

2023年2月9日

報道関係者各位

国立大学法人筑波大学

国立大学法人九州大学

液体でできた微小なレーザー光源の開発に成功 ～大気中で安定かつ気流で形状を制御可能～

電気や光を研究する分野では、曲げたり折ったりできる柔らかいデバイスが注目を集めています。従来、こういった柔らかいデバイスの素材には主にプラスチックが利用されてきましたが、その柔らかさには限界があります。本研究では究極の柔らかさを持つ素材として液体に着目し、100%液体でできたレーザー光源の開発に成功しました。

レーザーを構成する要素の一部に液体を利用したデバイスはすでに存在しています。しかしながら、レーザーを生み出す容器が硬い固体でできているため、柔らかさを備えることはできません。レーザーを生み出す容器も液体で作ろうとする試みはありましたが、大気中で安定に利用できる真球形状の微小な液滴の作製が難しく、実現には至っていませんでした。

本研究では、室温イオン液体を用い、超撥水性表面を持つ基板上で、液滴を形成する条件を最適化することで、これらの問題を解決しました。作製した微小な液滴は、基板上でほぼ真球の形状を維持できる上に、大気中でも蒸発が検知できないほど安定です。さらに、最も優れた有機マイクロ球体レーザーと同等の性能を示しました。液滴は極めて弱い力、例えば微風によって変形し、それに伴いレーザーの性能を調整できることも明らかにしました。インクジェットプリンターを利用すれば、多数の液滴からなるアレイの作製も可能です。本研究は安定な液体レーザーデバイスを構築するための基本的な材料戦略を提供するものであり、新たな柔らかい光デバイスの実現につながると期待できます。

研究代表者

筑波大学数理物質系

山岸 洋 助教

山本 洋平 教授

九州大学大学院システム情報科学研究院

吉岡 宏晃 助教

研究の背景

電気や光を研究する分野では、曲げたり折ったりできる柔らかいデバイスが注目を集めています。デバイスが柔らかくなれば、人の体に貼り付けたり体の中に埋め込んだりすることができる上に、デバイスを変形させることで機能を変化させることも可能になります。従来、このような柔らかいデバイスの素材としては、主にプラスチックが利用されてきましたが、その柔らかさには限界がありました。この限界を打ち破るための有望な素材として、液体に注目が集まっています。実際、レーザーを構成する要素の一部に液体を利用したデバイスはすでに存在しています。例えば最もよく知られているものでは、レーザー光を生み出す容器（光共振器）^{注1)}の内部に置かれる発光材料に液体が利用されています。ただし、このタイプの装置では、レーザーを生み出す容器が硬い固体でできており、柔らかさの点では課題がありました。

そこで、レーザーを生み出す容器も液体で作ろうとする試みが行われています。そのためには、光が漏れ出さないよう、真球の形状を持つ、直径数マイクロメートルほどの微小な液滴を作製することが不可欠です。しかしながら、特に、基板上で真球の液滴を作製すること、また、液体の蒸発を防ぐことが難しく、大気中で安定して利用できる微小な液滴を得ることは困難でした。例えば、グリセリンなどの水よりもはるかに蒸発しにくい有機物の液体でさえ、微小な液滴にすると数十分から数時間ほどで蒸発してしまいます。また、一般的な不揮発性の液体より更に不揮発な液体、真空状態でも蒸発しない液体である、シリコンオイルやイオン液体^{注2)}の場合は、表面張力が小さく、超撥水基板を用いても半球の形状しか作製することができませんでした。

研究内容と成果

本研究では、大気中で安定して働く 100%液体でできたレーザー光源の開発に成功しました。不揮発性のイオン液体のうち、比較的表面張力が大きなイミダゾール塩を選び、フッ素化した微粒子を塗布した基板上へ滴下しました。過去の研究と同様に、通常の滴下手法では接触角^{注3)}が十分に大きくなり、半球状の液滴しか形成しません。そこで、滴下する際の水滴の落下速度を抑え、かつ液滴を十分に小さくした状態で滴下すると、接触角が大きくなり、真球に近い形状の液滴を生成することができました（図1）。実験から明らかになった接触角の分散と理論的な考察を合わせて、このとき実現される接触角が準安定状態であることを明らかにしました。このようにして得られた液滴は、大気中でも1ヶ月以上にわたって安定で、その蒸発速度は顕微鏡や光学的な測定では検出できないほど抑えられていました。また、基板に強く吸着し、基板を垂直に立てたり振動させたりしても、落下や移動は生じません。

