

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：13501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870279

研究課題名(和文) 光の局在現象の2次元イメージング

研究課題名(英文) 2D imaging of light localization

研究代表者

酒井 優 (SAKAI, Masaru)

山梨大学・総合研究部・准教授

研究者番号：10371709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：ランダム媒質中で起こる光の局在現象である光のアンダーソン局在やランダムレーザーの詳細を、高分解イメージングによって実験的に明らかにすることを目的として研究を行った。観察に適した近接場光学顕微鏡の構築を行い、開口型光プローブを用いて光のアンダーソン局在の空間分布の観察に成功した。更に、ランダムレーザリングとの相関の測定の実現に向けて、光プローブ作成法の確立とトンネル顕微鏡ベースの近接場光学顕微鏡の構築を進めた。

研究成果の概要(英文)：This research was performed to clarify detail of light localization in disordered materials, such as Anderson localization of light and random lasers, by high-resolution optical-imaging technique. An original home-made scanning near-field optical microscope (SNOM) was developed and successfully observed Anderson localization of light by using SNOM with an aperture probe. Furthermore, to investigate the spatial correlation between Anderson localization and random laser, a SNOM with approaching technique using tunneling current has been developed.

研究分野：近接場光学

キーワード：光局在 ランダムレーザー 近接場光学顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

光の散乱体がランダムに配置したランダム媒質中では、光の多重散乱と干渉効果によって光強度分布の偏りが形成される。光の局在である。この現象は、電子のアンダーソン局在に対応させて、“光のアンダーソン局在”と呼ばれている。また、そのような光の局在が利得媒質中で起きると、“ランダムレーズング”が生じることも知られている。これまで実験的には、光のアンダーソン局在の場合は後方散乱スペクトルの解析、ランダムレーザー発振の場合は発振スペクトル観察や時間分解観察、統計的解析などが行われてきた。このような光の局在は、 $1\mu\text{m}$ 四方程度の領域内で生じると考えられているが、これまでの実験的研究はマクロな光学観察に留まっていたため、ランダム媒質中に局在した光を直接可視化するような測定は実現されていなかった。また、半導体での報告例は ZnO や GaAs に限られていた。

筆者は 2010 年に、GaN として初めてランダムレーザー発振の観察に成功した (Appl. Phys. Lett. **97**, 151109 (2010))。発振スペクトルの偏光依存性、ナノコラム充填率依存性、2D-FDTD 計算との比較などを行い、GaN ナノコラムにおけるランダムレーズングの特徴を明らかにした。しかし、これまでのマクロ (巨視的) な測定手法では、レーザーキャビティの空間的広がり・光のアンダーソン局在との関連性・局在長などの“ランダムレーザーの物理”については十分に議論することが出来なかったため、未だ解明されていない部分が多かった。

2. 研究の目的

本研究では、光の散乱体がランダムに分布した媒質中で起こる「光の局在現象」のうち、“光のアンダーソン局在”及び“ランダムレーザー”を、局在状態の可視化によって詳細に調べることが目的としている。光の局在が強く現れるとき、その局在 1 つ 1 つの空間的な広がりには光の波長と同程度でナノメートルスケールである。そこで本研究では、近接場光学顕微鏡をベースとしたオリジナルツールを構築し、局在光の空間的分布及びランダムレーザーのキャビティを直接可視化することを目指す。また、これらの新しいアプローチにより、光のアンダーソン局在とランダムレーザーの空間的相関を実験的に明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、系の配置 (表面形状像) と局在光強度 (光学像) の両情報を同時に取得可能なオリジナルの近接場光学顕微鏡 (Scanning Near-field Optical Microscope; SNOM) システムを構築し、どのような系にお

いてどのような光局在が起きるのかを可視化によって明らかにする。ランダム系の配置は、コラム径、充填率、などのパラメータに依存している。本研究ではパラメータが異なる複数の試料を用意して、各パラメータと光局在の関係性について、系統的に観察を行う。

この実験で得られる結果は、数値シミュレーション計算を組み合わせることで、さらに生きてくる。実験で得られた配置を直に取り込んで光の振る舞いの数値計算 (2次元 FDTD 法) を行い、局在光の空間分布について実験結果との比較を行う。

(2) ランダムレーズングは、鋭い発振ピークが多数観察されるという特徴を有する。発振ピーク 1 つ 1 つが、ランダム系の中に形成される多数のマイクロキャビティ 1 つ 1 つにおいて発生したレーズングに対応していると考えられている。更に、1 つのキャビティにおいて複数の縦モードで発振することを前提に、キャビティ長を同定するといった議論もある。しかし、実際のキャビティを空間的に観察した例は無いため、これらの考え方や議論は憶測の域を出ていない。本研究では、発振スペクトルの分光イメージングによってランダムレーズングの可視化を行い、ランダムレーズングの空間分布やキャビティ長を実験的に明らかにする。

