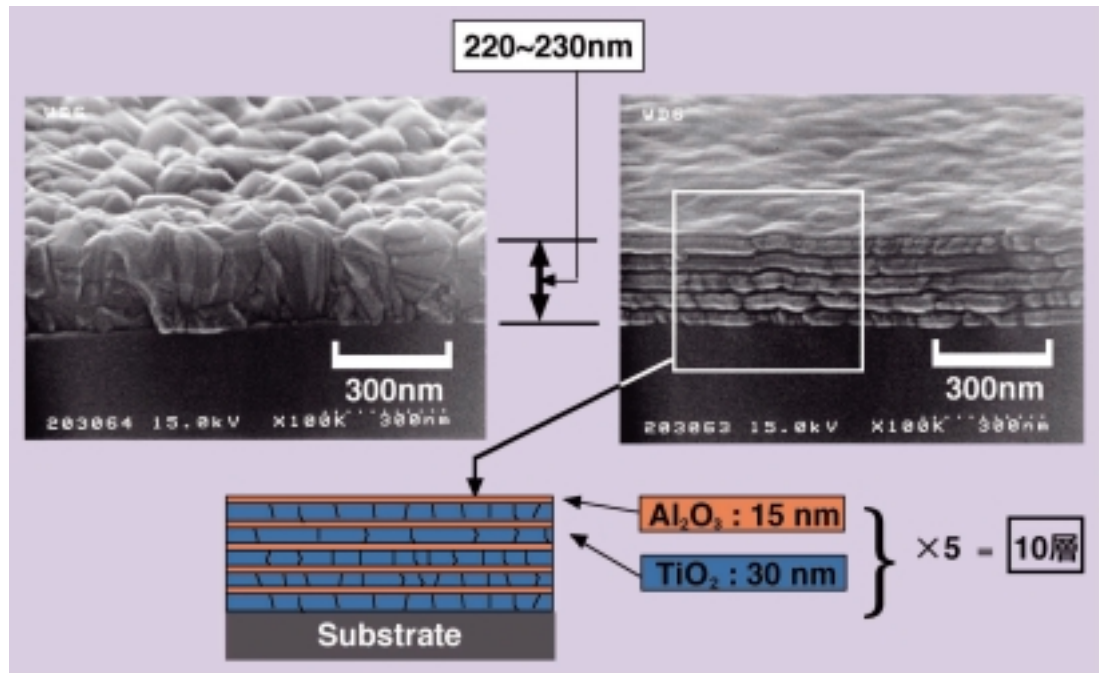


## CONTENTS

- 原子層堆積法による超精密光学薄膜の作製
- 高出力レーザー応用の発展を目指して
- 『光と蔭』水素社会とレーザー



【写真】原子層堆積法で形成したナノ積層膜による膜結晶構造の制御

## 原子層堆積法による超精密光学薄膜の作製

日本学術振興会特別研究員( 阪大レーザー研 ) 財津 慎一

### 慣性核融合研究における高出力レーザーシステム

慣性核融合研究では他に類を見ないような大型の高出力レーザーシステムが用いられています<sup>1)</sup>。現在でも、核融合点火を目指したレーザー装置の建設が世界中で進められています。このようなレーザー装置では、出力が1 kJから数MJ(市販されているレーザー装置の出力の1,000倍から10万倍)、ビームの本数は数十から200本程度になるものもあります。1本のビームの口径も数十cmから1 mと通常使われているレーザー装置よりもはるかに大きく、それゆえ、このシステム中で光線を制御す

るために用いられる光学薄膜(反射防止膜、反射鏡、偏光子)等も大きな光学基板上に形成されることになります。これらの光学薄膜はレーザー装置の性能を保証するために、このような大口径にもかかわらず反射防止膜で0.5%以下、高反射膜で99.5%以上の反射率が求められます。これは全口径にわたって面内の膜厚一様性が1%程度のときに達成される条件であり、特に偏光子の場合はこれに加えて各層の厚みの設計値からの誤差も抑える必要もあるために、その作製には厳しい困難が伴います。

