共振器内への応用に適した高性能反射鏡

ニール・アンダーソン、ラミン・ラレザリ

吸収と散乱損失を注意深く制御した高性能で低損失の反射鏡は、重力波検出やキャビティリングダウン分光法などの厳しい要求に対応できる。

高性能の反射鏡光学系は共振器を用いる吸収分光法、光学的原子時計分光法、リングレーザジャイロスコープ（RLG）、重力波検出などのさまざまな高感度測定を可能にする技術に成長した。それぞれの測定はさまざまな環境条件下においてスペクトル性能の犠牲なしに動作する低反射と低損失の反射鏡が重要になる。ここでは、極端に高い99.99%以上の反射率（R）をもつ反射鏡が誘電体材料を用いてどのように設計され、イオンビームスパッタリングを用いてどのように製造されるかを述べる。とくに、光吸収、光散乱、光透過などの損失を最小にする方法と、それらを定量的に直接測定する方法を詳しく述べる。これらの反射鏡の重要な応用例として、キャビティリングダウン分光法（CRDS）について述べる。

ほとんどの反射鏡はガラス上に金属薄膜を蒸着して製造され，ある程度の損失が許容される多数の用途に使うことができる。銀、金、アルミニウムなどの金属の利点は、それらが数ミクロンの広いスペクトル領域にわたりR＞95%の反射率が得られることにある。しかしながら、金属反射鏡の反射率を増強するには誘電体の被覆層を含めた付加加工の工程が必要になる。

金属反射鏡はコストが比較的安く、広い波長範囲にわたり比較的高い反射率を確保できるが、100万分の1レベルの光損失を要求する高感度で高精密の測定には不向きであり、これらの測定では極端に高い反射率が必要になる。また、金属被覆は化学的不安定性（銀）と機械的不安定性（アルミニウム、金）の両方の欠点もあり、ほとんどの場合に保護層が必要となり、例えば、アルミニウムには酸化ケイ素を被覆して反射鏡の劣化を抑制する。したがって、金属被覆に関連する本質的な不適合性を克服するには代替策が必要になる。その1つのアプローチはイオンビームスパッタリング（IBS）を使用して、高感度レーザ機器への応用に適した高反射率で低損失の反射鏡を製造することだ。

誘電体反射鏡は下地の基板（ガラス、結晶または金属）に高屈折率層と低屈折率層を交互に蒸着して積層構造を形成する。多層膜の設計、被覆材料および蒸着プロセスを適切に選択すると、紫外（UV）から近赤外（NIR）のスペクトル領域にわたり極端に高い反射率をもつ誘電体反射鏡の製造が可能になる。

ハードコートされた低損失の誘電体反射鏡を設計する場合は、反射鏡の帯域幅に対する高い（R＞99.95%）反射率、s偏光とp偏光の入射角（AOI）範囲での動作、高いレーザ誘起損傷閾値

