に、ローム(株)は、まず、搬送ロボット用 LiDAR への搭載をメインのターゲットとして、京都大学と連携して PCSEL 開発を継続しており、ユーザーへのサンプル提供などによって具体的な市場形成を進めている。さらに、現在、事業部への技術移管を加速しており、近い将来、高輝度・高ビーム品質という PCSEL の特長を生かし、ロボットの自動走行分野への展開、さらには車の自動運転までもの展開が期待できる。

さらに、野田は、PCSEL 技術のスマート製造分野への展開のために、PCSEL の更なる高出力化を行うべく、大面積に対して単一モード動作を可能にするフォトリック結晶の新設計理論を提唱し、それに基づいて作製した 3 mm 径の PCSEL において、CW 動作で 50 W 級・高輝度($1 \text{ GW/cm}^2/\text{sr}$)、ビーム拡がり角 $\sim 0.05^\circ$ を実現し、大幅な性能改善に成功した。この PCSEL 単体の輝度はガス/固体/ファイバーレーザ等の大型レーザに匹敵するものであり、従来の大型レーザによる光加工が、高効率・低コストの超小型 PCSEL で可能な段階に達したことを意味し、半導体レーザの開発史上極めて大きな成果である。なお、本研究開発課題に参画した三菱電機株式会社は、その後も、直列合波方式の合波モジュールの開発を進め、手のひらサイズの小型化に成功していたが、引き続き、レーザ加工用モジュールの量産へ向けて、PCSEL の更なる高出力化($\sim 100 \text{ W}$ 級)、冷却技術、電源技術の確立などの課題解決に産学連携で取り組んでおり、PCSEL のレーザ加工分野での社会実装へ向けた動きが着実に進んでいる。

本研究開発課題に関連する特許については、研究期間中の出願特許 10 件のうち 5 件が研究終了後に権利化されている。また、研究終了後に出願された本研究開発課題の関連特許 18 件のうち 5 件が権利化されるとともに、審査中や審査未請求のものもあり、今後も権利化が期待されるなど、知財活動も継続して活発に行われている。研究期間中の主要な特許は、本研究開発課題に続いて SIP プロジェクトにも参画したローム(株)、三菱電機(株)などとの共同出願になっており、これらの企業による PCSEL の実用化・製品化は、今後滞りなく進むものと期待できる。

以上により、研究成果の発展状況や活用状況は、技術的成立性証明の実施状況とそれに伴う企業との連携状況、知財の権利化状況を含めて期待どおりに優れていると評価できる。

2. 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果

野田による大面積の単一モード動作を可能にする PCSEL の新設計理論は、PCSEL 中の光波の相互結合(エルミート結合、非エルミート結合)の融合による世界初の提案で、これまで単に物理現象の探索に留まっていた非エルミート物理を、新たな光デバイス機能の実現にまで展開した点で画期的と言える。こうした新原理の光デバイスは「非エルミート系ナノフォトニクス」なる新学術分野の開拓に繋がり、科学技術上の貴重な波及効果をもたらすと期待される。

また、野田は 2 重格子構造とは別に、高出力・高ビーム品質を維持しつつ、電気信号の操作により任意の方向にビーム出射が可能な複合変調格子 PCSEL を開発し、これを適用した走査型 PCSEL を用いて 3 次元 LiDAR を実現した。この LiDAR システムは反射率の低い黒色物体についても高精度の 3 次元測距が可能であり、ロボットや車両の自律移動などの実用的な応用を目指した実証実験が行われている。

これらの科学技術的成果は、多数の学術論文業績とともに、「紫綬褒章」(野田進、日本国、2014 年 11 月)、「日本学士院賞」(野田進、日本学士院(日本)、2022 年 3 月)をはじめとする多数の受賞実績として高く評価されている。

さらに、GaN 系 PCSEL での W 級の高出力達成による、銅などの青色特有のレーザ加工への応用や、高出力・高ビーム品質を生かした自由空間・宇宙空間用光通信の光源としての可能性など、PCSEL は当初に適用を目指していたレーザ加工分野に留まらず、幅広い用途を支えるキーデバイスとして注目されている。京都大学内には新たな産業技術への展開を目指して PCSEL 京大拠点(PCSEL COE)が設立され、国内外の多くの企業と共同研究を行うとともに PCSEL 素子の提供を行っており、今後、社会・経済への多大な波及効果が期待できる。さらに特筆すべきは、2024 年 12 月に、企業と大学の橋渡し法人である、一般社団法人『京都大学フォトリック結晶レーザー研究所』を、PCSEL COE からスピンアウトして設立したことで、今後、社会実装活動がさらに加速されるものと期待される。

以上により、科学技術や社会・経済への波及効果は大きいと判断される。

以上

国立研究開発法人 科学技術振興機構
戦略的創造研究推進事業
ACCEL
追跡評価用資料

研究開発課題:「フォトリック結晶レーザ
の高輝度・高出力化」
(2013.12～2018.3)

研究代表者:野田 進
PM:八木 重典

2025 年 3 月

目次

要旨	1
研究開発課題の展開状況および波及効果(まとめ図)	3
第 1 章 研究開発課題の概要	4
1.1 研究開発概要	4
1.2 研究開発期間	4
1.3 研究体制	4
1.4 研究開発課題の成果	5
1.4.1 10W 級の高出力・高ビーム品質 PCSEL デバイス開発の主な成果	5
1.4.2 100W 級動作可能な PCSEL 合波モジュール開発の主な成果	6
1.4.3 高性能 PCSEL の要素技術の開発	6
1.4.4 本研究開発課題の目標に対する達成度	6
1.4.5 PCSEL 技術の社会実装/実用化に必要な取り組みに対する成果	7
第 2 章 研究開発課題終了から現在に至る状況	9
2.1 調査の方法	9
2.2 研究開発課題終了後の技術的成立性証明(Proof of Concept)の実施状況	10
2.2.1 研究期間中における PCSEL 成果の社会実装/実用化の例	10
2.2.2 研究終了後における PCSEL 成果の社会実装の実施状況	10
2.3 論文	14
2.4 産業財産権等の権利化状況	14
2.4.1 研究終了後に出願された特許	14
2.4.2 研究終了後に登録された特許	15
2.5 受賞	16
2.5.1 研究期間中の受賞	16
2.5.2 研究終了後の受賞	16
2.6 ACCEL プロジェクトの PM 活動による終了後の社会実装への波及効果	18
2.7 その他	18
第 3 章 研究開発課題成果の波及と展望	19
3.1 科学技術への波及と展望	19
3.1.1 新規な理論や概念の提唱	19
3.1.2 新たな研究領域や研究の潮流の形成	26
3.1.3 新たな次世代応用の開拓	33
3.1.4 国際共同研究と世界的波及効果の状況	34
3.1.5 科学技術への波及のまとめと展望	36
3.2 社会経済への波及と展望	37
3.2.1 PCSEL 技術の特徴と社会への貢献	37

3.2.2	社会経済への展開.....	40
3.2.3	社会経済への波及のまとめと展望.....	42

要旨

本報告書は、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の戦略的創造研究推進事業 ACCELの研究開発課題「フォトリック結晶レーザの高輝度・高出力化」(研究代表者：野田進、2013年度～2017年度)において、研究終了後一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況等を明らかにし、JST事業および事業運営の改善等に資するために、追跡調査を実施した結果をまとめたものである。

本ACCELの研究開発課題の目標は、半導体レーザ(LD)分野における独創技術「フォトリック結晶面発光レーザ(Photonic-Crystal Surface-Emitting Laser:PCSEL)」を高輝度・高出力化し、光製造の産業分野に適用できるレベルにまで発展させることである。そのための技術的成立性の証明・提示(Proof of Concept:POC)として、10W級の高ビーム品質・高出力動作が可能な単体PCSELの開発、および100W級動作が可能な合波モジュール技術の開発を目指すとともに、社会実装/実用化に向けた検討がなされた。

研究期間中、本研究開発課題は高出力 PCSEL および合波モジュールの製造プロセス・デバイス作製を目標とする「京都大学・ローム株式会社・三菱電機株式会社」グループ、およびフォトリック結晶構造の設計パラメーターの抽出とデバイス作製を目標とする「浜松ホトニクス株式会社」グループの2グループ体制で行われた。これにより PCSEL 単体では設計・プロセス・放熱・実装の各技術を5段階分割で進化させ、研究開始時の～1W出力を10W級出力で高品質化に成功し目標を達成した。また合波モジュールでも並列空間合波方式の採用により100W級合波モジュール技術を実現して目標を達成した。

研究終了後、PCSELは前例のない高出力・高品質LDとして多くの成果を挙げるとともに、「次世代スマート社会:Society5.0」におけるレーザ加工・センシング応用を目指した社会実装でも金属加工のほか超小型LiDAR¹センシングなどのPOCの実施がなされた。

PCSELの代表的な特性改善では、2重格子構造でフォトリック結晶空孔の位置とサイズをずらして重ねた新概念をさらに発展させ、縦・横モードの最適化に資する新設計理論を確立し、さらに発熱の問題を解決して、大面積(3mm径)・連続動作で単一モード・50W高出力を実現し、大型レーザに匹敵する高輝度を達成した。合波モジュールでも独自の直列合波方式の開発により超小型(名刺サイズ)の～1kWモジュール実現の道を拓いた。また、空孔格子点の位置およびサイズを変化させた新たな複合変調格子の概念を提唱し、集積マトリックス配置のパルス駆動で5W級高出力・狭いビーム拡がり角(0.7°)を実現し、任意の順番・タイミングによる各PCSEL区画の独立駆動で自在なビーム走査を世界で初めて実現した。

PCSELの代表的な社会実装では、1mm径・5～10W級の2重格子PCSELでステンレスへのマーキング、さらに3mm径・50W級出力の2重格子PCSELでステンレスへの切断加工を実現し、10素子合波の1kW級合波モジュールによる工業生産用超小型・高性能・安価な加工用光源の実用化に明るい見通しを得た。またセンシング応用では2重格子PCSELと回転ミラーの

¹ Light Detection And Ranging(光による検知と測距)

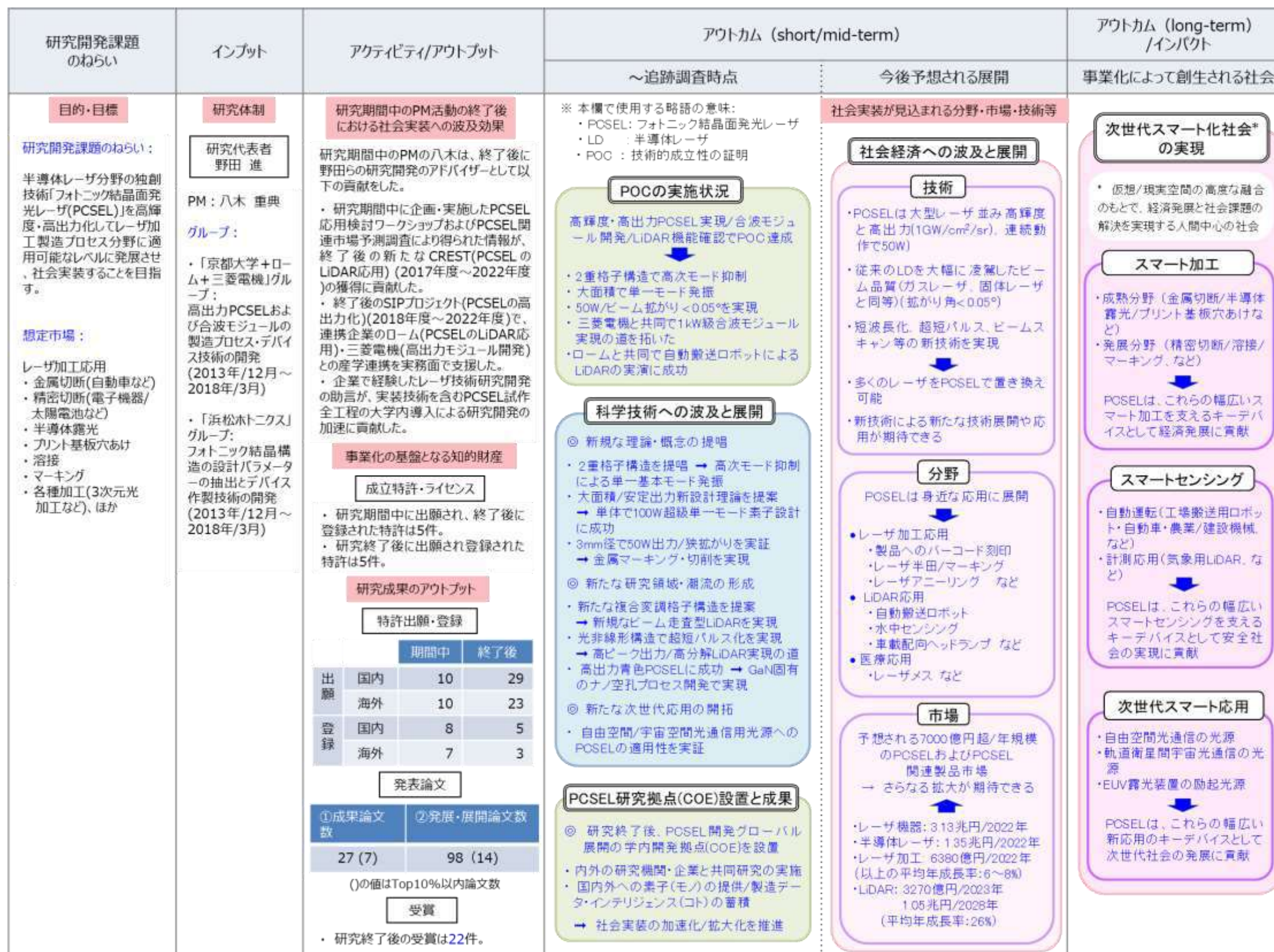
組み合わせによる自動搬送ロボット用小型LiDARや、複合変調格子PCSELのフラッシュ機能・ビーム走査機能の併用による高解像・高速測距LiDARのデモンストレーションに成功し、高い実用性を実証した。その他、超短パルス化の実現や短波長(青色)PCSELの開発によるLiDARアイセーフ遠距離測距化のための基礎技術開発、青色特有の水中センサーの原理実証、自由空間光通信用光源の検証、自在なビームパターンの創成の実現など身近な応用から次世代のスマート加工・センシングに向けた幅広い応用の可能性を示した。

研究終了後の野田の発表論文は98報(研究期間中は27報)であった。最も注目される2重格子PCSELの論文では被引用数が180に達した²。特許出願は国内29件(研究期間中10件)、海外23件(同10件)、特許登録は国内5件(同8件)、海外3件(同7件)であった。受賞は22件であった。研究終了後に野田が獲得した主な研究助成金プロジェクト事業は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構NEDO(2016年度～2020年度)、JST戦略的創造研究推進事業CREST(2017年度～2022年度)、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第2期(内閣府)(2018年度～2022年度)、日本学術振興会の科研費特別推進研究(2022年度～2026年度)、SIP第3期(内閣府)(2023年度～2027年度)、などである。

以上、PCSELの本研究成果は新規構造の提唱、大面積での高出力・高品質化を可能にする新設計理論の構築・実証などで著名な学術論文誌などに多数掲載されて国内外で多大な注目を浴びたことから、科学技術の発展および新たな研究潮流の創成に大きく貢献した。他方、PCSELは高出力・高機能の特性により、金属加工、自動搬送ロボット搭載による高感度のLiDARセンシング、高精度の自由空間・宇宙間光通信用光源の検証などで、幅広い応用力を実証した。これらの応用を含めて新たな産業技術への展開を目指して京都大学内にCenter of Excellence(COE) for Photonic-Crystal Surface-Emitting Lasers(PCSELs)(以後COEと略記)を設立し、国内外の企業と共同研究を行うとともにPCSEL素子の提供を行っている。このことから今後、社会経済への大きな波及効果が期待できる。

² M. Yoshida, et al. “Double-lattice photonic-crystal resonators enabling high-brightness semiconductor lasers with symmetric narrow-divergence beams”, Nature Materials Vol. 18, Feb. 2019.

