

公開シンポジウム「将来のエネルギー科学技術に向けた
パワーレーザーと高エネルギー密度科学の役割展望」
2022年2月3日

フォトニック結晶面発光レーザーの進展と展望

—究極の半導体パワーレーザーの実現を目指して—

京都大学工学研究科

野田 進

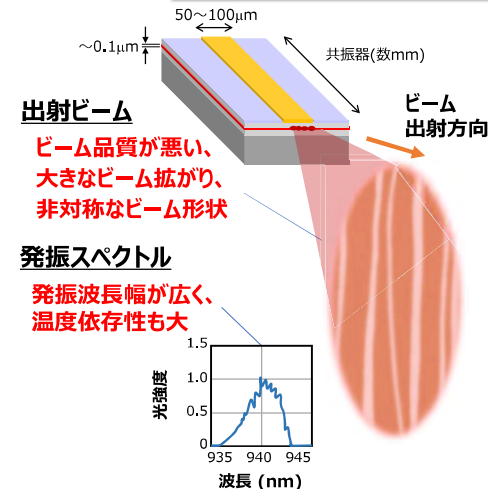
パワーレーザーは、スマート製造、 スマートモビリティを支えるコア技術



目次

- ・ブロードエリア半導体レーザー、CO₂レーザー、ファイバーレーザーの課題
- ・フォトニック結晶レーザーによるボトルネック解消
- ・フォトニック結晶レーザー高輝度性・高機能性の実証 (直近の出口としてのLiDAR応用を例に)
- ・フォトニック結晶レーザーによる超小型加工システムへの展望

ブロードエリア半導体レーザーと課題



課題:

・LiDAR センシング:

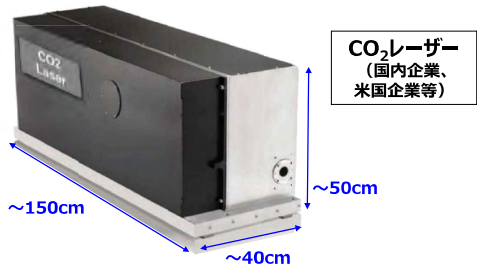
ビーム成形のために、複雑なレンズ系と、精密調整が必要

(*In addition, S/N ratio cannot be increased because broad spectrum does not allow to use narrow spectral band-pass filter to eliminate background light.)

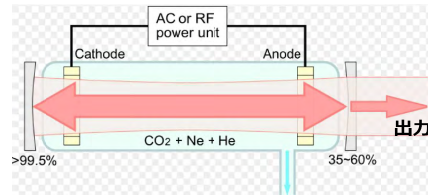
・レーザー加工:

輝度が、CO₂レーザーやファイバーレーザーよりも極めて低いために、直接加工に用いることは困難

CO₂レーザーと課題



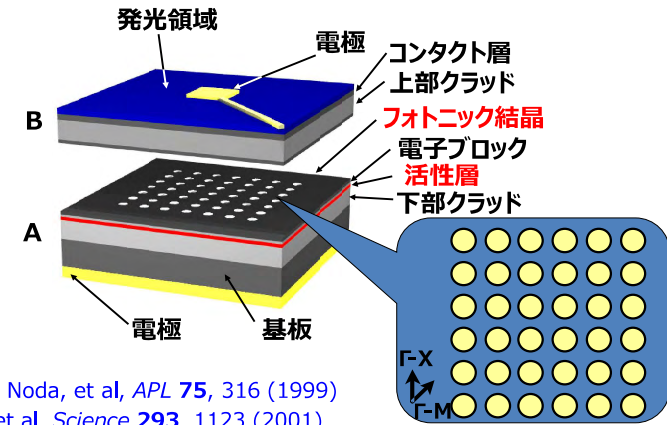
CO₂レーザー
(国内企業、
米国企業等)



