HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ランダムレーザーの発振モード制御に関する研究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	煮雪, 亮
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12631号
Issue Date	2017-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/65532
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Ryo_Niyuki_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（工学）　氏名　煮雪　亮

学 位 論 文 題 名

ランダムレーザーの発振モード制御に関する研究
（Mode Control of Random Lasers）

これまで、ファブリ・ペロー共振器やフォトニック結晶を代表とする周期性や対称性を持つ “規則的な” 共振器構造を用いたレーザー素子に関する研究が進められてきた。このようなレーザー素子は、高度なナノ加工技術を用いてその規則性を厳密に制御することで、波長やモード体積、Q 値の制御が可能となる。一方、それとは対照的に “不規則な” 構造を利用したランダムレーザーが近年注目を集めている。ランダムレーザーとは、不規則な屈折率分布を持つランダム構造を利用したレーザー素子であり、ランダム構造中における光の多重散乱とその干渉効果による光閉じ込め・増幅に基づくレーザー発振現象である。ランダムレーザーは、構造としてナノ粒子の凝集体や基板表面のラフネス等を利用できるため、簡便・安価に作製可能であるだけでなく、材料や形状の自由度が高いといった特徴をもつ。また、不規則な構造によりレーザー光を広角に放出することができる、空間コヒーレンスが低い等の従来のレーザー素子とは全く異なる特徴を有し、高輝度かつ高色純度のレーザーディスプレイやスペックルフリーなイメージング光源、センサー等への新規光源としての応用が期待されている。しかし、構造の不規則さにより、多モードで発振し、バックグラウンドの蛍光強度や発振しきい値が高く、発振波長や発振位置がランダムに決定されるため、従来のレーザー素子とは異なり、発振モード制御や効率的な発振の実現が難しい。そのため、ランダムレーザーの実用化を目指すには、前述のようなランダムレーザーの特徴を活かすだけでなく、従来の “規則的な” 共振器構造程ではないにしても、ある程度の発振モード制御を実現することが課題となっている。

このような課題に対して、温度や構造サイズ、励起光源プロファイル等の最適化や、ファブリ・ペロー共振器の共鳴モードの利用など様々な発振モード制御方法が提案されている。一方、本研究では、フォトニック結晶における欠陥モードの類推から、ランダム構造に共鳴散乱体と散乱体の無い欠陥領域を導入する制御手法に着目した。この制御方法では、均一な球状散乱体からなるランダム構造内に、散乱体の無い欠陥領域を設けることで、散乱体粒径によって決まる共鳴波長帯の光を選択的に欠陥領域に閉じ込め、散乱体粒径や欠陥領域の大きさ等の条件の調節により、発振波長や発振モード数等を制御できることが期待される。この制御手法はこれまで 2 次元の FDTD 解析により、その有効性が示されているが実験的な検証に至っていない。そこで本研究では、上記提案制御方法の有効性を実験的に検証することを目的とし、さらに本研究後半には、提案制御手法の応用展開の一環として、ランダムレーザーの材料として、酸化亜鉛だけでなく、ダイヤモンドやグラフェンを採用する事で、材料固有の特性を活かしたランダムレーザーの発振モード制御の検討を行った。

本論文は、以下の 8 章から構成されている。

第 1 章では、序論として本研究の背景と目的、第 2 章では、本研究に関する基礎理論についてまとめている。

第 3 章では、液中レーザー溶融法を用いて作製した粒径の均一な球状 ZnO ナノ粒子 (散乱・発光体) と、欠陥領域として蛍光ポリスチレンナノ粒子を混入したナノ粒子凝集体を提案制御モデル構造として作製し、そのレーザー発振特性を観測することで提案制御手法の実験的な検証を行った。実験の結果、従来のランダムレーザーが発光ピーク波長付近でマルチモードの発振を示すのに対し、提案構造では、欠陥領域にほぼ単一モードのレーザー発振が誘起され、従来よりも 1 桁程度低いしきい値を確認した。さらに、散乱体粒径の変化に伴うレーザー発振波長の変化や、欠陥サイズの変化に伴うレーザー発振モード数の変化を確認し、提案制御手法により、ランダムレーザーの低しきい値化及び、発振モード (波長・モード数) が制御可能であることを示した。

さらに第 4 章では、この発振特性を制御した新規ランダムレーザー発振特性の温度依存性の測定を行った結果、従来の ZnO ランダムレーザーが、電子正孔プラズマ状態に由来した反転分布を伴うレーザー発振であるのに対し、新規ランダムレーザーでは、光閉じ込め効果の改善によるしきい値の低下に伴い、励起子由来のレーザー発振である可能性を示唆する結果を得た。この結果は、提案制御方法により、ランダム構造の発振波長制御や低しきい値化が達成された結果、厳密に制御された規則的な共振器で観測される様な励起子由来のレーザー発振の誘起が可能となることを示唆している。

第 5 章では、レーザー誘起水熱合成法により作製した ZnO ナノロッドランダム構造におけるレーザー発振の観測について記述した。ランダムレーザーの実用化において電気励起は重要な技術的課題であり、特に照明等の光源としての利用する場合には、効率的に入出力を行えることが望ましい。これに対しては、3 次元的な光閉じ込め効果を有す粒子の凝集体よりも、電極形成も多数報告例のある 2 次元のナノロッドアレイ構造がより適している。実験の結果、レーザー誘起水熱合成法により作製した ZnO ナノロッドランダム構造からレーザー発振が誘起され、成長時間により、ナノロッドアレイ構造の散乱体直径・密度等が変化し、それに伴いレーザー発振しきい値が変化することを確認した。

第 6 章では、提案制御手法の他材料・他波長への展開を目指し、その候補としてダイヤモンドに着目し、実験した結果について記述した。ダイヤモンドは、高屈折率で NV 中心を代表とする様々な色中心や、ワイドバンドギャップを有するため、様々な波長における発光を利用したランダムレーザーの実現が期待できる。実験では、ダイヤモンドナノ粒子膜の光学特性を測定した結果、紫外域でのレーザー発振を初めて観測した。また、ダイヤモンドナノ粒子を適切な温度で加熱処理することで、発光を抑制するナノ粒子表面を覆うアモルファスカーボン層が除去され、紫外域の発光効率が改善されることを確認した。

第 7 章では、光励起に伴う伸縮性を有すグラフェンを用いた新たな制御手法の検討を行った。グラフェンを混入したランダム構造に、グラフェンを励起する制御光を照射することで、構造の散乱特性がグラフェンの収縮により変化し、それに伴いレーザー発振状態が変化することが期待される。グラフェンフレークを ZnO ナノ粒子ランダム構造に混入した試料において実験を行った結果、制御光である白色光を照射することで、レーザー発振波長や発光強度、モード数が変化する様子を確認し、その変化量が白色光照射強度に依存していることを確認した。今後さらなる検証が必要であるが、制御光の照射範囲選択による空間的な変調や、散乱体の共鳴特性を利用した制御方法との組み合わせにより、より詳細な制御の実現が期待される。

第 8 章では、本研究における成果を総括すると共に、今後の課題・展望について記述した。