研究開発課題の展開状況および波及効果(まとめ図)



第 1 章 研究開発課題の概要

1.1 研究開発概要

本研究開発課題の目標は、半導体レーザ分野における独創技術「フォトリック結晶面発光レーザ(PCSEL)」を高輝度・高出力化し、光製造の産業分野に適用できるレベルにまで発展させることである。そのためのProof of Concept (POC)として、10W級の高ビーム品質・高出力動作が可能な単体PCSEL開発、および100W級動作可能な合波モジュール技術開発を目指すとともに、社会実装/実用化に向けた検討を行った。これらの目標に対する主な成果を以下に示す。

・ 10W級の高ビーム品質・高出力PCSELデバイスの開発：

10W級の動作を目指し、デバイス技術開発と実装技術の開発を行った。デバイス技術に関しては、第一段階から第五段階へとフォトリック結晶構造を進化・発展させ、10W級の高ビーム品質動作(ビーム品質指数 $M^2 < 2$: $M^2=1$ が最良)が可能なデバイス技術の開発に成功した。ここでのポイントは、フォトリック結晶構造を2重格子構造へと展開させ、2重格子のそれぞれの形状や段差等を制御することで、デバイス面積を拡大させても、基本モードで動作可能になることを理論的・実験的に見出したことにある。さらに、本デバイスの放熱実装技術に関しても、パッケージの設計、サブマウント・半田材料の探索、さらに、ボンディング技術を深化させ、活性層温度を一定温度(55℃程度)以下に保ちうる技術を実現した。併せて、発熱時に生じる面内温度分布の影響を詳細に検討し、温度分布補償法を確立した。こうして連続動作を可能とする実装技術(冷却・温度補償技術)の開発に成功した。

・ 100W級動作可能なPCSEL合波モジュール技術の開発：

PCSELの合波による出力の高度増強を目指し、本方式の検討および合波モジュールの試作・評価を実施した。PCSEL-ファイバー結合条件の最適化を実現し、高効率かつ高集束なファイバー伝送技術を確立した。並列空間合波方式の合波モジュールにおいては、7素子の合波でビーム品質 $M^2=5.5$ (理論予測値 $M^2 < 6$)の合波モジュールの試作に成功した。さらに光ファイバーを使ってレーザ光を集める方式(ファイバーコンバイナー方式)において7合波時ビーム品質 $M^2=8.4$ (理論予測値 $M^2 < 9$)の実現に成功し、加工に適したビーム品質での100W級合波モジュールの技術開発に成功した。

1.2 研究開発期間

本研究開発課題は、2013年12月～2018年3月の期間に実施された。

1.3 研究体制

研究代表者：野田進 京都大学大学院工学研究科 教授

プログラムマネージャー(PM)：八木重典 科学技術振興機構

・「京都大学＋ローム＋三菱電機」グループ：

本グループは、高出力PCSELおよび合波モジュールのプロセス・デバイス作製技術の開発を目標とした。京都大学はデバイス技術開発(A)および重要要素技術の開発(C)、ロームは京都大学と連携してデバイス技術開発(A)および重要要素技術の開発(C)、三菱電機は高出力合波モジュールの開発(B)および京都大学と連携して重要要素技術の開発(C)を各々分担して推進した。社会実装/実用化については、全体で連携して実施した。

・「浜松ホトニクス」グループ：

本グループは、フォトリソニック結晶構造の設計パラメーターの抽出およびデバイス作製技術の開発を目標とした。浜松ホトニクスは京都大学と連携し、デバイス技術開発(A)および重要要素技術の開発(C)を推進した。社会実装/実用化については、全体で連携して実施した。

1.4 研究開発課題の成果

1.4.1 10W 級の高出力・高ビーム品質 PCSEL デバイス開発の主な成果：

・高性能PCSELデバイスの開発：

10W級の高ビーム品質・高出力動作を目指し、デバイス技術開発と実装技術の開発を行った。デバイス技術に関しては、第一段階から第五段階へとフォトリソニック結晶構造を進化・発展させ、最終的に10W級の高ビーム品質動作($M^2 < 2$)が可能なデバイス開発に成功した。ここでのポイントは、第一段階では、フォトリソニック結晶構造が、非対称単一格子構造であったものを2重格子構造へと展開させ、2重格子のそれぞれの形状や段差等を第二段階から第五段階へと深化・発展させることで、デバイスサイズを200 μm 、300 μm 、500 μm 、800～1000 μm と拡大させても、基本モードで動作可能になることを理論的・実験的に見出すことに成功したことにある。1000 μm での単一モードの動作例では、ビーム拡がり角は最小0.15°未満と極めて狭いことが判明した。特に、社会実装/実用化に必要な、800～1000 μm の大面积でも安定動作可能、かつ安定して作製可能なデバイスについて検討し、1回のエッチングで簡便に形成可能なデバイス構造(第五段階デバイス)を得ることに成功した。

・高度な実装技術の開発：

高出力動作時の発熱の影響への対策として、PCSELデバイスの実装技術を開発した。パッケージの設計、サブマウント・半田材料の探索、さらに、ボンディング技術を深化させ、40W程度の発熱が存在しても、活性層の温度を一定温度(55℃程度)以下に保ちうる技術を実現した。併せて、発熱時に生じる面内温度分布の影響を詳細に検討し、予めフォトリソニック結晶面内に空孔充填率の分布を導入することで、発熱による温度分布の影響を補償するというPCSELならではの補償法を確立した。以上、10W級の高ビーム品質単一モード動作は、半導体レーザ分野における科学技術上大きなインパクトを与えた。国際的水準は極めて高い。

1.4.2 100W 級動作可能な PCSEL 合波モジュール開発の主な成果：

PCSELの合波モジュールの開発においては、まずPCSELの高集束合波に関する理論検討を行った。その結果、2次元六方格子状にPCSELを配置することで、スーパーガウシアン次数 $N<10$ のビームに対し、19合波で $M^2=8\sim 18$ 、7合波で $M^2=5\sim 10$ 程度で合波が可能であることを示した。

次いで、PCSEL合波モジュール光学系の設計・評価を行った。合波ビーム伝送に関して、高集束ビームのファイバー伝送において、許容ビーム品質が入射ビームの M^2 値の3倍以下のファイバーを用いることで、高い収束性を保ったままでの伝送が可能となることを明らかにした。

続いて、合波モジュールの構築・評価を実施し、 $M^2=5.5$ (理論予測値 $M^2<6$)、合波効率90%を実現し、並列空間合波モジュールの試作に成功した。さらに、光ファイバーを使ってレーザ光を集める方式において、7合波時のビーム品質 $M^2=8.4$ (理論予測値 $M^2<9$)、合波効率95%の実現に成功し、合波100W実現の基盤技術開発に成功した。高ビーム品質PCSELに関する合波技術は、これまで世界的にも報告が無く、本研究で得られた成果の科学技術上のインパクトは大きい。国際的水準も、極めて高いと言える。

1.4.3 高性能 PCSEL の要素技術の開発：

・フォトリック結晶ナノ構造の精密形成技術：

フォトリック結晶ナノ構造を大面積で均一かつ精密に形成する技術の開発に成功した。高精度な電子ビーム描画手法の構築、意図的な段差形状などを含む立体的に自在なエッチング技術の確立、さらに有機ヒ素(As)を用いたMOCVD法による埋め込み成長技術の開発により、2重格子構造の孔の間隔や形状・寸法などを、ナノメートルレベルで精密に制御することを可能とし、800～1000 μm 径というLDとしては極めて大きな発振面積で、均一にフォトリック結晶を形成する技術を確立した。

・デバイスの設計および解析の基盤技術：

PCSELの高度な理論解析設計法を開発した。埋め込み成長により形成される立体的なフォトリック結晶の空孔形状をモデル化して取り込むことを可能とし、さらに、時間依存の3次元結合波方程式とキャリアのレート方程式を結合させ、キャリアの効果をも含めた解析手法として確立することで、大面積単一モード発振を得るための指針を示すことに成功した。

1.4.4 本研究開発課題の目標に対する達成度：

本研究開発課題の目標は、半導体レーザ分野における独創技術「フォトリック結晶面発光レーザ(PCSEL)」を高輝度・高出力化し、光製造の産業分野に適用できるレベルにまで発展させることである。そのためのPOCとして、10W級の高ビーム品質・高出力動作可能な単体PCSEL開発、および100W級の動作が可能な合波モジュール開発を目指した。

その結果、前述のように本研究開発課題で目指した目標は達成したと言える。また次の

1.4.5に述べるように、社会実装/実用化に向けた必要な取り組みに対しても目標は十分達成した。さらにPOC実現のための基盤となるナノテクノロジー、計算法において重要要素技術を確立した。これらは、世界的に見ても極めて高い水準にあると言える。

1.4.5 PCSEL 技術の社会実装/実用化に必要な取り組みに対する成果：

・知財権に関する課題への取り組み：

PCSEL技術を社会に適用・実装して行くため京都大学と参画企業各社が結集し、従来の複数社からなる産学共同プロジェクトにおいて問題となっていた、知財権に関する課題に取り組んだ。相互に高度で深い議論を行うことにより、知財権の帰属問題が障害とならない知財権成果共有のルール整備を行い、共同研究契約書により成文化した。一方、成果共有ルールを核として特許討論会を開催し、多数の特許出願を進めた。基本特許等、既存の特許に加え、新たな特許の出願についても検討した。以下、内容毎に列記する。

[PCSEL設計およびプロセス技術開発関連]：

- ・特願2014-175785「2次元フォトリック結晶面発光レーザ」2014/8/29 PCT出願済
- ・特願2014-175786「2次元フォトリック結晶面発光レーザ光源」2014/8/29 PCT出願済
- ・特願2015-169125「2次元フォトリック結晶面発光レーザ」2015/08/28 PCT出願済
- ・特願2016-037876「2次元フォトリック結晶面発光レーザおよびその製造方法」2016/02/29 PCT出願済
- ・特願2016-545639「2次元フォトリック結晶面発光レーザ」2017/2/21 PCT出願済

[モジュール構造関連]：

- ・特願2015-107329「レーザモジュールおよびレーザ加工装置」2015/05/27 PCT出願済
- ・特願2016-572776「レーザモジュールおよびレーザ加工装置」2016/12/12 PCT出願済

[各種応用関連]：

- ・特願2014-021447「半導体レーザ素子」2014/2/6 PCT出願済
- ・特願2014-038912「半導体レーザ素子」2014/2/28 PCT出願済
- ・米国出願 14/773584「2次元フォトリック結晶面発光レーザ」2014/2/25

・PCSELの社会実装に向けた積極的な情報発信と市場調査：

本研究開発課題の成果を社会へ広く情報発信し、PCSELのユーザー企業を巻き込んだ社会実装へと繋げる活動を、PMを中心に行った。代表例として、高ビーム品質・高出力レーザによる光加工に向けたデモンストレーションの第一歩として、W級PCSELを用いた燃焼実験を行った。この様子(動画)は、NHKニュースでも取り上げられるなど、社会の注目を集めた。

本研究開発課題では、成果の進展とともに加工用途(光製造)以外にも期待される応用分野が多いことが判明した。このため、具体的な応用市場について検討の機会を設けた。具体

的には、

(1) 全グループ参加の応用検討Workshopを計6回開催し、前半の4回ではLD市場、加工応用市場の分析や、他の市場応用についての意見交換を行うとともに、応用案や事業化についての基礎検討をした。

(2) さらに、加工用途およびそれ以外を含む出口についても広く検討すべく、外部シンクタンクを活用し、照明・計測・ライフサイエンス・運輸など他の市場への応用可能性について市場調査を実施し、適用可能と思える市場分野とその規模について将来予測を行った。

(3) 後半の2回の応用検討Workshopでは参加企業における事業化の意欲を確認し、コストを含む製品化の概略検討を行った。

(4) さらに、第三者からアイデアで知財権を押さえられるリスクを回避することも重要であるため、必要に応じて知財権化を進めた。

本研究開発課題の成果の一部について本格的な社会実装も2014年に開始し、小ロットの量産も受注できる段階に至った。また、社会実装/実用化を意識し、コストを含む製品化の初期検討を行った。具体的には、1kW-PCSEL搭載レーザ加工機を検討し、レーザ加工機市場において、PCSELが小型・高性能・高耐久性・低コストのLDとして、市場競争力を有し、光製造市場を革新する可能性を有すると結論した。

第 2 章 研究開発課題終了から現在に至る状況

2.1 調査の方法

(1) 基礎データ調査の方法

研究代表者(一部グループ内の成果も含む)を基本的に調査対象とした。利用したデータベースと調査範囲等を下記に示す。

①論文

研究期間中の論文は、2014 年～2018 年に発表された論文であり、終了報告書等に成果論文としてリストアップされている論文を収集した。終了報告書の成果論文リストの中で *in press*、*to be submitted*等と表記があり、その後発表されたものについても基本的には研究期間中の論文とした³。以下、これらの論文を「成果論文(①)」と定義する。

研究終了後の論文は、2018 年 3 月以降に発表され、かつ研究代表者が著者になっている論文を収集し、発展・波及論文(②)とし、リストにした。

データベースは、主としてエルゼビア社の Scopus を利用し、文献タイプは Book(Book chapter、Book review)、Editorial、Erratum を除く全文献タイプとした。

各論文についての評価指標の一つである FWCI(Field-Weighted Citation Impact)⁴、および Journal の指標となる CiteScore⁵についても収集した。

②特許の出願・登録状況

研究期間中の特許は、終了報告書等の成果リスト記載の特許とした。研究終了後の特許は 2018 年 4 月以降に出願され、かつ研究代表者が発明者である特許を収集した。データベースは、主に Patent SQUARE を利用し、補助的に特許情報プラットフォームと espacenet を利用し、国内外の登録状況などを確認した。

③受賞

研究期間中、終了後の受賞を調査対象者(主に研究代表者)の所属する研究室や本人の WEB サイトの調査、researchmap また Google 等の検索サイトで調査を行った。

④ベンチャー

インターネット検索やベンチャー情報の記載のあるデータベースを用いて検索し、研究代表者に確認した。本研究開発課題との関係をインタビューで確認した。

³ 終了報告書に記載の論文でも、2022 年、2023 年など最近の論文については、内容を精査した上で、インタビューで確認し、成果論文とするか、終了後の成果とするかを決定した。

⁴ FWCI(Field-Weighted Citation Impact) : 1 文献あたりの被引用数を世界平均(年別・分野別・文献タイプ別に算出)で割った数値。

⁵ ジャーナル評価指標(Web of Science の Impact Factor と同様の指標)。論文の出版年の CiteScore を取得した。

(2) インタビュー調査の方法

インタビュー調査は研究代表者および、PM、研究開発課題に参加した企業等の主なメンバー数名に実施した。

以下本章では、PCSELの社会実装の展開状況を、終了後のPOCの実施状況、産業財産権等の権利化状況、本研究開発課題のPM活動による終了後の社会実装への波及効果について報告する。

2.2 研究開発課題終了後の技術的成立性証明(Proof of Concept)の実施状況

本節では、最初に研究期間中の共同研究企業による PCSEL の実用化の状況を述べた後、研究終了後に新たな企業が参画して幅広く展開された多くの社会実装について述べる。代表的連携企業 2 社(ロームおよび三菱電機)との共同による社会実装の実施状況についても詳述する。

2.2.1 研究期間中における PCSEL 成果の社会実装/実用化の例

本研究開発課題参画企業の浜松ホトニクスは、プロジェクト開始 2 年目の 2014 年以来、京都大学と共同で出力 0.2W 級の初期的な PCSEL の製造法を構築し、小ロット量産可能なレベルに到達してサンプル出荷の後、研究期間中に製品化を達成した。製品化に関する記事は、以下の資料に掲載されている。

- ・実用化に関する学内研究室広報⁶
- ・JST フェア 2016 への出展⁷
- ・浜松ホトニクスの news への記載⁸

2.2.2 研究終了後における PCSEL 成果の社会実装の実施状況

PCSEL 研究の狙いは、スマート社会(Society5.0)⁹の一翼を担うレーザ加工実現のための性能改善(高出力化・高輝度化)のみでなく、スマート社会の新たな応用(LiDAR などのスマートセンシング、医療診察、分析、照明、移動/宇宙通信など)に向けた新機能の同時発掘にあった。このため、PCSEL は新たなプロジェクト(SIP、NEDO、CREST、科研費など)のもとで、深化型 2 重格子 PCSEL、変調格子型 PCSEL、短パルス PCSEL、短波長 PCSEL、自由空間・宇宙衛星間光通信用 PCSEL、等を含む新たな課題に取り組んだ。

⁶ 京都大学 野田研究室 ホームページ “最新情報” 2013 年 9 月 26 日.<http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp>.