CO₂ガス中で放電を行い、両側に鏡をおくことで、共振させ、レーザー発振を行う。
波長は、10μm帯。レーザー光は、自由空間を伝搬させて、加工に用いられる。

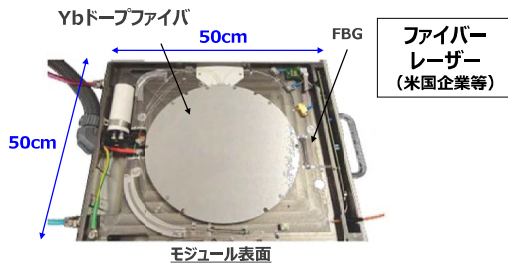
- ・ガスレーザーゆえに**大型**
- ・同様に、ガスレーザーゆえに**低効率 (~10%)**

ボトルネック解消の鍵：フォトニック結晶レーザー

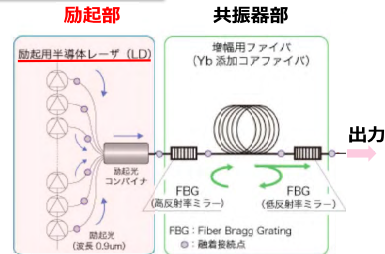


Imada, Noda, et al, *APL* **75**, 316 (1999)
Noda, et al, *Science* **293**, 1123 (2001)

ファイバーレーザーと課題



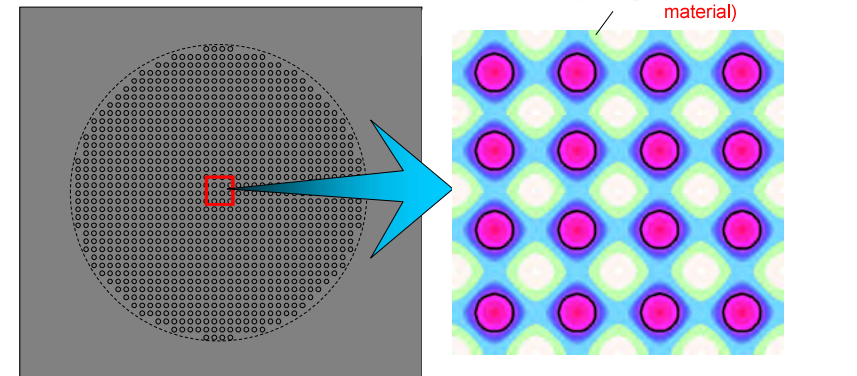
ファイバー
レーザー
(米国企業等)



非常に数多くの半導体レーザー（数100個の半導体レーザー）から出た光をコンバインし、Yb添加ファイバーを励起する。両側に設けたFBGにより共振。

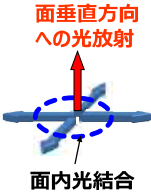
- ・多くの半導体レーザーを励起用として用いる。必然的に**大型**。複雑。
- ・半導体レーザーの効率 x ファイバーに添加されたYb原子のストークス損失が効率決定：**効率増大に限界**

動作原理



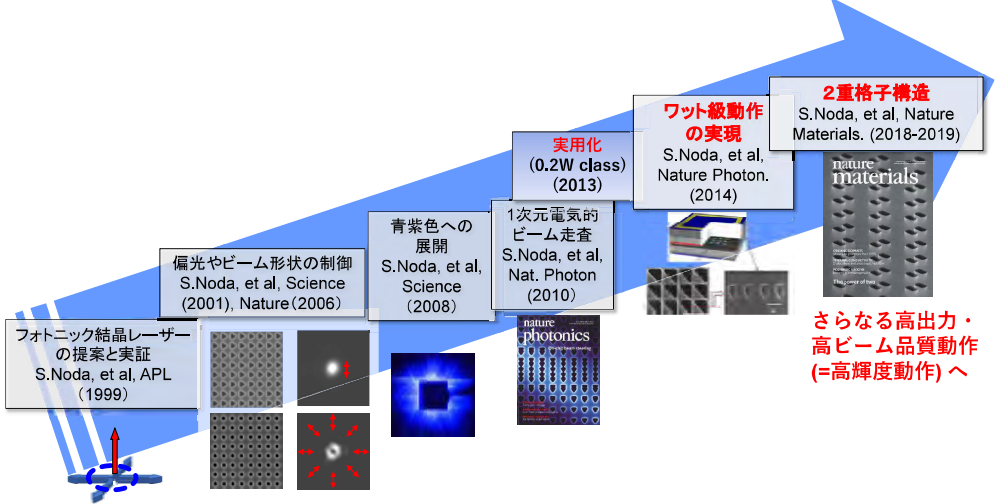
原理的に大面積でも基本モード動作可能
 = 高ビーム品質、狭発散角動作可能
 ⇒ 高輝度化
 (CO₂レーザー、ファイバーレーザーと同等輝度が期待)

$$\text{輝度} \propto \frac{S}{(m+1)(n+1)}$$
 S: 発振面積, m, n: 横モード次数
 基本モード動作時、m=n=0で輝度最大



