

# ジャイアント・マイクロフォトニクスによる小型集積レーザー

Giant micro-photonics for tiny integrated lasers

平等拓範<sup>\*,\*\*</sup>

\*理化学研究所 放射光科学研究センター  
(〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1)

\*\*自然科学研究機構 分子科学研究所  
(〒444-8585 愛知県岡崎市明大寺町字西郷中 38)

Takunori TAIRA<sup>\*,\*\*</sup>

\*RIKEN SPring-8 Center, Innovative Light Sources Division  
(RIKEN SPring-8 Center (RSC), 1-1-1, Kouto, Sayo, Hyogo 679-5148, Japan)

E-mail: taira@spring8.or.jp

\*\* Institute for Molecular Science (IMS), Division of Research and Innovation and Collaboration  
(38 Nishigonaka, Myodajji, Okazaki 444-8585, Japan)

E-mail: taira@ims.ac.jp

光の波長と同じオーダーで物質・材料を設計するマイクロドメイン構造制御により必要とする光機能を発現, 強調させるドメイン光制御法であるマイクロ固体フォトニクス, 特に高輝度な光を望む“ジャイアントマイクロフォトニクス”の深化はパワーレーザーの小型・集積化に大きく貢献した. セラミックレーザーに加えて原子レベルでレーザー材料とヒートシンクを直接接合する表面活性接合法により小型集積レーザー (Tiny Integrated Laser, TILA) が可能となってきた. ロボットアームに直接搭載されたパワーレーザーの例や高輝度かつ焦点深度の長い不安定共振器によるマイクロチップレーザーなども紹介する.

**Key words:** micro solid-state photonics, microchip laser, tiny integrated laser, laser peening, unstable cavity

## 1. 緒言

最初のレーザーは, 固体レーザーであり, その出現から 60 年を経ても固体レーザーの高性能化は, アインシュタインにより予言された重力波の検証を可能とし<sup>(1)</sup>, また高エネルギー物理に重要な加速器の革新となる高強度レーザー粒子加速に期待されるなど<sup>(2)</sup>, 科学技術の最先端を牽引している. 一方, 半導体の微細加工, 自動車・航空機などの加工, 自動運転や気象予測を含めたセンシング, DNA 解析から手術までのバイオ・医療応用まで幅広い分野で, 固体レーザーを中心としたパワーレーザーの活躍の場が広がっている. 背景として, 放電管励起固体レーザーが半導体レーザー励起固体レーザー (DPSSL) となり, 小型化・高効率化が進んだ事が挙げられる. 破壊的イノベーションが起こるのは特性のせいで潜在的な顧客数が制限されているとき, または不便で集中的な場所で消費を行わざるを得ないときとされている<sup>(3)</sup>. このような場合, その製品が十分に小型化, モジュール化されるなら, バリューチェーン進化による置き換えが始まりパラダイムシフトに繋がる. それであれば固体レーザーに特長的なパワーレーザーにおいても,

小型化, 集積化と同時に「+α」の新たな価値を創出できるなら社会に大きな変革をもたらすと期待される. 本講演では, このような観点から加工における可能性を議論する.

## 2. マイクロフォトニクスによる高性能レーザー

高強度パワーレーザーによる高品位加工や特殊計測は, 往々にして装置が大型で大電力を要するなど障害が大きい. ただ, 小型のマイクロ固体レーザーで同等, さらにはそれ以上の効果を実現する方法もある. レーザーの強度を高める手法である共振器の品質因子  $Q$  (Quality factor) を短時間に切換えて, レーザー媒質中に蓄積された反転分布エネルギーを瞬時に取り出す  $Q$  スイッチでは, その尖頭値  $P_p$  とパルス幅  $t_p$  は次式で与えられる<sup>(4)</sup>.

