

ナノ結晶粒子 LD 励起ランダムレーザー

Yang FENG^{*,***}・植田 憲一^{*,**}

Laser-Diode Pumped Nano-Crystalline Powder Random Laser

Yang FENG^{*,***} and Ken-ichi UEDA^{*,**}

We have proposed a one-mirror scheme for reducing random laser threshold, and demonstrated lasing in Nd:YAG nano-crystalline powder by quasi-continuous-wave laser diode pumping. Beside threshold behavior and substantial spectral narrowing, persistent irregular pulsing was also observed. We show random laser is not “random” actually; it is also a deterministic process of light confinement and excited ion population dynamics as a conventional laser. Pushing the idea further we have also demonstrated a microchip-type laser with multiple scattering from powder as necessary feedback.

Key words: random laser, nano-crystalline powder, Nd:YAG, ceramic, QCW LD-pumping

ランダムレーザーとは、通常は損失因子である散乱が多重散乱の干渉で加算的に強くなって光の増幅が生じ、散乱体中でレーザー発振が可能になるものである。レーザー励起が可能になってはじめて実現が可能になり、近年になって注目されるようになってきた¹⁻¹⁵⁾。干渉効果を見捨てる、乱雑な構造をもった物質中の光の伝播は拡散公式で表現できる。30年以上前、Letokhov¹⁶⁾らは、利得をもった散乱系で光放出に不安定性が出現することを、はじめて理論的に予想した。非常に強い散乱と干渉が働く系では、コヒーレントな光のフィードバックによるレーザー発振が可能となる。1999年、Caoらは、コヒーレントフィードバックによるランダムレーザーの実験的報告を最初に行った²⁾。いまではレーザー結晶粉末^{10-12,15,17)}、色素添加マイクロ粒子⁵⁾、ZnO微粒子^{2,18)}、散乱の多い穀物^{19,20)}、など、さまざまな材料でランダムレーザーは観測される。しかし、レーザー発振メカニズムについては、いまでも多くの議論がある⁶⁾。まだ未解明の基本的な疑問点があることは事実だが、現実にレーザー発振をして、応用提案も議論されてきた。それらの中には、蛍光体への応用から平面ディスプレイ、さらにはセンサーとして有望だというものもある

る^{1,3,12,21)}。

1. 1枚ミラー付きランダムレーザー

現実のランダムレーザーの発振閾値は高く、応用提案の実現を妨げてきた。その理由は、微小な粒子で作ったランダム共振器を効率よく励起するのが困難だからである。これまで研究は、ほとんど光学励起を使ってきた。ランダムレーザー中では、レーザー光と同様に励起光もやはり強く散乱される。強い散乱のため、試料に照射した励起光は深く侵入することができず、表面近傍が強く励起される結果となる。いいかえると、試料表面層に利得が限定される。この場合、利得領域と空間的重なりがあるレーザー発振モードも大きな損失を避けられず、発振閾値が非常に高くなる結果を招いていた。

筆者らは、励起光の入射面に高反射ミラーを付けると発振閾値を大きく低減できるという提案を行った²²⁾。用いるミラーはレーザー波長で高反射率、励起波長で高透過率のダイクロイックミラーである。この場合、低損失のレーザーモードはミラーと利得粉末の境界層の近くに存在する。強く励起された領域とレーザーモードはよい重畳条件とな

* 電気通信大学レーザー新世代研究センター (〒182-8585 調布市調布ケ丘1-5-1) **E-mail: ueda@ils.uec.ac.jp

*** 現所属: The European Southern Observatory (Karl-Schwarzschild-Str. 2, Garching, bei Munchen, D-85748 Germany)

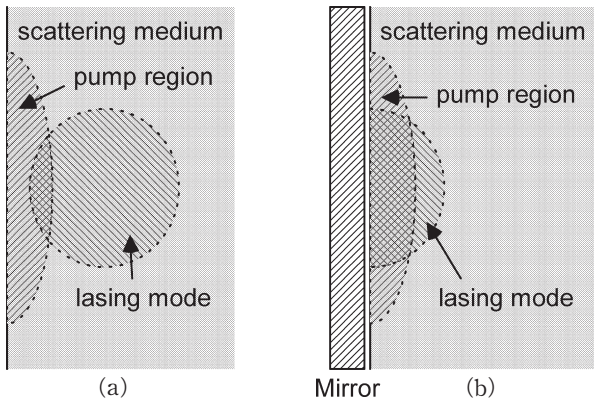


図1 1枚ミラー付きランダムレーザーの概念図。(a) ミラーなしの場合、(b) ミラー付き。ミラーを配置することでレーザー体積と励起体積の重なりがよくなる。(c) ミラーがある場合のコヒーレント後方散乱の概念図。コーティングに垂直入射した光は、完全に同じ光路を通過して反射する。往復する光の干渉効果によって、閉じたループが形成されやすくなる効果が期待される。