格子点形状や格子点位置・大きさ制御により
 ビーム走査、ビーム形状制御が可能に
 ⇒ 高機能化

フォトニック結晶レーザー技術の進展



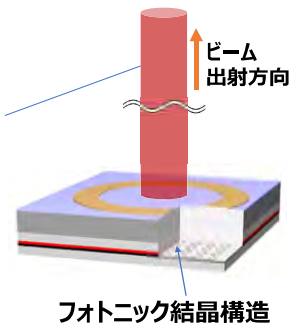
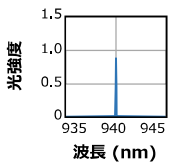
フォトニック結晶レーザーの特長のまとめ

出射ビーム

高ビーム品質、極めて狭いビーム拡がり、対称なビーム形状

発振スペクトル

発振波長が単一、温度変化が小さい



優位性

複雑なレンズ系不要で、部品数大幅削減、調整不要
 ⇒ 小型化・低コスト化

ワンチップで、高ビーム品質・高出力動作が可能
 ⇒ 超小型加工システムへの展開が期待

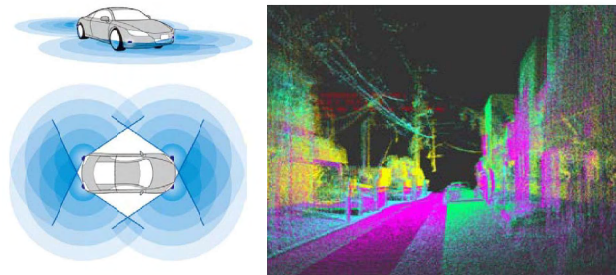
スマート製造、スマートモビリティを支えるキーデバイスとして期待

目次

- ・ブロードエリア半導体レーザー、CO₂レーザー、ファイバーレーザーの課題
- ・フォトニック結晶レーザーによるボトルネック解消
- ・フォトニック結晶レーザー高輝度性・高機能性の実証 (直近の出口としてのLiDAR応用を例に)
- ・フォトニック結晶レーザーによる超小型加工システムへの展開の展望

LiDAR (光測距システム) は、光パルスを物体に照射し、反射して帰ってくるまでの時間を測定することで、物体や障害物までの距離を検出するシステム

来たるべきスマート社会におけるスマートモビリティ、すなわち、ロボット、農機、建機、自動車等の自動運転の実現のために極めて重要

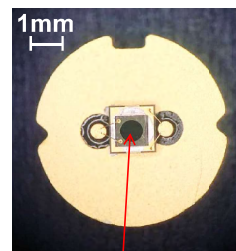


<https://www.sciencenews.org/article/designing-robots-help-disaster>

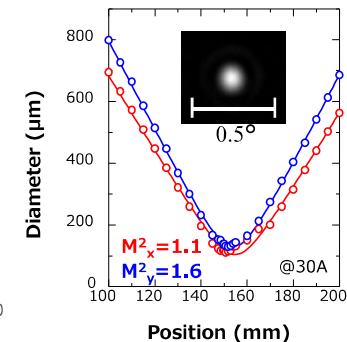
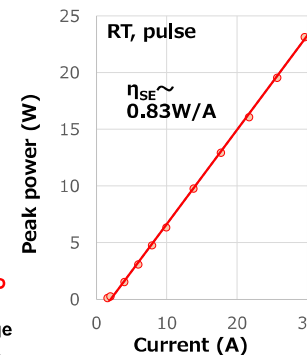
https://autoprove.net/supplier_news/pioneer/8731/?a=all

