高温超電導の生産を牽引する高出力エキシマレーザ

ラルフ・デルムダール

高温超電導線材の生産に使用される最大1200Wの高出力エキシマレーザは、より高速のパルスレーザ蒸着速度および、その結果としての高速テープ送り速度を確保できる。スループットの増加はそれぞれのPLDのシステム設計に依存し、主としてエキシマレーザの繰返し速度またはパルスエネルギーから決まる。インテリジェントビーム配送と基板‐ターゲット走査の二つのアルゴリズムが、高出力エキシマレーザの最新世代の能力に対する効果を発揮する。ここでは、高温超電導を生産する高出力エキシマレーザの性能を詳しく述べる。

エキシマレーザは最近の10年間に出力パワーと安定性の技術が進歩し、その結果、高温超電導の開発は大きく進展し、その性能は飛躍的に向上した。パルスレーザ蒸着法（PLD）は、第二世代高温超電導体（2G HTS）線材の商業化を目指す有望な技術のなかで、製法の壁を突破し生産の品質と生産能力の確保を可能にする最先端の方法として位置付けられている（図1）。新たに開発された大面積蒸着ビーム方式が従来よりも強力になったUVエキシマレーザのすべての生産能力を引き出し、費用効果に優れた2G HTS導体の市場参入への道を開いている。

パルスレーザ蒸着が発展を牽引

1987年に超伝導YBCO膜の最初のパルスレーザ蒸着が行われて以来、PLDは種々の複雑材料の蒸着に広く使われる技術の1つになった。薄膜蒸着用のPLDの最大の利点の1つは、アブレーションターゲットにおける陽イオン化学量論の再現性にあるとみなされている。最近の10年間に、ほとんどすべての材料の成長が世界中の何百もの薄膜蒸着に関係する研究所で試みられたことは間違いない。金属、半導体、多重化学量論セラミック、例えば、炭素から有機高分子まで、さらに生体試料も含めて、すべての材料が薄層として蒸着された[1]。

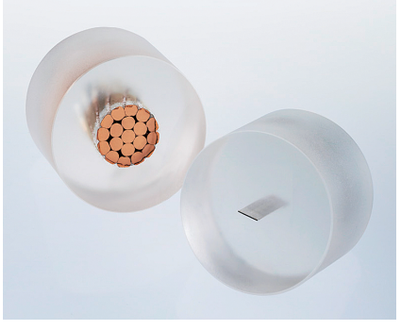

図1　同じ送電容量をもつ銅線と高温超電導の断面。

現在の機能性薄膜への要求は、ⓐディスプレイ産業からの透明導電酸化膜（例えばZnOやITO）、ⓑLED産業からの青色エミッタとしてのGaN膜など、ⓒ自動車および医療産業からのダイヤモンド炭素薄膜などの多様な保護被覆、ⓓ新興の超伝導産業からの高温超電導用の酸化物バッファ層とRE系（Y系）超伝導膜に大別される。

直ちに使用できるPLD真空装置が多数のPLDシステムメーカーから市販され、直径8インチ（200mm）の基板ウエハや長さ100m以上のリール・ツー・リール式基板テープなどを操作する関連装置も市販されている[2]。PLD装置、関連部品、監視装置および成熟して信頼性のあるエキシマレーザは、ウエハとテープの両方の配置に対応した装置においてPLD薄膜の工業化を牽引している。

商業化の可能性

高温超電導のリール・ツー・リール方式のPLD生産基盤を確立するには、何百メートルもの長さに対する横方向（面積）と垂直方向（厚み）の蒸着速度の増強が重要になる。新しいエキシマビーム利用法と高度な基板‐ターゲット配置は、増加するエキシマレーザの出力と合わせ、超伝導産業の高速PLD量産システムの基盤を構成して、商業化の実現に向けた高温超電導の費用対性能比の増加を一貫して追求している（図2）。業界で実績のある設計、たとえばコヒレント社のLAMBDA SXシリーズは、3交代、大面積UVアブレーションや照明のための、安定したパフォーマンスを提供する。

