豊かな歴史が引き続き成果を生む 中国のSIOM

ルシン・リー（李儒新）

設立50周年を迎える上海光学精密機械研究所は、ハイパワーレーザ、強磁場物理学、量子光学の分野で先駆的役割を果たしてきた。

1964年5月に設立された中国の上海光学精密機械研究所（SIOM）は、中国におけるレーザ科学および技術の最も重要な研究センターとして広く認められている。SIOMは、中国科学院（CAS）の約100の研究機関の1つで、その起源は北京と長春のCAS研究所のレーザ研究グループにある。この研究グループは、1961年に中国のルビーレーザ発振器を初めて実証した。

SIOMは包括的な研究所となっている。主要研究分野には、ハイパワーレーザ技術、強磁場レーザ物理学、情報光学、量子光学、固体レーザ技術とそのアプリケーション、レーザ向けの材料およびオプトエレクトロニクスが含まれる。ここでは、当研究所の50周年を記念して、レーザ技術開発と物理学研究の最近の前進に焦点を当てたい。

核融合研究

SIOMは、数十年にわたりハイパワーレーザ技術と工学の研究開発に注力してきた。ハイパワーレーザ技術とレーザ核融合実験施設の展開における初期の成果に加えて、SIOMがここ数年で開発したのは、中国初のマルチキロジュールレーザファシリティ、神光（SG:神光は、中国語で「魔法の光」という意味）-IIファシリティだ。SG-IIレーザファシリティには、2バンドルにまとめた8本のレーザビーム（**図1**）と多機能ビーム（9番目のビーム）が含まれる。レーザビーム間の時間同期は10ps RMSとなっている。

このファシリティでは、ファイバ発振器、ファイバ増幅器、ハイパフォーマンス集積導波路素子がシードユニットで使われている。異なるパルス間のタイミングジッタ（10psレベル）は、独自の短パルストリガー技術によって効率よく制御される。シングルピクセル空間光変調器を開発してレーザビームの近接場強度をアクティブ制御しているので、任意空間分布の達成が容易になっている。さらに、アクティブ波面コントロールシステムは、9番目のビームで設計、最適化、統合できる。主要コンポーネントとしては、9ビームそれぞれについて、デフォーマブルミラー、ハートマン波面センサが含まれる。コンピュータ制御を採用してレーザ収差を修正しているので、優れたフォーカス性能が達成できる。

図1　8ビームのSG-IIレーザファシリティは2000年に完成。ビーム開口部は240mm、総出力エネルギーは1053nm/1nsで6KJ、351nm/1nsで3KJ。SG-II 9番目のビームは、プローブおよび高圧衝撃波ドライバーとして2005年に建設。その出力は、350mmビーム開口で5.2KJ/パルスに達する。

SG-IIレーザファシリティは、10年以上にわたり安定的に運用されており、近い将来に20kJクラスレーザファシリティにアップグレードする予定になっている。このファシリティは、高エネルギー密度物理学研究の国際的利用施設になっている。ここで行われた最も面白い実験の1つは実験室天文物理学に関連するもので、ループトップX線源や太陽フレアの再結合流出のモデリングなどであった[1]。

超高強度フェムト秒レーザ

SIOMは、チャープパルス増幅（CPA）機構を用いて2007年に中国初のペタワット（PW）フェムト秒レーザファシリティを開発した。このレーザシステムは先頃、100mm径Ti:サファイア増幅器（**図2**）[2]をベースにして2PWにアップグレードした。これは、われわれが知る限りでは過去最高のピークパワーを達成している。新開発のハイコントラスト広帯域フロントエンドにより、26fs長レーザの信号対雑音比（SNR）も改善された。

横方向の寄生発振の抑制は、10PWクラスの大型開口CPA増幅器では真剣に取り組むべき技術的なボトルネックと見なされている。他の選択肢としては、光パラメトリックチャープパルス増幅器（OPCPA）がフォトルミネセンス効果なしで、一段と高いエネルギー増幅をサポートできる。三ホウ酸リチウム（LBO）は魅力的な非線形結晶であり、800nm付近で高効率、広帯域OPCPAをサポートできる。10PWを超えるピー