$$P_p = \frac{\ln(1/R)}{\gamma t_r} (r-1-\ln r) N_{th} L A_{eff} h\nu, \quad (1)$$

$$t_p = \eta \frac{r}{r-1-\ln r} \tau_c = \eta \frac{r}{r-1-\ln r} \cdot \frac{t_r}{\delta_{min}}. \quad (2)$$

ここで,  $r$  はしきい値  $N_{th} = \delta_{min}/2 \sigma L$  に対する反転分布の初期値  $N_i$  に対する割合, すなわち励起比であり,  $A_{eff}$  はレーザー光の有効断面積,  $L$  はレーザー

媒質長,  $h\gamma$  はレーザー光のフォトンエネルギー,  $\gamma$  は反転分布減少因子 (四準位レーザーは “1”),  $\sigma$  は誘導放出断面積である。また,  $\tau_c$  は共振器寿命で, 光の共振器往復時間  $t_r$  と Q スイッチが開いた際の共振器内部残留損失  $\delta_{\min} (=L_i - \ln R)$  により決まる ( $R$  は出力鏡反射率,  $L_i$  は共振器残留損失)。さて, (2) 式からパルス幅はただちに共振器長に比例するため, 従来のパワーレーザーに比べ極端に短い共振器内に可飽和吸収体 (SA) を配置した受動 Q スイッチによるマイクロチップレーザーは, 従来の Q スイッチレーザーで限界とされていたパルス幅から大幅に短くできる。しかし, 単に共振器を短くしただけであれば出力も下がり, パルス幅が短くとも尖頭値において点火に求められるメガワット ( $10^6$  W) を超える出力は望めない。そこで (1) 式を踏まえ,

- 1) 初期透過率  $T_0$  を下げる (初期反転分布  $N_i$  増大)
- 2) 反射率  $R$  を下げる (残留損失  $\delta_{\min}$  影響減)
- 3) 励起面積  $A_{\text{eff}}$  を広げる (出力増大)
- 4) 励起パワーを上げる (発振しきい値増大)
- 5) 準 CW 励起とする (励起に伴う熱負荷低減)

などの戦略を採用した<sup>(5)</sup>。これにより, レーザで求められる輝度を改善できる。例えば半導体レーザーをレンズで集めてファイバー伝送する場合, 集光はできるものの輝度 ( $B=P/(M^2\lambda^2)$ ) は向上しないため直ぐに発散する<sup>(6)</sup>。一方, ファイバー端に Nd:YAG/Cr:YAG マイクロチップレーザーを配置するならジャイアントパルスが容易に得られるため, 輝度にして数桁向上できる。このようなレーザー素子を実現する手法として, 光の波長程度のマイクロドメイン制御を開発し, レーザセラミックスの高度化, さらには, 常温接合により高輝度レーザーを小型集積化する事を試みた。

### 2.1 レーザ点火

高強度レーザーによるエンジン点火は, そもそも 1963 年に遡る。しかしながら最近まで, その様な高強度レーザーは大形で大電力を要した。それでもレーザー点火は 19 世紀から続く電気火花点火方式の限界を超えた強力点火が可能で, 低燃費, 低排出が望める高圧縮, 高過給, 希薄燃焼などの理想的な燃焼が