り、図1のようにレーザー発振のための条件がよくなる。このように高反射率ミラーで半閉鎖系となった状態の固有モードの構造は、全開放系とは異なってきて、ミラー反射とコヒーレント後方散乱の組み合わせの結果、より減衰率の低いモードが存在できるようになる²³⁾。コヒーレント後方散乱は双方向に伝播する光の波の干渉効果で、ちょうど後方散乱の方向に光が強くなる結果を生む。これも弱い光の局在効果だと考えられている²⁴⁻²⁶⁾。利得をもった散乱媒質の前面に反射鏡を配置すると、後方散乱光は散乱媒質に向かって反射して、再び利得を得ることができる。特に、反射鏡に垂直入射した光が正反射して戻るときには、散乱体の中にもまったく同じ閉ループが形成される可能性が高くなって、ランダムレーザーの発振閾値が大幅に低下すると期待できる。

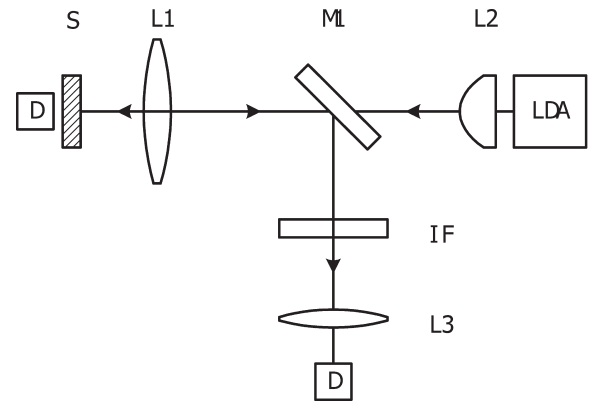


図2 実験配置図。LDA：LDアレイ、L1、L2、L3：レンズ、M1：ダイクロイックミラー（808 nm 高透過率、1064 nm 高反射率）、S：タブレット散乱体試料、D：検知器。

2. ランダムレーザーの発振実験と結果

実験で用いた1枚ミラー付きランダムレーザーの場合、粉末状レーザー材料をプレス加工して作ったタブレットと誘電体多層膜ミラーを使った。粉末タブレットは、神島化学から提供されたNd濃度4 atm%のナノ結晶パウダーをプレスして $\phi 16 \times 3 \text{ mm}^3$ の大きさに固めたものである。完全化学合成で作ったナノ結晶パウダーは、平均粒径が250 nmであった。粉末ペレットとYAGセラミックスの質量密度の比較から見積もった体積比率は50%である。YAG結晶の屈折率は1.82なので、粉体そのものは光子局在条件からは外れている²⁷⁾。ダイクロイックミラーは誘電体多層膜製で、レーザー波長の1064 nmで反射率99.5%、励起波長の805 nmの透過率は90%であった。反射バンド幅は10 nmである。多層膜がコートされた側に粉末タブレットを配置して、両者をきちんと圧着させた。図2に示したように、励起には浜松ホトニクス製QCW-LDアレイを用い、励起ビームはミラー側から試料を照射し、直径0.5 mmのスポットに集光した。集光点で測定した最大ピーク強度は150 Wであった。これは 76 kW/cm^2 の集光強度に相当する。

QCW-LDアレイは電流パルス制御によってパルス幅が調整可能で、通常は矩形パルスが発生する。4%濃度Nd:YAGレーザーのレーザー発振上準位寿命 $80 \mu\text{s}$ を考慮すれば、エネルギー蓄積が十分なパルス励起もできるし、より長いパルスで準定常状態の発振も実験が可能となる。

ミラーを付けないで、タブレットのみを照射した場合は、レーザー発振は観測されなかった。一方、ミラーと粉末タブレットを組み合わせた1枚ミラー付きランダムレーザーの構成にすると容易にレーザー発振が観測され、発振閾値はピークパワーで 30 kW/cm^2 以下と非常に低い