次ページへつづく▶



## 原子層堆積法による超精密光学薄膜の作製

### 簡便で高精度な光学薄膜堆積技術

このような大型光学薄膜は真空蒸着方式によって、一部屋ほどの専用巨大な真空釜の中で作製されています。さらに、大きな光学基板を遊星回転させたり、蒸着経路上に回転式のシャッターを配置する等の工夫を施すことにより、かろうじて仕様を満たす光学素子を作製しています。まさに、力ずくのやり方ではありますが、かつては他に方法もなく仕方のない方式でありました。近年はSol-gel法という簡便な成膜法によって単層の単純な構造の反射防止膜を作製する技術が確立されてきました。しかし、偏光子や反射鏡のような多層膜構造の大口径光学薄膜を高性能に作製する方法は他に全く存在しません。現状の技術ではさらなる高性能化(大面積性能、膜厚精度の向上)において明確な原理的限界が存在し、将来のさらなる高出力レーザー装置の設計においてそれが足かせとなることが予想されます。従って、従来の常識を覆すような、より簡便で高精度な光学薄膜堆積技術が開発されれば、核融合レーザーシステム設計に対して極めて大きなインパクトを与えることができます。

### 世界に先駆けてレーザー用光学素子の作製に応用

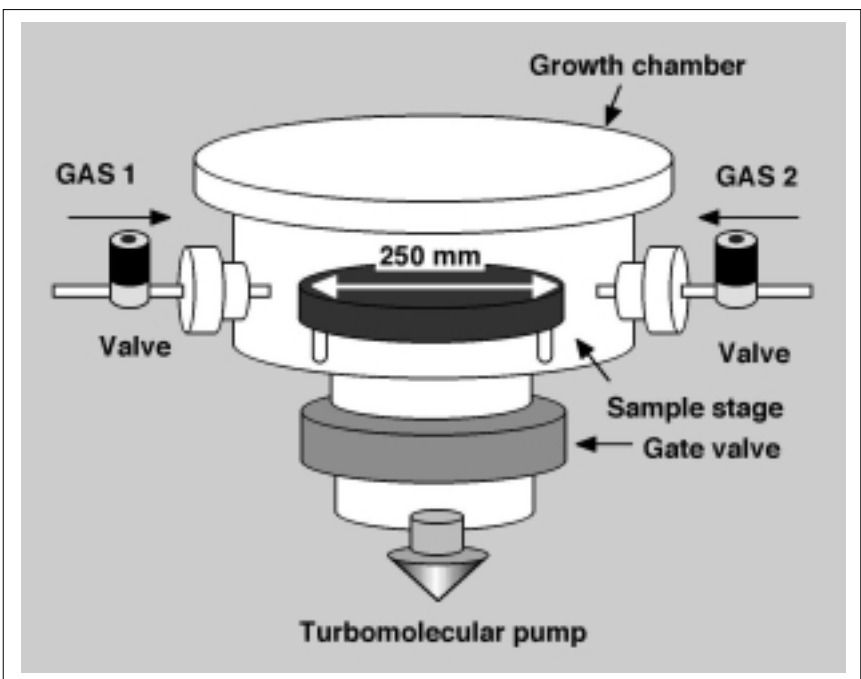
われわれは大阪大学レーザー核融合研究センターにおいて、従来の蒸着法に代わる新しい光学薄膜堆積技術として、表面化学反応による誘電体薄膜形成の研究に取り組んできました。これは一般には原子層堆積法(Atomic Layer Deposition:ALD)として知られている方法<sup>2)</sup>を世界に先駆けてレーザー用光学素子の作製に応用したものです。真空容器と原料導入バルブだけの単純な成膜装置構成(図1)で、現在世の中に存在するどの成膜法を用いても達成されえないような大面積に高精度な薄膜形成を目指しています。この方法では真空容器内に設置した基板の上に前駆体を交互に搬送し、表面でそれらの単分子吸着を誘起させることによって原子層オーダーで誘電体成長制御を実現させます。反応原料が吸着する全範囲にわたって同じ成長速度を維持する特性(表面化学反応の自己停止機構)を有しているため、大面積に均一な成膜も可能となります。現在、われわれは研究用成膜装置の大きさである直径25cmにわたって1%以下の膜厚精度で成膜できることを確認しています<sup>3)</sup>。原理的に大型化に対する制約はないので、今後の課題は成膜速度を早めた実用的な成膜装置で誘電体多層膜素子を作成させることです。

