

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：32670

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540377

研究課題名(和文) マイクロキャビティ構造を用いたコヒーレントフォノンに関する研究

研究課題名(英文) Study on coherent phonon generation by microcavity structures

研究代表者

島田 良子 (Shimada, Ryoko)

日本女子大学・理学部・准教授

研究者番号：90346049

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ZnO と GaN をベースとしたハイブリッドマイクロキャビティの作製方法を確立した。特に、3種の結晶成長法(MOCVD, MBE, UHCVD法)の組み合わせでクラックのない ZnO/GaNマイクロキャビティを作製できること、GaNマイクロキャビティは、MOCVD法による結晶の横方向への優先成長で良質なキャビティ層の成長ができることを見出した。さらに、反射や光ルミネッセンスのような光学特性評価を通じて、マイクロキャビティによるコヒーレントフォノンとキャビティポラリトンの相互作用の解明も試みたが、コヒーレントフォノンの生成にいたらなかった。今後も検討を継続する予定である。

研究成果の概要(英文)：This study established the method(s) of preparing ZnO/GaN-based hybrid microcavities. Specifically, crack-free ZnO/GaN hybrid microcavities were found to be well prepared with the MOCVD, MBE and UHCVD methods, and the GaN microcavities, with the MOCVD method using epitaxial lateral overgrowth technique. Fundamental optical properties for these microcavities, such as strong coupling regime, were characterized by the angle-resolved reflectivity and photoluminescence measurements. Unfortunately, no coherent phonon was generated from those microcavities, and its relationship with the cavity polariton remained unclear. Further study is planned for this relationship.

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：物性I

キーワード：マイクロキャビティ コヒーレントフォノン

1. 研究開始当初の背景

半導体発振器の出力とその周波数の関係を見ると、テラヘルツギャップと呼ばれる 2THz 付近に向かって電波側、光側の両方から出力低下領域がある。コヒーレント音響フォノンの利用は、そのギャップを克服するひとつの手段として注目されている。本研究では、酸化亜鉛(ZnO) と窒化ガリウム(GaN)をベースとしたハイブリッドマイクロキャビティ構造を用いた指向性・単色性に優れたコヒーレント音響フォノンの生成と、これらコヒーレント音響フォノンとキャビティポラリトンとの相互作用について、実験的に明らかにすることを目的として研究を進めてきた。

コヒーレントフォノンに関する研究は、1980 年、Nelson らによってペリレン単結晶を使ったコヒーレント音響フォノンの生成 [*J. Chem. Phys.*, **72**, 5202 (1980)] にはじまり、1990 年、Kurz らのグループが GaAs におけるコヒーレント LO フォノンの観測 [*Phys. Rev. Lett.*, **65**, 764 (1990)] を報告して以来、目覚ましい発展を遂げている。特に半導体では、Yamamoto らによる GaAs/AlAs 半導体超格子構造において、超短パルスレーザーを用いた折り返し音響フォノンの観測 [*Phys. Rev. Lett.*, **73**, 740 (1994)] をきっかけにして、光励起によるコヒーレントフォノンのダイナミクスやコヒーレントフォノンと励起キャリアとの相互作用などの研究の道が開かれた。さらには、Sun らによって、超短パルス励起による InGaN/GaN 多重量子井戸構造中のひずみによる圧電分極場を用いた大きなコヒーレント音響フォノンの発生 [*Appl. Phys. Lett.*, **75**, 1249 (1999) *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 179 (2000)] が報告された。また、Özgül らによって同様の試料に対して、コヒーレント制御、すなわち折り返しゾーン境界でのコヒーレント縦波音響フォノンの増強、減少また消滅の観測が報告された [*Phys. Rev. Lett.*, **86**, 5604, (2001)]。しかしながら、GaN 系量子井戸におけるコヒーレント音響フォノンの研究では、格子不整合によるひずみが与える影響(ピエゾ分極場や光学的性質に対する)を最小限に抑えるため、高品質の界面が要求される。一方、Huynh らは、確立された GaAs 系結晶成長技術によって、光学キャビティ内に音響フォノンのフィードバック機構を持つ GaAs 系のナノキャビティを用いて、音響フォノンモードの閉じ込め効果について報告した [*Phys. Rev. Lett.*, **97**, 11502 (2006)]。この結果は、フォノンナノキャビティ構造が、フォノンレーザーのフィードバックシステムを可能とすることを示すとともに、サブテラヘルツ帯域における音響フォノン制御の可能性を示している。