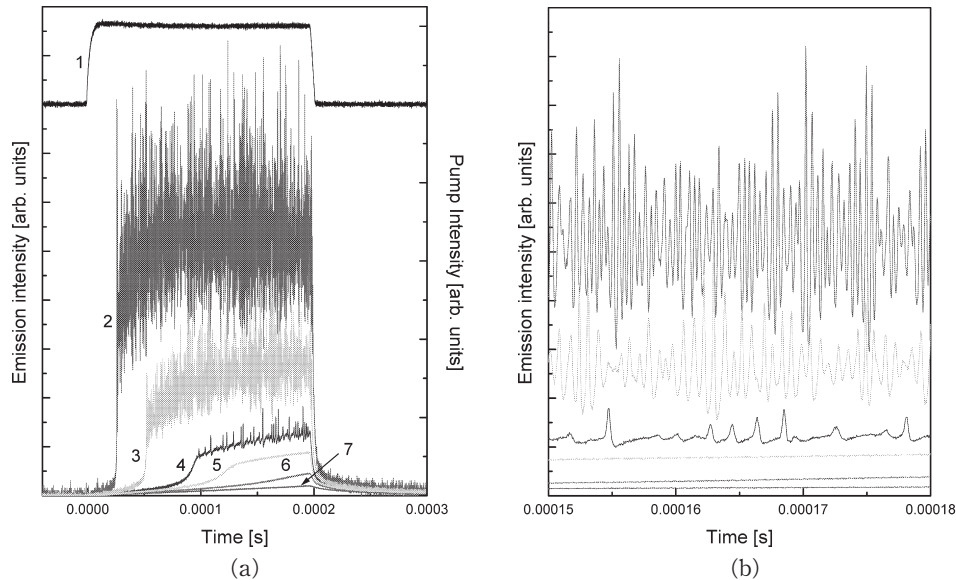


図3 ランダムレーザーの発光波形とレーザー発振。(a) 1: 励起パルス波形, パルス幅 $200 \mu\text{s}$, 立ち上がり, 立ち下がり $3 \mu\text{s}$ の矩形波形, 2~7: 励起パワー 156, 106, 81, 68, 53, 48 W に対応する典型的な発光波形, (b) レーザー発振パルスの拡大波形。

値であった。図3に典型的な発光波形を示した。下から順に $48, 53, 68, 81, 106, 156 \text{ W}$ の励起を行った場合に相当する。この実験で用いた励起パルスは、パルス幅 $200 \mu\text{s}$, 立ち上がり, 立ち下がり時間がおおよそ $3 \mu\text{s}$ の矩形パルスである。励起パワーが 50 W 以下では、励起時間中、発光は緩やかに増加するが、レーザー発振は観測されない。励起パワーをさらに大きくすると、スパイク状のパルスが観測されるようになる。発光強度は高いレベルにジャンプし、その後、緩やかに増加する傾向が現れる。発光の状態の変化に要する時間は、励起パワーに依存し、高励起をすると直ちに状態が変化する。

これまでのところ、2種類の発光相が観測され、以下のように理解できる。第1相は一樣な強度増加を特徴とし、励起光による反転分布の蓄積過程である。反転分布量がある値を超えると、Letokhov¹⁶⁾らが最初に予想したように、光子増幅に起因する発光強度の不安定性が観測されるようになる。自然放出光の増幅(ASE: amplified spontaneous emission)はすぐに飽和して、発光強度は再び安定なレベルに戻る。これは、励起された増幅媒質の体積に対して、強い散乱で結合して形成される発振可能な閉ループの占める体積が極小であるランダムレーザーのひとつの特徴とみることができる。いわば、体積的な空間的ホールバーニングが生じる結果、レーザー発振が停止してしまうわけである。

さらに励起強度を上げると、不規則なパルス発振という別の様相が現れる。図3(b)には、その部分の波形を拡大

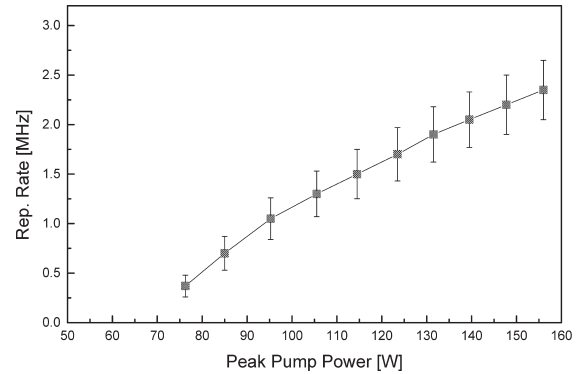


図4 1枚ミラー付きランダムレーザーの励起パワーと繰り返し頻度の関係。

して示した。パルスの繰り返し頻度は励起光強度に比例して増加する。典型的なパルス幅も励起強度に依存しており、励起強度を最大である 150 W まで上げると $0.5 \mu\text{s}$ から $0.25 \mu\text{s}$ に短パルス化した。