基板、ターゲット、ビーム操作技術およびエキシマレーザアブレーション光源の進歩によって、PLDは高温超電導の費用対性能比の壁を打破する最も有望な方法の1つに位置付けられるようになった。フジクラは長さ500メートルのテープの端部間において176kA・mの電流密度をもつ高温超電導をPLDによる製造で成功したと発表した[3]。

一方で、高温超電導のバッファ層と超伝導層の化学蒸着には、有機金属蒸着法（MOD）と有機金属化学蒸着法（MOCVD）があり、いずれにも湿式化

学処理工程が含まれる。

実際のところ、高温超電導が発展し、低温超伝導体（LTS）と従来の導線を上回る市場シェアを獲得するには、現在でも生産能力にボトルネックがあり、現状を大幅に超える生産能力を実現しなければならない。今日の超伝導体を使用する磁気共鳴撮像装置（MRI）は市場規模が30億米ドルであり、世界中のLTS生産能力の半分を消費している。LTS導線の需要について述べると、年間3000台以上のMRIシステムが出荷され、それぞれのシステムには約200kmの導線が使われている。

このような市場を背景にして、高温超電導製造の単位長は現在の数百メートルから1キロメートルへの拡大が必要になり、この拡大をテープ全長の端部間の電流密度を損なうことなく実現しなければならない。

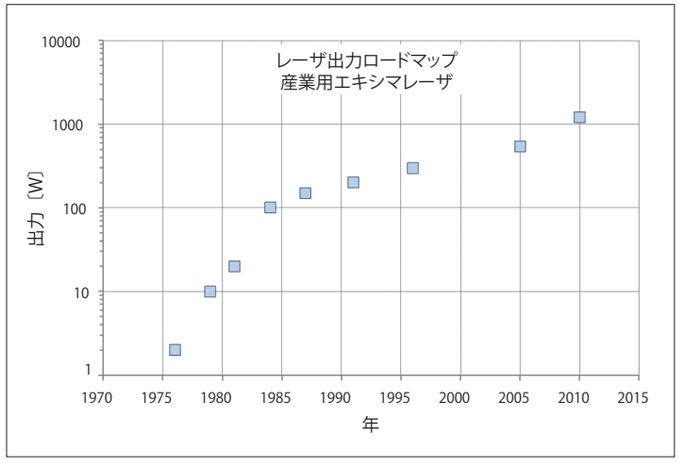

図2　高出力エキシマレーザモデルから得られる出力範囲。

高温超電導の性能‐価格ロードマップによると、今後の2G HTSの世界市場は大きな成長率を示し、2008年の約1億米ドルが2013年には約5億米ドルになると予測されている[4]。

出力による蒸着速度の向上

エキシマレーザのビーム分離と走査にもとづく新しいビーム配送方式は、数本の並列物質プルームを形成できる[5]。照射スポットサイズのそれぞれの形成に必要なエキシマレーザフルエンスがターゲット上で維持されると仮定すれば、第一近似による単位時間当たりの蒸着量は形成される並列要素ビーム数と物質プルームのそれぞれに対応する。

図3に示すLambda SXのような高出力エキシマレーザは、安定した1Jの高い出力エネルギーが得られるので、高速多重プルーム蒸着方式に必要な、平方センチメートル当たり数Jの理想的なフルエンスを確保できる。また、エキシマレーザから配送される高いパルス当たりエネルギーは、高い繰返し速度であっても、最大のパルス-パルス安定性が得られるので、PLDの高いプロセス安定性を確保できる。図4は安定化された1Jの安定エネルギーモードで動作する高出力エキシマレーザの代表的な長期のパルスエネルギー安定性とガス寿命の改善を示している。

今日の単一ガスを充填する標準的な高出力エキシマレーザは、二昼夜にわたり一連の5000万パルスをハンズフリーで連続的に発振し、1%よりも良いrms値のエネルギー安定性を得ることができる。図4は高UVエネルギーの産業応用においてともに多用される248 nmと308nm波長で測定されたエネルギー安定性の、1996年からの改善を示している。この進歩はレーザ - 物質相互作用の精密制御とレーザ光学系の寿命の最適化により実現された。

