

GaN マイクロディスクにおける WGM 発振の解明に向けた UV 光ファイバプローブの開発

山梨大学 工学部先端材料理工学科 酒井 優

Fabrication of UV Optical Fiber Probe for Clarifying WGM Oscillation in GaN Microdisks

Masaru Sakai

Faculty of Engineering, University of Yamanashi

GaN マイクロディスクは、六角形状の良質な窒化ガリウム (GaN) 単結晶である。その周回型光共振器としての構造と GaN のレーザー媒質としての性質から、ウィスパーリング・ギャラリー・モード (WGM) 発振による鋭い発光スペクトルが得られることが知られている。しかし、WGM 発振の詳細についてはこれまで明らかになっていなかった。本研究では、GaN マイクロディスク内部の WGM 光をエバネッセントカップリングによって取り出すことで WGM 発振の詳細を明らかにすることを目的として、光ファイバプローブ (マイクロ光ファイバカップラー) の作製を行った。GaN の発光は紫外線領域にあり、従来の熔融延伸法では目的に合った光ファイバプローブが得られないことから、HF エッチングによりプローブを作製した。作製した光ファイバプローブを用いた WGM 光の観察により、WGM 発振の周回方向に偏りがあることが明らかとなった。

GaN microdiscs are high-quality gallium nitride (GaN) single crystals with a hexagonal shape. Because of its structure as a orbital optical resonator and the properties of GaN as a laser medium, it is known that sharp emission spectra can be obtained by Whispering Gallery Mode (WGM) oscillation. However, the details of WGM oscillation have not been clarified so far. In this study, optical fiber probe (micro optical fiber coupler) was fabricated to clarify the details of WGM oscillation by extracting WGM light inside a GaN microdisk by evanescent coupling. Since GaN luminescence is in the ultraviolet region, a suitable fiber probe could not be obtained by the conventional melt-stretching method, the probe was fabricated by HF etching. Observation of WGM light using the fabricated optical fiber probe revealed that the WGM oscillation was unbalanced in the orbital direction.

1. はじめに

本研究で扱う GaN マイクロディスクは、分子線エピタキシー法によって作製される六角形状の良質な窒化ガリウム (GaN) 単結晶で、側面が六方晶 GaN の結晶面で構成されることから正確に 120° の頂角を有する六角形となる (Fig.1 (a,b))。その高い結晶性ゆえ、GaN マイクロディスクは光が内部を全反射しながら周回する周回型光共振器として機能する。その共振モードは Fig.1(c) に示すように：

- ・ WGM : Whispering Gallery Mode
 (“ささやきの回廊”)

- ・ QWGM : Quasi-WGM
(擬似 WGM)
- ・ FPM : Fabry-Pérot Mode
(ファブリ・ペロー型共振器)

の3種類が考えられる。一方で、GaNは利得媒質であることから、光強励起下(ナノ秒光パルス励起下)においてはレーザー発振様の発振スペクトルが得られる(Fig.2)。

これまでの研究により、この発振ピークがWGMまたはQWGMに起因する光共振器発振であることが確認されている¹⁾。しかし、測定で得られた発振ピークが実際にどの共振モードに対応しているのか、1周あたり波の数はいくつなのか、など発振モードの基本的性質については明らかになっていなかった。GaNマイクロディスクは直径が2~3 μm と小さいことからWGMの縦モード間隔が5~10nmと広いためGaNの利得幅の中に1~2モードしか存在しないこと、考えられる空間モードが複数あること(Fig.1(c))、などが発振モードの特定を難しくしている。発振スペクトルの散乱角度依存性の測定結果と理論計算の比較より、励起光の1パルス毎のWGMまたはQWGMの周回方向(右回り/左回り)において統計的に偏りがあることが予想されたが、憶測の域を出ていない²⁾。レーザー発振であれば励起光1パルス毎に左右どちらの周回方向が選択されることは想像に難くないが、統計的には右回り:左回り=1:1に近づくはずであり、この比が極端に偏る理由は容易には見つからない。WGM発振の周回光を直接測定することが出来れば、共振モードの特定や周回方向の偏りの解明につながると期待される。

本研究では、GaNマイクロディスクにおいて観察されるWGM発振の発振モードを解明するための、テーパ光ファイバー型の新しいマイクロ光ファイバースプロブを作製し実証することを目的としている。本研究で作製する光ファイバースプロブを用いてGaNマイクロディスクのWGM発振を測定する模式図をFig.3に示す。光ファイバーの中間部分を細線化して