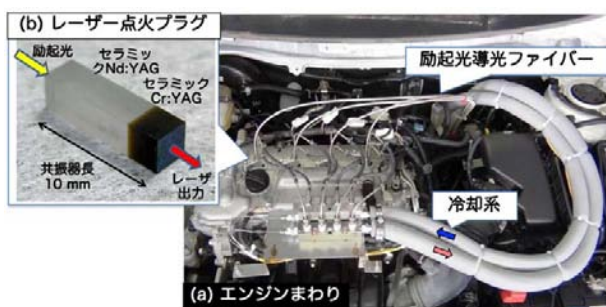


図1 (a) レーザ点火システムを搭載した 1.8L 直列 4 気筒ガソリンエンジンの外観, (b) 点火用マイクロチップレーザー

望めるため, 次世代の革新的省エネ技術として開発が期待されている<sup>(7)</sup>。図 1 に示す Nd:YAG/Cr:YAG セラミックスによる高輝度マイクロチップレーザーでは, パルスエネルギー 2.4mJ をパルス幅 700ps で得る事ができる。そこでこれを 4 式, 1.8L 直列 4 気筒ガソリンエンジンに搭載し, 世界で初めてのレーザー点火による自動車の自走実験を試み, 成功した<sup>(8)-(10)</sup>。この意義は大きく, 高強度レーザーの議論をマイクロチップレーザーに展開する試みが為されるようになった。

### 2.2 レーザピーニング, フォーミング

材料の表面に水膜がある状態で短パルスレーザーを照射すると, 材料表面がアブレーションされるのだが水の慣性でプラズマの膨張が妨げられるため, 狭い空間にレーザーのエネルギーが集中する (図 2)。その結果, プラズマのピーク圧力は数 GPa に達する。この圧力で材料の表層部は局所的な塑性変形を受け周囲に伸展しようとするが, 材料内部の未変形部分の拘束により伸展できず, 表面に高い圧縮残留応力が形成される。このレーザーピーニングには, 通常, 100mJ 以上のパルス幅数 ns のレーザーが利用されるが, 大型で不安定だったため利用が限られていた。

ところで, マイクロチップレーザーではより短いパルス幅が望めるため, 例えば出力が 5mJ でもパルス幅が 400ps の場合, そのプラズマ圧力は 12.5GPa にも達する。さらに, 材料厚が薄い場合は伸展する力に逆らえず変形するものでこれをピーンフォーミングと呼ぶ。(図 3) に, マイクロチップレーザーにより変形した厚み 200 $\mu$ m のアルミ板を示す。

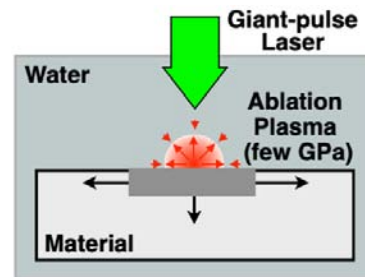


図2 レーザピーニングの原理



図3 マイクロレーザーによるピーン・フォーミング

### 3. マイクロフォトニクスによる小型集積レーザー

#### 3.1 常温接合による新たなレーザー構造

ただ、マイクロチップレーザーの高出力化には励起に伴い増加する発熱に起因した熱問題の処理が必要になる。そこで熱伝導率の高い透明材料を YAG に接合する必要があるが、焼結接合は昇温プロセスであるため異種材料の接合は困難である。そこで真空中で高速原子ビームを照射することで材料表面を活性化させ、その状態で物質を合わせることで僅かなアモルファス層を介して接合する常温接合装置を開発し、線膨張係数の異なるサファイアと YAG の直接接合、さらにコーティングを介したチップの接合にも成功した (図 4)。表面活性接合により可能となった繰り返し透明高熱伝導率材料でレーザー媒質を挟み込む分布面冷却 (Distributed Face Cooling, DFC) 構造による小型集積レーザー (TILA; Tiny Integrated Laser) の構成を図 5 に示す<sup>(11),(12)</sup>。出力結合鏡の透過率を 40% とし、DFC チップ間に初期透過率 30% の  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG を配置し、受動 Q スwitch として動作させたところ出力 21mJ そして最近では 31mJ, 670ps が得られた。尖頭値で 40MW に達する。図 6 にこのマイクロチップレーザーをロボットアームの先端に取り付け発振させている写真を示す。尖頭出力が 40MW にも至る高強度光の場合、ファイバー伝送は不可能なので複数のガルバノミラーを用いて空間伝送するしか無い。このためビームデリバリが盛んに議論されてきた。しかし、kW 程度の低出力半導体レーザー光をロボット先端のチップで圧縮し、数 10MW の高強度光に変換するなら問題は一切無くなる。ただ、Q スwitch エネルギー増大のために発振断面積を広げても通常共振器構成では出力光のビー