(3) ランダムレーズングは、全てのランダム系で起きるわけではなく、光のアンダーソン局在が強く起きる系においてのみ発生すると考えられている。筆者もマクロな光学測定と数値計算の比較によってそれを示してきた。しかし、実際に光局在が生じる場所にランダムレーズングのキャビティが形成されるかどうかは、明らかになっていない。そこで本研究では、1 つのランダム系サンプルにおいて光のアンダーソン局在とランダムレーズングの両方の可視化を行い、それらと比較することで、光局在とランダムレーズングの空間的な相関を実験的に明らかにする。

4. 研究成果

(1) 本研究では、まず始めに近接場光学顕微鏡 (SNOM) システムの構築を行った。最初は、光のアンダーソン局在の直接観察を目的とし、プローブを集光に利用する局所集光モード (Collection-mode) で構築した。光源には、半導体 CW レーザ (中心波長: 405nm) を使い、対物レンズ (100 倍) で試料の裏面から照射した。その他の光学部品としては、ピエゾスキャナ、開口プローブ、分光器、その他ミラー等で構成され、これらを組み合わせることで SNOM システムの構築を行った。

SNOM の心臓部であるサンプルステージ部分は、ピエゾスキャナを用いて作製し、SII 社製プローブコントローラからコントロールし、走査測定を行った。なお、同じピエゾ

スキャナを用いて、開口プローブと試料間の距離のフィードバック制御も行っている。

開口プローブは、光ファイバを弗酸系溶液でエッチングすることで先鋭化し、Ar イオンスパッタで金属膜コーティングを行い、押し付け法で開口を作製した。

(2) 続いて、構築した SNOM システムを利用して、GaN ナノコラムにおける光のアンダーソン局在の直接観察を試みた。試料には、GaN ナノコラムの上部に InGaN 量子井戸層を積層した InGaN/GaN ナノコラムを用いた。InGaN/GaN ナノコラムでは、GaN ナノコラム間に形成された局在分布を反映して InGaN が発光するため、InGaN が微小アンテナの役割を果たし高感度な測定が可能となる。これらの方法を駆使して測定を行った結果、2次元ランダム系構造における光のアンダーソン局在を直接可視化することに成功した(図1)。測定結果において、In組成揺らぎによる発光分布と光の局在による発光分布を比較して切り分けるために、測定データの統計処理を行い明らかにした(図2)。

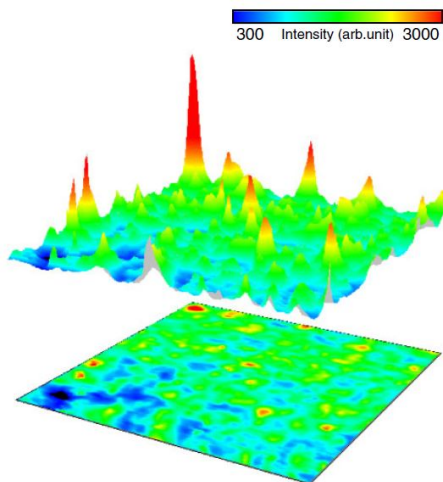


図1 GaN ナノコラムにおける光局在の SNOM 観察結果

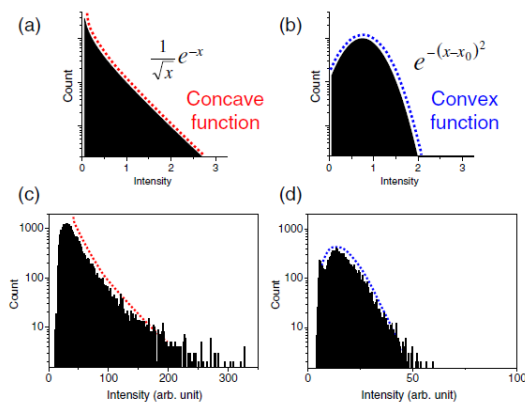


図2 発光分布の統計処理による解析結果

(3) ランダムレージングが観察可能な試料において、光のアンダーソン局在も同時に観察し、ランダムレージングのキャビティと光局在の関連性を調べることを目的として、SNOM システムの改良を行った。

まず光プローブとしては、開口型プローブではなく、先端が先鋭化した光プローブが必要となる。そこで、弗酸系溶液でのエッチングの条件を見直して、測定に適したペンシル型の光ファイバプローブの作成に取り組み、これに成功した(図3)。一方、2次元ランダム構造上を光ファイバプローブが接触することなく安定して走査できるためには、安定したフィードバック制御が必要となる。そこで、これまでの原子間力を利用した方法(原子間力顕微鏡の原理)に代えて、トンネル電流を利用した方法(トンネル顕微鏡の原理)を導入した。以前の方法では1~2時間の短い測定でも途中で試料と光プローブ接触してしまって、測定の継続が困難となるケースが多かったのに対して、トンネル電流を利用した方法では、8~10時間の測定を複数回繰り返すことが出来ることを実際に実験で示した。