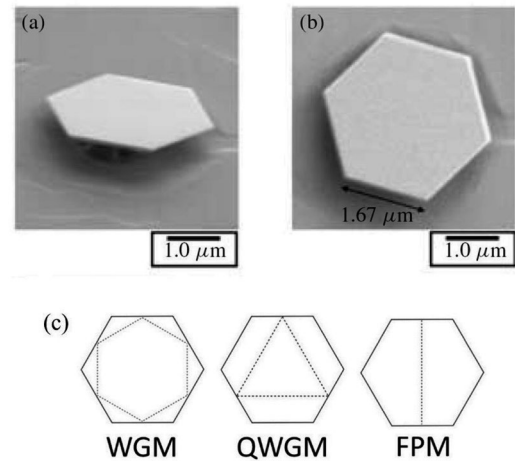


Fig.1 (a,b) GaNマイクロディスクの電子顕微鏡写真と、(c) 3つの共振モードの模式図¹⁾

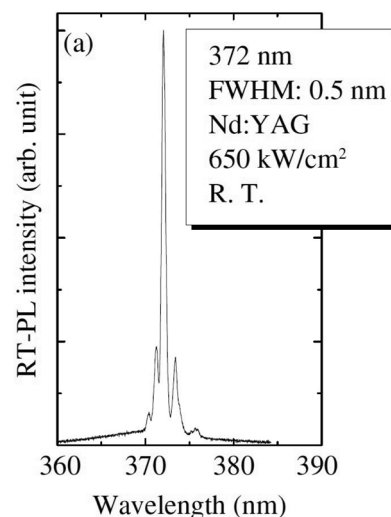


Fig.2 発振ピークの一例¹⁾

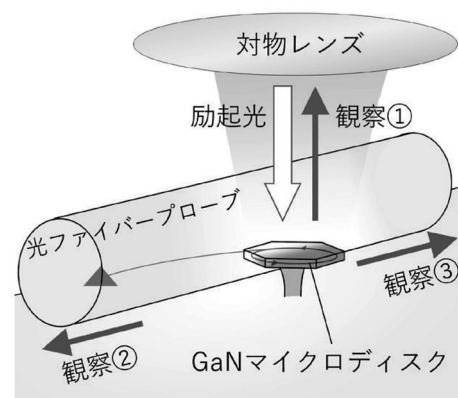


Fig.3 光ファイバースプロブを用いたWGM周回方向測定の模式図

GaN マイクロディスクに近接させることで、エバネッセントカップリングによって GaN マイクロディスク中の WGM 発振の一部を光ファイバースプロブ内に取り出して計測する。これにより、左回り／右回りの発振をそれぞれ図中の観察②／観察③のように別々に取り出すことが可能となる。励起光 1 パルス毎に観察①～③を同時に分光測定し、この測定を六角形の複数の辺に対して行うことで、WGM 発振の発振モードの解明を目指した。

2. 光ファイバースプロブの作製

従来のテーパ光ファイバーは、Fig.4 に示すように熔融延伸法によって作製される。この方法では細線化された部分は光ファイバーのクラッド成分が支配的となる。本研究で扱う GaN の発光は UV 域のため、コアが純粋石英の石英光ファイバーを用いる必要がある。その場合クラッドには何らかのドーパントが含まれるため、従来の方法では細線化された部分の光吸収が大きく発光の測定が出来ない。さらに、細線化した部分の形状が直線的だと基板表面にある GaN マイクロディスクに対してアクセスが出来ない。

そこで本研究では、基板表面の GaN マイクロディスクに近接できるように湾曲し (Fig.5 (a))、かつ、その先端部においてはコアが露出するような形で細線化された、テーパ光ファイバーを拡張した新しい光ファイバースプロブを作製した。プロブ作製においては、まず光ファイバーを湾曲させた状態で治具に固定し、緩衝フッ酸エッチングによって湾曲した先端部分の細線化を行う (Fig.5 (b))。なお、光ファイバーに何らかの応力がかかっていると、エッチング開始後すぐに光ファイバーが破断してしまう。そこで本研究では、エッチング前に光ファイバーの加熱処理を行い、湾曲させた際に生じる応力を取り除いた上でエッチングを行った。これにより、Fig.5 (c) に示すような、先端部において純粋石英コアが露出した光ファイバースプロブを作製することができた。Fig.6 に実際に作製した光ファイバースプロブの写真を示す。