図3　高スループット薄膜生産用に設計されたLAMBDA SXレーザシリーズ。

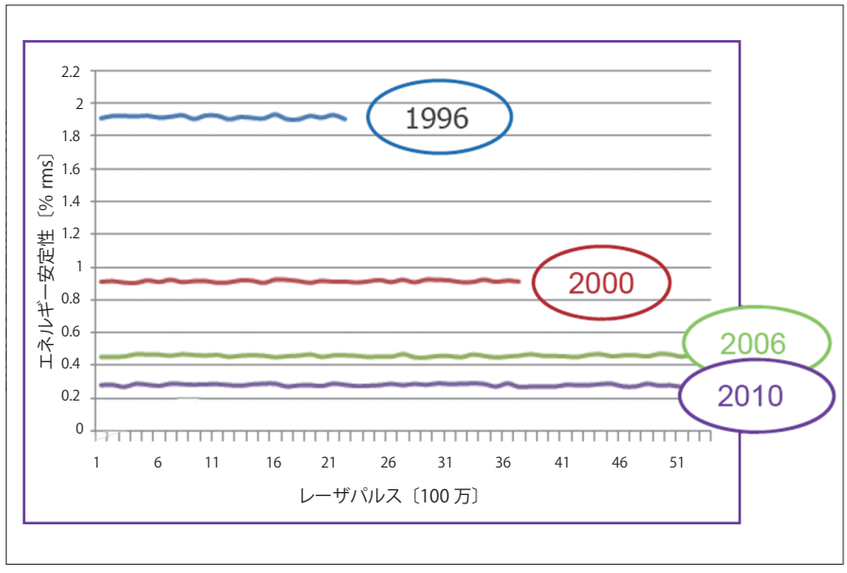

図4　高出力エキシマレーザの長期エネルギー安定性の発展。

周波数による蒸着速度の向上

テープ蒸着に用いるエキシマレーザのPLD手法全体としての速度向上は、多重プルームを可能にする十分に強い出力エネルギーに加えて、レーザパルス周波数が牽引する[6]。コヒレント社の高出力エキシマレーザLAMBDA SX 540Cは、2倍のレーザパルス周波数が得られる設計を採用して、産業用の量産加工のスループットを増強している。LAMBDA SX 540Cは308nmの波長において、最大900mJの安定化されたエネルギー動作と600Hzの高い繰返し速度が得られる。図5は安定化された480Wの動作に対応する800mJのプリセット安定化パルスエネルギーをもつ、7500万以上のパルスの600Hz連続発振を示している。

