分析科学への応用を見出したLDLS

ホーリン・チュー、ポール・ブラクボロウ

超広帯域レーザ駆動光源（LDLS）は、自然科学で必要とされる要求を満たす長寿命と高い空間およびスペクトル安定性を持つ。

今日の生命科学と材料科学における最先端の研究と生産技術は、明るく非常に安定した長寿命の光が得られる光源を必要としている。超高輝度を広い波長帯（170～2100nm）にわたり放射する新光源が分光およびその他の用途向けに開発され、その優れた費用対効果と長寿命は、従来の重水素（D2）ランプ、タングステン - ハロゲン（TH）ランプおよび短アークキセノン（Xe）ランプの置き換えを可能にしている。米エナージェティク・テクノロジー社（Energetiq Technology）が開発してレーザ駆動光源（LDLS）と名付けた新しい光源は、従来の光源の十倍にもなる非常に長い寿命が得られ、その高温プラズマはタングステン電極との相互作用がないため、競合品よりもはるかに安定に動作する。

従来の光源

今日の分光およびその他の分析機器は、その多くが試料の組成や構造の決定を支援する高輝度で広帯域の光源を必要としている。伝統的な光源は測定対象のスペクトル領域、つまり、深紫外（DUV）から可視を経由して近赤外（NIR）までの約170から1100nmの波長を1台で測定することはできない。例えば、一般の分析機器は高輝度のD2ランプをTHまたはXeランプと組み合わせて広帯域の用途に対応する。1台の機器に複数のランプを使用すると、光源の使用効率が低下し、余分な費用も必要になる。また、これらのランプの標準的な寿命は500～2000時間であるため、ランプの度重なる交換と機器の較正が必要になる。

DUV波長の場合、従来の光源の多くは放射輝度が低く、このことが機器能力の制約要因になる。複数のランプを使用する機器はランプのスペクトルの不整合、低い輝度によるスループットと感度の低下、各ランプの使用時間の相違などが起こるため、それらへの対応も必要になる。多くの場合、光学装置の設計者は複雑性や費用の面で問題のある複数のランプを避け、1つのランプだけを使用するが、一般に、D2またはXeランプだけでは機器のスペクトル応答と応用の柔軟性が制約される。

溶融石英の光学窓をもつD2ランプは180～380nmの波長範囲に有用なUV放射ランプになる。380nmより長波長では放射輝度が低いため、THまたはXeランプを使用して可視とNIRの放射を確保する。

D2ランプは低圧放電が欠点であり、プラズマのパワー密度が低いため、200nmであってもUVの放射輝度が低くなる。また、プラズマサイズが比較的大きく、通常は0.5から1mmの直径になるため、小さなエタンデュへの集光、例えばコア直径200μmの光ファイバや高分解能分光計の狭いスリットに集光することは難しい。溶融石英の光学窓をもつD2ランプのスペクトル放射ピー