デバイス特性

上面図

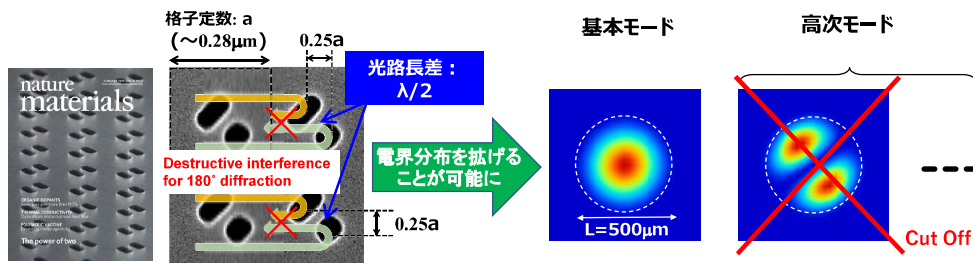


デバイスサイズ：500 $\mu\text{m}\Phi$
アップサイズダウンで
5.6mm Φ のCan Package
に実装。基板側から出射。



最大輝度 = 1.5GW $\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$: 従来の半導体レーザーの10倍以上の高輝度化に成功

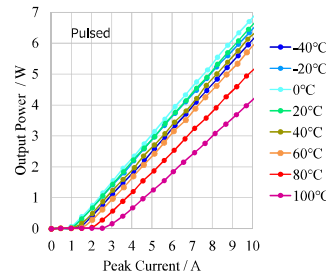
高輝度動作を実現する2重格子フォトニック結晶



高ビーム品質・高輝度動作が可能に

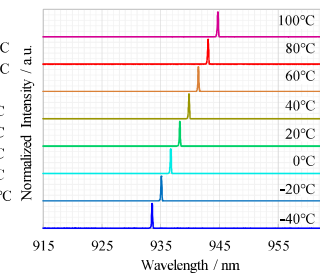
詳細なデバイス特性

Temperature dependence of I-L characteristics



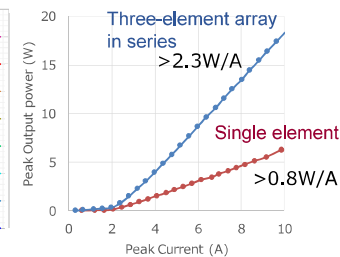
Temperature dependence of output power for fixed current: -0.36%/K
[Superior to FP lasers (-0.40%/K)]

Temperature dependence of lasing spectrum @ 10A



Temperature dependence of lasing wavelength: 0.08nm/K
[Superior to FP lasers (~0.3nm/K)]

Improvement of Slope Efficiency



Slope efficiency can be increased by three-element array (series)

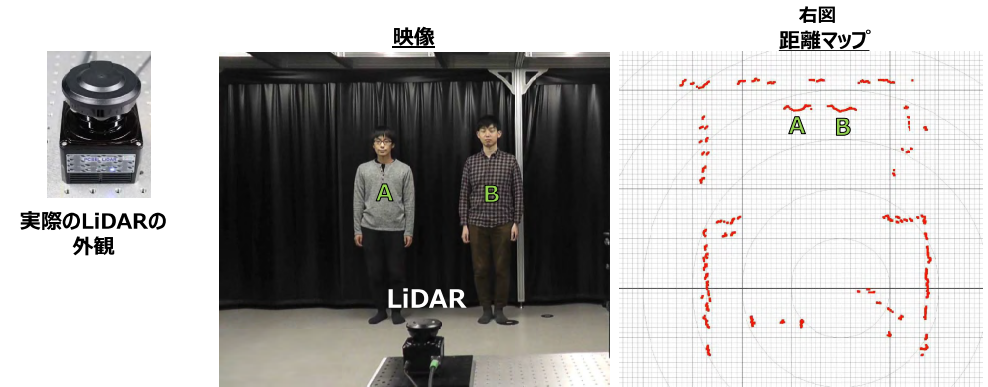
フォトニック結晶レーザーと通常の半導体レーザーの詳細比較

レンズフリーでの長距離伝播実験

	15cm	50cm	1m	10m	20m	30m
通常のブロードエリア半導体レーザー				確認不可	確認不可	確認不可
フォトニック結晶レーザー (500μmΦ)						