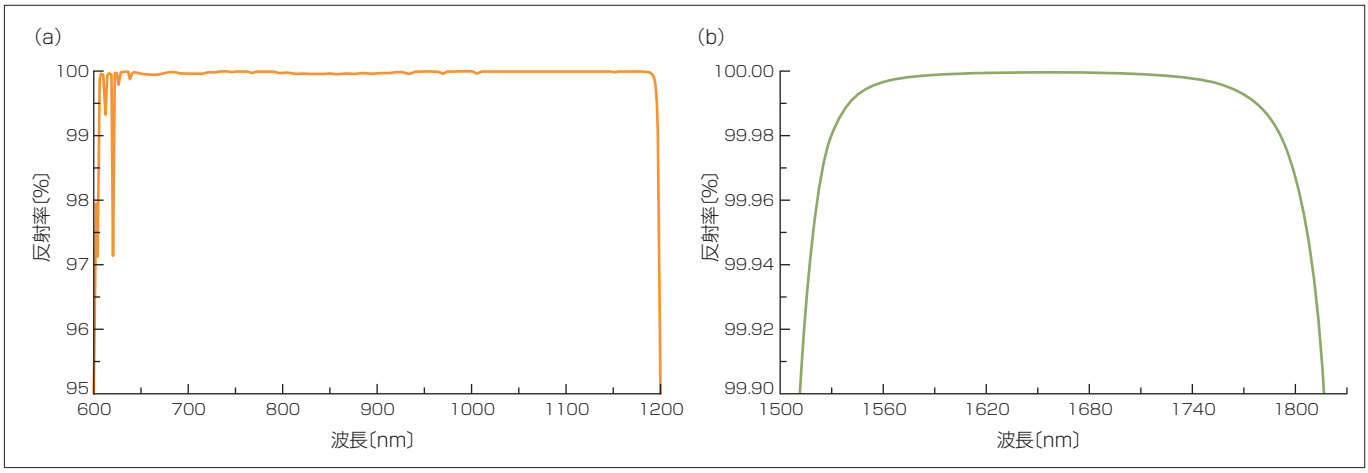


図1　レーザ共振器用に設計した反射鏡は500nmの帯域にわたりR＞99.95%の反射率が得られる（a）。キャビティリングダウン分光法用の反射鏡は1650nmにおいてR=99.9994%の反射率を持つ（b）。

（LIDT、例えば、10ns、1064nmパルスに対するLIDT＞20J/cm^2）などが要件になる。**図1**は可視およびNIR領域で動作するように設計された2種類の高反射率誘電体反射鏡の反射データを示している。以下にハードコート誘電体反射鏡の性能特性を述べ、極端に高い反射率値を実現するために、透過（T）、散乱（S）および吸収（A）に関係する損失の制御と最小化がどのようにして行われるかを議論する。

散乱、吸収および透過特性

光が反射鏡の表面と相互作用すると、いくつかの異なる現象が生じる。入射光の大部分は反射される。しかしながら、光の一部は反射鏡における散乱、吸収または透過によって失われる。エネルギー保存則から次式が得られる。

$$R=1-(S+A+T)$$

すべての誘電体反射鏡の反射率は主として設計に支配され、多層構造の形成に用いる高屈折率材料と低屈折率材料の層数を変えることで任意の値が得られる。そこには上述の損失機構があるため、R=100%を実現することはできない。とは言いながら、いくつかの特殊な場合は単波長（850nm）に対してR=99.9998%、狭い波長範囲（830～880nm）に対してR=99.99965%をもつ誘電体反射鏡が製造されている[1]。高反射率値の究極の限界は散乱と吸収に関係する損失になる。したがって、散乱と吸収の両方の機構に関係する損失の最小化と制御の方法が重要になる。

散乱による光損失は表面欠陥と基板粗さにより支配され、実際の多層被膜からは生じない。表面欠陥にはスクラッチ、ディグ、微粒子などの種類がある。最高品質のガラス基板と蒸着法を用いると、微粒子欠陥は散乱損失の主要因にはならない。

散乱損失は下地基板の表面粗さが最大の支配要因になる。この場合の光損失は基板面に存在するサブミクロンの表面形状により反射した光波に誘起される位相の不均一変化から生じる回折効果として理解できる。強い散乱面は不均一分布形状の二乗平均平方根（RMS）粗度（d）が入射光の波長オーダ（$d \fallingdotseq l$）の場合に対応する。この場合の入射光は強く散乱される。弱い散乱面は$d<<l$の面として定義される。この場合の入射光は弱く散乱され、その結果、損失が減少する。

表面粗さによる散乱損失はRMS粗度がdの表面からの全積分散乱（TIS）の理論計算にもとづいて容易に理解できる。全積分散乱は波長（l）に対するRMS粗度の比の二乗に指数関数で比例し、次式により与えられる。

$$\mathrm{TIS}=1-\exp[-(4pd/l)^2]$$

図2は広く使われる4つのレーザ波長に対する100万分の1（ppm）でのTSI測定値とRMS粗度dとの関係を示している。この簡単な理論モデルによる解析から明らかなように、反射鏡の多層膜を被覆する下地の基板は、サブナノメートルのRMS表面粗さを確保し、散乱を最小化して、R>99.995%の反射鏡を製造しなければならない。