⁷ <https://www.jst.go.jp/tt/jstfair/list/detail/bd009.html>

⁸ https://www.hamamatsu-news.de/issues/hamamatsu_news_2018_01_31yNvDCV8/28/

⁹ サイバー空間(仮想空間)とフィジカル空間(現実空間)を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会(Society)。

(1) 高輝度・高出力 2 重格子型 PCSEL の開発とレーザ加工応用の実施状況¹⁰

研究期間中、単一素子でレーザ加工が可能となる LD を目指し、パルス動作では直径 500 μm の素子において出力 10W 級・高輝度(300MW/cm²/sr、ビーム拡がり M²~2) (従来の LD の 3 倍以上)、CW 動作では 800 μm で出力~7W 級・高輝度(180MW/cm²/sr)の PCSEL を実現した。

研究終了後、本課題は SIP プロジェクト「フォトリソニック結晶レーザの高輝度化およびスマート化の研究開発」(2018 年度~2022 年度)のもとで、性能の飛躍的向上に成功した。まず 2 重格子そのものの深化と発熱による特性劣化を抑制する輻射領域の設計の深化、さらには、裏面に分布型反射鏡(Distributed Bragg Reflector:DBR)を導入した新構造により、パルス動作で出力 20W 超・高輝度(1.5GW/cm²/sr)を実現した。これにより、光源部のレンズフリー動作が可能となり、クラス最小サイズとなる LiDAR が初めて実験的に確認された。

更なる高出力化のために、3mm 径の大面积に対して高性能化を実現するための新設計論を確立し¹¹、CW 動作で 50W 級・単一モード・高輝度(1GW/cm²/sr)の大幅な性能改善を実証した¹²。図 2.1(a)は試作した 3mm 径の PCSEL チップの写真である。この性能は大型レーザに匹敵するもので、単一素子でステンレスの切断加工も実証され、Nature 論文誌(2023 年 6 月)や朝日新聞(2023 年 9 月)を含む国内外の多数の報道機関に取り上げられた。図 2.1(b)は、3mm 径 50W 級 PCSEL による加工に先立ち、1mm 径の 10W 級 PCSEL を用いて、ステンレス表面のレーザマーキングを行った結果を示し、図 2.1(c)は、まさに、50W 級 PCSEL によるステンレス板の円形切削加工後の写真である¹³。

¹⁰ プレスリリース(京都大学 2023 年 6 月) <https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/20230615>

¹¹ 第 3 章 3.1.1(2)を参照。

¹² 第 3 章 3.1.1(3)を参照。

¹³ 野田(京都大学)提供。類似の写真は、S. Noda et al, Advances in Optics and Photonics, 15, 977-1032 (2023)を参照のこと。

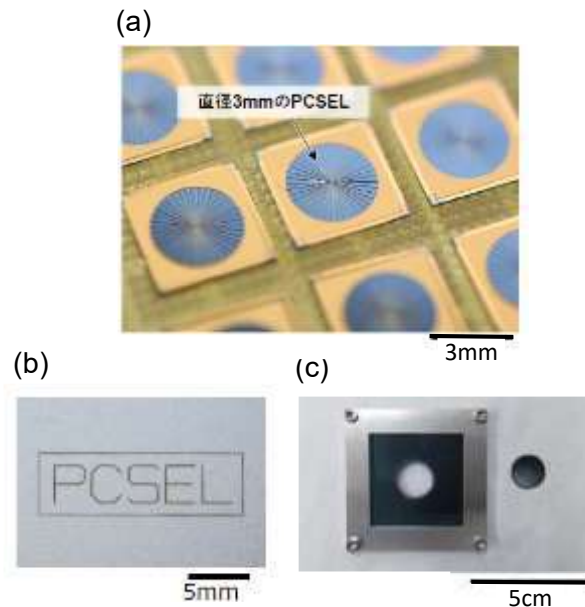


図 2.1 (a)大面積・高出力・高輝度 2 重格子 PCSEL (b)ステンレス表面のレーザーマーキング (c)ステンレス板の円形切削加工

(2) 三菱電機との連携による PCSEL 合波モジュールの実用化の展開¹⁴

研究期間中および研究終了後の SIP プロジェクトを通じて、三菱電機は連携企業として小型・高出力の PCSEL 合波モジュールの開発を担当した。同社は、研究期間中すでに並列空合波方式の高出力 PCSEL モジュールの基盤技術を確立し、10 個の PCSEL により 100W 級の出力が可能な PCSEL モジュール実現の道を拓いた。

研究終了後、さらに直列合波方式の開発を進め、5 個の素子を 2 段に配列した 10 個の PCSEL を、波長および偏光の違いを利用して同一光路上に合波する、直列合波式の小型の高輝度 PCSEL モジュールを設計し、その原理実証を行った。こうして複数の PCSEL を高出力・高輝度の単一ビームに統合できることを実証した。設計した直列合波式 PCSEL の外観写真を図 2.2 に示す。本モジュールは、1kW 級の高出力動作が可能となると期待される PCSEL の合波システムで、従来のファイバーレーザー装置(～50cm×50cm×10cm)に対し、手のひらサイズの超小型化が期待されるため実用化の価値は高い。

レーザー加工用合波モジュールの量産技術の課題としては、PCSEL 素子の更なる高出力化(～100W 級/素子)、高電力密度デバイスとしての高効率・均一冷却技術の確立、低電圧・大電流供給構造・電源技術の確立、等が挙げられる。なお、PCSEL における重要な製造工程として、超微細周期空孔の均一生成と封孔を含むフォトリソグラフィ結晶構造の生成プロセスがあるが、後述する(3)項で述べるナノインプリント法での高精度・高速な形成が可能となりつ

¹⁴ Mitsubishi Electric Company, “ADVERTISEMENT FEATURE : Laser tech that could cut into manufacturing emissions”, Nature, Vol 608 No 7922, August 11, 2022.

つある。現在、プロセス速度・歩留まりの向上、ヒートシンクへの均一・低応力接合に向けた改善などが、産学連携で現在取り組まれている。



図 2.2 直列合波方式の手のひらサイズ PCSEL 搭載モジュール

(3) ロームとの連携による LiDAR 用高品質 PCSEL の実用化の展開

研究期間中～終了後を通じて共同研究に携わったロームは PCSEL のプロセス技術の開発支援を担当した。高度な設計理論に基づく高出力・高品質な PCSEL の構造実現には 100nm 以下のナノ構造の高度な微細加工技術を要する。最も重要なプロセスは、フォトリソグラフィの微細空孔パターンの描画・ナノ加工・埋め込み成長を高歩留まりで実現することにある。もともと、フォトリソグラフィのパターン形成には、電子ビーム露光法を用いていたが、ロームと京都大学は連携して、実用化に向けて量産性に富むナノインプリントリソグラフィ（NIL）技術を導入した。当技術は、他社との共同開発を経て独自のプロセス技術として開発され、フォトリソグラフィパターンの解像度ならびにデバイス特性において電子ビーム露光と同等の性能が実現した。

ロームは PCSEL の応用面で、パルス動作（ナノ秒）・高出力・高品質な 2 重格子型 PCSEL を搭載した LiDAR によるセンシング応用の社会実装を北陽電機株式会社とともに支援した。当初レーザ加工应用を目指して開発された 2 重格子 PCSEL は、出力・放射モードともに従来にない高性能を実現した。その結果、レーザ加工のみならず幅広い分野へ応用を拡大するため、その一つとして LiDAR センシングへ適用が開始された。ロームと京都大学は、連携してパルス動作（ナノ秒）の PCSEL の開発を行い、さらに北陽電機とも連携して、これを回転ミラー付き小型装置に搭載し、複雑なレンズ系を要さない名刺サイズの小型・高分解能 LiDAR を実現した。その応用として、図 2.3 に示すように工場内の自動搬送ロボットに搭載して自動走行により物資を運搬するデモンストレーションに成功し、LiDAR システムの大幅な簡素化・高性能化を実証した。

ロームはこのような搬送ロボットへの搭載をメインのターゲットとして PCSEL 開発を進めており、京都大学と連携して、ユーザーへのサンプル提供などにより具体的な市場形成を目指す段階にある。

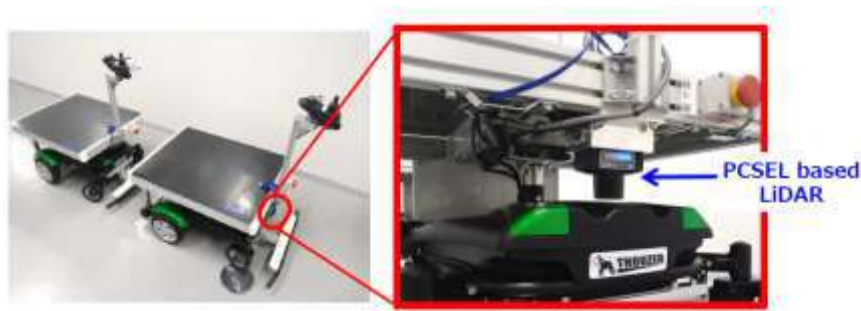


図 2.3 PCSEL 搭載 LiDAR 装備の自動搬送運転ロボットによる物資運搬のデモンストレーション

2.3 論文

研究終了後の野田の発表論文は 98 報(研究期間中は 27 報)であった。この内、Top10%以内の論文数は 14 報(研究期間中は 7 報)であった。代表的な 2 重格子 PCSEL の論文の被引用数は 180 に達した。本論文の著者、タイトル、論文誌、巻、頁、発行年を以下に記す。

M. Yoshida, M. D. Zoysa, K. Ishizaka, Y. Tanaka, M. Kawasaki, R. Hatsuda, B. Song, J. Gellera, and S. Noda, “Double-lattice photonic-crystal resonators enabling high-brightness semiconductor lasers with symmetric narrow-divergence beams”, Nature Materials Vol. 18, 121-128 (2019).

2.4 産業財産権等の権利化状況

2.4.1 研究終了後に出願された特許

研究終了後、野田らが出願した 29 件の特許の内、研究開発課題に関連した出願特許は 18 件であった。これらの特許を、以下の内容：①設計、②プロセス技術、③モジュール構造、④各種応用に分類し、出願番号・名称・出願日・PCT 出願の有無とともに下記に列記する。

① 設計関連：

- ・特願 2019-30277 「2 次元フォトリック結晶面発光レーザ」 2019/2/22 PCT 出願済
- ・特願 2020-120961 「フォトリック結晶面発光レーザ素子」 2020/7/14 PCT 出願済
- ・特願 2021-542686 「2 次元フォトリック結晶面発光レーザ」 2020/8/04 PCT 出願済
- ・特願 2022-511852 「2 次元フォトリック結晶レーザ」 2021/3/17 PCT 出願済
- ・特願 2022-512568 「2 次元フォトリック結晶レーザ」 2021/3/30 PCT 出願済
- ・特願 2021-164063 「面発光レーザ素子」 2021/10/05 PCT 出願済
- ・PCT/JP2022/007739 「2 次元フォトリック結晶面発光レーザ」 2022/2/24 国際公開
- ・PCT/JP2022/007740 「2 次元フォトリック結晶レーザ」 2022/2/24 国際公開

②設計およびプロセス技術関連：

- ・特願 2018-164927 「面発光レーザ素子及び面発光レーザ素子の製造方法」 2018/9/03 PCT 出願済
- ・特願 2019-226780 「面発光レーザ素子及び面発光レーザ素子の製造方法」 2019/12/16
- ・特願 2019-226781 「面発光レーザ素子及び面発光レーザ素子の製造方法」 2019/12/16
- ・特願 2022-508138 「面発光レーザ素子及び面発光レーザ素子の製造方法」 2021/2/10 PCT 出願済
- ・PCT/JP2021/040130 「フォトニック結晶面発光レーザおよびその製造方法」 2021/10/29 国際公開
- ・PCT/JP2022/009415 「フォトニック結晶面発光レーザおよびその製造方法」 2022/3/4 国際公開
- ・特願 2022-86644 「面発光レーザ及び面発光レーザの製造方法」 2022/5/27

③モジュール構造関連：

- ・特願 2020-515781 「合波光学系」 2019/9/13 特許第 6808892 号
- ・特願 2020-204010 「合波光学系」 2020/12/9 登録(権利有)

④各種応用関連：

- ・特願 2020-59842 「3次元センシングシステム」 2020/3/30 PCT 出願済

2.4.2 研究終了後に登録された特許

本研究開発課題に関連した研究期間中の出願特許 10 件のうち、以下の 5 件が研究終了後に登録された。

- | (特許番号) | (成立年月日) |
|----------------|--------------|
| ・特許第 6440138 号 | 2018. 11. 30 |
| ・特許第 6651144 号 | 2020. 01. 24 |
| ・特許第 6789541 号 | 2020. 11. 06 |
| ・特許第 6860175 号 | 2021. 03. 30 |
| ・特許第 6865439 号 | 2021. 04. 08 |

また研究終了後に出願された本研究開発課題に関連した特許 18 件のうち、以下の 5 件が登録された。

- | (特許番号) | (成立年月日) |
|----------------|--------------|
| ・特許第 6808892 号 | 2020. 12. 11 |
| ・特許第 7086501 号 | 2022. 06. 10 |
| ・特許第 7279875 号 | 2023. 05. 15 |

- ・特許第 7306675 号 2023. 07. 03
- ・特許第 7384349 号 2023. 11. 13

2.5 受賞

2.5.1 研究期間中の受賞

研究期間中の野田らの受賞は 12 件であった。受賞者・賞名・授賞機関(国)・受賞年月を下記に列記する。

- ・西本昌哉、野田進 ほか「第 35 回応用物理学会講演奨励賞」応用物理学会(日本)(2014 年 3 月)
- ・井上卓也、野田進 ほか「第 36 回応用物理学会講演奨励賞」応用物理学会(日本)(2014 年 9 月)
- ・野田進「紫綬褒章」日本国(2014 年 11 月)
- ・野田進「第 15 回応用物理学会業績賞」応用物理学会(日本)(2015 年 3 月)
- ・鴻池遼太郎、野田進 ほか「第 37 回応用物理学会講演奨励賞」応用物理学会(日本)(2015 年 3 月)
- ・井上卓也、野田進 ほか「2014 年度 LQE 奨励賞」電子情報通信学会 エレクトロニクスソサイエティ レーザ量子エレクトロニクス研究会(日本)(2015 年 12 月)
- ・鴻池遼太郎、野田進 ほか「SPIE Green Photonics Awards」SPIE(米国)(2016 年 2 月)
- ・野田進 ほか「2016 年秋季学術講演会 PosterAward」応用物理学会(日本)(2016 年 9 月)
- ・井上卓也、野田進 ほか「第 1 回フォトニクス奨励賞」応用物理学会フォトニクス分科会(日本)(2017 年 3 月)
- ・野田進「レーザー学会フェロー賞」レーザー学会(日本)(2017 年 5 月)
- ・吉田昌宏、野田進 ほか「Best Student Paper Award of CLEO-PR」CLEO-PR2017(2017 年 8 月)
- ・仲代匡宏、野田進 ほか「第 43 回応用物理学会講演奨励賞」応用物理学会(日本)(2018 年 3 月)

2.5.2 研究終了後の受賞

研究終了後の野田らの受賞は 22 件であった。受賞者・賞名・授賞機関(国)・受賞年月を下記に列記する。

- ・野田進 泰山賞レーザー進歩賞」ILT2018(日本)(2018 年 7 月)
- ・坂田諒一 ほか「第 3 回フォトニクス研究会 優秀ポスター賞」フォトニクス研究会(日本)(2018 年 12 月)

