

ダイヤモンド媒質ラマン渦ビームの実証

サリー・コール・ジョンソン

ダイヤモンドの広帯域スペクトル透過特性とラマン周波数シフト特性を、渦ビーム生成の波長非依存性と組み合わせるとどうなるのか。渦ビームの動作波長を大幅に拡張できるようになる。

渦ビームの急速な進化と、幅広い応用性に着想を得て、中国、日本、およびオーストラリアの国際研究チームが、従来の反転分布レーザが抱える課題、すなわち、波長の拡張性や、出力スケールリングの制約といった課題に取り組んだ。

同研究チームは、これまでのダイヤモンド媒質のレーザに関する研究成果を踏まえ、ダイヤモンドの優れた熱光学特性が画期的な解決策となり得ることに気付いた。

一方では、「ダイヤモンドは既知の結晶の中で最も高い熱伝導率を誇り、効率的な熱管理によって大幅な出力向上が期待できるだけでなく、高出力時の熱歪みを最小限に抑える」と、中国河北工業大 (Hebei University of Technology in China) にて光学教授、電子情報工学院 (School of Electronics and Information Engineering) 副学部

長、先進レーザ技術センター (Center for Advanced Laser Technology) および河北省先進レーザ技術・設備重点实验室 (Hebei Key Laboratory of Advanced Laser Technology and Equipment) 副所長を務めるジェンシュー・バイ教授 (Zhenxu Bai) は説明する。

他方では、「ダイヤモンドは、ラマン増幅媒体として、最大級のラマン周波数シフトと、極めて高い利得係数という特性を兼ね備えている」とバイ教授は述べる。「このような特性により、精密な波長調整と高い変換効率という、渦ビーム技術の進歩に不可欠な性能が実現する。特に、ダイヤモンドの優れた熱特性と光学特性を活用して渦ビーム性能を高める展望は非常に魅力的であり、光操作や高解像度イメージングから量子光学に至るまで、多岐にわたる革新的な応用への道を切り拓くものだ」。

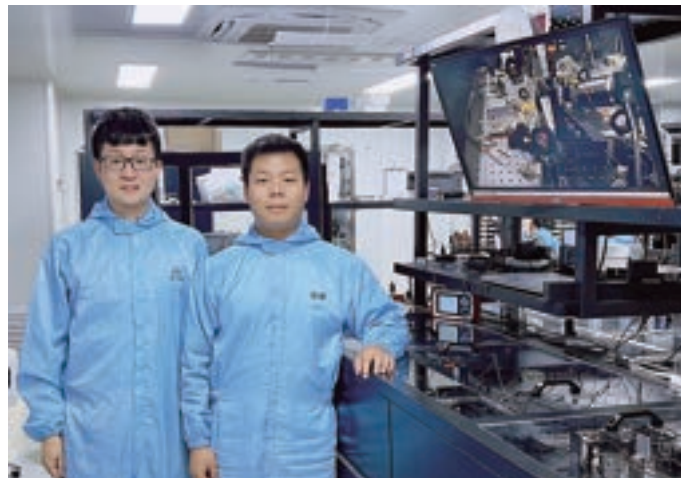
ダイヤモンド媒質のラマン渦ビーム

ダイヤモンドは重要な非線形媒質であり、強力なポンプ光を用いて誘導ラマン散乱 (SRS) や誘導ブリルアン散乱 (SBS) といった非線形効果を引き起こすことでレーザ出力を可能にする。

「ダイヤモンド媒質のレーザを設計する際には、ダイヤモンド結晶が十分なポンプ光強度を受けること、そしてポンプ光がレーザ共振器の固有モードと精密にモード整合されることが不可欠だ」と、バイ教授は説明する。「この整合は特にダイヤモンドラマン渦レーザにおいて重要である。ポンプモードに最適な共振器モードを選定することで、利得抽出の最適化と発振しきい値の最小化が実現する」。

バイ教授率いる研究チームの実験手法は、従来のダイヤモンドレーザおよび渦ビーム生成技術を基盤としているが、新たな方法で組み合わせたものだ。同チームは、従来のダイヤモンドラマン発振器に、オフアクシスポンピングというシンプルな渦ビーム生成手法を組み合わせた。

「コリメートされたダイヤモンドラマン発振器の出力ミラーを精密な角度で意図的に回転させることで、高次ラマンモード間のモードオーバーラップを強化し、発振プロセスを制御した。これにより、一次およびカスケード高次ラマンの両方で渦ビームを生成した」と、バイ教授は述べる。「注目すべきことに、当チームのシステムで $1\mu\text{m}$ のポンプ光を用いると、 $1.2\mu\text{m}$ および $1.5\mu\text{m}$ の波長で渦ビーム出力を得た。これらの波長は優れた透過ウィンドウ



研究論文著者のジェンシュー・バイ氏 (左) およびチェン・フィ氏 (右) のダイヤモンドラマン渦レーザ実験光学システム。背景右側のモニターにも、同システムの実物画像が表示されている (画像提供: ジェンシュー・バイ氏)