30mという遠方においても～5cmという狭いビームスポット
高輝度性を示す重要な結果

フォトニック結晶レーザーを搭載したLiDARのデモンストレーション



フォトニック結晶レーザーを搭載したLiDAR構築とその効果

通常の半導体レーザーを搭載したLiDARの光源部

複雑なレンズ系・精密調整必要・大型

実際のビーム走査の様子

ビーム拡がりが大きく、分解能が低い

フォトニック結晶レーザーを搭載したLiDARの光源部

フォトニック結晶

レンズフリーで簡素化・小型化可能

実際のビーム走査の様子

ビーム拡がり小さく、分解能が高い

フォトニック結晶レーザーによる空間分解能の向上 (ユーザー企業での詳細評価)

通常の半導体レーザーを搭載したLiDAR

白紙 @ 4.2m, 背景 @ 5.0m

ゴースト (中間距離) 出力の例

従来品の場合の距離出力

白紙の両エッジ付近で、中間距離を誤って検出

フォトニック結晶レーザーを搭載したLiDAR

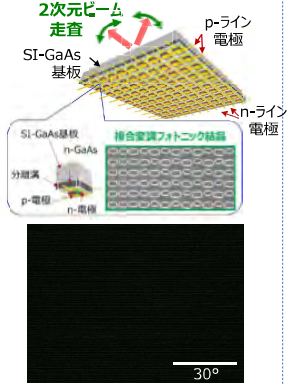
PCSEL 測域センサの場合の距離出力

格段に誤検出が減少し、エッジが非常にシャープに

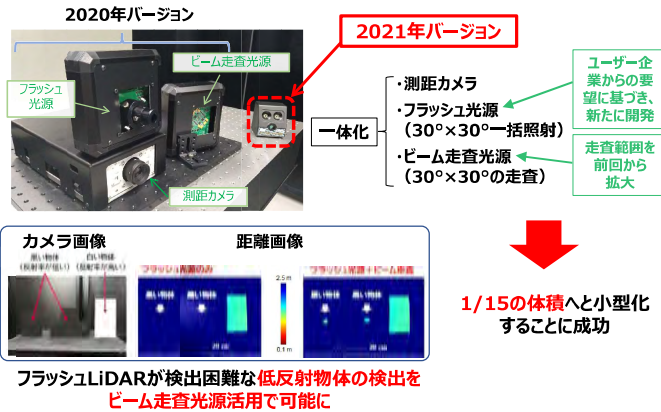
スマート化

—ビーム走査PCSEL開発と新型LiDARへの展開—

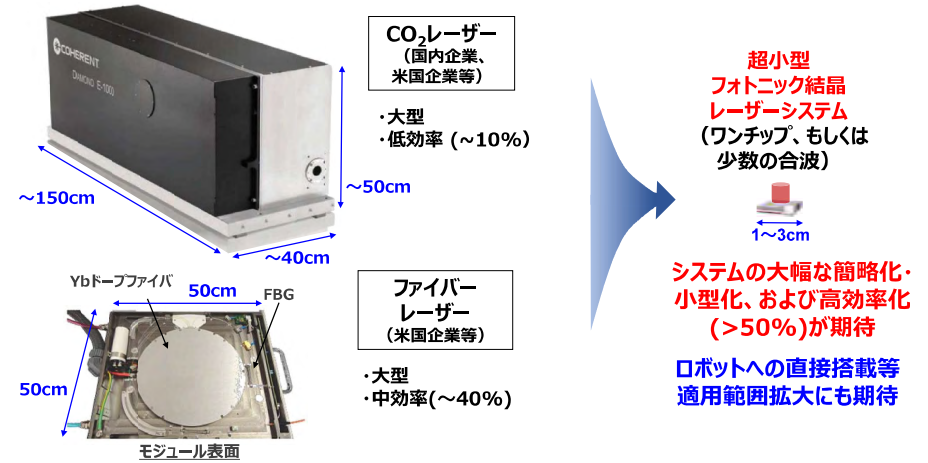
電氣的2次元ビーム走査 PCSELの開発・深化



新型非機械式LiDARシステム（フラッシュ+ビーム走査型）の構築