- ・吉田昌宏 ほか「2018 年度 LQE 奨励賞」電子情報通信学会 エレクトロニクスソサイエティ レーザ量子エレクトロニクス研究会(日本)(2019 年 2 月)
- ・深谷昌弘 ほか「2019 年 第 66 回 応用物理学会春季学術講演会 Poster Award」応用物理学会(日本)(2019 年 3 月)
- ・末光真大 ほか「第 45 回応用物理学会講演奨励賞」応用物理学会(日本)(2019 年 3 月)
- ・森田遼平 ほか「2019 IPC STUDENT PAPER & POSTER AWARD - Finalist」IPC(2019 年 10 月)
- ・野田進 「2019 MOC Award」24th Microoptics Conference(2019 MOC)(日本)(2019 年 11 月)
- ・吉田昌宏 ほか「IEEE Photonics Society Kansai Chapter Best Student Presentation Award」IEEE Photonics Society Kansai Chapter(日本)(2019 年 11 月)
- ・鴻池遼太郎 ほか「APL Photonics Future Luminary Award 2019」APL(米国)(2020 年 2 月)
- ・吉田昌宏 ほか「第 47 回応用物理学会講演奨励賞」応用物理学会(日本)(2020 年 3 月)
- ・吉田昌宏 ほか「第 4 回フォトニクス奨励賞」応用物理学会フォトニクス分科会(日本)(2020 年 3 月)
- ・西村健太郎、野田進 ほか「第 21 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SICE SI 2020)」計測自動制御学会(日本)(2020 年 12 月)
- ・坂田諒一 ほか「第 5 回フォトニクス奨励賞」応用物理学会フォトニクス分科会(日本)(2021 年 3 月)
- ・勝野峻平 ほか「Gold Medal of ISLC2021」ISLC2021(日本)(2021 年 10 月)
- ・勝野峻平 ほか「IEEE Photonics Society Kansai Chapter Best Student Presentation Award」IEEE Photonics Society Kansai Chapter(日本)(2021 年 11 月)
- ・野田進「日本学士院賞」日本学士院(日本)(2022 年 3 月)
- ・坂田諒一 ほか「第 52 回(2022 年春季)応用物理学会講演奨励賞」応用物理学会(日本)(2022 年 6 月)
- ・野田進 ほか「レーザ加工学会 2021 年度ベストオーサー賞」レーザ加工学会(日本)(2022 年 7 月)
- ・野田進 ほか「Best Paper Award, ISLC 2022」28th International Semiconductor Laser Conference(2022 年 10 月)
- ・小笠原誠 ほか「第 43 回 2023 年 レーザー学会 論文発表奨励賞」レーザー学会(日本)(2023 年 4 月)
- ・森田遼平 ほか「第 54 回(2023 年春季)応用物理学会講演奨励賞」応用物理学会(日本)(2023 年 6 月)
- ・野田進「IEICE Distinguished Lecturer」電子情報通信学会(日本)(2023 年 9 月～2025 年 8 月)

2.6 ACCEL プロジェクトの PM 活動による終了後の社会実装への波及効果：

本研究開発課題の PM の八木は、高出力・高品質 PCSEL 研究とレーザ加工への応用研究への取り組みに対し、京都大学内研究者への高度な教育と産学連携での知識共有を目的として、研究期間中に以下の活動を行った。

- (A)PCSEL 応用検討ワークショップの企画と実施を行った。本企画では PCSEL の多岐にわたる応用の可能性として、レーザ加工应用のみならず、身近なロボット搭載から将来の車載に至る LiDAR センシング应用のほか、計測・医療应用、ディスプレイ应用などを検討した。
- (B)PCSEL の市場予測調査の企画・実施を行った。市場調査の一環として、調査会社を通じて多くの企業・大学研究室(ニコン株式会社、飛鳥メディカル株式会社、オムロン株式会社、株式会社島津製作所、トヨタ自動車株式会社、三菱電機株式会社、大阪大学など)への訪問が実施された。その結果、レーザ加工のみならず、LiDAR などのセンシング应用到途が多いことが指摘された。

これらの PM 活動による入手情報は、PCSEL の LiDAR センシング应用を目指す、野田の新たな CREST「変調フォトリック結晶レーザーによる 2 次元ビーム走査技術の開発」(2017 年度～2022 年度)の獲得にも貢献した。

八木は研究終了後に開始した SIP プロジェクト(2018 年度～2022 年度)でアドバイザーを務めた。同プロジェクト期間中、連携企業のロームは PCSEL の LiDAR 应用を、三菱電機は PCSEL 合波モジュールの高出力化によるレーザ加工への应用を目指して社会実装への展開を進めたが、八木はこの間の大学・企業間連携を実務面で支援した。

これらの PM のサポートにより、野田が研究開発に集中出来るようになり、早期に PCSEL 素子の深化技術(さらに高度な加工技術)、実装技術(ボンディングなどを含む)の確立が可能になったとも言える。その結果、デバイス試作の全工程が学内で可能となり、「研究室発の新設計理論～実験・評価～再設計へのフィードバック」ループ即ち大学内での「基礎～応用に至る研究開発の加速化」体制を確立した。そのことにより、大学での研究開発段階ですでに実用レベルの高い成果を多数創出することができた。

PCSEL の社会実装への動きが幅広く展開された理由に関しては、PM と野田の絶妙な連携、さらには、この連携により、ACCEL の成果を、社会実装を加速する SIP 第 2 期等に繋ぐことが出来たことが大きいと言える。これらのことが、応用開発を含めて短期間で高い実用レベルの成果を挙げたことに繋がったと言える。

2.7 その他

研究終了後に野田が獲得した主な研究助成金プロジェクト事業は、NEDO(2016 年度～2020 年度)、JST 戦略的創造研究推進事業 CREST(2017 年度～2022 年度)、SIP 第 2 期(内閣府)(2018 年度～2022 年度)、日本学術振興会の科研費特別推進研究(2022 年度～2026 年度)、SIP 第 3 期(内閣府)(2023 年度～2027 年度)、などである。

第 3 章 研究開発課題成果の波及と展望

本章では、科学技術や社会経済への波及の視点で見た研究成果の発展について述べる。

3.1 では PCSEL の新規な理論や概念の提唱および新たな研究領域や潮流形成の意義を述べ、併せて国際共同研究への発展状況を述べる。また 3.2 では、社会経済への波及と展望を述べる。

3.1 科学技術への波及と展望

3.1.1 新規な理論や概念の提唱

(1) 高次モードを抑制した 2 重格子 PCSEL の実現¹⁵

従来の LD は図 3.1 (a) に示すように、高出力化のために面積を拡大(ブロードエリア化)するとビーム品質が著しく劣化し、スペクトル也多モード化する。また、発振波長の温度依存性も大きい。これらの要因のために、従来の LD は加工用途に直接用いることが困難で、また、LiDAR センサー応用においても、乱れたビーム形状を整形するために複雑な光学系を必要とするとともに、太陽光などの背景光カットのために狭帯域フィルタを用いることが出来ず、高 S/N 比を得にくいという課題があった。

一方、PCSEL は、同図 (b) に示すように、ACCEL プロジェクトとその後のプロジェクトで深化/発展してきたように、基本的に極めて狭いビーム拡がりや単一スペクトルを得ることが可能である。

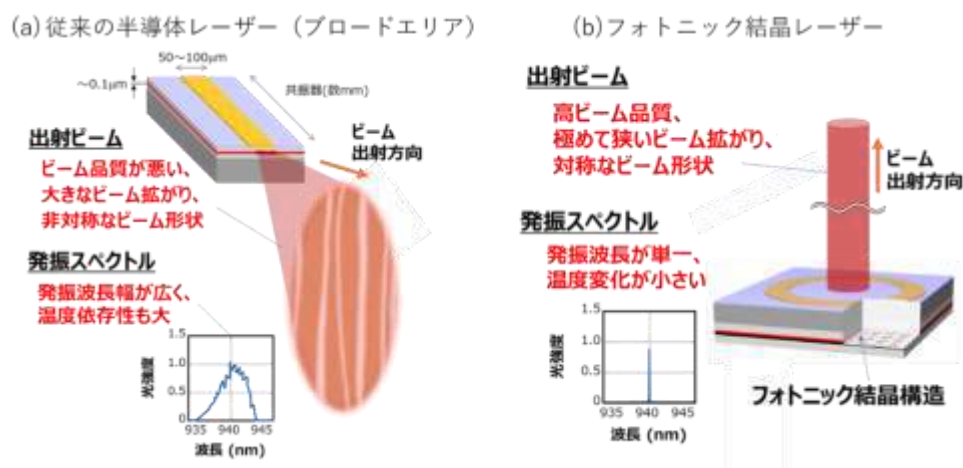


図 3.1 (a) 従来の LD の構造と課題 (b) PCSEL の構造と特長

¹⁵ M. Yoshida, M. D. Zoysa, K. Ishizaki, Y. Tanaka, M. Kawasaki, R. Hatsuda, B. Song, J. Gellela, and S. Noda, "Double-lattice photonic-crystal resonators enabling high-brightness semiconductor lasers with symmetric narrow-divergence beams", Nature Materials Vol. 18, Feb., 121-128 (2019).

ACCEL プロジェクトの初期において、野田らは、ビーム出射径を $200\mu\text{m}$ まで増大しても、基本モード動作が可能であり、ワットクラスの高出力・高ビーム品質動作が可能であることを実証し、通常の LD に比べて圧倒的に有利であることを示した。その後、ビーム出射径をさらに拡大すると基本モード以外に、高次モードが出現する(図 3.2(b)参照)という課題に直面したが、その課題に対応するため、野田らは図 3.2(a)に示す 2 重格子 PCSEL の新概念を提唱した¹⁶。本構造は、2 つのフォトニック結晶の空孔を x および y 方向に 4 分の 1 波長だけずらし、且つ大きさを調整して重ねた独自の共振器構造である。本構造では、フォトニック結晶面内の 180° 方向の回折や、 180° 方向と 90° 方向を合わせた光回折が打ち消し合うため、面内の光回折効果が弱まり、光が大面積に拡がり、基本モードを閉じ込めつつ高次モードをカットオフすることが可能となる。

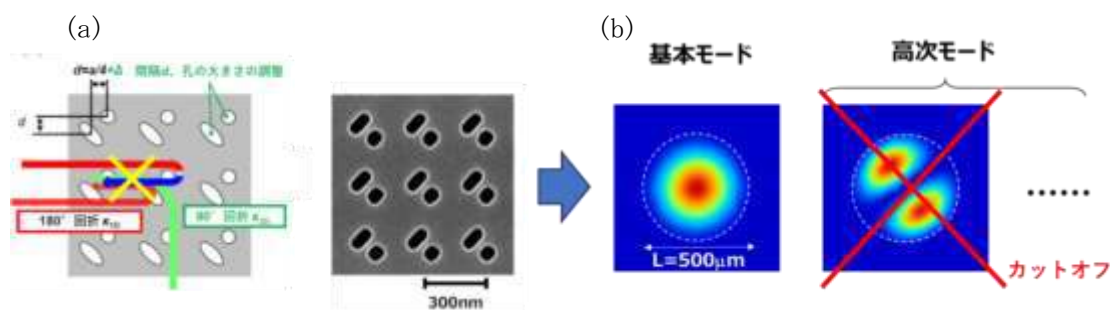


図 3.2 (a)2 重格子 PCSEL の説明図 (左図) 180° 、 90° 方向の光回折の打ち消しにより、高次モードの発生を防ぎ、基本モード動作を得るための原理図 (右図) 試作された 2 重格子パターンの一例 (b) 高次モードのカットオフ

本素子では、代表的な特性として直径が $500\mu\text{m}$ 以上(従来の 10,000 倍以上)の大面積で、LD では類例のない単一モード・狭出射角($<0.2^\circ$ @ $1/e^2$)・10W 以上のパルス動作出力・高ビーム品質($M^2 \leq 2$)を達成した。図 3.3 に、作製した 2 重格子 PCSEL の室温、パルス動作における電流-ピークパワー特性例を示す¹⁷。同図(a)および(b)は、2019 年時点での 2 重格子 PCSEL の表面 Scanning Electron Microscope (SEM) 像および光出力特性であり、15A の入力電流に対し、10W のピークパワーが得られている。レーザ出射面の直径は $500\mu\text{m}$ で 2 重格子の大小の空孔サイズを中心に变化させている。これに対し同図(c)および(d)は、2020 年時点での同様の SEM 像と光出力特性であり、ピークパワーは最大 70W に増大している。この時は、素子の出射面を 1mm 径に拡大し、2 重格子のサイズおよび間隔の双方を変化させている。得られた遠視野の拡がり角はいずれも 0.2° (@ $1/e^2$) 以下で極めて小さい。これにより PCSEL は、まずパルス動作状態で、大型のガスレーザやディスク/ファイバーレーザに迫る輝度($\geq$

¹⁶ プレスリリース(2022 年 7 月) <https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/20220706>

¹⁷ 京都大学プレスリリース PDF、2020 年 7 月 8 日発表。

1GW/cm²/sr)に達した。本 2 重格子構造は世界初の概念提唱であり、掲載論文誌 Nature Materials(2019)の表紙に使用された。

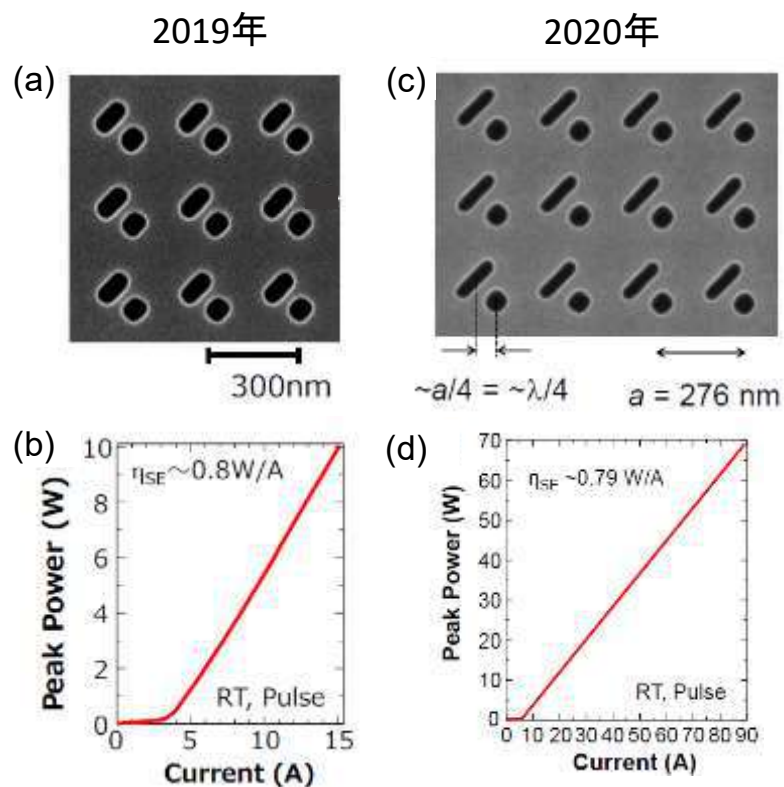


図 3.3 (a)および(b)2019 年時点の 2 重格子 PCSEL の表面 SEM 写真と室温パルス動作時の電流-光出力特性 (c)および(d)2020 年時点の同様の表面写真と光出力特性

(2) 3~10mm 径での高出力単一モード動作の実現を目指す PCSEL の新設計理論を提唱¹⁸

2 重格子 PCSEL は、高出力・単一モード発振を 500 μm ~1mm 径の素子で実現したが、更なる高出力を目指す大面積(3~10mm 径)素子では、高出力を支える単一基本モード動作の設計指針が、当初存在しなかった。

¹⁸ T. Inoue, M. Yoshida, J. Gellela, K. Izumi, K. Yoshida, K. Ishizaki, M. D. Zoysa, and S. Noda, “General recipe to realize photonic-crystal surface-emitting lasers with 100-W-to-1-kW singlemode operation”, Nature Communications (2022) 13:3262.