クパワーのフェムト秒レーザシステムは、Ti:サファイアベースのCPAチェーンとLBOベースのOPCPAブースターアンプを組み合わせることで開発できる。SIOMは先頃、ハイブリッドTi:サファイア-CPAとLBO-OPCPAシステムを実装した[3]、これはスペクトラル帯域80nm(FWHM)で増幅パルスエネルギー28.68Jを生成可能である。パルス圧縮後、このレーザシステムのピークパワーは0.61PW、パルス幅33.8fsになる。

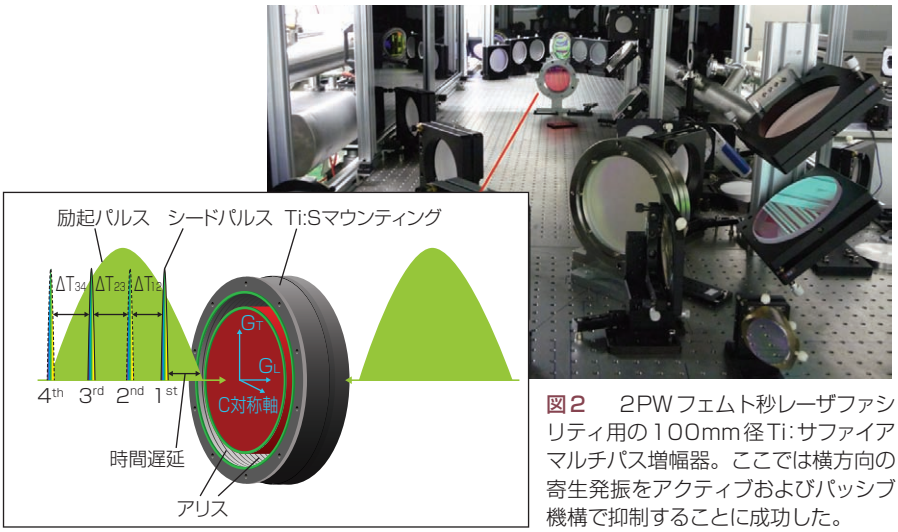

図2　2PWフェムト秒レーザファシリティ用の100mm径Ti:サファイアマルチパス増幅器。ここでは横方向の寄生発振をアクティブおよびパッシブ機構で抑制することに成功した。

強磁場レーザ物理学

レーザ航跡場加速器(LWFA)は今では、従来の高周波加速器と比べて遙かに小さな規模でマルチギガeV(GeV)の電子ビームを生成できる。第一段のトンネルイオン化誘導インジェクションをベースにして、ほぼGeVの準単一エネルギー電子ビーム(QMEB)を持つオールオプティカル・カスケードLWFAがSIOMで初めて実現された[4]。ピークエネルギー～0.8GeVのコリメートされたQMEBは加速勾配187GV/mで得られる。

段階的なLWFAスキームの重要な問題は、第2段への電子のシード処理フェーズをコントロールすることであり、SIOMは最近2段LWFAに向けてこれを実証した。第2段への電子のシード処理フェーズを最適化することにより、3% RMSエネルギー広がりで0.5GeVを超える電子ビームが2mmの短い加速距離で生成された。電子ビームのピークエネルギーは、第2加速段を5mmに伸ばすことで1GeVを超えた[5]。

空間フェムト秒レーザの強力なパルスのフィラメンテーションは強磁場レーザ物理学の重要なトピックである。霧箱の中で高繰り返しレートのフェムト秒レーザパルスのフラグメンテーションによって初めて壮大なスノーフォール現象が誘導された[6]。さらに、SIOMは位相安定化した少サイクルレーザパルスで駆動するエアフィラメントプラズマからの波形制御テラヘルツ放射を実証した[7]。

最近の研究では、空気分子イオンにおける瞬時の反転分布発展によってリモート空間レーザ発振が引き起こされた[8]、[9]。特筆すべきは、低位軌道からの分子の配向依存イオン化特性が、トンネルイオン化二酸化炭素分子からの蛍光放射の配向依存性を検出することで読み取り可能であることも実証された[10]。