繰り返し頻度と励起強度の関係を考えてみよう。必ずしも規則的でないパルスの繰り返し頻度を測定するには、1回の励起パルスに対するパルス頻度を、いろいろな時間間隔でパルス数をカウントし、さらに、同様の計測を繰り返して、その平均値を求めた。結果を図4に示したが、通常のレーザーにおける緩和発振を想起させる傾向を示した。緩和発振では、繰り返し周波数は励起強度の $1/2$ 乗に比例するという関係がよく知られている²⁸⁾。しかし、緩和発振のように、減衰振動の特徴はみられない。筆者らの見解では、このようなパルス発振の機構は単純な緩和発振で

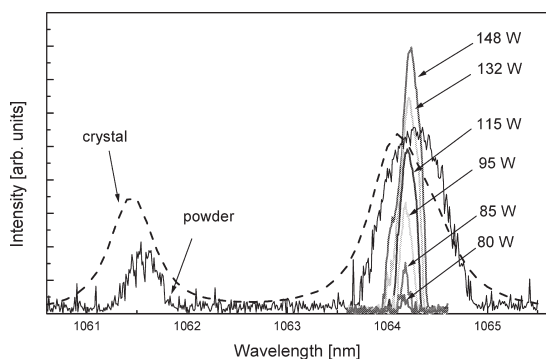


図5 ランダムレーザーの発光スペクトル。比較のために、ミラーを付けないパウダー試料と単結晶 Nd:YAG (室温) のスペクトルを示した。

はありえず、ランダムレーザーの閉ループ内で生じているさまざまな非線形効果、モード結合、利得飽和など、多くの過程が競合し、結合している複雑なプロセスが関係して、安定な共振器モードの存在を妨げ、CW 発振させないと考えている。ただし、大局的に見て、一定の発振体積中のエネルギー収支という点でいうと、緩和発振の振る舞いがみえてくるはずだと考えられる。

ランダムレーザーの発振をスペクトルの点からみてみよう。図5は、おのおの励起パワーが148, 132, 115, 95, 85, 80 W のときに測定された発光スペクトルである。ミラーをもたないパウダー試料と単結晶試料の室温発光スペクトルも比較対象として示した。パルス発光のスペクトルは、ファイバー入力型の光スペクトラムアナライザーで分光し、各測定スペクトル点についてピークホールド法でピーク蛍光強度を測定した。パルス発生は不規則で、パルス部分だけの時間分解スペクトルを測定するのが困難なので、パルスと平坦部を含めた平均スペクトルを測定した。細かいピークが見えるが、これは計測に使用したピークホールド法に起因する雑音であって本来の発光ではない。

単結晶と比べると、パウダー試料からの発光が長波長側にシフトしている。パウダー試料では実効的熱伝導係数が低いので、励起光による温度上昇が顕著で、スペクトルの温度シフトが観測されている¹⁵⁾。ミラーをもたないパウダー試料の場合でも、ASEの2つのスペクトルピーク、1064.2 nm と 1061.5 nm の比率に差が生じたのも特徴的である。ミラーを付けたパウダー試料からの発光を見ると、80 W の励起時に発光スペクトルの線幅は0.1 nm で、これは装置の分解能0.05 nm で制限された値である。自然放光の蛍光スペクトル幅は0.5 nm であるから、このような劇的な狭帯域はレーザー発振が起きていることの証拠となる。確認しておく、80 W 励起とは、パルス発生が観測される閾値よりわずかに強い励起条件である。