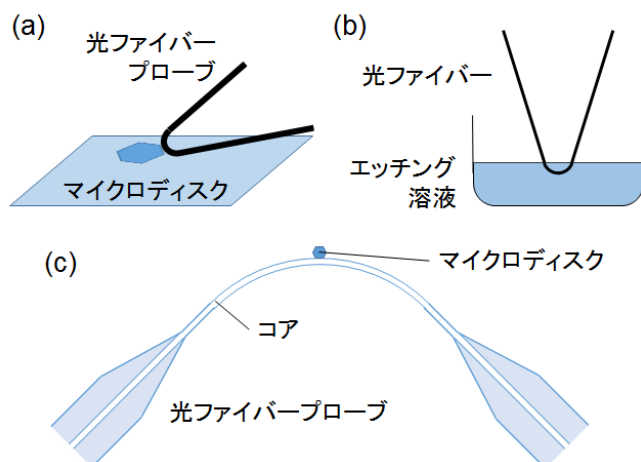


Fig.5 本研究で作製した光ファイバースプロブの、(a) 光学測定配置、(b) エッチング行程、(c) コアが露出したプロブ先端部とマイクロディスク、の各模式図

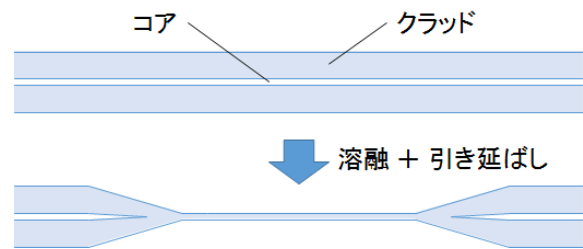


Fig.4 従来のテーパ光ファイバーの模式図



Fig.6 作製した光ファイバースプロブ(エッチング前)

3. 光学測定と測定結果

Fig.7に示すような光学測定系を構築し、作製した光ファイバプローブを用いてGaNマイクロディスクのWGM発振の測定を行った。光源には、波長355nm、パルス幅5ns、繰り返し1kHzのパルスレーザーを用いた。自作パルスピッカーにより、繰り返しを14Hzまで下げることで、1パルス毎の測定を可能とした。励起光(青色のライン)は、50倍のUV対物レンズを通して試料に照射した。試料からの発光は、1パルス毎に3方向への発光を同時に分光器で測定した。3方向とは、試料の上方向への散乱光(緑色のライン)、光ファイバプローブのSide A方向(紫色のライン)、およびSide B方向(朱色のライン)、の3つである。測定結果の一例をFig.8に示す。

本測定では、GaNマイクロディスクに対して光ファイバプローブを右側から近付けた。これにより、ディスク内の右回りWGMによる発光がSide A方向に、左回りWGMによる発光がSide B方向に観察される。Fig.8(a)は、励起光70パルスの積算で得られた、3つの各方向への発光スペクトルである。Side A、Side B、上方向への散乱光の3スペクトルとも、371nmと376nmに発振ピークが観察された。続いて、これらのピークの周回方向特性を調べるために1パルス測定を行った。測定結果をFig.8(b)に示す。この図では、1パルス毎にSide A方向とSide B方向で得られたスペクトルについて、371nmと376nmの各波長におけるピーク強度をXYプロットで示している。1点が1パルスに相当し、1000パルスの測定結果を示している。波長371nmのピークについては、Side A側に強く偏っていることがわかる。一方、波長376nmのピークについては、明確な周回方向の違いはみられなかった。これらの結果により、WGM発振の周回方向には偏りがあることが明らか