2. 研究の目的

テラヘルツギャップを克服するひとつの手段として、コヒーレント音響フォノンの利用は注目されている。本研究では、酸化亜鉛(ZnO) をベースとしたハイブリッドマイクロキャビティ構造を用いて、指向性、単色性に優れたコヒーレント音響フォノンを生成し、コヒーレント音響フォノンとキャビティポラリトンとの相互作用の詳細を実験的に明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

実験は (1) 試料の作製と(2)光学的評価からなる。

(1) マイクロキャビティ構造を用いたコヒーレント音響フォノンを生成のための ZnO ハイブリッドマイクロキャビティ構造の作製 (Virginia Commonwealth University, USA) : MOCVD と MBE によって GaN 系 DBR (Distributed Bragg Reflector) と ZnO キャビティ層の結晶成長を行い、ハイブリッド型マイクロキャビティ構造を作製した。ハイブリッドマイクロキャビティ構造の模式図を図 1 に示す。

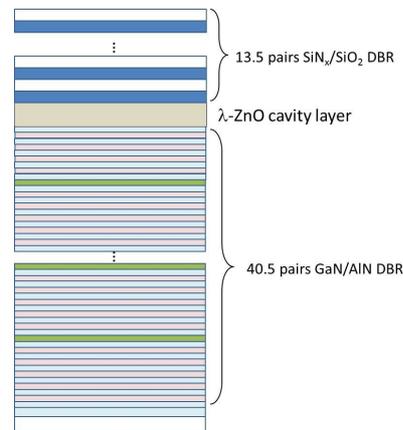


図 1 ZnO ハイブリッド型マイクロキャビティ構造。緑色の部分は、超格子構造が挿入されている。

(2) コヒーレント音響フォノンとキャビティポラリトンの相互作用の検証のために、光励起によるコヒーレントフォノンの生成実験 (University of North Texas, USA) : 図 1 に示すような試料を作製した後、基礎的な特性評価(角度依存の反射スペクトルなど)は、日本女子大学で実施した。パルスレーザーを用いた実験などは、Univ. of North Texas の Prof. Neogi 研究室で実施した。

4. 研究成果

Virginia Commonwealth University (Prof. Morkoc 研究室) において ZnO/GaN ハイブリッドマイクロキャビティ構造の作製を実施した。図 1 に示すマイクロキャビティ構造のうち、一方の反射鏡 (Distributed Bragg Reflector: DBR) には、GaN/AlN の組み合わせ、もう一方は SiO₂/SiN_x の誘電体多層膜を用いた。GaN/AlN の組み合わせは、もっとも屈折率差の大きい組み合わせで、全体の総数を減らすことは可能であるが、格子定数の差も大きいため、格子不整合によるひずみの発生で試料にクラックが生じやすい。そこで、本研究では、MOCVD 法による GaN/AlN DBR の構造設計を見直し、数組の層の間に、超格子構造を挿入し、格子不整合によるひずみを緩和するようにした(図 1)。この手法によって作製した GaN/AlN DBR の反射特性を図 2 に示す。ウェハの場所によって反射特性に違いが見られる。これは、場所による厚さの違いによるものである。

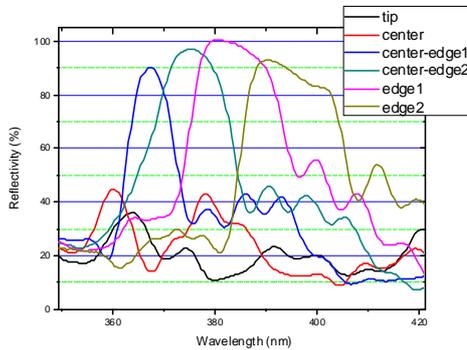


図 3 40.5 nm の GaN/AlN DBR の反射特性。場所によって反射特性に違いが見られる。

図 2 に示す特性を持つ GaN/AlN DBR 上に、1 波長の厚さの ZnO キャビティ層を MBE 法で作製した。ハーフキャビティの状態でもフォトルミネッセンスを測定し、下部の DBR と ZnO の発光エネルギーが一致することを確認した(図 3)。その後、上部の SiO₂/SiN_x 誘電体 DBR を UHCVD 法により作製し、フルキャビティ構造を完成させた。