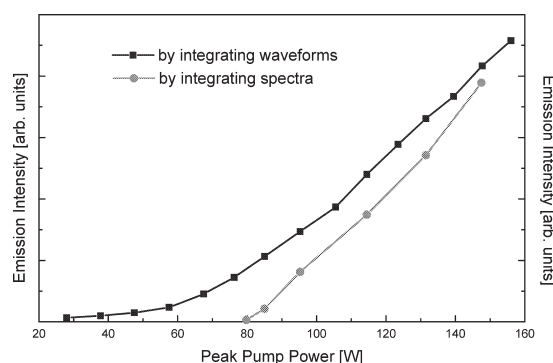


図6 発光成分の時間積分値と分光スペクトル積分値のピーク励起強度依存性。

図5をよく見ると、面白いことに気がつく。励起強度を上げていくと、当初は狭帯域化していた発光スペクトルが、やがて再び広がり出している。すでにレーザー発振によって十分に狭帯域化しているのに、さらに強い励起になると多くの並列共振パスが形成されるマルチモード発振が起これ、スペクトルが広がったと解釈できる。ランダムレーザーでは、レーザー発振のモードは異なった光路、異なった励起体積を利用しているので、温度が異なる閉ループを形成するとレーザー発振の中心波長がシフトする。通常の場合、均一なスペクトル広がりをもつ結晶レーザーではこのようなことは観測されない。むしろ、ガラスレーザーのように不均一広がりをもつレーザーで起こる現象である。

発光強度について、発光波形の間の時間積分値を測定した。結果は図6に示したとおりで、励起強度が弱いときには、非常にゆっくりと発光強度が増大する。ピーク励起パワーが70 W 程度になると、傾きが変わって、より急激な発光モードに移行したことがわかる。さらに励起を強くすると、その後は励起強度に対して直線的に増加する。これはレーザー発振がもつ特性のひとつであり、レーザー発振の証拠となる。次に、スペクトル領域を積分した発光強度も測定を行ったところ、より明確な結果が得られた。スペクトル積分値は80 W 励起までは観測できず、80 W に閾値が観測され、その後は直線的に増加した。通常のレーザー発振にみられる入力・出力曲線が観測されている。時間波形にみられる ASE 成分はどこに行ったのか、という疑問が生じるかもしれない。スペクトル計測に用いた光スペクトラムアナライザーは、入射部にコア径5 μm の単モード光ファイバーを装着しているの、空間フィルターの効果のために、ファイバーに完全平行なビームでないと伝播できない。この結果、ミラー装着部分から出力される並行レーザービームは光スペクトラムアナライザーで分光さ

れるが、ASEのような低コヒーレントな光は、分光器に入射できず、スペクトル積分の対象となるのはランダムレーザーのレーザー発振成分のみになる。逆にいうと、相当な空間的コヒーレンスをもった光だけが計測可能な計測を行うことで、発光成分のうち、パルス部分が真のレーザー発振であることを証明したことになる。

低励起条件ではスパイク状の発振パルスはまばらで、一見不規則にみえるが、ショットごとのばらつきは驚くほど少ない。図7の左側のデータは、別々の時間に測定されたパルス波形の例である。この図ではまったく独立に計測された波形が描かれているが、下から3本の波形は6秒間隔で計測され、4番目は3番目を計測した1分後に計測したものである。一見してわかることは、パルスの高さには若干のばらつきがあるものの、いずれの波形も非常に似ており、特にパルスの時間位置は非常に安定である。このことが意味するのは、スパイク状発振が偶然の結果ではなく、しっかりしたレーザー発振過程の結果だということである。もちろん、1分間の間隔をおいた4番目の計測の場合、連続した計測データとは少し違って別のスパイクも観測されるようになっているが、この程度の変化は当然であろう。

高励起にすると、スパイク間隔は密になってゆき、安定性はなくなってしまふ。図7の右図に違った時間の計測波形を示した。下から数えて3番目までの計測は6秒間隔で、4番目は1分間後の計測である。一見すると、よく似たパターンが発展しているようにもみえるが、現状では、複雑すぎて、簡単に解析できない。しかし、総合してみれば、いろいろ異なったサブシステム（モード）が互いに結合しあっていて、複雑な光子、反転分布、モード結合の結果、不安定性を誘起しているようにみえる。

細かいことを抜きにすると、以上の観測からいえることは、この実験におけるランダムレーザー現象は、Wiersmaら⁶⁾が提案したような幸運な長パス増幅によるものではない。たまたま、幸運に恵まれて長い閉ループができたという偶然性に起因したものではなく、もっとはっきりとした機構が背景になくは、このように安定な、そして定常的なランダムレーザー発振が実現されるはずはない。連続している発光パルスはほとんど同じものなので、これはランダム過程によるものではなく、通常のレーザーと同じく、光の閉じ込め効果と励起イオンによる反転分布間の相互ダイナミックに依存した決定論的な過程と考えるべきである。これは、1枚ミラー付きランダムレーザーによる実験によって筆者らが主張する重大な結論のひとつである。