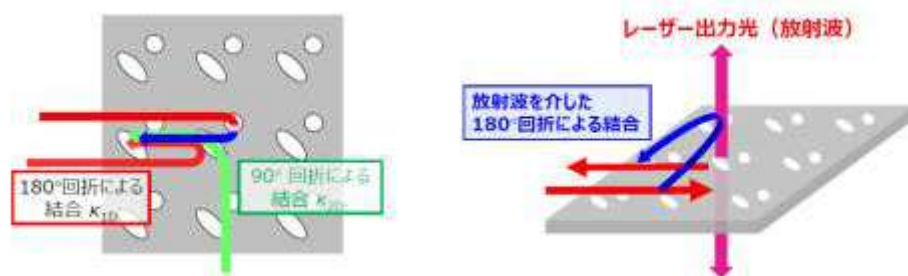


図3.4 PCSELの光波の相互結合図 (左図)180°/90°回折モードの結合 (右図)垂直放射光と面内回折モードの結合

この課題に対して、野田らは 3～10mm 径の大面积 PCSEL に対しても安定な単一モード動作を可能にする画期的な新設計理論を提唱した。その基本原理は、図 3.4 に示すように 2 次元面内の 180°/90°回折伝搬モードの結合(左図)のみならず、垂直放射光と面内回折モードの結合(右図)を融合して制御する事にある¹⁹。左図の結合は上下方向への放射損失を伴わない「エルミート結合($\kappa_{1D} + \kappa_{2D}$)」と呼ばれる。ここで、 κ_{1D} 、 κ_{2D} は各々180°、90°回折による結合係数である。空孔の距離 d と大きさ x を変えることで、素子面積に応じて面内回折光を制御できる。一方、右図の結合は、面内の各伝搬波が、放射波と結合してエネルギーの一部を失い、その後再び 180°方向の伝搬波へと結合する「非エルミート結合($i\mu e^{\pm i\theta_{pc}}$)」と呼ばれる。ここに μ は結合の大きさ、 θ_{pc} は放射波を介して 180°方向に結合する際の位相変化である。図 3.5 に示す様に、 μ はフォトニック結晶と裏面反射鏡の距離 t_{pclad} に依存し、垂直放射光(非エルミート結合)を制御できる。本原理に基づき、レーザ放射面積に応じた両結合の調整で、安定した高出力単一モードが発振する。

¹⁹ プレスリリース(2022 年 7 月) <https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/20220706>

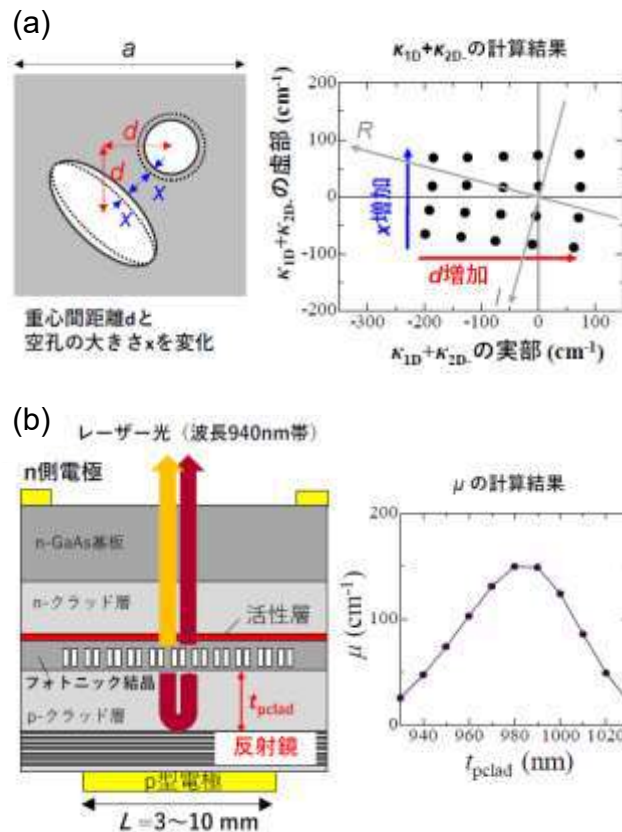


図 3.5 (a)空孔のサイズと位置の調整による面内回折の制御 (b)フォトニック結晶層と裏面反射層の間隔の調整による非エルミート結合係数の大きさ μ の調整

本設計理論をもとに、電流・光出力特性および出射ビーム形状などのシミュレーションが行われた。計算結果として、直径 3mm では図 3.6(a)に示すように 100W 超の光出力と極めて

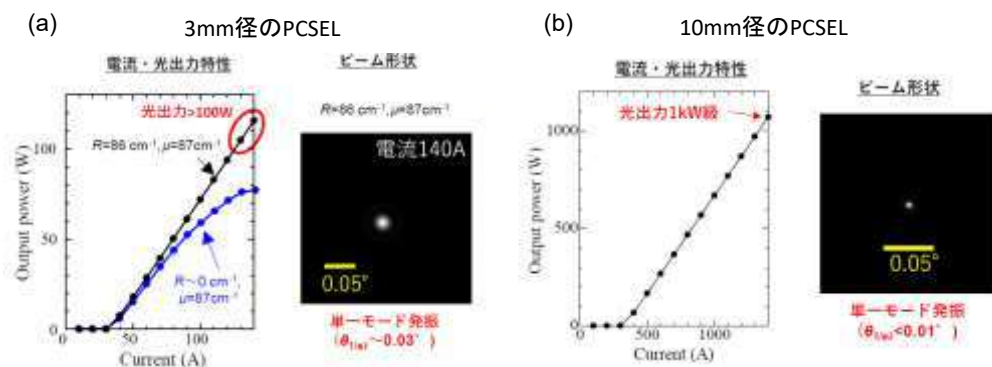


図 3.6 新設計法に基づく PCSEL の光出力特性とビーム形状(放射パターン)

(a)3mm 径の PCSEL (b)10mm 径の PCSEL

狭いビーム拡がり角 ($\theta_{1/e2} \sim 0.03^\circ$) の単峰ビームが得られた。また、直径 10mm では同図 (b) に示すように 1kW 級の光出力と狭いビーム拡がり角 ($\theta_{1/e2} < 0.01^\circ$) の単峰ビーム形状が得られることも明らかとなった。

エルミート結合/非エルミート結合の融合による PCSEL の設計手法は世界初の提案であり、これまで単に物理現象の探索に留まっていた非エルミート物理を、新たな光デバイス機能の実現にまで展開した点で極めて画期的と言える。この新たな展開の他の例としてエルミート結合/非エルミート結合を適度に相殺した 2 重格子フォトニック結晶の設計により「一方向性光反射・放射現象」の実現が理論的・実験的に明らかとなった。また超狭発散角に光を回折する大口径アンテナの実現も予見されている。こうした新原理の光デバイスは「非エルミートナノフォトニクス」なる新学術分野の開拓に繋がり、科学技術上の貴重な波及効果をもたらすとされている。

(3) 発熱対策による安定した大面積・超高出力 PCSEL の実現と実用化への進展²⁰

2 重格子の新構造による PCSEL により、発熱が伴わないパルス励起で単一モード動作を実現することが可能となっても、連続動作では発熱によるデバイス特性の変化という課題がある²¹。実用化に向けて、その発熱の影響への対策は必須の課題であった。

野田らは、エルミート結合/非エルミート結合融合型の新設計法に発熱効果を取り入れた新たな設計法で本課題を克服した。発熱の影響が無視できるパルス動作では、3mm 径の大面積 PCSEL でも単一基本モードの発振を実現したが、連続動作では、図 3.7 (左図) に示すように、発熱に伴う PCSEL 内の温度分布・屈折率分布により実効的な空孔周期の面内不均一分布が誘起され、光の面内回折効果が乱れて基本モード動作が阻害される²²。そこで本研究では設計の改良により、図 3.7 (右図) に示すように、温度上昇に伴う屈折率の不均一分布を打ち消すように中央部分ほど空孔周期 (格子定数 a) が減少する格子定数分布を施した 3mm 径の PCSEL が製作された。

²⁰ M. Yoshida, S. Katsuno, T. Inoue, J. Gellera, K. Izumi, M. D. Zoysa, K. Ishizaki, and S. Noda, “High-brightness scalable continuous-wave single-mode photonic-crystal laser”, *Nature* Vol 618 | 22 June 2023.

²¹ M. D. Zoysa, *et al.*, “Thermal management for CW operation of large-area double-lattice photonic-crystal lasers”, *JOSA:B* Vol 37, No 12, 3882-3887 (2020). S. Katsuno, *et al.*, “Self-consistent analysis of photonic-crystal surface-emitting lasers under continuous-wave operation”, *Optics Express* Vol 29, No 16, 25118-25132 (2021).

²² プレスリリース (2023 年 7 月) <https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/20230615>

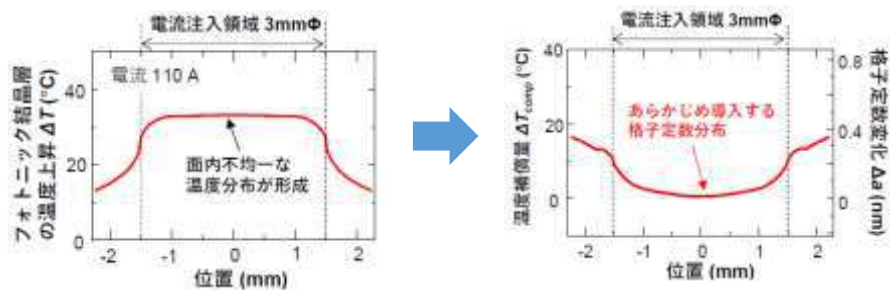


図3.7 (左図)連続動作PCSELにおける面内温度分布の断面プロファイル (右図) 左図の面内温度分布を打ち消すように導入する格子定数分布

連続動作に対応できるヒートシンクに実装された素子の写真を図 3.8(a)に示す。同図(b)は連続動作時の電流-光出力特性、発振スペクトルおよび遠視野像を示す。この結果、光出力 50W・輝度 $1\text{GW}/\text{cm}^2/\text{sr}$ ・ビーム拡がり角 $\sim 0.05^\circ$ と極めて高いビーム品質の PCSEL が実現した。これは、PCSEL 単体で、ガス/固体/ファイバーレーザ等の大型レーザに匹敵する輝度 ($1\text{GW}/\text{cm}^2/\text{sr}$)を示したものである。従来の大型レーザによる光加工が、高効率・低コストの超小型 PCSEL で可能な段階に達したことを意味し、LD の開発史上極めて大きな成果である。

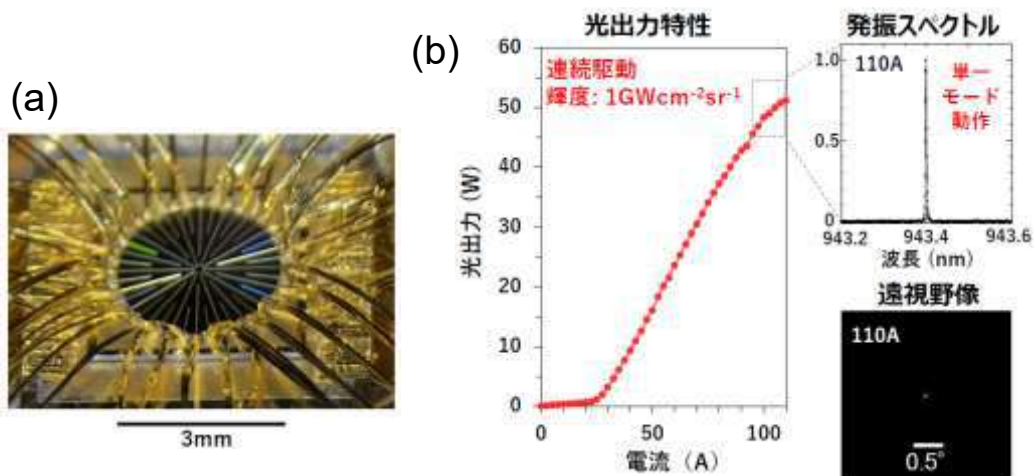


図3.8 (a) 3mm径PCSELの実装後の写真 (b)連続動作での電流-光出力特性、発振スペクトルおよび遠視野像

この成果は、著名な学術誌 Nature(2023 年 6 月)に掲載されたほか、朝日新聞(2023 年 9 月)などに大きく取り上げられ多大な注目を浴びた。今後、発熱の影響を補償する格子定数分布の導入を維持しつつ 10mm 径を超える更なる大面積に対し、完全単一モードで kW 級の

高出力と $10\sim 100\text{GW}/\text{cm}^2/\text{sr}$ 以上の輝度を持つ PCSEL の実現も可能となると期待される。これにより、PCSEL が加工応用のみならず、宇宙通信応用、核融合のための光源、EUV 露光装置の励起光源など、多くの新たな分野への社会実装が視野に入るものと期待される。以上の研究成果は科学技術の進展に大きなインパクトを与えたと言える。

3.1.2 新たな研究領域や研究の潮流の形成

(1) 従来の半導体レーザを凌駕する高品質・高出力の半導体レーザによる超小型 LiDAR システムを実現²³

PCSEL は、1999 年のフォトニック結晶レーザの提案と実証に始まり、本研究開発課題開始時の 2014 年に W 級の動作を実現し、研究終了時に 10W 級高品質化を達成した。

その後も、PCSEL 素子単体の高出力・高品質化と並行して応用の検討を進め、従来の LD を搭載した LiDAR に比べて複雑なレンズ系が不要で小型・高分解能の LiDAR を実現し、自動搬送ロボットへの適用に成功した²⁴。光測距システムとしての LiDAR は、ロボット・農機・建機・自動車の自動走行などスマートモビリティ²⁵を支える必須の光センシング技術である。

従来の LiDAR では、図 3.9(a)に示すように心臓部にあたる光源に小型・安価なブロードエリアタイプの LD²⁶が用いられているが、ビーム品質の劣化と非点収差のためビーム整形用外部レンズ系とその精密調整が必要であり、サイズ・コスト・性能に課題を抱える。野田らは、ロームおよび北陽電機と共同で、2 重格子 PCSEL による光測距システム LiDAR の開発に世界で初めて成功した。全貌を図 3.9(b)に示す。用いた 2 重格子 PCSEL は、高効率化のために、フォトニック結晶領域の下面に DBR 構造を導入している。これにより、素子径 $500\mu\text{m}$ ・パルス動作で、ピーク光出力 20W 以上(2019 年時点の 2 倍以上)・ビーム拡がり角 $\sim 0.1^\circ$ (半値幅)の優れた特性を実現した。本 PCSEL は、レンズフリーでビーム走査用回転ミラーのみ付属の 2 次元センシング用小型 LiDAR システムに搭載された。図 3.9(b)下部の走査ビームのスポット像が示すように、本装置では高い分解能の測距が可能となる。図 3.9(c)は、本 LiDAR を用いたリアルタイムの測距デモンストレーション結果を示す。カメラ画像(左図)と距離マップ(右図)の時間変化から、人物 A、B の移動や手の動きが細かく識別できる。本結果から、LiDAR システムへの応用に対する PCSEL の有効性が世界で初めて示された。

²³ M. Yoshida, M. De Zoysa, K. Ishizaki, W. Kunishi, T. Inoue, K. Izumi, R. Hatsuda, and S. Noda, “Photonic-crystal lasers with high-quality narrow-divergence symmetric beams and their application to LiDAR”, J. Phys. Photonics Vol. 3 (2021) 022006.