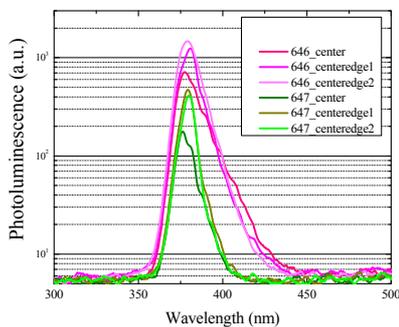


図 4 1 nm の厚さの ZnO を持つハーフキャビティのフォトルミネッセンス特性

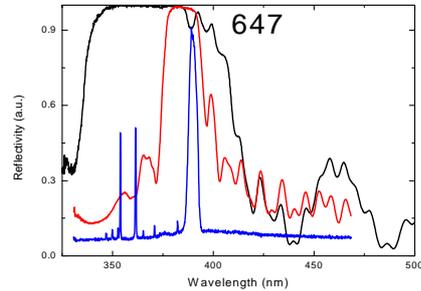


図 2 フルキャビティの反射特性と発光特性の関係。フルキャビティからの反射スペクトル(黒)、フルキャビティからのフォトルミネッセンス(青)、参考のため、下部 DBR の反射スペクトル(赤)を重ねて書いた。

図 4 に示すのは、ZnO ハイブリッドマイクロキャビティの反射特性と発光特性である。反射スペクトル上に、ZnO の発光エネルギーに対応する吸収が見られている。しかしながら、角度依存の反射スペクトル測定および発光スペクトル測定を行った結果、明確なキャビティポラリトンによる強結合状態を得ることはできなかった。さらに、コヒーレントフォノンの生成実験も試みた。キャビティポラリトンの強結合状態が完全ではなかったこと、測定側の問題が発生したこと(米国の協力研究室におけるレーザートラブル)により、コヒーレントフォノンの生成にはいたらなかった。これについては、今後も検討を続ける予定である。

一方で、新しいマイクロキャビティ構造の作製方法を提案した。上下の DBR を誘電体多層膜として、MOCVD 法でキャビティ層である GaN を Epitaxial Lateral Overgrowth (ELO) を行い、欠陥密度の低い良質な GaN 層の成長に成功した。InGaN/GaN 量子井戸を有する GaN マイクロキャビティの作製を行い、その光学特性評価を行った。この新しいマイクロキャビティについても、引き続き検討を行う予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

R. Shimada, B. Urban, M. Sharma, A. Singh, V. Avrutin, H. Morkoc and A. Neogi, "Energy transfer in ZnO-anthracene hybrid structure", *Optical Materials Express*, 査読あり, Vol. 2, 2012, 526-533.

S. Okur, R. Shimada, F. Zhang, S. D. Ahmad Hafiz, J. Lee, V. Avrutin, Ü. Özgür, H. Morkoç, A. Frabke, F. Bertram and J. Christen, "GaN-based Vertical Cavities with All Dielectric Reflectors by Epitaxial Lateral Overgrowth", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読あり, Vol. 52, 2013, 08JH03

K. Main, R. Shimada, Y. Fujita and A. Neogi,

“Energy transfer induced enhancement of localized exciton emission in ZnO nanoparticles-anthracene hybrid films”, *Phys. Status Solidi Rapid Research Letters*, 査読あり、Vol. 7, 2013, 1089-1092.

M. Kimura, N. Tarutani, M. Takahashi, S. Karna, A. Neogi and R. Shimada, “Enhanced photoluminescence emission from anthracene-doped polyphenylsiloxane glass”, *Opt. Lett.*, 査読あり, Vol, 38, 2013,5224-5227.

〔学会発表〕(計 4 件)

Ryoko Shimada, Serdal Okur, Fan Zhang, Shopan Din Ahmad Hafiz, Jaesoong Lee, Vitaliy Avrutin, Umit Ozgur, Hadis Morkoc, GaN-based vertical cavities with all dielectric reflectors and polar and nonpolar orientations, International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN13), 2012年10月14日～2012年10月19日, 札幌

R. Shimada, The 13th Japanese-American Frontiers of Science (JAFoS) Symposium, Nov 30-Dec 2, 2012, Arnold and Mabel Beckman Center, Irvine, CA, USA

M. Kimura, N. Tarutani, M. Takahashi, R. Shimada, “Surface plasmon-enhanced photoluminescence of organic molecules with metal nanoparticles”, The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), July 14-19, 2013, Makuhari, Japan.

R. Shimada, M. Oki, K. Main, V. Abrutin, H. Morkoc, A. Krokhin and A. Neogi, “Enhanced photoluminescence in inorganic/organic hybrid structures with metal nanostructures”, 13th international conference on optics of excitons in confined systems (OECS13), Sep. 9-13., 2013, Rome, Italy

〔図書〕(計 1 件)

R. Shimada and H. Morkoc, John Wiley & Sons, ZnO Materials for Electronic and Optoelectronic Device Applications, Chapter 9, Growth and Characterization of GaN/ZnO Heteroepitaxy and ZnO-Based Hybrid Devices, 2012, 43.

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

島田 良子 (SHIMADA, Ryoko)

日本女子大学理学部数物科学科

研究者番号：90346049