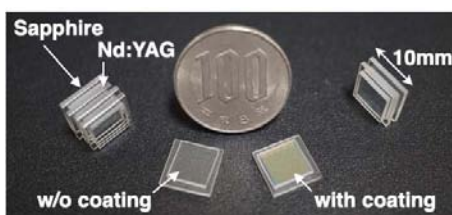


図 4 異種材料ヒートシンクを常温接合したレーザーチップ (写真は Aug. 15<sup>th</sup>, 2016).

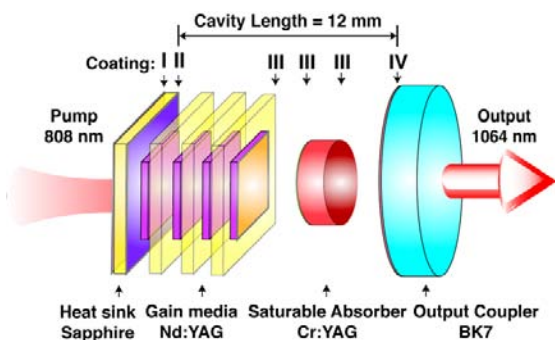


図 5 DFC チップによる受動 Q スwitch レーザ



図 6 ロボットアーム先端に搭載の TILA

ム品質の劣化を招く。図 6 のレーザーでは  $M^2 > 10$  にもなり、輝度は劣化するためレーザーピーニングなど、広い面積でのレーザー処理の場合は問題ないが、エンジン点火や微細孔加工など小さな集光スポットを求める応用には適さない。

#### 3.2 不安定共振マイクロレーザー

通常共振器で大出力化のためにレーザー発振領域を拡大しても高次モード発振に繋がるだけである。そこで、不安定共振器構成を採用した (図 7)<sup>(13)</sup>。この場合、パルスエネルギー 13.2mJ, パルス幅 476ps と尖頭値で 27.7MW が得られるも、プロファイルはドーナツモードとなり  $M^2=6$  程度に留まった。ただ、興味深いのは大気中で集光しブレイクダウンに至る閾値エネルギーをマイクロ MOPA<sup>(14)</sup> ( $M^2=1.3$ ) と比較したところ、遜色ない結果が得られた。そこで集光領域でのプロファイルを測定したところ、実効的には  $M_{\text{eff}}^2=1.2$  と同程度の極めて細い光が確認された (図 8)。当然ながら回折光であるためサイドピークが見られるが、主ピークは細く焦点深度も基本ガウシャンビームの 4 倍長かった。これは、アキシコンレンズを介した集光ビームが細く、かつ長い焦点深度を有するためにアスペクト比の高い微細孔加工に注目されているのと同じで、不安定共振器では、その様なレーザー光を共振器から直接発生できた。

そこで輝度につき、 $B=P/(M^2\lambda)^2$  として、これまで報告された輝度と合わせて図 9 に示した。マイクロチップレーザー単体での出力が 10mJ 以上になると  $M^2$  が急激に悪くなることから、輝度  $B=67.2\text{TW}/\text{sr}\cdot\text{cm}^2$  は、先の DFC チップレーザーよりも高くなる (図 9 [g])。高出力化のため単にレーザーの発振モードを

