

# フォトニックバンドギャップ導波路による利得制御を用いた 単一周波数ファイバーレーザー光源の開発

陳 明晨

波長575-600nmの黄色からオレンジ色にあたる波長領域には、レーザーガイドスター(LGS)光源や眼科医療、高分解能分光などの応用があり、高輝度なレーザー光源が求められている。第二高調波発生によりこの波長帯を実現できる1150-1200nm光源の開発が盛んに行われている。

Yb<sup>3+</sup>を添加した光ファイバー(Ybファイバー)は1000nmから1200nmまで裾を引いた広い発光スペクトルを示すため、長波長裾域でのレーザー動作が盛んに試みられてきた。Yb<sup>3+</sup>は単純な2準位構造からYbファイバーは1に近い量子効率を実現しており、高出力・高効率で優れたレーザー媒質として知られる。しかし長波長動作では、利得のピークである1030-1100nm帯で強い増幅自然放出が寄生発振を引き起こすため高出力化が難しく、光源開発が困難であった。これまでに一般的なYbファイバーを用いて出力パワー十数WのYbファイバー発振器が達成されているが、パワースケーリングが難しく、さらに発振器よりも利得ファイバー内の反転分布が高い増幅器は実現されていない。

本研究ではフォトニックバンドギャップファイバー(PBGF)を用いた利得制御高出力増幅器の開発を行った。PBGFは微細構造ファイバー(MOF)の一種である。MOFは従来のシングルモードファイバーに無い特性を示すため次世代の光導波路として近年盛んに研究されている。PBGFでは反共鳴反射により低屈折率コアで光閉じ込めが行われ、コアは波長フィルタ特性を示す。これを利用することで高利得帯の利得を損失により選択的に相殺することができる。Ybを添加したPBGF(Yb-PBGF)を用いた1178nmにおける高効率、高利得なPBGF増幅器が2010年に実証され、Ybファイバーによる1150-1200nmでの狭線幅な高出力光源の可能性が開かれた。狭線幅・単一周波数の光源は波長変換での変換効率を向上できるだけでなく、LGS光源として用いることができる。LGS光源には高出力、狭線幅が求められる。本研究の目的はYb-PBGFを用いた波長1178nmで動作する単一周波数の高出力ファイバー光源の実証である。

光源の構成として、主発振器と2段のファイバー増幅器による多段増幅器の構成を採用した。主共振器には自作した外部共振器半導体レーザーを用いた。出力は数百mW程度である。1段目の前置増幅器であるファイバーラマン増幅器(FRA)でPBGFの飽和パワー程度の数Wレベルまで増幅を行い、最終段のPBGF増幅器で数十Wクラスの出力まで高出力増幅を行った。

狭線幅ファイバー光源の開発では一般的に、光ファイバーの高い非線形性から3次の非線形効果である誘導ブリルアン散乱(SBS)が問題となる。特にFRAの出力パワーはPBGF増幅器の効率を左右するため高出力が望まれるが、増幅に非線形効果である誘導ラマン散乱を利用するためSBSによる出力の制限が著しい。本研究では3つの異なる手法によるSBSの抑制を試み、最終的にシード光の線幅を拡大することにより理論値で16倍のSBSの抑制を実現した。また本研究で用いたPBGFでは飽和パワーを下げるため直径10 $\mu$ mと一般的なコアサイズを採用している。そのためSBSは

PBGF増幅器でも問題となる。ポンププローブ法によるブリルアン利得スペクトルの測定を行い、1.8dBのSBS抑制効果を明らかにした。PBGF増幅器においてもFRA同様に線幅拡大によりSBSの抑制を行った。32mのYb-PBGFを用いた増幅器により、5Wのシード光から出力パワー87W、利得12.4dB、対吸収パワーで30%の引き出し効率を実現した。さらに光源は偏光消光比11dBで、SNR40dB以上を実現した。増幅による線幅の変化はなく半値全幅780MHzが得られた。この出力パワーはこの波長帯におけるYbファイバーを用いた単一周波数光源としての最高出力である。現在の出力限界は低い変換効率による励起光吸収の飽和であり、シードパワー向上とファイバー長の最適化により更なるパワースケーリングが可能であることを計算で明らかにした。

本研究で用いているPBGFのコアは両側に偏波保持のためのB添加ロッド(低屈折率)が配置されており、ボロン軸上では全反射導波路となっている。上記の増幅器ではボロン軸と曲げの径方向のなす角度(傾き角)が90度に近いPBGFを用いた。傾き角が異なるPBGFを用いた増幅実験では、高利得動作をさせた際に約0度のファイバーでは1010nm付近で起こる寄生発振が見られた。この寄生発振は1178nmを含む第3PBGではなく第4PBGに起因することが実験から推測されるが、Ybの吸収帯にかかっており詳細な評価が難しい。そこで有限要素法を用いた伝搬モードの解析を行った。これにより、各モードの損失と波長の関係から寄生発振の原因が第4PBGの高次モードであることを明らかにした。またボロン軸の配置が0度と90度の場合の高次モードの曲げ損失をそれぞれ計算により異なる曲げ径に対して求めた。この結果、90度の場合ではより大きな曲げ損失を与えることができ、寄生発振抑制に適していることが分かった。

さらに本研究ではフォトニック結晶構造とPBG構造を複合したコア径36 $\mu\text{m}$ の大口径ファイバー(hybrid-PCF)を用いた1178nmファイバー増幅器の実験を世界ではじめて行った。非線形性はコア径の二乗に反比例するためコアの大口径化はSBSの抑制に有効であり、将来的に狭線幅を維持したパワースケーリングが期待できる。実験では利得3.3dBの増幅に成功した。この利得は寄生発振の発生によって制限されている。課題はコア径の拡大による飽和パワーの増大と励起光吸収の増大による高い反転分布量の形成、それによる第4PBGでの寄生発振の発生である。そのため hybrid-PCFによる増幅器の実現には、コア/クラッドのアスペクト比を小さくし励起光吸収を減らすとともに、第3と第4PBGの間隔を拡げるファイバーデザインが必要である。