### 光学薄膜のレーザー損傷耐力の向上を研究

さらに、われわれはこの薄膜を用いて光学薄膜のレーザー損傷耐力の向上の研究にも取り組んできました。核融合用レーザーでは、伝播するレーザー光の強度が光学素子の損傷を引き起こさない程度に制限されています。従って、光学素子の損傷耐力はレーザー装置全体の性能を決定づけるほどクリティカルな要素であります。しかし、現状はレーザー損傷に関しては、壊れるものは仕方ないといったようなあきらめ感があるのが現状です。われわれの光学薄膜においてはレーザー損傷耐力が膜材料の結晶性に強く依存することを明らかにしました。さらなるレーザー損傷の研究には微小な領域( $\mu\text{m}$ )における光と物質の相互作用を詳細に調べる必要があり、これまでにない新しい観測技術を構築する必要があります。さらに、将来の実用炉では現在のような単一パルス光による損傷だけではなく、繰り返し(数十Hz)高エネルギーレーザー光による損傷の問題も解決されねばなりません。レーザー損傷の原因とメカニズムの解明は、未来のレーザー核融合発電実現において極めて重要な研究課題であります。

### 誘電体ナノレイヤーによる新機能光学薄膜の形成に成功

また、われわれはより一般的な応用として、原子レベルでの膜厚制御性を利用した誘電体ナノレイヤーの形成による新機能光学薄膜の形成にも成功しています<sup>4)</sup>。異なる誘電体ナノレイヤーを交互に積層し、それぞれの層の膜厚を精密に制御することによって、膜全体の屈折率を任意に制御可能な光学薄膜の形成が可能となりました。この手法の利点は屈折率のコントロー



【図1】原子層堆積法による光学薄膜形成装置

ルが各誘電体ナノレイヤーの膜厚で制御可能であり、極めて高い精度で屈折率制御が可能になるという点です。これを応用すれば、膜厚方向に傾斜屈折率を持った新機能光学フィルターと等価な膜を作製することも可能になり<sup>5)</sup>、さらに、将来的には分散補償用のチャープミラー等これまで作製が困難であった高精度新機能光学素子においても、極めて高性能な素子が容易に作製できると考えています。

ナノテクノロジーの進歩によって実現

この研究の基礎となる原子層堆積法は1970年代に発明されましたが、当時はナノの厚さの誘電体薄膜は大きな需要がなく、大面積性能を生かした非常に限られた応用しかありません

でした。しかし、21世紀になって半導体素子の微細化が進み、ナノテクノロジーへの要求が高まるにつれて、いよいよこの技術が日の目を見ようとしています<sup>6)</sup>。今後、原子レベルでの膜厚制御性を持つ、この究極の光学薄膜形成法が大型光学薄膜の形成のみならず、通信用狭帯域光学フィルター作製等の産業応用でも大きく花開いていくことを期待しています。

- 1)レーザーと現代社会(レーザー技術総合研究所編、コロナ社、2002)
- 2)M. Ritala and M. Leskela:Handbook of Thin Film Materials Vol. 1 (ed. H. S. Nalwa, Academic Press, San Diego, 2002) p. 103
- 3)S. Zaitso et al.: J. J. Appl. Phys. 41 (2002) 160.
- 4)S. Zaitso et al.: Appl. Phys. Lett. 80 (2002) 2442.
- 5)特許出願 2002-349554
- 6)A. E. Braun: Semicond. Int. 24 (2001) 52.