この液滴にレーザー色素を添加してレーザー光源としての機能を調べたところ、およそ $1 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ という、最も優れた有機マイクロ球体固体レーザーと同等のしきい値^{注4)}でレーザー発振することが分かりました。液滴は極めて弱い力、例えばごく微量な空気の流れによって変形し、それに伴ってレーザー発振波長が変化します。この変化量は風速によって変化させることができます（図2）。また、風による液滴変形のシミュレーション^{注5)}、および変形した液滴内部における電磁場のシミュレーション^{注6)}から、風速による液滴変形の計算結果、および変形によるレーザー波長変化の計算結果が実験結果と符合することを明らかにしています。さらに、同様の滴下方法をインクジェットプリンターで実現する手法を開発しました。これにより、一定の大きさの液滴を、素早く大量に決まった位置に作製することができます（図3）。

今後の展開

液体は、形や位置が定まらないことから、光デバイスとしての利用は限定的でした。本研究で開発した手法により、安定な液体レーザーデバイスを構築することができる上、変形や外部刺激応答性といった液体本来の性質を十分に発揮することができます。この性質はレーザー光源およびセンシングデバイスとして有用であり、新たな柔らかい光デバイスの実現につながると期待できます。

参考図

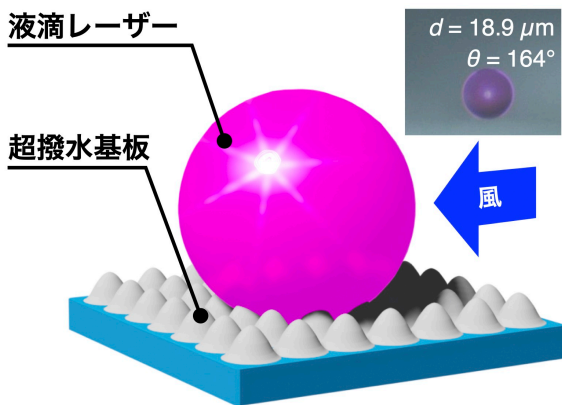


図1 超撥水基板表面に形成した液滴レーザーに風があたっている状態の模式図。直径(d)18.9 マイクロメートル、接触角(θ)164° の真球に近い形状をもつ大気中で安定な液滴を形成した。