フォトニック結晶レーザーの将来のスマート加工応用



目次

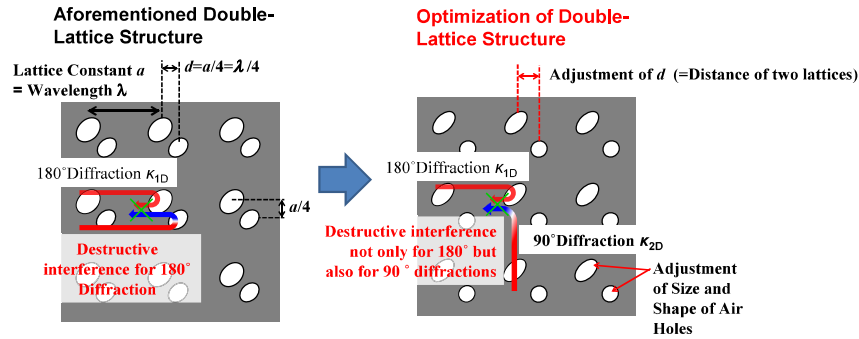
- ・ブロードエリア半導体レーザー、CO₂レーザー、ファイバーレーザーの課題
- ・フォトニック結晶レーザーによるボトルネック解消
- ・フォトニック結晶レーザー高輝度性・高機能性の実証 (直近の出口としてのLiDAR応用を例に)
- ・フォトニック結晶レーザーによる超小型加工システムへの展開の展望

ゴールに向けた戦略

1. 先に述べたフォトニック結晶技術を発展させ、まず、10W級の高ビーム品質連続動作可能なPCSEL (1mmΦ)の開発
2. デバイスサイズを2-3mmΦ (さらには1cmΦ、あるいはそれ以上)と大きくし、100W級 (さらにはkW級、10kW級)へと展開。
3. 他の重要な要素技術の開発 (冷却・パッケージ技術、トポロジカルフォトンクス (3mmΦ、1cmΦという超大面積での単一モード動作)、合波技術、等。

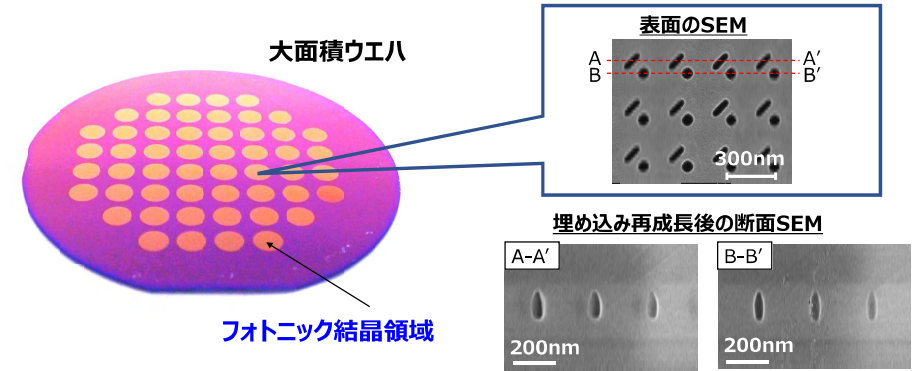
1. 10W級の高ビーム品質連続動作可能なPCSEL (1mmΦ)の開発

1mmΦに最適な2重格子構造の設計

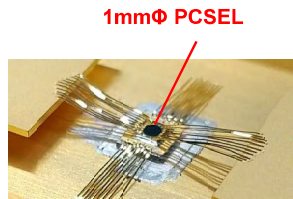


2. デバイス面積の拡大 (2-3mmΦデバイスの開発)

面積を拡大して、単位面積あたりの発熱量を低く保ちつつ、CW動作で $1 \text{ GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ を実現していく