TREATISE

## 高出力レーザー応用の発展を目指して

大阪大学大学院工学部(阪大レーザー研) 近藤公伯

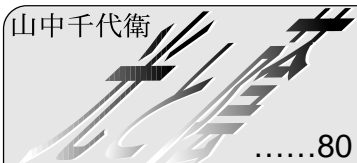
今世紀の新産業を生み出すレーザー技術

大阪大学レーザー核融合研究センターの学生生活から12年が

たち、このたび大阪大学で再び研究活動をさせていただくこと

となった。さて、近年レーザーを利用したさまざまな光産業の

山中千代衛



### 水素社会とレーザー

アメリカのイラクに対する侵攻が切迫している。ブッシュ大統領が悪の枢軸と定めつけたイラクと北朝鮮を比べると、どう見ても金正日の方が危険度が高い。それでもブッシュはイラクには武力を使ってでも政権の転覆を謀る作戦だが、北朝鮮の核開発や人権抑圧は外交努力で解決する方針という。

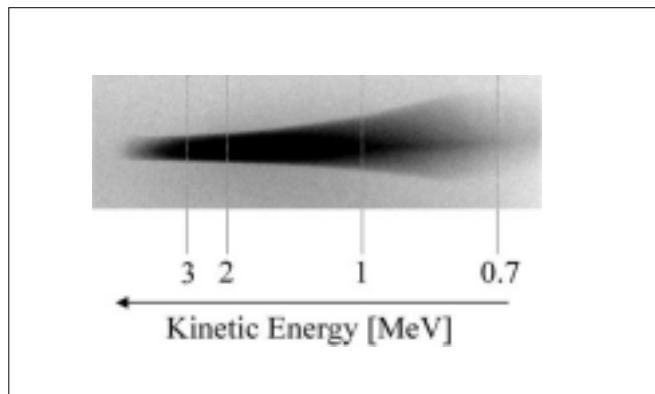
なに故フセインをかくまで目の敵にするのか。湾岸戦争や長年にわたるアラブ・イスラエル紛争も要因だが、イラクと北朝鮮の決定的な相違は石油の有無である。サウジアラビアに次ぐ世界第二の油田を誇るイラクは、アメリカのエネルギー世界戦略のまさしくターゲットに位置付けられているのだ。

人類の生存に決定的に必要なものは食糧とエネルギーである。科学技術が人間に役立つ最も重要な分野はまさにエネルギー開発技術だ。地上のあらゆる生物は太古より太陽のエネルギーで生かされてきた。近代文明は現在石油のエネルギーにより支えられているのである。この資源は不断に消費され枯渇への道を辿っている。

22世紀は石油に変わる水素エネルギーの社会となる。現在燃料電池の発達により、自動車がその焦点に置かれている。アメリカは先行する日本の燃料電池自動車を追撃すべく、5ヵ年17億\$という大型予算を計上したと新聞が報じている。当面はガソリンから水素を発生する方式が便利とされているが、やがては水から無尽蔵の水素を採集する方式に行くのは自明であろう。即ちレーザーによる水素生産の道が求められるのである。しかもこれは核融合発電による水の電気分解ではなく、核融合エネルギーによる直接水素発生方式でなければならない。

30年来努力してきたレーザー核融合による中性子利用やレーザーによるエネルギー集中を用いた水素発生こそ人類最大の夢なのである。アメリカもやはり核融合の重要性に目覚め、回帰してきた。わが国の科学技術基本計画の焦点をエネルギーに向けなければ日本の22世紀はない。いよいよ水素社会の到来である。

【(財)レーザー技術総合研究所 研究所長】



【図1】高速電子の分光像(50ショット積算)