²⁴ 京都大学プレスリリース PDF、2020 年 7 月 8 日発表。

²⁵ より安全・効率的で交通渋滞・大気汚染などの課題解決に資する、交通・移動を変える新たなテクノロジーの総称。

²⁶ 光通信などに用いられる狭い導波路幅で単一横モード動作の LD に比べ、導波路幅を数 $100\mu\text{m}$ に拡大し、端面の光密度を下げた高出力を実現。固体レーザの励起光源などに用いられる。

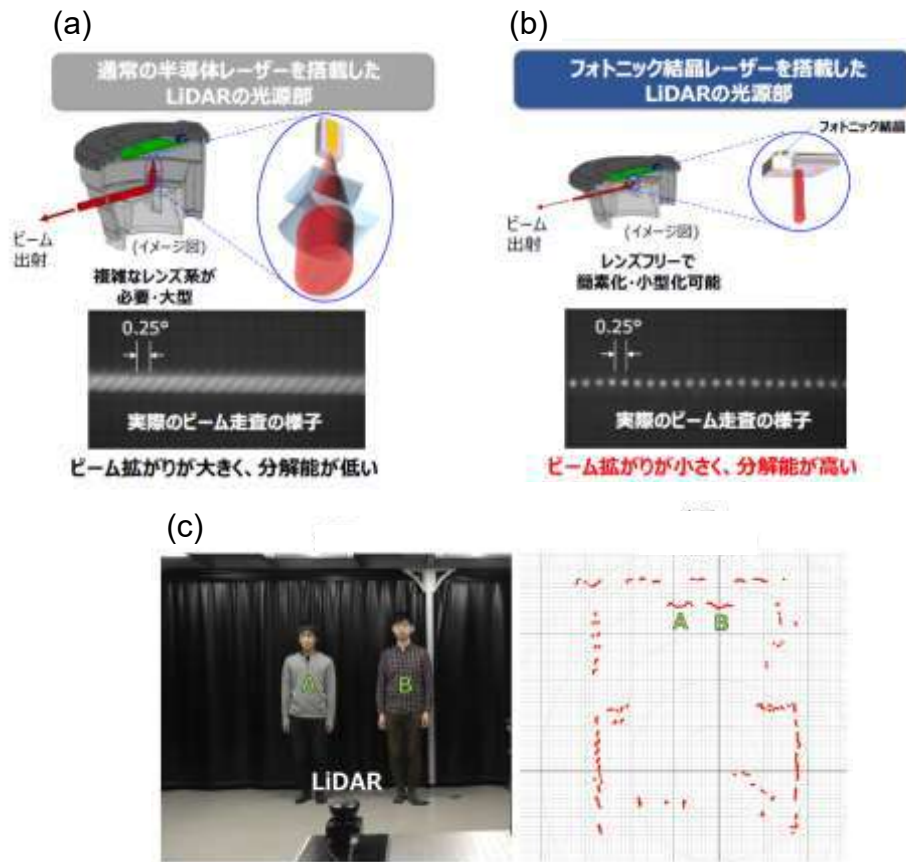


図 3.9 (a)従来のLD 搭載 LiDAR の光源部 (b)PCSEL 搭載の小型・簡素化 LiDAR の光源部 (c) (左図)PCSEL-LiDAR による測距実験のカメラ画像 (右図)人物の移動や手の動きが細かく識別可能な距離マップ

(2) 放射ビームの自在走査が可能な複合変調格子 PCSEL の実現とその応用²⁷

野田らは、前述の2重格子構造の新概念とは別に、高出力・高ビーム品質を維持しつつ、電気信号の操作により任意の方向にビーム出射が可能な複合変調格子 PCSEL の新概念を提唱した。

図 3.10 において、左図は変調前の規則的なフォトニック結晶配列、右図は新概念の複合変調格子 PCSEL において位置およびサイズを変調した格子点配列を示す²⁸。

²⁷ R. Sakata, K. Ishizaki, M. D. Zoysa, S. Fukuhara, T. Inoue, Y. Tanaka, K. Iwata, R. Hatsuda, M. Yoshida, J. Gellet, and S. Noda, “Dually modulated photonic crystals enabling high-power high-beam-quality twodimensional beam scanning lasers”, Nature Communications, (2020) 11:3487.

²⁸ JST news(2020/Nov.) <https://www.jst.go.jp/pr/jst-news/backnumber/2020/202011/index.html>

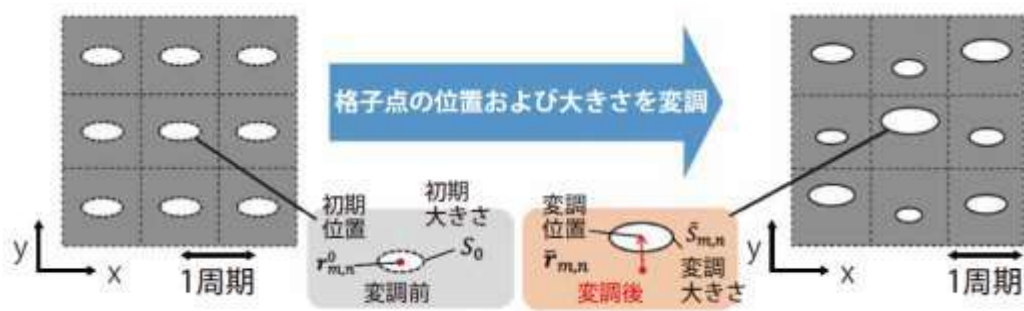


図3.10 複合変調PCSELの模式図 左は変調前の規則的な空孔配列 右は空孔の位置および大きさを変調した配列

新素子の光ビームの出射原理を、図 3.11 を用いて説明する²⁹。まずこれまでの 2 重格子 PCSEL ではレーザ光は基板に垂直に出射する(波数空間で Γ 点共振発振と呼ばれる)。こうした共振状態はフォトニック結晶層(ここでは GaAs 層)の厚み、屈折率、共鳴波長などで決まる。これに対し本提案の複合変調格子 PCSEL では、 Γ 点とは異なる M 点共振状態を考える。この時、同図(a)に示す変調前の規則的な格子配列では、4 個の基本モード(A, B, C, D)はいずれもレーザ光を自由空間に出射しない。その理由は、2 つの基本モード A および C で例示するように、レーザ駆動時に各空孔周辺の電界分布で誘起される各空孔における電界ベクトルが消失する(モード A, B の場合)、または隣接同志で打ち消し合う(モード C, D の場合)ことに起因する。

これに対し、同図(b)に示す複合変調では、同様の各空孔の電界ベクトルが強め合う(モード A, B)、または打ち消し合いが崩れる(モード C, D)ことにより、いずれのモードでも適切な光放射が起こる。即ち、自由空間への適切な光放射が可能となる。ここで、位置や大きさの変調は、狙った自由空間の方向に光が放射可能なように、同図(c)の波数空間における波数ベクトル K に従って導入する。これにより、任意の方向 $[(\theta, \phi)$ および $(\theta, \phi+180^\circ)]$ にレーザ出射が起こる。こうして格子の複合変調では、レーザ駆動時に狙った格子位置から狙った方向にレーザ発振が動作する。

²⁹ 京都大学プレスリリース(2020年7月) 詳しい研究内容について「電氣的に2次元ビーム走査可能な新たなフォトニック結晶レーザーチップの開発に成功」 <https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2020-07-22-0>.

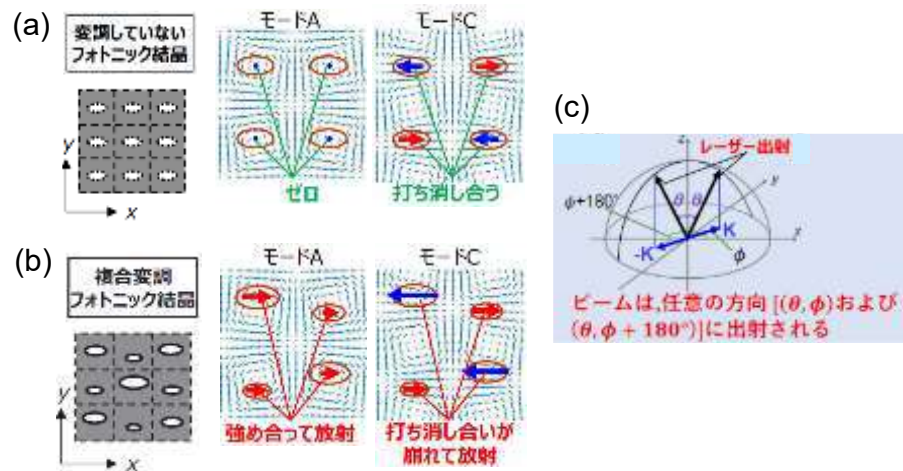


図3.11 (a)変調前の基本モードA・Cにおける各空孔の電界ベクトル (b)複合変調後の基本モードA・Cにおける各空孔の電界ベクトル (c)複合変調時に任意の方向 $[(\theta, \phi)$ および $(\theta, \phi + 180^\circ)$]に出射される光ビーム

図 3.12 は本アレイ素子の概要を示す。同図(a)は、直径 $100\mu\text{m}$ の各電流注入領域に直交する 10×10 の $n \cdot p$ ライン電極が配置された約 3mm 角チップの写真である。各領域はメサエッチ構造により隣接間で隔離されているため、 $n \cdot p$ ライン電極の交差領域のみ独立にレーザ駆動が可能である。こうして同図(b)に示すように、裏面の $n \cdot p$ 電極で電圧が印加された区画から上向きの2次元方向にレーザビームが放射される。同図(b)の右側は、2次元マトリックス状に配置された複合変調格子配列の電子顕微鏡写真である。本構造により異なる場所への電流注入で、異なる方向へレーザ光が出射することが確認された。

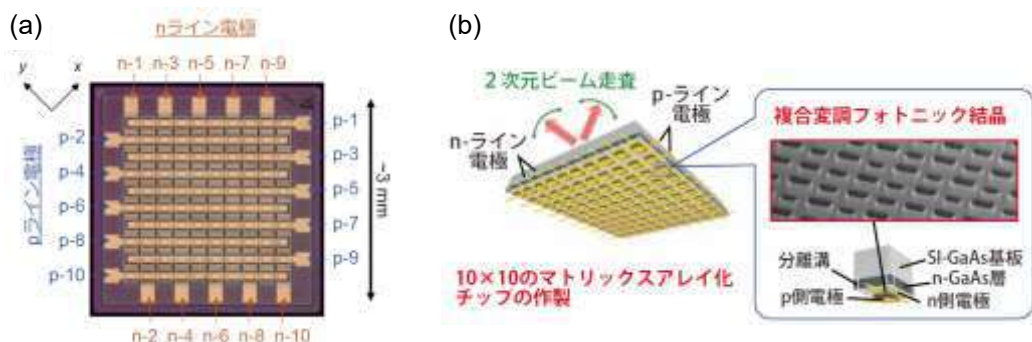


図 3.12 (a)裏面における $n \cdot p$ 直交ラインの電極配置の写真 (b)複合変調 PCSEL アレイ素子の全貌と部分拡大電子顕微鏡写真。 10×10 アレイ型複合変調 PCSEL の2次元ビーム走査の様子を示す

複合変調格子 PCSEL を用い、フラッシュ型 PCSEL (全区画の同時レーザ駆動) とビーム走査型 PCSEL (任意区画の個別レーザ駆動) の併用で 3 次元 LiDAR を実現した。本 LiDAR ではナノ秒パルスによる Time of Flight (ToF) (反射パルスの走行時間の計測で測距方式により) 小型・簡易・高精度センシングが可能である。本方式では、反射率の低い黒色物体を含む全物体に対して、最初のフラッシュ照射後に ToF カメラで赤外線画像を分析し、その後黒色物体を中心にビーム走査で追尾して高精度の 3 次元測距を行うことができる。

本システムの優れた LiDAR センシング機能は、図 3.13 に示すデモンストレーションで実証された³⁰。同図(a)には白色物体と黒色物体がおかれている。同図(b)は、最初のフラッシュ型 PCSEL 照射に対する ToF カメラの赤外線像である。この時、赤外線像の黒色物体を含む像の位置情報と新たに開発されたソフトウェアをもとに、ビーム走査型 PCSEL を駆動して赤外線像(黒色物体)を自動追跡し、同図(c)に示すように黒色物体も含めた高精度・高分解の測距が可能となる。野田らは、ロボットや車両の自律移動などの実用的な応用を目指して本システムの実証実験に取り組んでいる。さらには国際共同研究により(3.1.3 参照)、光学感度が現在の ToF カメラより一層高い Single Photon Avalanche Diode (SPAD) に置き換えることで、より長距離の測距が可能な LiDAR システムの開発を視野に入れている。

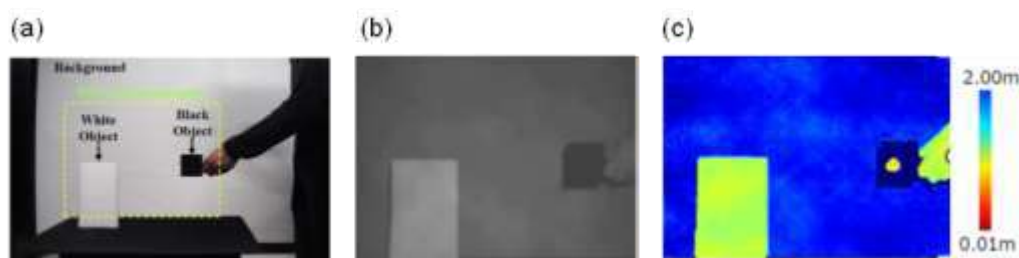


図 3.13 (a) フラッシュ・ビーム走査併用 LiDAR の実演 (b) ToF カメラによる赤外線画像 (c) 本併用方式により高精度・高分解の測距を実現

(3) 短パルス PCSEL の実現で応用拡大³¹

2 重格子 PCSEL を用いて、超短パルス・高ピーク出力を目指す新たな課題に挑戦した。図 3.14 は新素子の概要を示す³²。本素子の裏面電極構造は、同図(a)に示すように、光増幅(利得)領域(注: 黄色で示す電極領域)と吸収領域(注: 青色で示す、2 次元同心円状領域と周囲領域) 光の利得増幅と負荷吸収の 2 次元同心円状領域の配置から成る。ここで、吸収領域は過飽和吸収と呼ばれる光非線形効果を呈する領域である。本領域において、低レベルの

³⁰ 野田(京大)提供。類似の図面は Laser Focus World (2023/2/23) を参照のこと。

³¹ R. Morita, T. Inoue, M. De Zoysa, K. Ishizaki, and S. Noda, “Photonic-crystal lasers with two-dimensionally arranged gain and loss sections for high peak-power short-pulse operation”, Nature Photonics VOL 15, 311-318 (2021).

³² プレスリリース(2021 年 3 月) <https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2021-03-29-3>

キャリア蓄積では、吸収領域の存在でレーザ共振器のQ値が低いためレーザ発振は起こらないが、蓄積キャリアが増大して発光量があるレベルに達すると、吸収飽和が起きてQ値が高くなりパルス発振する。即ち当該領域は光の吸収・損失媒体であるが、利得領域へのキャリアの急激な増大とともにQスイッチング動作と呼ばれる短パルスかつ高ピーク出力のレーザパルス発振動作が起こる。

開発した素子特性の一例では、利得領域径の直径を1mm、かつ3つの同心円吸収領域(および周囲吸収領域)を設けて位置と幅を調整して安定な基本モードパルス発振を得た。図3.14(b)は本素子の出力の計算結果である。30Aの注入直流電流に対し、パルス幅40ps、ピーク出力300W級の短パルス・高ピーク出力発振特性が得られている。また、電流注入が時間幅ns程度の短パルスの場合、ピーク出力300W級短パルスが任意のタイミングで出射可能であることも確認された。なお、活性層の材料や厚さ、層数、さらにフォトニック結晶構造の最適化で、10~20ps以下の短パルス幅で、kWを超える高ピーク出力も可能となる。本成果は掲載論文誌Nature Photonics(2021)の表紙に採用された。

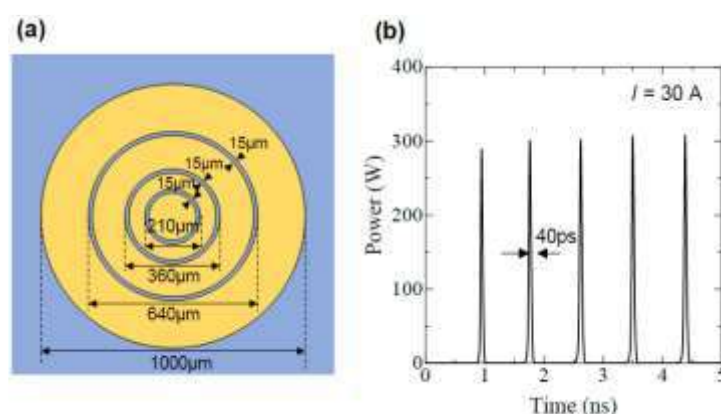


図 3.14 光利得領域(黄色)および(可飽和)吸収領域(青色領域)の2次元同心円状配置から成る2重格子型短パルスPCSEL

今日、無人化が進む工場の製造現場などで加工条件を自動的かつ精密に最適化するスマート加工や、アイセーフで高分解の長距離測距を可能にするLiDARなどの分野では、数10ps以下の極短パルス・高出力・高分解で小型・安価・可搬・高制御なレーザ光源が求められている。本短パルスPCSELはこうした分野への大きな波及効果が期待される。

(4) 高出力青色PCSELの実現³³

³³ K. Emoto, T. Koizumi, M. Hirose, M. Jutori, T. Inoue, K. Ishizaki, M. D. Zoysa, H. Togawa and S. Noda, "Wide-bandgap GaN-based watt-class photonic-crystal lasers", Communications Materials Vol. (2022)3:72.