先進的固体レーザ

SIOMは、2001年以来、衛星搭載レーザとライダシステムの開発を行っている。これまでに複数のレーザがライダシステムに実装され、現在軌道を回っている。初の宇宙環境品質の固体レーザはレーザ高度計の送信器であり、中国の月探査機嫦娥1号に搭載された。このダイオードポンプNdCr:YAGレーザは、波長1064nm、パルス幅5nsでパルスエネルギー150mJ。2007年に打ち上げられて、軌道上で約16ヶ月、繰り返しレート1Hzで動作した。

それ以来、中国の月探査計画の全探査機は、SIOMが製造した宇宙品質の固体レーザを搭載している。嫦娥3号プローブには、パルス幅7ns、繰り返しレート50kHzのYbドープパルスファイバレーザシステムが走査画像ライダの送信器として開発された。我々が知る限りでは、これは深宇宙で動作する初めての宇宙品質ファイバレーザである。

嫦娥計画用のレーザだけでなく、長寿命と高品質の様々なタイプの宇宙品質レーザもSIOMで開発された。これには、中エネルギーダイオード励起固体レーザ、単一周波数レーザ、中平均出力パルスファイバレーザが含まれる。

SIOMは、中国におけるハイパワーファイバレーザ開発に取り組む最早期の研究機関の1つであった。2002年に3.9Wシングルモードファイバレーザを実証した。独自開発のダブルクラッドファイバを使い、最大1.75kW CWを実現したのは2009年。2013年には、SIOMはビーム品質$M^2 = 1.46$、1.5kWオールファイバ設計のプロトタイプを作製した。高ピークパワーパルスファイバレーザで重要な進展も得られた。2008年には、自撮像キャビティを用いることにより、二次元4ファイバレーザCBC出力でコヒレントビーム合成(CBC)技術も実

証した。パルス重畳と位相ロッキングにより、多チャネルファイバ増幅器アレイ向けに遠視野干渉パターン明瞭度が約88.7%の優れたCBCを実現した。

冷却原子物理学

ここ数年、SIOMの冷却原子物理学への取り組みは主としてレーザ冷却技術の応用に集中している。ボーズ・アインシュタイン凝縮体(BEC)、原子チップ、無線周波数誘導原子、原子干渉計、強結合プラズマ物理学が冷却原子システムに含まれている。ルビジウム(Rb)BECは2002年に、原子チップでのRb BECは2008年に実証された(**図3**)。

最近、われわれはRbとYbと言った異核原子間の相互作用を調べ、原子チップ上で原子ジャイロスコープを実証した。

時間と周波数基準に関する研究には、新概念のマイクロ波時計、時間周波数比較と光ファイバでの伝搬、光周波数基準が含まれる。2005年には初のルビジウム泉方式原子時計が作製され、その安定性は現在2×10^{-15}に達している。

SIOMは、宇宙冷却原子時計も開発している。これは、マイクロ波共振器を使用した原子時計の性能限界を追究するために中国の宇宙ステーションで用いられることになっている。一次クロック以外に研究者は、10^{-15}レベルの高安定性を持つ2つのタイプのコンパクトな時計を開発した。積分球冷却原子時計と蒸気セルのパルス光励起時計である。

周波数変換の研究は、遠隔ユーザにとっては主に光ファイバ中のノイズ制御に集中的に取り組むことになる。周波数基準についての次世代アプリケーションの要求を満たすために、SIOMは光周波数基準技術を開発している。水銀光格子時計、ファイバ干渉を介した超安定レーザ、ダークファイバ内の光周波数変換と伝搬が含まれる。