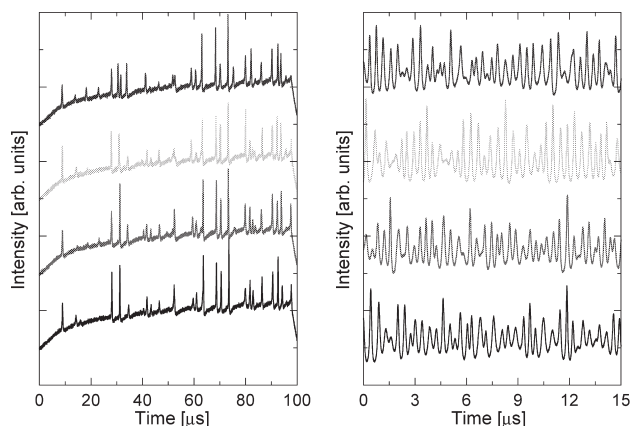


図7 スパイク状発振の時間波形。下から3番目までは6秒間隔、その後、1分後に計測した波形が4番目の波形。左は低励起条件、右は高励起条件で、励起強度に応じてスパイク密度は高密度化する。

3. ランダム/マイクロチップ複合レーザー発振

上記のような考えをさらに進めるために、筆者らは反射鏡のかわりに、利得をもったセラミックNd:YAGマイクロチップを置いた実験を行った。利得のあるアクティブミラーというわけである。マイクロチップレーザーには、2%濃度の1mm厚のNd:YAGセラミックレーザーを用いた。蛍光寿命は230 μ sであった。もちろん、マイクロチップレーザーの一面には高反射率コーティングを施した。このようにレーザー発振に必要なフィードバックにパウダーの多重散乱を使ったランダム/マイクロチップレーザーの発振実験は筆者らがはじめてではなく、すでに研究例がある²⁹⁾。1枚ミラー付きランダムレーザーと比較すると、マイクロチップ/ランダムレーザーでは均一な利得媒質部分のために効率よい励起が可能で、利得の大部分をマイクロチップ内で与えることができる。発振特性は図8のように、1枚ミラー付きランダムレーザーの約200倍の強度で観測され、発振閾値も60W以下と低い。ランダムレーザー単独と比べると、全発振パワー中でミラー方向に出力する割合は、マイクロチップレーザーの存在によって増強されているので、単純にレーザー発振に寄与する光子が200倍になったというわけにはいかない。スペクトルの計測結果からは、ランダムレーザー内におけるスペクトルの温度シフトが観測され、マイクロチップレーザーより熱効果の影響の大きいランダムレーザーのほうがスペクトルへの寄与分が大きかった。

物理的に面白いかどうかは別にして、このような構成は光学品質の材料が作れない材料を使った光源を作るための1つの方法を提供する。マイクロチップレーザーの部分は励起光を効果的に吸収して、より高い利得を与えるために

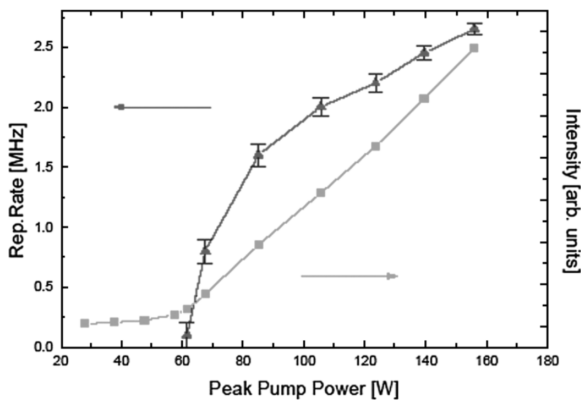


図8 ランダム/マイクロチップ複合型レーザーの発振特性。発振閾値は1枚ミラー付きランダムレーザーより低く、発振パルスの繰り返し頻度には急速な立ち上がりが観測された。

役立つ。パウダー部分は必ずしも利得をもつ必要はない。パウダー部分の役割は光のフィードバックを与えることで、マイクロチップ部分の品質が悪い場合にも、それに対応した閉ループが形成されるので、位相共役鏡的な働きが期待できる。この考えを発展させると、パウダーと均質なレーザー媒質のサンドイッチ構造に発展させることができる。その場合も、パウダー部分はフィードバックを、均質なレーザー媒質部分は利得を担当する。