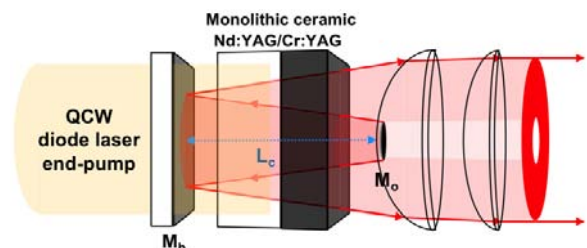


図 7 不安定共振器マイクロレーザー



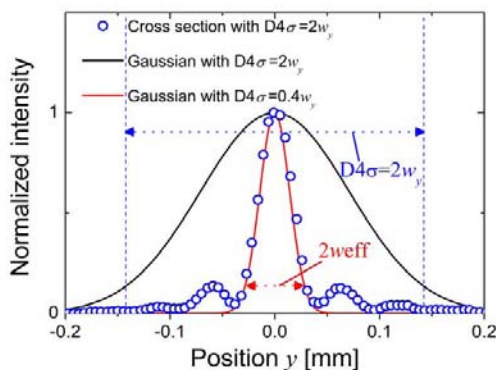


図8 不安定共振器マイクロレーザー

広げること、高次モードを励振するためにビーム品質が劣化し、必ずしも輝度向上には寄与しない。これに対し、不安定共振器ではドーナツモードとなるために  $M^2=6$  と決して小さくならないが、安定共振器に比べると輝度で勝ることが分かった。さらに興味深いのは、集光付近で現れる中心モードに着目するならば、この領域に集まるエネルギーは全体の30%でしか無いが、 $M_{\text{eff}}^2=1.2$  であるため相当するエネルギーは  $E_{\text{eff}}=3.96\text{mJ}$  と小さいものの輝度にして  $B=504\text{ TW/sr}\cdot\text{cm}^2$  と大幅に向上する (図9 [h])。さらに焦点深度は通常のガウシアン光に比べ4倍と長いためにアスペクトの高い動作が可能となる。

ところでこのレーザーは、励起に伴う量子欠損由来の発熱のため繰り返し周波数は  $10\text{Hz}$  と低い。サファイアやダイヤモンドなど高熱伝導率材料との常温接合により、さらなる高エネルギー化、高繰り返し化が望めると考えている。

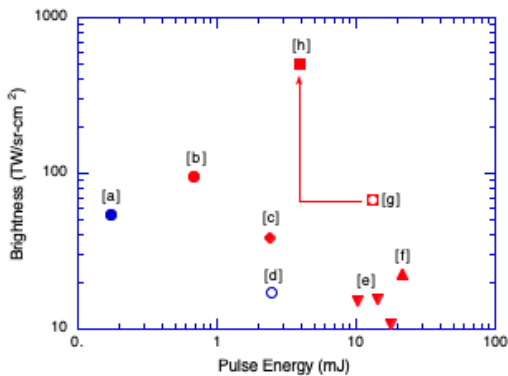


図9 各種マイクロレーザーの輝度とパルスエネルギー

### 5. まとめ

まず、セラミック Nd:YAG/Cr:YAG マイクロチップレーザーによるエンジン点火、レーザーピーニングなどを紹介したが、出力不足も指摘された。それが最近では常温接合法の開発や共振器の見直しなどによりマイクロチップレーザーの性能は著しく向上し、基本モードと等価な集光性で数  $10\text{mJ}$  程度のサブナノ秒パルスがワンチップの小型集積レーザー (TILA) 構成で望める様になった。これにより非常に小型で低

消費電力の強力な TILA によるレーザー加工、非破壊計測からロケットや航空機のエンジン点火も検証され自動車・移動体に新たな可能性をもたらしつつある。ただ、排熱特性を高めても高出力化のためには発振モードを広げる必要があり、ビーム品質が劣化し必ずしも輝度向上とはならない。一方、共振器を安定共振器から不安定共振器に変えることで高次モードの励振を抑えながら発振モードを拡大できることが確認された。さらには集光付近の中心光はガウシアン光に比べ4倍も長い焦点深度と  $B=0.54\text{ PW/sr}\cdot\text{cm}^2$  に至る非常に高い輝度が得られることが分かった。今後、共振器の最適化により、その特性向上が見込まれており、小型集積レーザーは、レーザー利用に新たな道を拓くと期待される。