ナノスケールの表面粗さによる散乱損失を減少させるには、スーパーポリッシュ技術を使用することが多い。スーパーポリッシュは一連の連続加工工程からなり、微細な研削材料と研磨材料を続けて使用して、基板の全面RMSを1Å以下に抑える。R＞99.995%の反射鏡が必要となる場合の基板は、1Åまたはそれ以下のRMS表面粗さ値が必要になる。

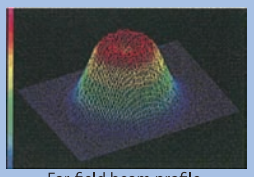
散乱効果に関係する損失ばかりでなく、

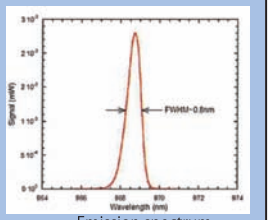
PRINCETON OPTRONICS

これが
高出力 VCSEL
です

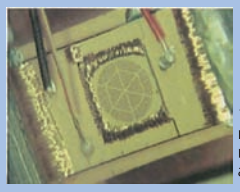
この高出力半導体レーザーはエッジエミッター方式に比べ数々の特徴があります！

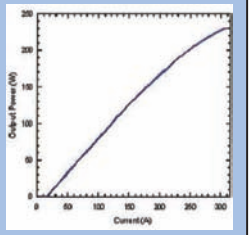
◆ビームの質がよい


Far-field beam profile


Emission spectrum
5mm×5mm VCSEL array at 100W output power

◆高スケーラビリティ


100W CW single mode VCSEL array mounted on a micro cooler



その他の特徴
◆温度依存が低い
◆製品間のばらつきが小さい
◆バックトークが少ない
◆波長の安定度が高い
◆FIT<10

AUTEX オーテックス株式会社
URL http://www.autex-inc.co.jp
E-mail Sales11@autex-inc.co.jp
東京本社 〒162-0067
東京都新宿区富久町16-5 新宿宿高砂ビル
TEL. 03(3226)6321 FAX. 03(3226)6290
大阪支社 〒530-0004 大阪市北区堂島浜2-1-29
TEL. 06(6344)6328 FAX. 06(6344)6342

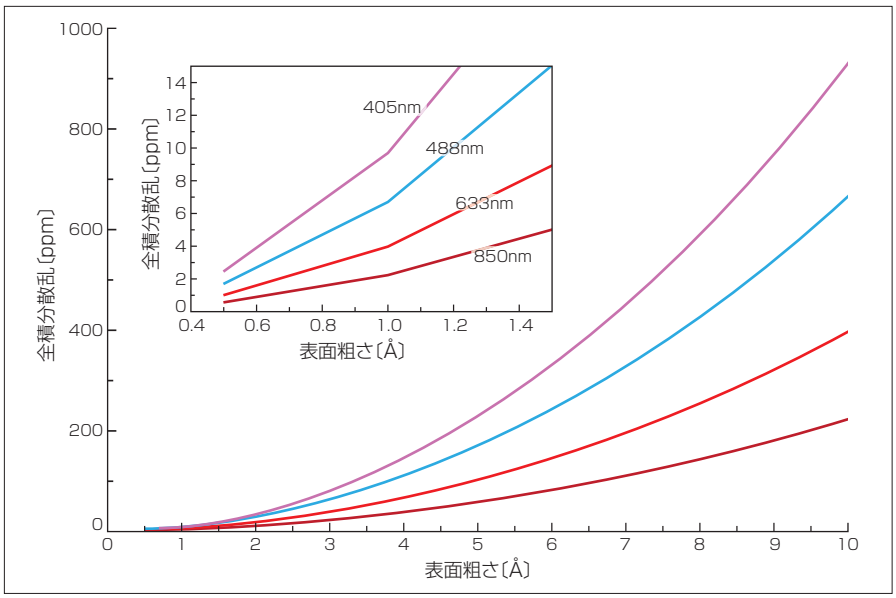


図2 RMS表面粗さを関数にした全積分散乱（TIS）の理論曲線を4つの汎用レーザ波長に対して示している。挿入図は同様の1.5Å以下の表面粗さ値に対するデータ。

吸収損失も最小化と制御が要求される。光吸収は材料に固有の電子構造により支配される。したがって、屈折率の最適な高低屈折率コントラスト（n_H/n_L）が得られ、反射鏡の動作波長に対して過剰な光吸収をもたらさない誘電体材料対の適切な選択が重要になる。