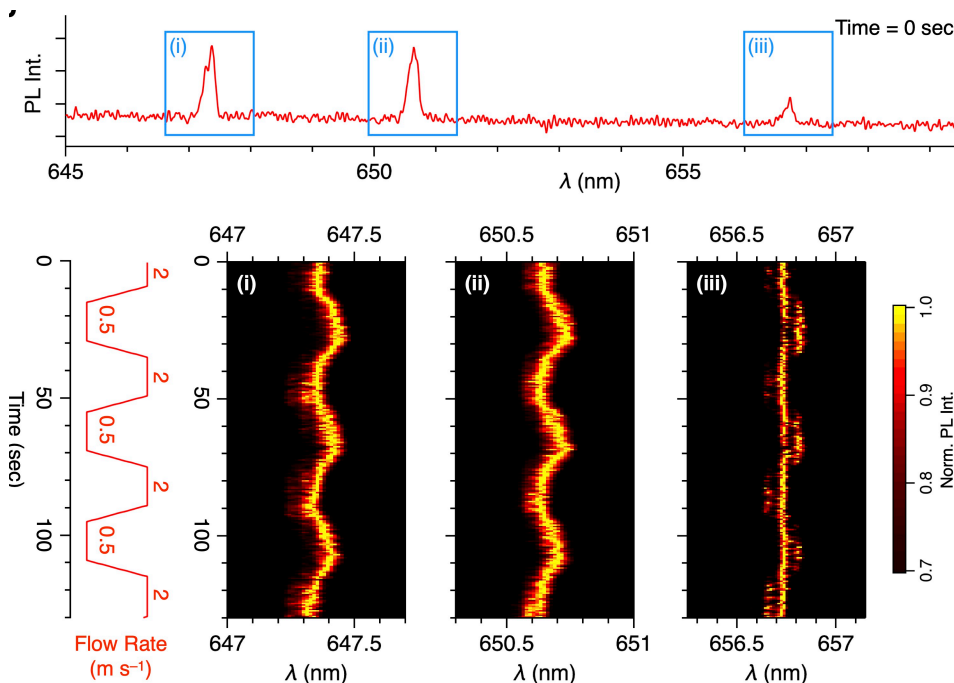


図2 微小な気流の変化（液滴の変形）に対するレーザー発振波長の変化。液滴の発光スペクトル（上図）にはレーザー発振を示す鋭いピークが現れている。液滴に0.5と2 m/sの風を交互に当てながら、それぞれのピーク(i)-(iii)の波長変化を観測したところ、強い風を当てた（より大きく変形した）ときにレーザーピークが短波長側へシフトしていることが分かる（下図）。

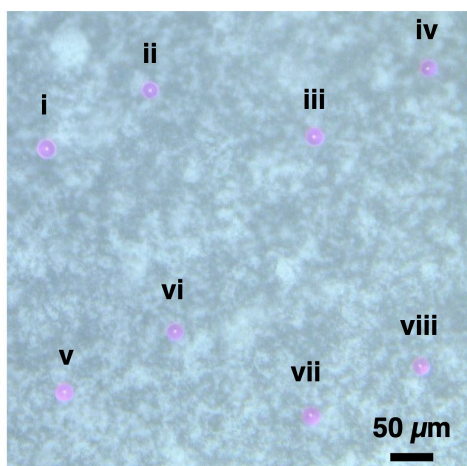


図3 インクジェットプリンターによる液滴の配置を制御した液滴の光学顕微鏡写真。レーザー光源として働く8つの液滴 i-viii（ピンク色部分）が生成している。

用語解説

注1) 光共振器

光を閉じ込めることのできる微小な容器。合わせ鏡や球体といった特殊な形状を持つ物体で構成される。レーザー光を生み出す装置の重要な部品の一つ。

注2) イオン液体

プラスとマイナスの電荷をもつ分子で構成される物質のうち、室温付近で液体のもの。極めて蒸発しにくいなど、通常の液体とは異なる特性を示す。

注3) 接触角

液滴の縁において液面と基板がなす角度。接触角が大きくなるほど液滴の形状が真球に近づく。

注4) しきい値

発光する物質に強力なエネルギーを与えると、レーザー光を生み出すことができるが、その下限のエネルギーの値。九州大学大学院システム情報科学研究所に所属する吉岡宏晃助教らの協力のもとで実施した。

注5) 風による液滴変形のシミュレーション

Computational Fluid Dynamics (CFD, 数値流体力学)シミュレーションをもちいた流体力学の計算手法。国立研究開発法人産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門において、高田尚樹上級主任研究員らの協力のもとで実施した。

注6) 変形した液滴内部における電磁場のシミュレーション

Finite-Difference Time-Domain (FDTD)法をもちいた電磁気学の計算手法。Leibniz Institute of Photonic Technology において、Prof. Jer-Shing Huang らの協力のもとで実施した。

研究資金

本研究は、JST 戦略的創造研究推進事業 (ACT-X、CREST)、科研費、他の研究プロジェクトの一環として実施されました。

掲載論文

【題名】 Pneumatically tunable droplet microlaser
(気流で制御可能な液滴レーザー)

【著者名】 Hiroshi Yamagishi*, Keitaro Fujita, Junnosuke Miyagawa, Yuya Mikami, Hiroaki Yoshioka, Yuji Oki, Naoki Takada, Soumei Baba, Shimpei Saito, Satoshi Someya, Zhan-Hong Lin, Jer-Shing Huang, and Yohei Yamamoto*

【掲載誌】 Laser & Photonics Reviews

【掲載日】 2023年2月7日

【DOI】 10.1002/lpor.202200874

問い合わせ先

【研究に関すること】

山岸 洋 (やまぎし ひろし)

筑波大学数理物質系物質工学域 助教

URL: https://www.ims.tsukuba.ac.jp/~yamamoto_lab/index.html

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp

九州大学広報室

TEL: 092-802-2130

E-mail: koho@jimu.kyushu-u.ac.jp