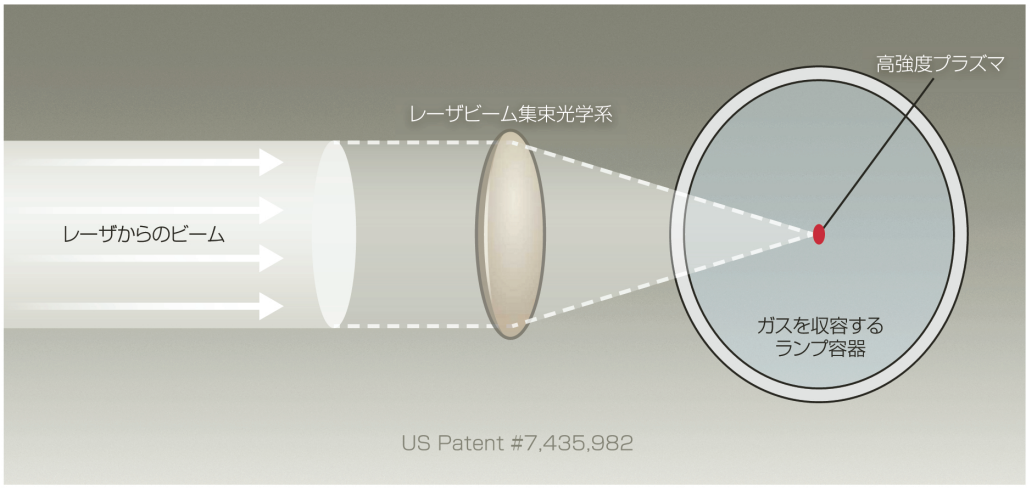

図1　LDLSからの放射は集束レーザビームとXeまたは不活性ガスの混合物との相互作用から起こる。

クは200nm近傍にあり、その値は一般に0.1mW/mm²-nm-sr以下になる。この放射輝度はランプの標準的な寿命の2000時間にわたって連続的に減少する。

THランプは、一般に400nm近傍からNIRまでのスペクトル範囲に使われる。THランプは動作温度が限定され、タングステンフィラメントのサイズが大きい（ミリメートルサイズ）ため、その輝度はかなり低く、とくに400nm近傍では低くなる。広帯域の用途の場合、THランプは一般に高輝度D2ランプと組み合わせて使用する。この組み合わせによる光源は2つのランプの発光が低い400nm波長近辺の出力が低いことが欠点になる。つまり、2つのランプの発光体は同一の空間にスポットを結ばず、両者の輝度は低いため、光捕集効率が低下する。また、2つのランプの1つに何らかの劣化や変化が起こると、出力スペクトルが変化し、再較正が必要になる。

Xeの短アークランプはNIRから250nmまでの広いスペクトル領域をもつ。このランプはタングステン電極により生成されるプラズマ温度が限られるため、300nm以下のスペクトル放射輝度は急激に減少する。Xeアークランプのスペクトル放射輝度のピークは500nm近傍にあり、1mW/mm²-nm-srの大きさになる。XeランプはD2およびTHランプに比べると安定性が非常に悪い。Xeランプのアークプラズマは基本的に不安定だが、それはランプが古くなりカソードが腐食すると、カソード面上のアークスポットが空間的に動くことによる。その雑然とした動きと点滅は使用時間とともに激しくなり、このランプの低雑音分光法への使用は許容できなくなる。短アークXeランプは1000時間が標準の寿命であるため、機器の寿命期間は何回もの交換が必要になる。

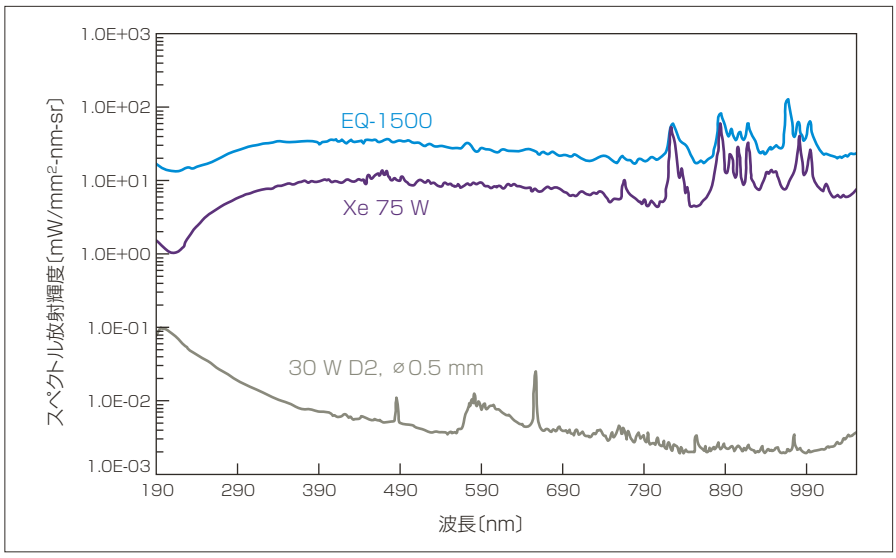

図2　LDLS（製品モデルEQ-1500）は、D2およびXeランプに比べると、スペクトル放射輝度がUV/可視/NIRスペクトルの全域において高く、その波長依存性が小さい（Φ＝直径）。