耐火性酸化物は低屈折率材料としての二酸化ケイ素（SiO_2）と、高屈折材料としての二酸化チタン（TiO_2）、二酸化ハフニウム（HfO_2）および五酸化タンタル（Ta_2O_5）がハードコート誘電体反射鏡に広く使われている。これらの材料はUVから中赤外の波長領域において高い屈折率コントラストと低い吸収損失が得られる。フッ化物、ケイ素（Si）やゲルマニウム（Ge）などの非晶質半導体、III-VおよびII-VI化合物などは反射鏡の動作波長の深紫外や遠赤外への拡張を可能にする。

吸収損失は不完全な化学量論組成、化学的不純物の存在および高いレーザ強度による非線形光学過程の影響も受けるが、最後の非線形光学過程はユーザの使用条件から決まるため、その制御が難しい。化学量論組成の変動は最適の蒸着条件を選択することで解決できる。化学的不純物の影響は最高の品質管理を行い、最高純度の出発材料を使用することで抑制できる。

上述したように、吸収損失の主な要因の制御と最小化が可能であることは比較的容易に理解できるであろう。低損失を実現するための課題は損失を100万分の1の精度で正確に測定することの難しさにある。

そのための1つの方法は光熱共通経路干渉測定（PCI）にある。光熱共通経路干渉計は2つのレーザ光源からなり、プローブビーム（一般に633nm）とポンプビームは反射鏡の表面で空間的に重なり、ポンプビームの波長は反射鏡の動作波長の設計にもとづいて選択される。PCIの場合、ポンプビームの吸収が反射鏡の局所加熱を引き起こす。この加熱はポンプビームに小さいが測定可能な位相歪みをもたらし、位相強度の変化が干渉計の検出器アームでの測定を可能にする。点毎または連続走査による走査を行うと、反射鏡の全面にわたる吸収「ホットスポット」の空間マップが得られる。

透過損失も注意深い考慮が必要になる。反射鏡の反射率と同様に、反射鏡被覆の透過特性も多層構造の設計による制御と最適化を行うことで、任意の小さい値に抑えることが可能になる。しかしながら、ほとんどの応用は透過光を測定の一部に利用するため、ある程度の透過損失が必要になる。少量の損失が必要となる古典的な事例にはレーザ共振器の出力反射鏡がある。多くの応用において、反射鏡は$T=S+A$を満足するように設計される。

高反射率で低損失のハードコート誘電体反射鏡は多様な高感度光学測定器を実現する中核技術になっている。最近の進歩した反射鏡性能の背景にはスーパーポリッシュ技術の使用による損失の最小化と制御および最新のIBS蒸着プロセスを組み合わせた$R>99.999\%$と、100万分の1レベルの散乱および吸収損失をもつ反射鏡製造の信頼性と再現性がある。

これらの進歩から得られた成果はいくつかの高精密で高感度の光学測定技術に恩恵を及ぼしている。その重要な実例の1つは化学種の検出とその濃度の定量化を10億分の1以下のレベルで可能にするCRDS機器の開発だ。

参考文献
(1) G. Rempe et al., Opt. Lett., 17, 5, 363(1992).
(2) Light Scattering and Nanoscale Surface Roughness, A.A. Maradudin, ed., Springer Science(2007).

著者紹介
ニール・アンダーソン（Neil Anderson）は米IDEXオプティクス・アンド・フォトニクス社（IDEX Optics & Photonics）Semrock事業部の技術開発アナリスト。ラミン・ラレザリ（Ramin Lalezari）は同社のアドバンスト・シンフィルムス事業部の事業部長（e-mail: ramin@atfilms.com URL: www.atfilms.com）。

LFWJ