### 謝辞

本研究の一部は革新的研究開発推進プログラム ImPACT における「ユビキタス・パワーレーザー」、JST 未来社会創造事業 JPMJMI17A1 の支援を得て行われた。また実験に協力頂いた分子科学研究所の A. Kausas 研究員、L. Zheng 博士、V. Yahia 博士及び川崎泰介研究員、佐野雄二 PM と各種モジュールおよび接合装置の設計・製図を行って頂いた装置開発室の水谷係長、近藤技官、さらに関わって頂いた多く皆様に感謝する。

### 参考文献

- (1) [https://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2017/press.html](https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2017/press.html)
- (2) S. W. Jolly, N. H. Matlis, F. Ahr, V. Leroux, T. Eichner, A.-L. Calendron, H. Ishizuki, T. Taira, F.X. Kärtner, and A. R. Maier: Nature Commun. 10, 2591 (2019).
- (3) C.クリステンセン(翔泳社, 2001, 2004).
- (4) 平等拓範, 先端固体レーザー, レーザー学会編(編集分担), ISBN-13:978-4274211249 (オーム社, 東京, 2011), pp. 97-147.
- (5) [b] H. Sakai, H. Kan, and T. Taira, ">1 MW peak power single-mode high-brightness passively Q-switched Nd<sup>3+</sup>:YAG microchip laser," Opt. Express, 16(24), 19891-19899 (2008).
- (6) 平等拓範, "レーザービーム品質測定の基礎," レーザー研究, 26(10), 723-729 (1998).
- (7) D. Graham-Rowe, "Lasers for engine ignition," Nature Photonics 2, 515 (2008).
- (8) M. Tsunekane, T. Inohara, A. Ando, N. Kido, K. Kanehara, and T. Taira, "High peak power, passively Q-switched microlaser for ignition of engines," IEEE J. Quantum Electron., 46(2), 277-284 (2010).
- (9) T. Taira, S. Morishima, K. Kanehara, N. Taguchi, A. Sugiura, and M. Tsunekane, "World first laser ignited gasoline engine vehicle," presented at the First Laser Ignition Conference (LIC) (2013).
- (10) 平等拓範, "マイクロドメイン制御によるハイパ

- ワーレーザー材料," 応用物理, 85(10), 863-869 (2016).
- (11) L. Zheng, A. Kausas, T. Taira, "Drastic thermal effects reduction through distributed face cooling in a high power giant-pulse tiny laser," *Opt. Mater. Express*, 7(9), 3214-3221 (2017).
- (12) [f] L. Zheng, A. Kausas, T. Taira, ">30 MW peak power from distributed face cooling tiny integrated laser," *Opt. Express*, 27(21), 30217-30224 (2019).
- (13) [e],[g] H. H. Lim and T. Taira, "High peak power Nd:YAG/Cr:YAG ceramic microchip laser with unstable resonator," *Opt. Express*, 27(22), 31307-31315 (2019).
- (14) V. Yahia and T. Taira, "High brightness energetic pulses delivered by compact microchip-MOPA system," *Opt. Express*, 26(7),8609-8618 (2018).
- (15) (a) J. Dong, K. Ueda, A. Shirakawa1, H. Yagi, T. Yanagitani, and A. Kaminskii, " Composite Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG ceramics picosecond microchip laser," *Opt. Express*, 15(22), 14516 (2007).
- (16) [c] N. Pavel, M. Tsunekane and T. Taira, "Composite, all-ceramics, high-peak power Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG monolithic micro-laser with multiple-beam output for engine ignition," *Opt. Express*, 19(10), 9378-9384 (2011).
- (17) [d] O. Sandu, et al., *Quantum Electron.* 42, 211 (2012).
- (18) 社会連携研究部門, TILA コンソーシアム  
[https://www.ims.ac.jp/news/2019/04/01\\_4294.html](https://www.ims.ac.jp/news/2019/04/01_4294.html)