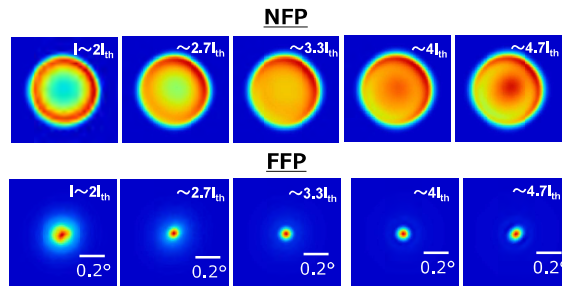


デバイス作製と近視野像(NFP)・遠視野像(FFP)の計算



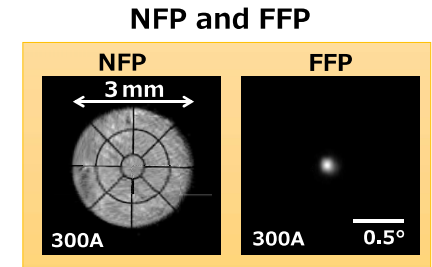
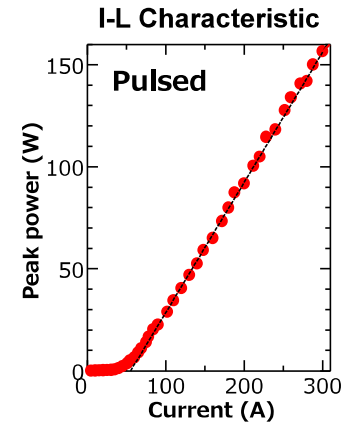
・アップサイドダウンで治具にボンディング

電子・正孔、光、熱の相互作用を考慮した独自の計算法で、近視野像、遠視野像を計算したもの



⇒ 10W級の高ビーム品質動作が期待

3mmΦデバイスの第一次試作

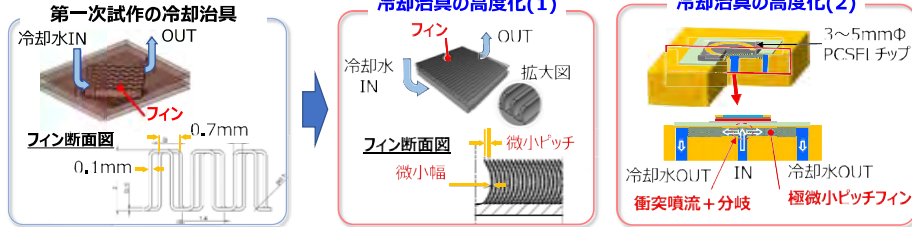


- ・わずかに閾値の6倍で、150W出力。
- ・フィラメンテーションが見られず、一様発振の実現。
- ・非常に狭い出射角度：3mmΦにも関わらず、少数のモードでの発振（高ビーム品質動作）。

1cmサイズでkW級動作が期待、さらなる面積拡大、あるいは、少数の合波で数10kW級も期待

3. 放熱・実装、さらなる高ビーム品質化、合波技術等

● 放熱・実装技術の構築

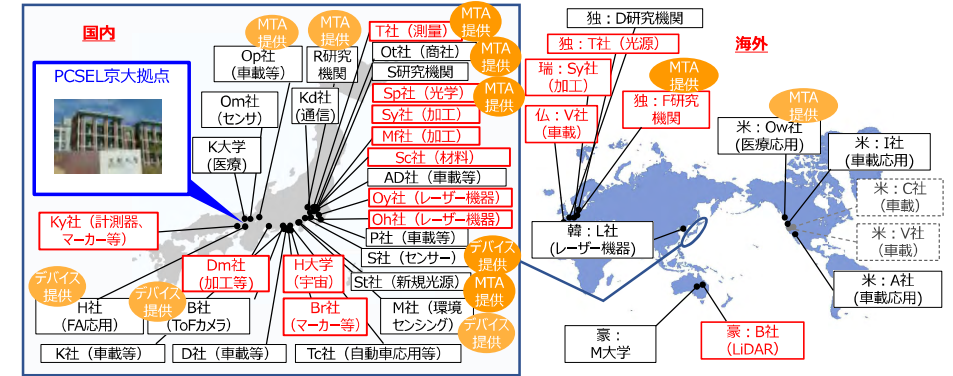


水路幅・ピッチの縮小化と水流の変化による冷却効果増大

- **3mmΦ以上の大面積におけるさらなる高ビーム品質化(M²<2)**
非エルミート・トポロジー物理によるM²~1が可能なフォトニック結晶構造の考案
- **合波技術の開発**
新しい空間合波法や、波長・偏波合波法の考案・開発