近年、脱炭素社会に向けた自動車など輸送機器の電動化の進化に伴い、特に多用される銅のレーザ加工の需要が高まっており、銅材料への光の吸収率が高い青色レーザへの期待が高い。

野田らは上述の応用を目指して、青色レーザ材料として有望なGaNを用いた高出力・高品質の2重格子PCSELの開発を行った。Ga系PCSELは、2008年に野田らによって初めて実証されていたが、当時のフォトニック結晶配列および製造プロセスでは閾値電流密度が高く、出力が低い(mW以下)という課題があった。このため、光の面内損失を抑制するデバイス層/共振器構造・均一な空孔形成、等の結晶成長(MOVPE)条件の最適化を図った。特に、空孔のドライエッチングおよび埋め込み再成長に関してはGaAsの場合とは異なるGaN固有の条件探索に成功した。また、従来の三角格子系フォトニック結晶配列に代わる正方格子系を採用し、さらに電極位置・形状の変更による光取り出し効率の向上を図った。

その結果、青色波長でW級の高出力と極めて狭いビーム拡がり角($\sim 0.2^\circ$)を達成した。図3.15の左図はGa系PCSELの構造図、右図は2重格子フォトニック結晶の正方格子配列のSEM写真を示す³⁴。GaN特有の結晶面で囲まれた均一性の良好な空孔が確認される。

一般に青色光は水中での吸収が少ない。このことからGa系青色PCSELは水中センシング(建築業界における橋脚検査など)への応用のほか、降雨時にも有利な車載配向(ADB=配向可変ビーム)ヘッドランプなどへの応用にも注目されている。また、今日既存の大型ファイバーレーザでは青色は存在しない波長領域であるため、本青色PCSELは10W級でレーザ半田付け・マーキング・レーザアニリングへの応用、100W~1kW級で電気自動車の重要な部材で今後増大が見込まれる銅やCFRP(炭素繊維強化プラスチック)のレーザ加工、金属3Dプリンターなどへの応用も期待されている。このことから本研究成果は、学術面のみならず製造分野にもたらす波及効果が期待できる。

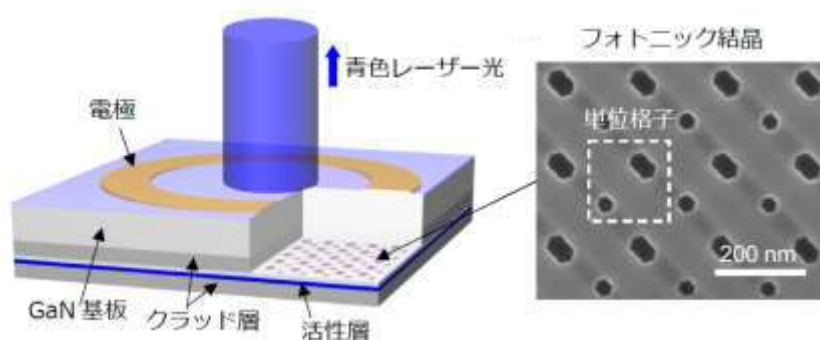


図 3.15 (左図)Ga系PCSEL の構造図 (右図)Ga系から成る 2 重格子 PCSEL の空孔配列 SEM 写真

³⁴ プレスリリース(2022 年 10 月) <https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/cecp3r>

3.1.3 新たな次世代応用の開拓

(1) 自由空間光通信光源用 PCSEL の開拓³⁵

現在、高出力自由空間光通信を行うには、ファイバーアンプなどを用いた大型送信機が必要であるが、PCSELを用いると単一の半導体素子のみで所要の光パワー出力を有するために光アンプが不要であり、かつ、極めて狭い拡がり角によりレンズ等の光学系も不要となるため、送信機システムの大幅な小型化・簡素化が期待される。

野田はKDDI株式会社と共同で、ビームの拡がり角が小さい超小型PCSELを用いて、光アンプを用いない自由空間光通信の実証実験を行った。実験には、64QAM変調(直角位相振幅変調)された864MHz帯域のOFDM(直交周波数分割多重方式)光信号が用いられた。図3.16に示すように、1W級光パワーのPCSELで光信号を発射させ、1.1mの空間伝送に成功した。本結果は、PCSELによる5.2Gbps相当の自由空間光通信の実現可能性を示すものである。

なお、KDDIとKDDI総合研究所は、2030年を見据えた次世代社会構想「KDDI Accelerate 5.0」³⁶を策定し、具体的な取り組みとしてイノベーションを生むエコシステムの醸成に必要な「将来像」と「テクノロジー」を、Beyond 5G/6Gホワイトペーパー³⁷に纏めている。今回の成果は、この中に盛られた7つのテクノロジーの中の「ネットワーク」に該当するものである。

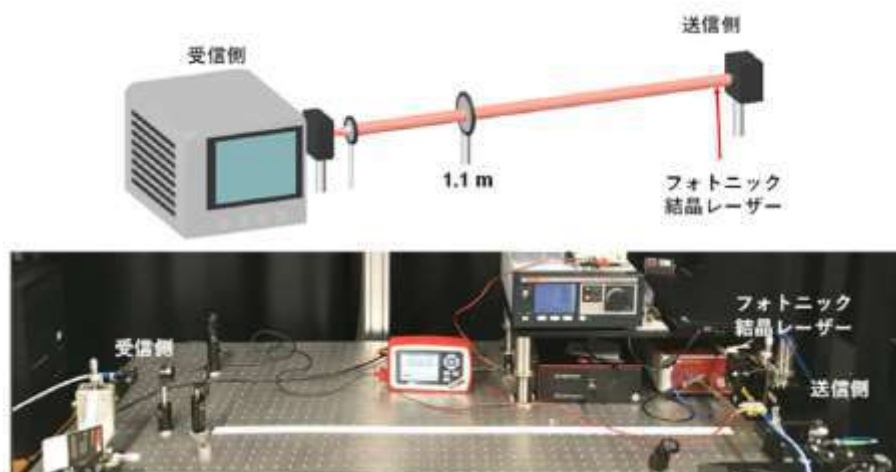


図 3.16 1W 級出力 PCSEL で 64QAM 変調・864MHz 帯域の OFDM 光信号を用いた 1.1m の空間伝送実験システム

³⁵ 1) ECOC2022 (The European Conference on Optical Communication), Post deadline paper, September, 2022. 2) KDDI 総合研究所 ニュースリリース (2022 年 9 月) <https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2022/092201.html>

³⁶ https://www.kddi-research.jp/kddi_accelerate5_0/

³⁷ https://www.kddi-research.jp/tech/whitepaper_b5g_6g/

(2) 宇宙間光通信光源用PCSELの開拓³⁸

野田とKDDIの共同研究による前述の超小型PCSELを用いた自由空間光通信の実証実験では、強度変調・直接検波方式を用いた。今後の長距離宇宙空間を見据えると、3万6,000kmを超える伝送距離をカバーするために受信感度がより高い通信方式が求められる。そこで今回、周波数変調とコヒーレント受信方式を組み合わせることで、出力光の強度が1億分の1に減衰しても通信可能な新たな自由空間光通信方式の実証実験を行った。

本実験では、送信側でPCSELを従来の強度変調よりも高効率・大出力な周波数変調器として動作させ、受信側でPCSELの狭線幅特性を生かしたコヒーレント受信方式とすることで、極めて弱い光信号に対して超高感度な自由空間光通信方式を採用した。具体的には、0.5GbaudのNon-return-to-zero (NRZ) 電気信号でPCSELを直接駆動して高出力光周波数変調信号を生成した後、この光信号を1億分の1に減衰させ、コヒーレント受信後に元のNRZ信号が復元できることを確認した。今後は、図3.17のように、光アンプ不要のPCSEL搭載小型高出力送信器システムにより一層長距離かつ大容量の自由空間光通信を実現し、6G時代における低軌道衛星-静止軌道衛星間の宇宙空間における光通信を支える中核光伝送技術を目指す³⁹。

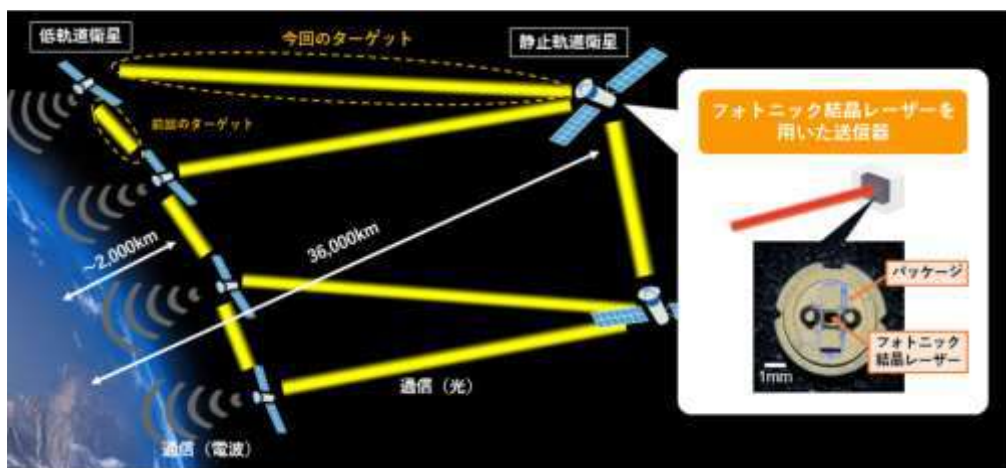


図 3.17 長距離・大容量の衛星間宇宙光通信を目指す PCSEL 利用自由空間光通信実験

3.1.4 国際共同研究と世界的波及効果の状況

◎海外研究拠点との連携の状況

京都大学は、2021 年来ドイツのフラウンホーファー研究機構 (IMS 研究所・ISIT 研究所) と共同研究契約を締結し、双方の独自技術 (日本の PCSEL 技術と、ドイツの Single Photon

³⁸ ECOC2023 (The European Conference on Optical Communication), Post deadline paper, October, 2023.

³⁹ プレスリリース (2023 年 10 月) <https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/20231019-1>

Avalanche Diode (SPAD)およびMEMS 技術)の融合による新たなLiDAR システム(Next Level Photonics)の開発に取り組んでいる。図 3. 18(a)は両国の連携研究機関によるグローバル連携の拡大を謳う図式である。本図は、MEMS と PCSEL 光源を組み合わせた超小型のビームスキャナと SPAD の受光部からなる新たなLiDAR システムへの展開を象徴している。

一方、本グローバル連携は 2022 年、オランダの研究機関を交えた日独蘭連携へと拡張された。同図(b)は日独蘭連携への拡張を謳う図式である。同連携では同年7月にオランダ High Tech Campus 会議が開催され、会議場では PCSEL 搭載小型 LiDAR が展示・実演された。この日独蘭連携は、同図(c)に示すように、同年 10 月、駐日オランダ大使館を介してオランダの研究開発拠点 PhotonDelta⁴⁰との間で、学生の交流などを含む連携活動が盛り込まれて開始された。また本連携を通じて、高度ナノ技術を保有するオランダの企業等とも連携が開始している。

一方アジア圏では、韓国の成均館大学(Sungkyunkwan University)の B. Song グループと、PCSEL やフォトニックナノ構造に関する共同研究が進展している。

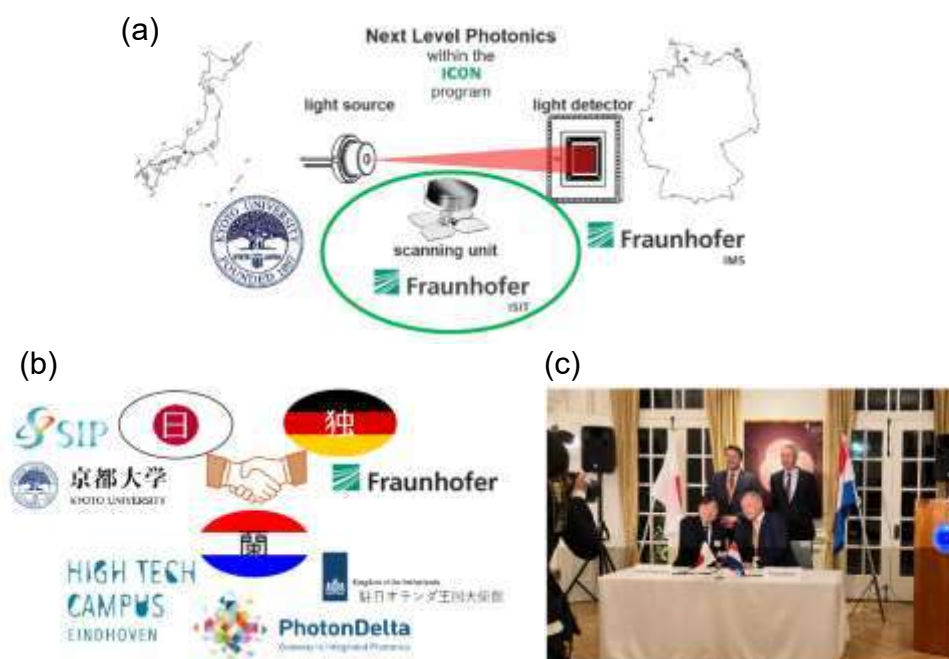


図 3. 18 (a)日独 2 国間によるグローバル連携 (b)日独蘭 3 国間によるグローバル連携 (c)日蘭連携の MOU 締結⁴¹

⁴⁰ 集積フォトリソを含むエコシステムを構築するオランダの企業。

⁴¹ 野田先生ご提供資料から引用

3.1.5 科学技術への波及のまとめと展望

PCSEL は 2 次元フォトニック結晶面発光 LD として、1999 年の世界初の提案/実証以来、数多くの新構造・新概念・新設計理論を構築してきた。図 3.19 は研究終了後の 2019 年以降に達成された PCSEL の研究成果を図示したものである。

