

# ヘリコン波プラズマエピタキシー開発とポラリトンレーザ構造形成

研究代表者

秩父重英 東北大学多元物質科学研究所 教授

共同研究者

小島一信 東北大学多元物質科学研究所 准教授

嶋 紘平 東北大学多元物質科学研究所 助教

菊地 清 東北大学多元物質科学研究所 助手



## 1. 研究の背景と達成目標

超低閾値コヒーレント光源であるポラリトンレーザを紫外線波長で室温動作させることができれば、高輝度・高効率・高演色性白色光源を作製できるため未来の照明の姿を変える可能性がある。本研究では、紫外線を呈する禁制帯幅を持ち、室温動作が最も期待できる ZnO 微小共振器構造を、産業化に適する我々独自のヘリコン波励起プラズマスパッタ (HWPS) 法を駆使して形成し、室温における励起子と光子の強結合を実現する。

目標として、①HWPS 法による高品質 ZnO および  $Mg_xZn_{1-x}O$  エピタキシャル薄膜の成長、②誘電体の分布ブラッグ反射鏡 (DBR) 形成と ZnO の共振器ポラリトン観測、③誘電体 DBR を用いた共振器構造への電子、正孔の注入とポラリトン観測の実証実験、を掲げた。

## 2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

- ・ HWPS 法により高品質な ZnO・ $Mg_xZn_{1-x}O$  薄膜のエピタキシャル成長を達成した。MgZnO 系超格子構造による導電性 DBR や、MgZnO / ZnO 量子井戸構造を用いた紫外発光素子等への応用が期待される。
- ・ 高い反射率および広い反射帯域幅を両立する誘電体 DBR ( $SiO_2/ZrO_2$  および  $SiO_2/HfO_2$ ) を形成した。
- ・ 誘電体 DBR を用いた光励起型の ZnO 微小共振器構造において、室温において角度分解反射スペクトルに共振器ポラリトン構造を観測した。室温動作ポラリトンレーザの実現に繋がる成果である。
- ・ 電流注入型 ZnO ポラリトンレーザ構造の要素技術を開拓した。実際にデバイス構造を試作し整流特性を確認した。将来的に、室温で電流注入によりポラリトンレーザが発振すれば産業上のインパクトは計り知れない。

## 3. 研究成果

HWPS エピタキシャル法により、良好な発光特性を示す ZnO および  $Mg_xZn_{1-x}O$  薄膜を形成した。また、誘電体 DBR を用いた ZnO 微小共振器構造から、室温において共振器ポラリトン発光を観測した。一方、薄膜の特性から理論予測した  $Mg_xZn_{1-x}O$  系 DBR には反射帯域幅に致命的な問題が見つかったため、電流注入機構を再設計し、p 型、n 型導電性半導体薄膜製膜と ZnO 微細加工等の技術を新たに開発し、電流注入型 ZnO ポラリトンレーザ構造を試作した。

- ① バルク ZnO 基板にエピタキシャル成長させた ZnO および  $Mg_xZn_{1-x}O$  薄膜表面は単分子層ステップにより構成され、モザイク構造は殆どみられなかった。また、室温において十分な強度のバンド端発光を呈した。
- ② 高い反射率および広い反射帯域幅を両立する誘電体 DBR ( $SiO_2/ZrO_2$ ) を形成した。また、短波長側の吸収損失が少ない  $SiO_2/HfO_2$  DBR も形成した。これらを用いた ZnO 微小共振器構造を形成し、室温における角度分解反射スペクトルに明瞭な共振器ポラリトン構造を観測し、発光を確認した。
- ③ n 型 ZnO と TYPE-II ヘテロ構造を形成できる p 型 NiO の反応性 HWPS 製膜技術および反応性イオ

ソエッチングによる ZnO 微細加工技術を新たに開発した。これらの技術を総合して試作した電流注入型ポラリトンレーザ構造の電流-電圧特性にはダイオードのオンオフを示す整流特性が確認された。

#### 4. 今後の展開

本研究で試作した電流注入型ポラリトンレーザ構造を精緻化し、電流注入により室温で紫外線を呈する ZnO ポラリトンレーザを実証する。さらに、HWPS 法による高品質 ZnO/Mg<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>O 量子井戸を活性層に用いるポラリトンレーザ創成に挑戦したい。

#### 5. 発表実績

##### 【学術講演】

- ・嶋紘平, 小島一信, 秩父重英, “水熱合成単結晶 ZnO 基板の薄膜化プロセスと微小共振器構造への応用”, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 2019 年 3 月 9 日~12 日.
- ・嶋紘平, 小島一信, 秩父重英, “反応性ヘリコン波励起プラズマスパッタ法による p 型 NiO 薄膜の堆積”, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 2019 年 3 月 9 日~12 日.
- ・粕谷拓生, 嶋紘平, 小島一信, 秩父重英, “時間分解フォトルミネッセンスによる ZnO のプロセス誘起欠陥の評価”, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2018 年 9 月 18 日~21 日.
- ・嶋紘平, 粕谷拓生, 小島一信, 秩父重英, “反応性ヘリコン波励起プラズマスパッタ法による SiO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> 誘電体分布ブラッグ反射鏡の作製”, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2018 年 9 月 18 日~21 日.
- ・K. Shima, T. Kasuya, K. Furusawa, K. Kojima, and S. F. Chichibu: "A comparative study on SiO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> distributed Bragg reflectors for ZnO-based microcavities", The 10th International Workshop on ZnO and Other Oxide Semiconductors (IWZnO2018), Warsaw, Poland, Sep.11-14, (2018), No.ThO\_7.6 (oral).
- ・T. Kasuya, K. Shima, K. Kojima, K. Furusawa, and S. F. Chichibu: "Fabrication of a ZnO-based microcavity using the reactive helicon-wave-excited-plasma sputtering method", The 10th International Workshop on ZnO and Other Oxide Semiconductors (IWZnO2018), Warsaw, Poland, Sep.11-14, (2018), No.ThO\_7.3 (oral).
- ・粕谷拓生, 嶋紘平, 菊地清, 小島一信, 秩父重英, “反応性ヘリコン波励起プラズマスパッタ法による誘電体分布ブラッグ反射鏡の形成 (1)”, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 早稲田大学, 2018 年 3 月 17 日~20 日.
- ・嶋紘平, 粕谷拓生, 菊地清, 小島一信, 秩父重英, “反応性ヘリコン波励起プラズマスパッタ法による誘電体分布ブラッグ反射鏡の形成 (2)”, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 早稲田大学, 2018 年 3 月 17 日~20 日.