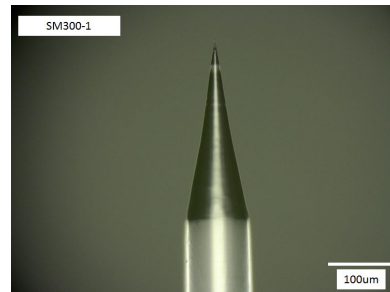


図3 作成した先鋭型光ファイバプローブ

以上の通り、本研究では近接場光学顕微鏡システムの構築及び測定に適した開口プローブの作製を行い、ランダムに配置した InGaN/GaN ナノコラムにおいて光のアンダーソン局在の直接観察に成功した。さらに、光局在の2次元イメージングに向けて要素技術の開発を進め、プローブ=サンプル間の距離制御についても、研究当初の原子間力を利用した方法からトンネル電流を利用した方法に代える等、装置の改良を行った。

一方で、2次元ランダム試料を観察する上で問題となっていた光プローブ先端の形状については、弗酸エッチング法の変更で解決し、紫外光測定と高分解能表面像観察を両立するプローブの作製に成功した。本研究テーマの最終目標である光局在とランダムレーザの空間分布の直接比較に向けて、測定装置の大幅な改良を達成することができた。今後の研究の継続により、局所観察による手法によって光の局在現象の詳細が明らかにされることが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Masaru Sakai, Yuta Inose, Tomi Ohtsuki, Kazuhiro Ema, Katsumi Kishino and Toshiharu Saiki, "Near-field optical imaging of light localization in GaN nanocolumn system," Jpn. J. Appl. Phys. **53**, 030301 (2014).
DOI: 10.7567/JJAP.53.030301

〔学会発表〕(計7件)

三輪嘉彦, 大久保領, 酒井優, 東海林篤, 内山和治, 小林潔, 松本俊, 岸野克巳, 堀裕和 “近接場マルチプローブ顕微鏡による半導体量子井戸内の励起輸送観察()”, 第62回応用物理学会春季学術講演会, 2015年3月, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市).

大久保領, 三輪嘉彦, 酒井優, 東海林篤, 内山和治, 小林潔, 松本俊, 岸野克巳, 堀裕和 “半導体中の励起輸送解明のための第2高調波アシスト光近接場プローブ顕微測定法の研究”, 日本光学会ナノオプティクス研究グループ第21回研究討論会, 2015年3月, 山梨大学甲府キャンパス(山梨県・甲府市).

三輪嘉彦, 大久保領, 酒井優, 東海林篤, 内山和治, 小林潔, 松本俊, 岸野克巳, 堀裕和 “光近接場マルチプローブ顕微鏡による半導体量子井戸内の励起輸送観察”, 日本光学会ナノオプティクス研究グループ第21回研究討論会, 2015年3月, 山梨大学甲府キャンパス(山梨県・甲府市).

大久保領, 三輪嘉彦, 高橋良慈, 酒井優, 東海林篤, 内山和治, 小林潔, 松本俊, 岸野克巳, 堀裕和 “第二高調波アシスト光近接場顕微鏡による青色半導体の局所観察”, 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 2014年9月, 北海道大学札幌キャンパス(北海道・札幌市).

三輪嘉彦, 大久保領, 高橋良慈, 酒井優, 東海林篤, 内山和治, 小林潔, 松本俊, 岸野克巳, 堀裕和 “近接場マルチプローブ顕微鏡による半導体量子井戸内の励起輸送観察()”, 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 2014年9月, 北海道大学札幌キャンパス(北海道・札幌市).

猪瀬裕太, 植田裕輝, 下迫直樹, 江馬一弘, 酒井優, 井川雄介, 岸野克巳, 大槻東巳 “窒化物半導体ナノコラムにおける光局在とレーザー発振”, 日本物理学会2013年秋季大会, 2013年9月, 徳島大学常三島キャンパス(徳島県・徳島市).

猪瀬裕太, 植田裕輝, 下迫直樹, 江馬一弘, 酒井優, 井川雄介, 岸野克巳, “窒化物半導体ナノコラムにおける誘導放出特性”, 第74回応用物理学会秋季学術講演会, 2013年9月, 同志社大学京田辺キャンパス(京都府・京田辺市).

〔その他〕

ホームページ等

http://erdb.yamanashi.ac.jp/rdb/A_DiSplInfo.Scholar/4_3_22/AFAB3D56608C135C.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 優 (SAKAI, Masaru)

山梨大学・大学院総合研究部・准教授