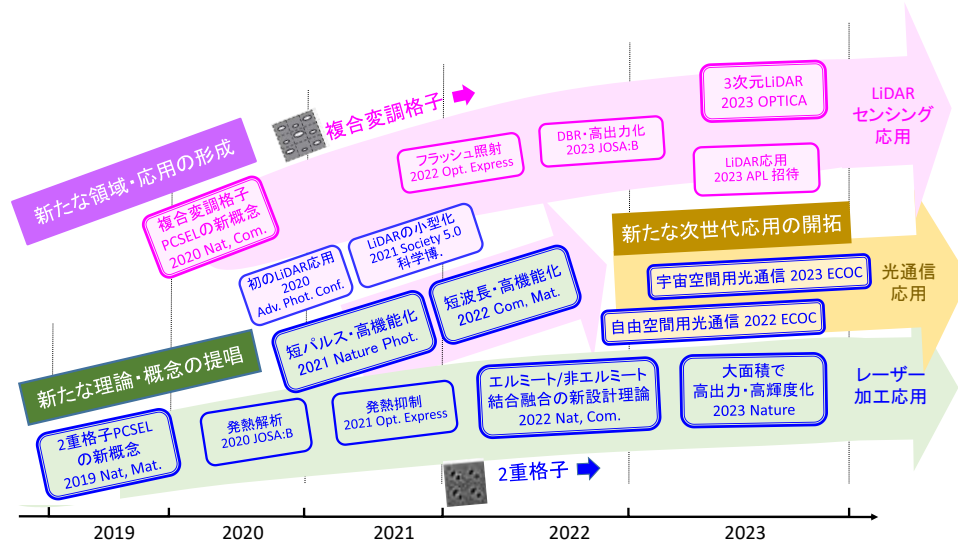


図 3.19 研究終了後 2019 年～2023 年の PCSEL 技術の進展

新たな理論・概念の提唱では、2019 年発表の 2 重格子の新概念は、大面積で単一モード・高出力・高輝度 PCSEL を可能にする新設計理論の構築を経て、実用化に不可欠な発熱の影響に対処する新たな設計を加え、3mm 径の大面積・連続動作で前例のない 50W の高出力を実現し、大型レーザに匹敵する高輝度を達成した。

新たな領域・応用の形成では、2 重格子 PCSEL を用いた LiDAR の実現で新規な応用への道を切り開くとともに、更に新規な仕組みの LiDAR に向けた複合変調格子 PCSEL を提案し、空孔の位置とサイズを変調させた格子配列から成る多数の小区画を選択的にレーザ駆動させることで出射ビーム走査を任意に制御できる新機能を実証した。特に本変調格子を用いたフラッシュ型素子とビーム走査型素子の併用に加えて赤外線 ToF カメラを搭載した非機械式小型 LiDAR では、フラッシュ光源だけでは困難な反射率の低い黒色物体でも高解像の測距が出来ることを実証した。一方、光非線形媒質を組み込んだ短パルス PCSEL や、それまでの GaAs 系でなく GaN 系材料で構築した短波長(青色)PCSEL の開発は、高分解能を有する LiDAR や青色特有のレーザ加工への新たな応用分野の創出に貢献した。

新たな次世代応用開拓の領域では、野田と KDDI の共同研究で、PCSEL の高輝度性を生かした小型・軽量の光送信器として、自由空間および宇宙空間用光通信への有用性を実証した。

これらの研究成果は多くの著名な論文誌に掲載されており、研究終了後の野田の発表論文は 98 報(研究期間中の成果論文は 27 報)に上る。最も注目される 2 重格子 PCSEL の論文では被引用数が 180 に達しており、被引用数 Top1%に迫っている⁴²。

新理論から新応用にわたって多くの成果を創出した PCSEL は、半導体レーザおよび光技術の飛躍的な発展に大きな貢献をもたらしたと言える。

3.2 社会経済への波及と展望

2019年に開始された内閣府：SIPプロジェクトは、経済発展と社会的課題の解決を両立させ、人間中心の社会であるスマート社会：Society5.0の実現に向けた、サイバー空間(仮想空間)とフィジカル空間(現実空間)の高度融合システム、即ちサイバーフィジカルシステム(CPS)の構築を目指す。本PCSELの研究に関わるスマート製造分野では、国内外市場でのIoT/AI関連の具体的な応用先として積極的な投資が開始され、CPS構築が進んでいる。こうした中、これまでに類例を見ない高性能を達成したPCSELは、超小型・高性能光源としてレーザ加工・センシング・医療・生命科学などへの幅広い応用を目指し、我が国の多様な産業分野での競争力を高めることが期待されている。実際にPCSELは、研究終了後に多方面で社会実装への展開をなし、科学技術および社会経済への多大な波及効果をもたらした。こうした社会経済への波及効果は、SIPプロジェクト、および同プロジェクトのもとで京都大学内に設置されたPCSEL研究拠点(COE)による研究支援に負うところが大きい。

3.2.1 PCSEL 技術の特徴と社会への貢献

(1) 従来のレーザに対する PCSEL の特徴

比較のため、従来の代表的なレーザ(ガス/ファイバー/半導体レーザ)の特徴を以下にまとめる。

- ・ **ガス(CO₂)レーザ**：CO₂ガスの放電に基づき $\sim 10\mu\text{m}$ 帯の波長で発振する。装置は大型($\sim 150\text{cm} \times \sim 50\text{cm} \times \sim 40\text{cm}$)で、ガス放電のためエネルギー効率が低い($\sim 10\%$)。
- ・ **ファイバーレーザ**：ファイバー中に添加した Yb の励起に多数の LD($100 \sim 200$ 個)を要す。装置は大型・複雑であり、効率の増大に限界あり。
- ・ **半導体レーザ**：共振器は微小(厚み $\sim 0.1\mu\text{m}$ 、長さ $\sim$ 数 mm、幅 $\sim 50 \sim 100\mu\text{m}$)だが、サブミクロンの厚みによりビームの拡がり角が大きく(10° 以上)、縦・横非対称ビーム形状でビーム品質が悪い。発振スペクトル幅が広く、温度依存度も大きい。センシング応用には複雑なレンズ系を要し、精密調整が必要である。加工用途へ適用するには圧倒的に輝度が劣る。

⁴² M. Yoshida, et al. “Double-lattice photonic-crystal resonators enabling high-brightness semiconductor lasers with symmetric narrow-divergence beams”, Nature Materials Vol. 18, Feb. 2019.

これに対し、PCSEL は図 3. 20 に示すように超小型(1〜3cm)であり、システムの大幅な簡略化・小型化・高効率化(50%以上)が期待される。

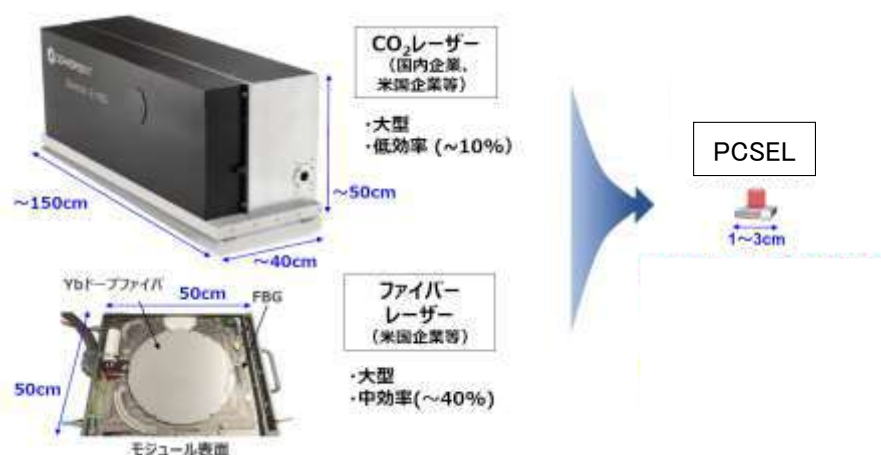


図 3. 20 従来の代表的なレーザーと比較した PCSEL のサイズ

(2) レーザ技術の世界市場

一方、上記レーザーの種類および応用別でみた世界市場に関する情報の一例を以下に列記する。なお市場額は、情報元における米ドル額を、1米ドル=145円(レート)とした円換算で表記している。

- ・ **レーザー機器**⁴³ : 3.13兆円/2022年、4.74兆円/2029年(平均年成長率:5.92%)。用途は主に切断、溶接、マーカ、その他の加工。
- ・ **半導体レーザー**⁴⁴ : 1.35兆円/2022年、2.68兆円/〜2035年(平均年成長率:8.2%)。用途の割合:通信〜58%、医療・ヘルスケア〜23%、航空宇宙〜10%、その他〜9%。
- ・ **レーザー加工**⁴⁵ : 6380億円/2022年、9720億円/2028年(平均年成長率:7.26%)。用途は主に溶接、切断、表面改質、穴あけ、微細加工ほか。
- ・ **LiDAR**⁴⁶ : 3270億円/2023年、1.05兆円/2028年(平均年成長率:26.3%)。

上記の世界市場の予測の中で、LiDARの平均年成長率が26%と高いことは注目に値する。これは、今後多様な分野で自律走行車などのスマートモビリティが躍進するという予測の

⁴³ Global Laser Processing Machines Market Report, History and Forecast, 2018-2029.

⁴⁴ Newscast SDKI : 半導体レーザー市場の発展、動向、巨大な需要、成長分析および予測 2023-2035。

⁴⁵ IMARC Group. Laser Processing Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2023-2028.

⁴⁶ Mordor Intelligence. <https://www.mordorintelligence.com/ja/industry-reports/global-lidar-market>

影響が大きい。PCSEL の性能の現状および将来予測に、レーザ機器、半導体レーザ、レーザ加工および LiDAR の市場の平均年成長率(6%~26%)を加味すると、PCSEL の社会貢献の場としては、7250 億~2.9 兆円/年の市場が期待できると言える。

図 3.22 を用いてレーザ加工市場における PCSEL の具体的な応用例を考える⁴⁷。大型レーザに匹敵する高輝度を達成した PCSEL は、本図では成熟分野とされる金属切断・半導体露光・プリント基板穴あけなどのみならず、発展分野である精密切断・溶接・マーキング・各種加工などですでに実用的性能を有している。このことから、PCSEL は加工分野では幅広い用途を支えるキーデバイスになり得ると言える。

PCSEL はレーザ加工分野のみならず、超小型・高輝度・高出力光源であるため、従来にない高機能・高分解能の LiDAR や自律走行ロボットなど、幅広いスマートモビリティとしての有効性を実証した。図 3.23 は PCSEL が次世代スマート社会を支えるキーデバイスに発展する可能性を図式化したものである⁴⁸。



図 3.22 PCSEL が目指すレーザ加工におけるターゲット

⁴⁷ JST news April 2014 特集1 革新的半導体レーザーの新たな挑戦

⁴⁸ PCSEL 研究拠点(COE)。SIP プロジェクト関連資料ほか。



図3.23 次世代のスマート社会を支えるキーデバイスとして活躍が期待される PCSEL の予想されるスマート加工・スマートセンシング他の応用分野

3.2.2 社会経済への展開

◎PCSEL 研究開発のグローバル展開を支援する PCSEL 研究拠点 (COE)

野田は、研究終了後の SIP プロジェクト⁴⁹を通じて、広範な応用領域で PCSEL の社会実装への可能性の実証を進めた。プロジェクト期間中、特にアウトプットとしての PCSEL 素子 (Product、別名「モノ」) および PCSEL の製造等に関するデータ・インテリジェンス (Technology、別名「コト」) の国内外における活用範囲を最大限に広めるために、京都大学内に PCSEL 拠点が設立された (Center of Excellence (COE) for Photonic-Crystal Surface-Emitting Lasers (PCSELs))。

・ PCSEL 研究拠点の支援体制

本研究拠点では、1,000m²以上のスペースに、PCSEL 試作/評価ライン・企業研究員の集結スペース (数10人規模の複数研究員の受け入れ) が確保され、窓口機能・マンパワーの増大・装置のメンテナンス体制の充実が図られ、企業の寄付講座が受け入れられた。さらに弁護士・技術移転機構との連携、英語版ホームページ開設による国内外への情報発信など、広範な施設と多面的な組織が整備され、PCSEL 研究の拠点強化および社会実装に向けた支援体制が極めて充実している。

⁴⁹ 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「光・量子を活用した Society5.0 実現化技術研究開発計画」(2018 年度～2022 年度)。

・海外企業との連携の支援

PCSEL の研究開発に関する海外連携については、PCSEL 研究拠点を通じて海外企業・研究拠点から多数の引き合いが来ており、特にこの1年間は急増している。こうした研究開発を通じて生み出される「モノ」と「コト」は、個々の目標を通して以下のように社会実装への道筋が設定されている。

・モノ(PCSEL 素子)の社会実装の目標：(第一段階)LiDAR・加工・医用・分析、その他の応用に向け、本拠点から各種のユーザー企業・機関へMTAを介してPCSEL素子を提供する。(第二段階)連携企業から(i)まずはLiDARセンシング分野、(ii)数年後に汎用CW-PCSEL、(iii)更なる数年後に加工システム、の順に社会実装。一方、別の技術移管企業から、照明・通信などの応用分野で社会実装。

・コト(データ・インテリジェンス)の社会実装の目標：(第一段階)PCSEL 製造の Cyber Physical System(CPS)化を通じて、製造に不可欠なデータ・ノウハウを蓄積。(第二段階)本拠点から製造企業へ高付加価値のデータ・インテリジェンスを提供し、大規模共同研究(数億円規模)へと展開。さらに、グローバル連携を介して社会実装化を拡大する。

PCSELに関する国内外企業・研究機関との各種形態での連携の事例が以下のように示されている。

・全引き合い：～81件(2022年末時点。その後、拡大)。

・モノの社会実装関連：64件。内、国内37件 海外27件。分野別では、センシング：17件(国内9件：海外8件)、加工：13件(10件：3件)、レーザ光源・機器：8件(2件：6件)、宇宙：5件(1件：4件)、計測・医療：2件(2件：0件)、ほか。

・コトの社会実装関連：17件。内、加工：5件、プロセス：5件、センシング：2件、照明：2件、通信：2件、ほか。

PCSEL研究拠点への引き合いは、その後、100を超える研究機関・企業に拡大されている。この拠点を通じて、参画機関以外の企業への技術移転や、協力機関を含むユーザー企業へデバイス提供を通じてPCSELの社会実装が加速されたため、本拠点の果たした役割は大きい。

3.2.3 社会経済への波及のまとめと展望⁵⁰

従来多くのレーザ加工などで主流のガス/ファイバーレーザは大型・低エネルギー効率・高価格などの課題を抱える。また、従来の半導体レーザは大きなビーム出射角の故に低いビーム品質、広い発振スペクトル幅などの欠点があり、センシング応用には複雑なレンズ系や精密な調整を要する。また加工に用いるには圧倒的に輝度が劣る。

これに対して、PCSEL は大きな出射面積に対して高出力・高ビーム品質を実現するための多くの課題を解決し、大型レーザに匹敵する高輝度を実現した。この結果、光出力と輝度を性能指標とした従来型レーザとの 2 次元比較マップでも、主流のファイバーレーザに迫る性能と位置付けられるとともに、装置のサイズ・簡易性・電力効率では圧倒的な優位性が示された。

期待される PCSEL の応用分野において、レーザ加工では金属切断・半導体露光・プリント基板穴あけなどの成熟分野のみならず、精密切断・溶接・マーキングなどの発展分野でもすでに実用的性能を有している。また、PCSEL は超小型・高輝度・高出力光源であるため高機能・高分解能の LiDAR やそれを搭載した自律走行ロボットなど幅広いスマートモビリティ応用における有効性を実証したことで、加工応用に留まらず、幅広い用途を支えるキーデバイスと注目されるに至っている。

レーザ技術の市場に目を向けると、レーザ機器や半導体レーザなど装置・デバイスの世界市場は 1.35 兆～3.13 兆円/2022 年と予測された一方、加工や LiDAR などの応用でも 3270 億～6380 億円/2023 年の大きな世界市場が示された。注目すべき例として、LiDAR の平均年成長率が 26%と高い。これは、多様な分野での自律走行車の躍進に対する期待などの表れの一例である。

総じて、PCSEL が達成した前例のない高度なデバイス性能、多様な分野で実証した応用の可能性、現在主流の大型レーザに比肩しうる性能レベルと超小型光源としての圧倒的な優位性、周囲を取り巻く大きな世界市場などの多くの視点に立つとき、PCSEL は次世代スマート社会を支えるキーデバイスとして、社会経済の発展にもたらした貢献と予測される波及効果は極めて大きいと言える。

また、京都大学には、成果を社会へ浸透させる組織として、PCSEL 拠点が設立された。その支援活動により、日本国内のみならず、海外の多数の企業に素子を提供し、共同研究が大きく広がっている。

⁵⁰「超スマート社会」への挑戦：（インタビュー（3）京都大）フォトリソグラフィがもたらす業界のゲームチェンジ、（監修）尾木蔵人、東洋経済新報社、2023 年 2 月発行、p. 102～p. 143.