に一致している。本手法を用いてこれらの波長で渦ビームの生成に成功したのは初の報告例となる」。

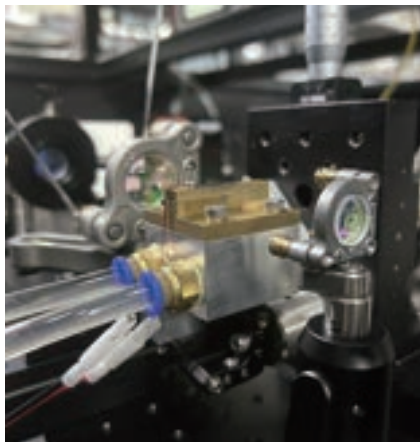
同チームが直面した主な課題の1つは、ラマン方式による渦ビーム生成の効率を高めることだった。ラマン変換には高いポンプ光強度と精密なモード整合条件が必要であり、本質的に高次横モード分布となるため、レーザ出力密度が低下し、モード整合が複雑になる傾向がある。

「本研究では、実験パラメータを手動で調整した」と、河北工業大博士課程学生であるフイ・チェン氏(Hui Chen)は言う。「しかし、精密な制御システムを用いれば、変換効率が最適化され、低しきい値かつ高出力の渦ビーム生成への道が拓かれるとわれわれは考えている」。

では、この成果は、ラマンレーザ研究に、どのような展開をもたらすのだろうか。「ラマン渦レーザにおける画期的な成果だ」と、バイ教授は述べる。「従来、ラマンレーザ研究における渦光は、渦光自体をポンプ光源として用いて生成されてきた。しかし本研究では、ガウシアンビームのポンプ光を用いて、ラマン発振器から直接渦ビーム出力を得られることを示している。初期の実証ではダイヤモンドを用いたが、本手法はあらゆるラマン結晶にも応用可能であると考えている。この手法は渦ビームの生成を簡素化するだけでなく、ラマンレーザと渦ビーム技術両方の今後の開発への可能性を広げるものである」。

渦レーザ生成の簡素化手法

同チームにとって特筆すべき成果の1つは、「特定波長における渦レーザ生成を簡素化した手法を見出したことだ」と、バイ教授は言う。「従来型の



バイ教授チームのダイヤモンドラマン渦発振器装置のクローズアップ写真(画像提供:ジェンシユー・バイ氏)

ガウシアンビームポンプを活用することで、ラマン変換によって特定波長、さらには多波長の渦ビームを直接生成できたのだ」。

オフアクシス角を微調整することで、ガウシアンベースモード、エルミート・ガウシアン(HG)モード、ラゲール・ガウシアン(LG)モードの間をシームレスに移行でき、その結果、高品質なビーム変調が可能となる。

「本実験では、一次およびカスケード高次の渦光出力を実証し、その出力は数十ワットに達した」と、バイ教授は述べる。「当チームのダイヤモンドラマンレーザは、ダイヤモンドの優れた熱特性と光学特性を組み合わせることで、高出力の渦光生成において前例のない制御性と柔軟性を実現し、レーザビーム操作の新時代を切り拓くものとなった」。

材料加工および光通信への応用

ダイヤモンド媒質の渦ビームの大きな利点として、優れた波長の多様性と出力スケールアップ技術が挙げられる。「ダイヤモンドの広帯域スペクトル透過特性、ラマン周波数シフト特性、渦ビーム生成の波長非依存性によって、渦

ビームの動作波長を大幅に拡張できる」とバイ教授は言う。「この画期的な進歩により、さまざまな波長の渦ビームを用途ごとに最適化する材料加工分野において、極めて有望な展望が拓かれた」。

多波長渦ビームが生成されることで、データ伝送速度と総合効率が向上し、光通信や量子情報システムの強化にもつながると期待される。「光学グレード人工ダイヤモンド結晶の成長技術が成熟しつつあり、ダイヤモンドのコストも徐々に低下していることから、ダイヤモンド系レーザにかかる総コストを抑えられる見通しだ」と、バイ教授は説明する。「その結果、今後3～5年以内に、ダイヤモンドラマン渦レーザによって産業化が推進され、製造プロセスと光通信の両分野に革新がもたらされる可能性がある」。

ダイヤモンド渦ビームの回転特性

ダイヤモンド渦ビームの回転を制御するパラメータには、空間分布だけでなくコヒーレンスも関係しており、これは将来の長距離宇宙探査への応用において極めて重要となる。「当チームは、狭線幅、特殊波長生成、高出力、優れたビーム品質といったダイヤモンドレーザ独自の特性を活用し、さらに渦ビームへ統合していきたい」と、バイ教授は述べる。

ダイヤモンドは、ブリルアン利得の理想的な媒質でもある。「2020年には、ダイヤモンド結晶のブリルアン利得係数を測定し、高出力ブリルアンレーザの直接発振を実現した」と、バイ教授は補足する。「そのため、現在当チームはダイヤモンド内でのブリルアン渦ビーム生成を研究中だ。この開発によって、渦ビームの回転をミリ波周波数領域にまで拡張できる可能性がある」。

LFWJ