レーザ駆動光源

分析機器の光源は、DUVからIRにわたり平坦なスペクトル出力、非常に小さく超高輝度の発光体、および動作中の何年にもわたって出力が一定であることが理想の要件になる。

IDLSの場合、Xeまたはその他の不活性ガスの混合物からなる高強度プラズマは、半導体またはファイバレーザからエネルギーを吸収して動作を継続する（**図1**）。短アークXeランプの電極による電気放電プラズマとは違って、このプラズマは光学放電プラズマ（ODP）と呼ばれる。LDLS内部のODPプラズマは高圧ガスを充填した溶融石英バルブの中心にあるレーザビームの集束スポットを形成する。集束スポットのレーザビームのパワー密度は十分に高いため、短アークXeランプから得られる一般的な5000～7000Kの温度よりも高い1万～2万Kの小さくて強力なプラズマを生成する。このような高いプラズマ温度はDUV放射の大幅な増加が可能になる。

プラズマのサイズは主としてレーザの集光スポットから決まり、その直径の半値全幅（FWHM）は約100μmになる。このプラズマの空間および時間安定性は主として光学系とレーザ駆動出力の安定性から決まり、いずれも高い精度が維持される。プラズマはエネルギー損失を引き起こす電極との接触がないため、プラズマにより吸収されるレーザ出力の大部分は広帯域スペクトルの全域にわたり再放射される。この技術の拡張性は20Wから5kWのレーザ入力パワーの広い範囲に対して実証されている。

分析機器は高いスループットと高い信号対雑音比（SNR）を達成するための高輝度の光源が必要になる。高輝度で小サイズの光源を使用すると、光源の発光面積は小さいコア直径の光ファイバまたはモノクロメータの狭いスリットに効率よく同じ面積で像を結ぶ。光源の感度と分解能は輝度が高いほど大きくなる。

LDLS、高輝度D2ランプおよび75W Xeアークランプのスペクトル放射輝度データを比較した（**図2**）。LDLSはUV/

可視/NIR帯の全域にわたり、D2ランプとXeランプよりもはるかに高いスペクトル放射輝度をもつことが分かった。LDLSのスペクトル放射輝度のピーク値はD2ランプに比べると2桁以上(約200nm)も高く、Xeアークに比べると200nmにおいて約1桁の増加を示した。200nmにおけるD2ランプ、XeランプおよびLDLSのスペクトル放射輝度は、それぞれ約0.1、1.0および10mW/mm^2-nm-srであった。

DUVからNIRの波長領域が得られる単一光源は分析機器の設計の複雑性を減少させ、動作範囲を増加させる。異なる波長の光が同一の発光体積から放射されるため、光学系との光結合は容易になり、結合効率が増加する。LDLSの場合、入力パワーは小さい面積に投影されるため、そのエネルギー密度はXeアークランププラズマの場合に比べて顕著に増加する。この高エネルギー密度はより高温のXeプラズマを生成し、その結果、UV/可視/NIRスペクトル全域の発光が高くなり、DUVは最大の増加になる。

LDLSの寿命と安定性

ランプの性能変化と度重なる較正は、技術的価値と経済的価値ばかりでなく生産性の低下も引き起こす。電極駆動ランプの場合、ホットエレクトロンは金属が蒸発して石英バルブ上に付着するため、それ自体が故障の大きな原因になる。LDLSはエネルギーがXeプラズマに対して光学的に供給されるため、高圧ガスバルブには高い熱的応力、電気的応力、機械的応力などが負荷されることがない。点火だけに使われるバルブの電極はプラズマから離れた場所にあり、動作時はプラズマによる直接の加熱が起こらない。LDLSと標準的なXeおよびD2ランプとの寿命試験データの比較から、LDLSは出力の経時的低下の特性が優位にあることが分かった(**表1**)。