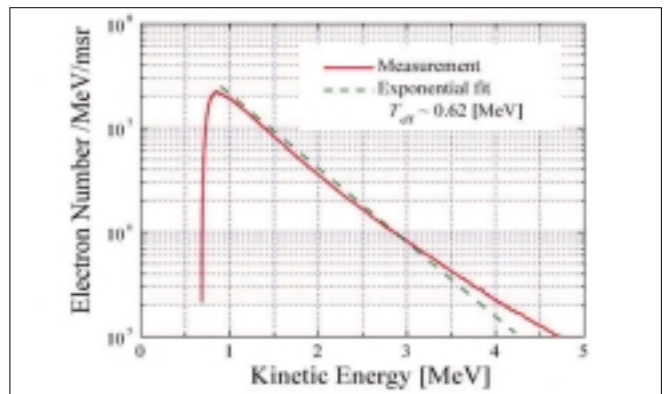
創出が待望されているが、私は高出力レーザー技術こそが、このような期待を大いになえてくれるのではないかと考えている。例えばこれまでの私の研究では、瞬間出力10TW(十兆ワット)、繰り返し10Hzの比較的小型の高出力レーザー装置の開発とそれを利用した応用研究を展開してきた。このような装置は1ショットあたりの出力エネルギーこそ400mJ程度と比較的小さめながら、パルス幅が40fs(40フェムト秒、1フェムト秒は千兆分の一秒)と極めて短いため、瞬間出力は10TWに到達する。このようなパルスはレーザーの持つ空間コヒーレンスのよさから、例えば10 $\mu$ m以下に絞り込むことは容易であり、この結果、極めて短い時間、極めて限られた空間領域ではあるが、電子をその中にさらせば、瞬時に相対論的運動エネルギーになるような非常に高い強度の光電磁場を発生することができる。

#### 新しい実用型高速電子発生装置の可能性

図1、2はアルゴンガスジェットに上述の10TWパルスを集光し、その際に発生した高速電子ビームのエネルギースペクトルを示す(図1は高速電子の分光像、図2は分光像から得られたスペクトル。図2は1ショットあたりの強度を示す)。実験ではイメージングプレートを検出器として使い、ターゲットから50cm程度離れたところに分光用の電磁石とともに設置した。わずか50ショットで十分過ぎる信号量を得ることができるほどMeV以上の高速電子発生効率が高く、このようなレーザー装置が、例えば現在の10Hz動作から、kHz動作へ改良されるだけで、極めてコンパクトな、全く新しい実用型高速電子発生装置が可能となるだろう。さらに、このような高速電子のエネルギーをもっと高くすることができれば、レーザーで発生した電子で新たにターゲットを放射化したり、例えば巨大核共鳴により中性子発生も可能となると考えている。

#### 高密度爆縮プラズマの挙動

また、もともと励起に用いているレーザーパルスのパルス幅が40fsと極めて短いので、発生した高速電子のパルス幅も極めて短くなることが予測され、このような短いパルス幅の高速電



【図2】1ショットあたりに換算した高速電子のスペクトル強度

子を用いれば、例えば高密度爆縮プラズマの挙動なども手に取るように見ることもできるかもしれない。これはレーザー核融合研究において、現在極めて重要とされている高速点火物理を解明するにあたり、極めて強力なツールになるだろう。以上のことを踏まえて考えると、今後も引き続き高出力レーザー技術を究め、これを利用した新しい応用研究を展開することが非常に重要なのではないだろうか。

#### 時空間コヒーレンスを利用した分野

高出力レーザー技術は主にレーザー加工の分野で大きく花開いたが、このような、レーザーエネルギーを一端インコヒーレントな熱エネルギーに変えて利用するだけでなく、レーザーの大きな特徴である時空間コヒーレンスをもっと積極的に利用した分野を開拓したい。例えば上述の高速電子発生には電子プラズマ波が重要な役割を果たすと考えられていたが、私の得た結果は、電子プラズマ波だけではなく、レーザーが作り出す電磁界のコヒーレントな振動こそが高速電子発生を生み出していると考えに足る実験結果を示している。また比較的低出力のレーザーの応用のみならず高出力レーザーの分野でも、光の位相制御がキーポイントになると考える。光の位相制御こそがブレイクスルーの大きな鍵ではないだろうか。

#### 大きな産業となり得る高出力レーザーエンジニアリング

これまで私は実験室規模の比較的小型のレーザーを研究対象としてきたが、そこで得られた知見を大型レーザーにも積極的に応用していくことができればと考えている。高速点火核融合はまさに超高エネルギーレーザーの光位相制御技術が極めて重要な技術の一つであることは間違いなからう。21世紀に“高出力レーザーエンジニアリング”が大きな産業をもたらすことを夢見ており、レーザー技術総合研究所との積極的な研究協力を進めていきたい。

"High power laser engineering never fails to open the new field!" である。関係する多くの人たちとエキサイティングな夢を見ることができればと願う次第である。