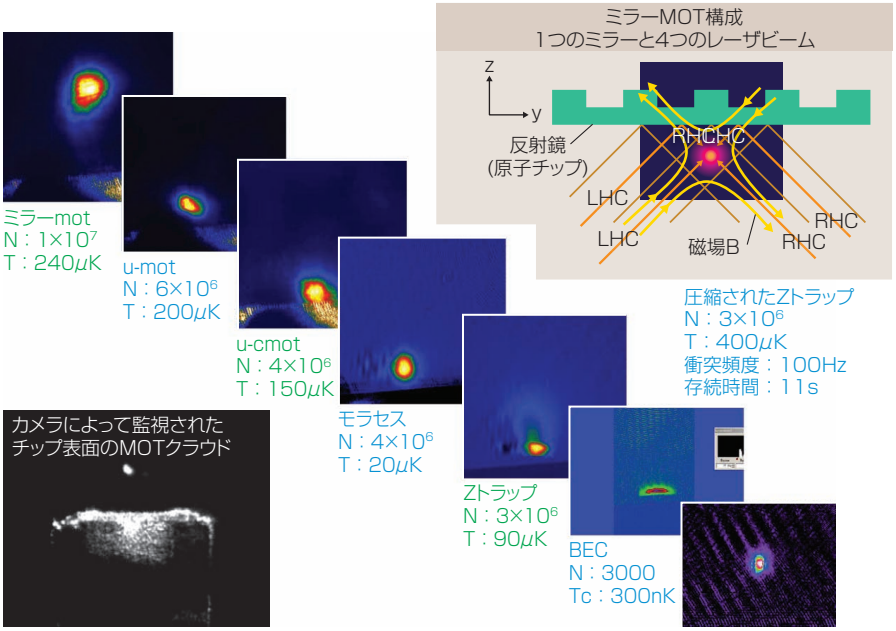

図3 原子チップでのボーズ・アインシュタイン凝縮体。右上端が磁気光学トラップ(MOT)構成、冷却原子画像は左カド下。ミラーMOTからBECへのプロセスは、左上カドから右下カドに示している。

ハイパワーレーザ材料

HOYAや独ショット社とともにSIOMはラージ(最大開口部400mm)Ndドープレーザガラススラブの世界的3サプライヤーの1つである。このレーザガラススラブは、ハイパワーレーザ核融合を促進する重要活性材である。SIOMは、最大サイズ810×460mm、優れた波面パフォーマンス(形状誤差1/3波長以下)のNdガラススラブを商用提供できる。

ハイパワー長寿命フラッシュランプについては、30を超える特許技術がSIOMに認められている。パルスと連続光の両タイプのフラッシュランプが様々なサイズと形状で提供されており、リニア、螺旋およびU形状がある。サイズは、アーク長5～185cm、内径3～42mmとなっている。

さらに、ハイパワーレーザアプリケーション用の光学コーティングは波長範囲、深紫外から赤外まで特注提供が可能。ミラーや偏光子のレーザ誘導損傷閾値は、それぞれ60J/cm²、30/cm²(1064nm、10ns)を上回る。これらは、ここ数年のSPIEレーザダメージシンポジウムの「薄膜損傷競争」の中で最先端レベルである。

参考文献
(1) J. Zhong et al., Nature Phys., 6, 984 (2010).
(2) Y. X.Chu et al., Opt. Express, 21, 29231 (2013).
(3) J.-Y. Lee et al., Opt. Lett., 38, 4837 (2013).
(4) J. S. Liu et al., Phys. Rev. Lett., 107, 035001 (2011).
(5) W. T. Wang, et al., Appl. Phys. Lett. 103, 243501 (2013).
(6) J. J. Ju et al., Opt. Lett., 37, 1214 (2012).
(7) Y. Bai et al., Phys. Rev. Lett., 108, 255004 (2012).
(8) J. P. Yao et al., Phys. Rev. A, 84, 051802(R) (2011).
(9) H. Zhang et al., Phys. Rev. X3, 041009 (2013).
(10) J. Yao et al., Phys. Rev. Lett., 111, 133001 (2013).

著者紹介
ルシン・リーは上海光学精密機械研究所および中国科学アカデミーのディレクター。
e-mail: ruxinli@mail.shcnc.ac.cn URL: http://english.siom.cas.cn.

LFWJ