表1 LDLS光源とXeおよびD2ランプとの寿命試験データの比較

光源	広帯域出力変化/1000時間(標準)	現在までの寿命試験の時間	注
LDLS EQ-1000	約−2%	>1万6000	試験中
LDLS EQ-1500	約−1%	>1万	試験中
LDLS EQ-99	約−1%	>6000	試験中
30W D2ランプ	−50% (製品モデルに依存する)	—	出展: 製品データシート
75W Xeランプ	−25〜−50% (製品モデルに依存する)	—	出展: 製品データシート

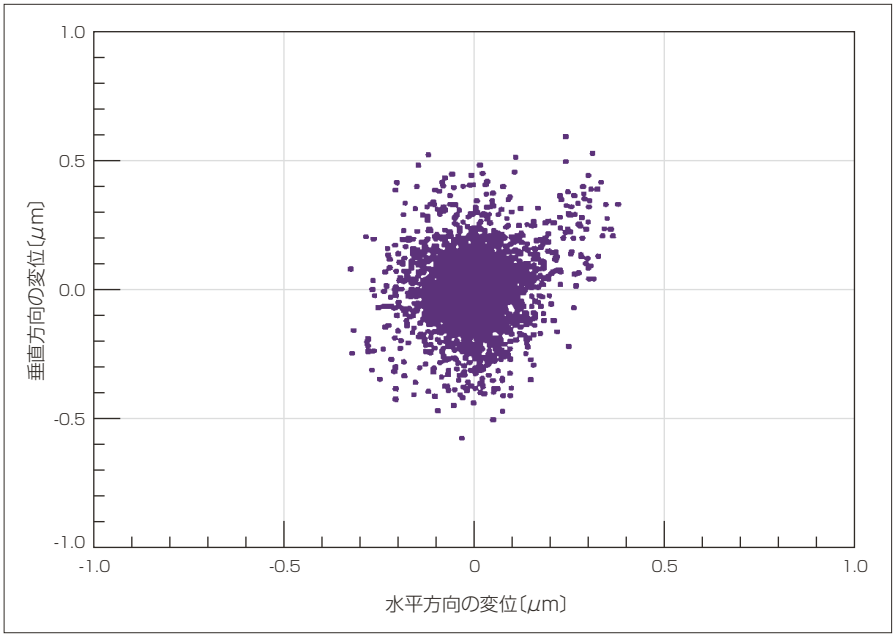

図3 時間の関数としてプロットしたLDLSプラズマ「質量中心」の位置は、この発光体の高い空間安定性を示している(2500画像、200フレーム/秒)。

高輝度で小スポットの光源は空間安定性が重要であり、小さなエタンデュの入口をもつ機器への高効率結合が可能になる。Xeアークランプの点滅に見られるように、プラズマのすべての動きは信号雑音に変換される。LDLSはレーザ集束とレーザ出力の規則性を組み合わせることで、±1μm以下の空間安定性が実証された(**図3**)。

現在のLDLSはUV/可視/NIR分光法、光ファイバの品質検査、半導体の計測、最新の内視鏡、光放出電子顕微鏡法などの広範囲の用途に使用されている。この光源は高感度、大きいスループットおよび長い保守間隔の利点を組み合わせた次世代の分析機器を実現できる。

著者紹介
ホーリン・チュー(Huiling Zhu)は米エナージェティク・テクノロジー社(Energetiq Technology)の主任科学者、ポール・ブラクボロウ(Paul Blackborow)は同社の最高経営責任者。
e-mail: pblackborow@energetiq.com URL: www.energetiq.com.

LFWJ