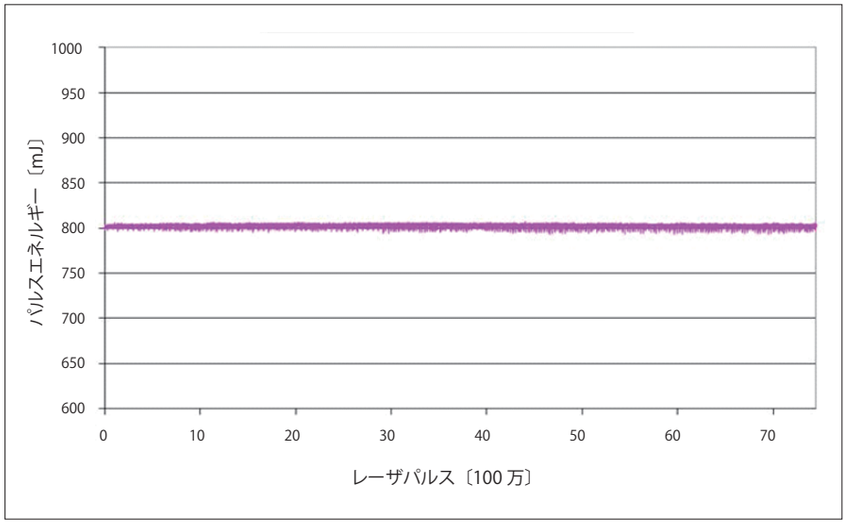

図5　600Hzと800 mJで動作する単一ガス充填LAMBDA SX 540モデルのエネルギー安定性。

表1　LAMBDA SX製品の248nmと308nmおよび300Hzと600Hzの性能仕様。

レーザモデル	LSX 200K	LSX 300K	LSX 200C	LSX 300C	LSX 540C
波長	248nm		308nm		
最大安定化エネルギー	670mJ	1000mJ	670mJ	1000mJ	900mJ
最大安定化出力	200W	300W	200W	300W	540W
最大繰返し速度	300Hz	300Hz	300Hz	300Hz	600Hz
エネルギー安定性（rms）	＜1.5%	＜1.5%	＜1%	＜2%	＜2%

テープ生産では二倍に高速化された繰返し速度を高速の蒸着速度とテープ送り出し速度に変換し、実現可能な繰返し速度を完全に生かすために、新しいビーム配送アルゴリズムが採用された。ターゲットをアブレーションするときの局所重なりの影響を排除する設計と、横方向の均一性、大面積の超伝導およびバッファ層成長のそれぞれを維持する精密ビーム走査の設計を用いて、高いレーザパルス周波数の利用が高温超電導の品質の犠牲なしに実現されている。

パラメータとシステム設計の整合

表1はLAMBDA SX高出力エキシマレーザ製品の最新の製品仕様を示している。その多くが産業用として使われるPLDシステムは、ビームの配送と走査および基板‐ターゲット配置の設計が特許化され、そのスループットを繰返し速度またはパルスエネルギーが牽引している。したがって、エキシマレーザの製品モデルとPLDシステムの配置を整合して高温超電導の生産能力を効果的に拡大するには、UVアブレーションと蒸着のすべての潜在能力を引き出す必要がある。

結び

PLDを用いる高温超電導製造は数百ワットの平均UV出力と新しい装置設計を巧みに組み合わせて生産速度を大幅に向上している。究極的には、最新のエキシマレーザのUV出力を完全に生かす高度化された多重ビームアブレーションおよび多重プルーム蒸着方式によって、最高のテープ送り出し速度が実現されるであろう。

生産能力をスケールアップする最良のシナリオでは、レーザの繰返し速度の二倍化が材料加工速度の二倍化を可能にし、レーザビームのn本への分割がPLD成長による超伝導層とバッファ層の蒸着速度のn倍化を実現する。

このPLDによる高温超電導製造の顕著なスケールアップの可能性とPLD成長による超伝導体薄膜の本質的に高い品質および性能を組み合わせることで、エキシマレーザによるPLDは超電導の大市場への参入の加速を先導する技術へと発展するであろう。

参考文献
（1）S.D. Norton, Pulsed Laser Deposition of Complex Materials: Progress Towards Appli cations, Pulsed Laser Deposition of Thin Films: Applications -Led Growth of Functional Materials（R. Eason edited, Hoboken: Wiley-Interscience）pp. 3-31（2006）.
（2）J. Greer, Large -Area Commercial Pulsed Laser Deposition of Thin Films: Application -Led Growth of Functional materials（R. Eason edited, Hoboken: Wiley -Interscience）pp. 191-213（2006）.
（3）S. Hanyu, T. Miura, Y. Iijima, M. Igarashi, Y. Hanada, H. Fuji, K. Kakimoto, T. Kato, T. Hirayama, and T. Saitoh, J. Phys. Conf., Ser. 97, 012273（2008）.
（4）http://www.conectus.org/market.html.
（5）A. Usoskin, H.C. Freyhardt, MRS Bulletin, 29, pp.583 -589（2004）.
（6）A. Usoskin, L. Kirchhoff, J. Knoke, B. Prause, A. Rutt, V. Selskij, and D.E. Farrell, IEEE Trans Appl. Supercon., 17, pp. 3235-3238（2007）.

著者紹介
ラルフ・デルムダール（Ralph Delmdahl）は独コヒレント社（Coherent GmbH）エキシマレーザ事業部のマーケティングマネージャーである。e-mail: ralph.delmdahl@coherent.com

LFWJ