4. まとめと将来

これまでの研究をまとめてみると、筆者らは最初に1枚ミラー付きのランダムレーザーがレーザーの発振閾値を大きく下げることができると提案し、次に、Nd:YAGのナノ結晶パウダーをQCW-LDで励起して実際に発振させることに成功した。パウダーだけでは発振が不可能なランダムレーザーが、1枚のミラーを接触させると容易に発振することを示し、筆者らの提案が正しいことを自ら証明した。ランダムレーザーの実験を通じて、ランダムレーザーは現実的にはランダムではなく、光子閉じ込めと反転分布、利得飽和というダイナミックな相互作用というきちんとした決定論的過程が積み重なって、レーザー発振に至ることを実験データを通じて示した。その意味では、通常のレーザーと変わるところがない。ただ、人工的に与えた光共振器の限られたモードの中で、発振に至るモードが選択されるのか、多重散乱が繰り返される複雑な競合過程の中で、発振モードが選択されるのかが違うだけである。われわれが知っている範囲内で選択されるか、さらに広い範囲から選択されるかは、物理的には意味がないことで、両者を本質的に区別する理由にはならない。その考えを推し進めて、単なるミラーを利得のあるミラーに交換して、パウダーの多重散乱をフィードバック源とするマイクロチップ

型のレーザーの発振にも成功した。規則的な散乱がスペクトルや空間的な応答を制御することができるというのがフォトニック結晶やフォトニックファイバーのアイデアである。それらの対抗軸として、乱雑構造のパウダーと規則的ナノフォトニック構造（今回の例では、誘電体多層膜、将来は、より複雑なフォトニック結晶）を組み合わせることが、新しい機能を生み出すことを予感させる結果である。いまは、きわめてシンプルな実験であるが、この種の複合的ランダムレーザーは、将来、重要な役割を果たすようになると考えている。

現在のところ、ランダムレーザーは、多重散乱、光子局在、局所的に増強された非線形現象など、物理学者の興味範囲にとどまっている。しかし、論文をみると、数多くの応用が提案されている³⁰⁾。光散乱過程を基礎にする光のフィードバック機構は、効果的な反射素子が存在しないスペクトル領域で、レーザーを実現するときに役に立つだろう。

今日までのランダムレーザーは、ほとんどが光学励起型レーザーである。フラットパネルディスプレイ、自動車や飛行機のcockpitの表示盤に応用するには、電気的な励起が必要となる。最近、希土類イオンを添加した誘電体のナノ微粒子蛍光体で、電流励起のCW発振ランダムレーザーが報告された¹⁰⁾。電流励起は光学励起よりはるかに高効率にすることができる。なぜなら、光学励起ランダムレーザーの問題点は励起光のほとんどがランダム媒質に吸収させるのではなく、散乱によって失われてしまうからである。電流励起ランダムレーザーはこの点を解決するので、新しい時代を開くと期待される。

この研究は、21世紀COEプログラム「コヒーレント光科学の新展開」の中で行われた。また、試料提供に当たっては、神島化学の特別の厚意を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

文 献

- 1) H. Cao: "Lasing in random media," *Waves Random Media*, **13** (2003) R1-R39.
- 2) H. Cao, Y. G. Zhao, S. T. Ho, E. W. Seelig, Q. H. Wang and R. P. H. Chang: "Random laser action in semiconductor powder," *Phys. Rev. Lett.*, **82** (1999) 2278-2281.
- 3) D. S. Wiersma and S. Cavalieri: "A temperature tunable random laser," *Nature*, **414** (2001) 708-709.
- 4) D. S. Wiersma and A. Langendijk: "Light diffusion with gain and random lasers," *Phys. Rev. E*, **54** (1996) 4256-4265.
- 5) N. M. Lawandy, R. M. Balanchandran, A. S. L. Gomez and E. Sauvain: "Laser action in strongly scattering media," *Nature*, **368** (1994) 436.
- 6) S. Mujumdar, M. Ricci, R. Torre and D. S. Wiersma:

- “Amplified extended modes in random lasers,” *Phys. Rev. Lett.*, **93** (2004) 053903.
- 7) P. Sebbah and C. Vanneste: “Random laser in the localized regime,” *Phys. Rev. B*, **66** (2002) 144202.
 - 8) M. Patra: “Decay rate distributions of disordered slabs and application to random lasers,” *Phys. Rev. E*, **67** (2003) 016603.
 - 9) X. Jiang and C. M. Soukoulis: “Time dependent theory for random lasers,” *Phys. Rev. Lett.*, **85** (2000) 70-73.
 - 10) B. Li, G. R. Williams, S. C. Rand, T. Hinklin and R. M. Laine: “Continuous-wave ultraviolet laser action in strongly scattering Nd-doped alumina,” *Opt. Lett.*, **27** (2002) 394-396.
 - 11) M. Bahoura, K. J. Morris and M. A. Noginov: “Threshold and slope efficiency of $\text{Nd}_{0.5}\text{La}_{0.5}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$ ceramic random laser: Effect of the pumped spot size,” *Opt. Commun.*, **201** (2002) 405-411.
 - 12) G. R. Williams, S. B. Bayram, S. C. Rand, T. Hinklin and R. M. Laine: “Laser action in strongly scattering rare-earth-metal-doped dielectric nanophosphors,” *Phys. Rev. A*, **65** (2001) 013807.
 - 13) X. H. Wu, A. Yamilov, H. Noh, H. Cao, E. W. Seelig and R. P. H. Chang: “Random lasing in closely packed resonant scatterers,” *J. Opt. Soc. Am. B*, **21** (2004) 159-169.
 - 14) Y. Feng and K.-i. Ueda: “Random stack of resonant dielectric layers as a laser system,” *Opt. Express*, **12** (2004) 3307-3312.
 - 15) Y. Feng, J.-F. Bisson, J. Lu, S. Huang, K. Takaichi, A. Shirakawa, M. Musha and K. Ueda: “Thermal effects in quasi-continuous-wave $\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ nanocrystalline-powder random laser,” *Appl. Phys. Lett.*, **84** (2004) 1040-1042.
 - 16) V. S. Letokhov: “Generation of light by a scattering medium with negative resonance absorption,” *Sov. Phys. JETP*, **26** (1968) 835-840.
 - 17) C. Guedard, D. Husson, C. Sauteret, F. Auzel and A. Migus: “Generation of spatially incoherent short pulses in laser-pumped neodymium stoichiometric crystals and powders,” *J. Opt. Soc. Am. B*, **10** (1993) 2358-2363.
 - 18) H. Cao: “Random lasers with coherent feedback,” *Top. Appl. Phys.*, **82** (2003) 303.
 - 19) S. V. Frolov, Z. V. Vardeny, A. A. Zakhidov and R. H. Baughman: “Laser-like emission in opal photonic crystals,” *Opt. Commun.*, **162** (1999) 241-246.
 - 20) S. V. Frolov, Z. V. Vardeny, K. Yoshino, A. Zakhidov and R. H. Baughman: “Stimulated emission in high-gain organic media,” *Phys. Rev. B*, **59** (1999) R5284.
 - 21) D. S. Wiersma: “The smallest random laser,” *Nature*, **406** (2000) 132-133.
 - 22) Y. Feng and K. Ueda: “One-mirror random laser,” *Phys. Rev. A*, **68** (2003) 025803.
 - 23) Y. Feng, J. Lu, S. Huang and K.-i. Ueda: “Random lasing in Nd: YAG nano-crystalline-powder pumped by laser diode,” *Photonic Crystal Materials and Nanostructures*, eds. R. M. D. L. Rue, P. Viktorovitch, C. M. S. Torres and M. Midrio, **5450** (2004) 388-395.
 - 24) M. B. v. d. Mark, M. P. v. Albada and A. Lagendijk: “Light scattering in strongly scattering media: Multiple scattering and weak localization,” *Phys. Rev. B*, **37** (1988) 3575-3592.
 - 25) D. S. Wiersma, M. P. v. Albada and A. Lagendijk: “Coherent backscattering of light from amplifying random media,” *Phys. Rev. Lett.*, **75** (1995) 1739-1742.
 - 26) P.-E. Wolf and G. Maret: “Weak localization and coherent backscattering of photons in disordered media,” *Phys. Rev. Lett.*, **55** (1985) 2696-2699.
 - 27) F. J. P. Schuurmans, M. Megens, D. Vanmaekelbergh and A. Lagendijk: “Light scattering near the localization transition in macroporous GaP networks,” *Phys. Rev. Lett.*, **83** (1999) 2183-2186.
 - 28) A. E. Siegman: *Lasers* (University Science, California, 1986).
 - 29) Y. Feng, S. Huang, G. Qin, M. Musha and K.-i. Ueda: “Random microchip laser,” *Opt. Express*, **13** (2005) 121-126.
 - 30) H. Cao: “Random LASERS: Development, features and applications,” *Opt. Photonics News*, **16** (2005) 24-29.

(2005年6月22日受理)