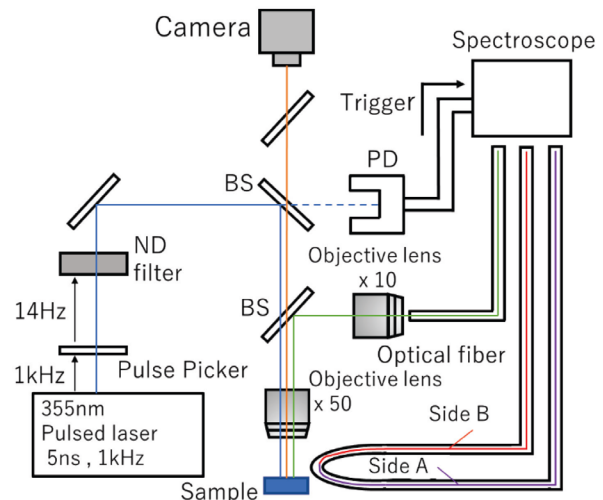


Fig.7 測定系の概略図

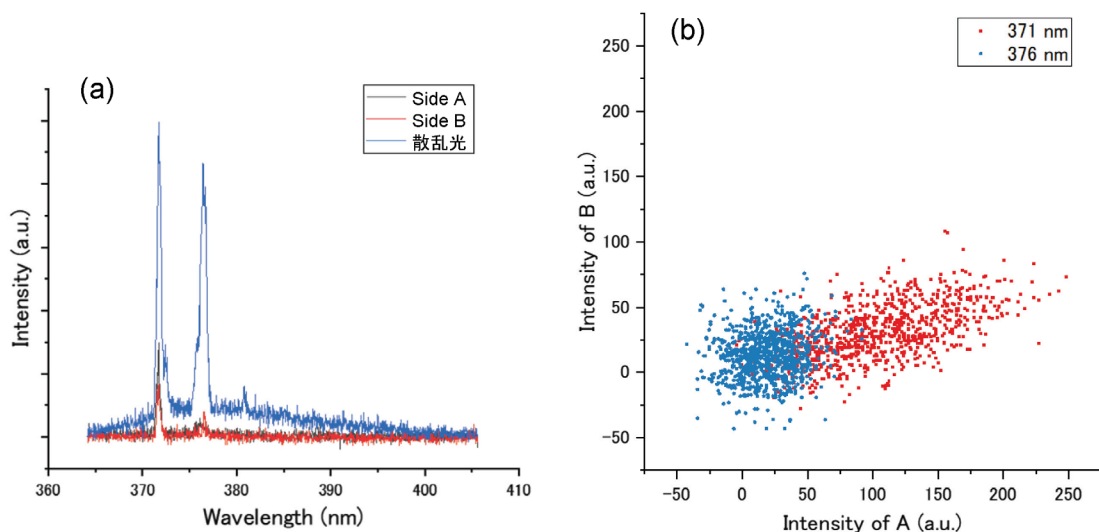


Fig.8 (a) 各方向の発光スペクトル(積算)と (b) 1パルス測定による周回方向の分布

かとなった。WGM 発振の周回方向については、1 パルス毎に右回りまたは左回りのどちらかの周回方向が選択されることは、利得の大きなモードに偏るという一般的なレーザー発振の考え方で理解することができる。しかしその場合、周回方向はランダムに選択されるはずであり、右回りと左回りは 1:1 になるはずである。実験では、常に WGM 発振は右回りの一方向のみで観察されており、その理由は現時点では明らかになっていない。一方、周回方向の偏り方については、同じマイクロディスク内でも異なる波長(発振モード)では、偏り方の振る舞いが異なることが明らかとなった³⁾。

4. まとめ

GaN マイクロディスク内部の WGM 光をエバネッセントカップリングによって取り出すことで WGM 発振の詳細を明らかにすることを目的に、UV 領域で使用可能な光ファイバプローブ(マイクロ光ファイバケーブル)の作製を行った。作製した光ファイバプローブを用いた WGM 光の観察により、WGM 発振の周回方向には偏りがあり、偏り方は同じマイクロディスク内でも波長によって異なることが明らかとなった。

5. 謝辞

本研究は、山梨大学大学院医工農学総合教育部修士課程工学専攻先端材料理工学コースの岩本優歌氏の協力により行われました。また、令和 2 年度(第 42 回)日本板硝子材料工学助成会の研究助成を受けて行いました。同助成会に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Lasing Action on Whispering Gallery Mode of Self-Organized GaN Hexagonal Microdisk Crystal Fabricated by RF-Plasma-Assisted Molecular Beam Epitaxy, T. Kouno, K. Kishino, and M. Sakai, IEEE J. Quantum Electron. 47, 1565-1570 (2011).
- 2) Periodic Radiation Patterns and Circulating Direction of Lasing Light by Quasi Whispering Gallery Mode in Hexagonal GaN Microdisk, T. Kouno, S. Suzuki, M. Sakai, K. Kishino, K. Hara, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 053401 (2016).
- 3) Investigation of the direction of rotation of WGM oscillation in hexagonal GaN microdisk, Y. Iwamoto, K. Kamiishi, A. Syouji, T. Kouno, A. Kikuchi, K. Kishino, and M. Sakai, The 13th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNFO13) PO 29-36, Hokkaido University (Sapporo, Japan), July 29-31, 2022.