“モノ”と“コト”の社会実装の拡大化

国内外の、センサー、医療応用等、幅広い分野のユーザー企業との連携や、フォトニック結晶レーザーその“モノ”の提供を拡大化



PCSEL 拠点 : <http://www.pcsel-coe.kuee.kyoto-u.ac.jp>

フォトニック結晶レーザーに関する拠点形成 (PCSEL京大拠点)

ターゲット 研究開発を通じて生み出される、“モノ”および“コト”の両方

直接のアウトプットとしてのPCSELそのもの (“モノ”)

SIP推進中 ・京大拠点から、各種のユーザー企業・機関へと、PCSELその“モノ”を提供 (LiDAR、加工、医用、分析、科学技術、その他の応用に向けて)
※MTA (Material Transfer Agreements) を介して提供

SIP終了後 ・終了後速やかに、ロームから、LiDAR等のセンシング分野を主として社会実装
・その後数年で、三菱電機から汎用CW PCSELとして社会実装
・さらに、その数年後、PCSELを組み込んだレーザー加工システムを社会実装
・また、他の技術移転先企業から、照明や通信等の用途にて社会実装を目指す

PCSELの製造等に関する、データ、インテリジェンス (“コト”)

SIP推進中 ・フォトニック結晶レーザー製造のCPS化 (デジタルツイン形成) を通じてPCSEL製造に不可欠な、貴重なデータ、ノウハウやインテリジェンスを蓄積

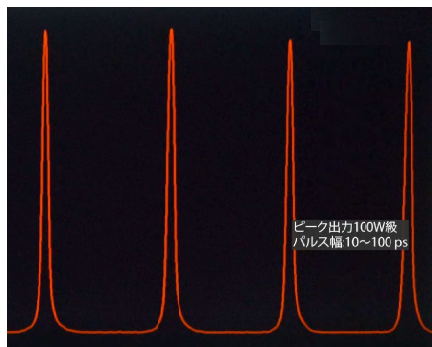
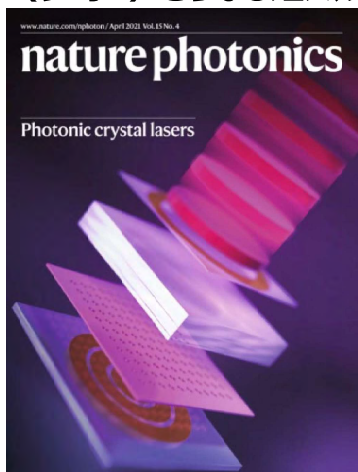
SIP終了後 ・京大拠点から製造企業へと、高付加価値のデータ、インテリジェンス等の“コト”を提供していき、大規模な共同研究へと展開。
(R&D部門のみならず、事業部門との数億円レベルの大規模な共同研究への発展を念頭に推進)

さらに、社会実装の拡大化に向けたグローバル連携 (日独蘭、日加蘭、日台蘭等)

LiDARセンシング、レーザー加工は、スマートモビリティやスマート製造を支えるコア技術



(参考1) さらなる短パルス・高ピーク出力化

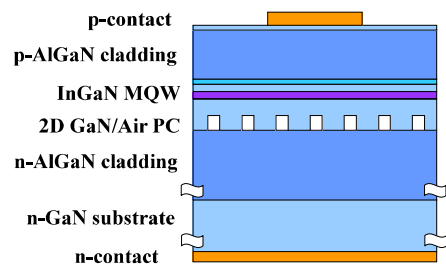


ストリークカメラ像 (~30ps)

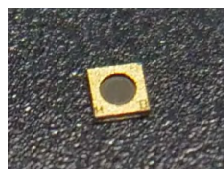
Nature Photonics 誌 4 月号表紙

(参考2) 短波長化

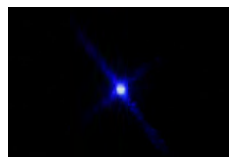
GaN系への展開



短波長発振



素子写真



発振の様子