

広帯域ミラー

伊沢 孝男*・猿倉 信彦**

Ti³⁺ ドープ・サファイア（チタンサファイア）に代表される波長可変レーザーの開発によって、きわめて広い波長域にわたり波長可変可能なレーザー光源が生まれている。しかし、実際に連続的にチューニングできる波長域は、共振器ミラーの帯域幅によって制限され、レーザー媒質として可能な波長域すべてをチューニングするためには、何組かのミラーを交換しなければならないという問題点があった。例えば、チタンサファイアレーザーを例にとると、670～1100 nm の波長域に対して、通常3～4組ものミラーセットが必要となっていた。

しかし、最近のコーティング技術の進歩によって広帯域チューニングを可能とする広帯域ミラーが実現されつつある。本稿では筆者らが開発した広帯域・低損失ミラーを例にとり、広帯域ミラーの開発現状と波長可変レーザーへの応用について述べる。

1. 広帯域・低損失ミラー

チタンサファイアのような広帯域波長可変レーザーを、全波長域にわたって1組のミラーで効率的にCW動作させるためには、広帯域性と低損失性（損失0.2%以下）をかね備えた広帯域ミラーやアウトプットカップラー（部分透過ミラー）が必要となる。

しかし、従来の電子ビーム蒸着で作製された一般的な広帯域ミラーでは、損失は2～3%（反射率97～98%）程度あり、ゲインの低いレーザー媒質のCW発振は困難であった。この損失は、通常の狭帯域ミラーに比べると10倍以上にもなる。こうした違いは、広帯域ミラーにおける膨大な膜層数とマルチスタック構造（膜厚の異なる多層膜をブロック的に積み重ねたもの）に関係している。すなわち広帯域ミラーに必要なとされる100層近い層数は、蒸着過程での膜の多結晶化によって生ずる表面粗さの劣化を増大させ（一般に30 Årms以上に

る）、狭帯域ミラー（30層程度）の5～10倍の散乱損失を生む結果となる。またマルチスタックにおける膜内の電界強度は、各スタックからの反射光の干渉効果によって、単一スタックの狭帯域ミラーに比べると10～50倍にもなり、吸収や散乱をさらに増加させる原因となる。

こうした広帯域ミラーにおけるデメリットを補うため、筆者らが新たに開発した広帯域・低損失ミラー^{1,2)}では吸収・散乱損失の極めて少ないTa₂O₅/SiO₂多層膜（99層）が用いられている。成膜手段としては、従来の電子ビーム蒸着法であるが、吸収・散乱・膜欠陥を最小に抑える適切な成膜条件やベーキング処理が施され、従来の一般的電子ビーム蒸着膜に比べると、損失は約1/10（30層のとき、損失160 ppm）に低減されている。

さらに多層膜内の電界強度を減少させるため、各膜厚を基板から空気側に行くにしたがい、徐々に薄くしていく設計が用いられている。これはスタック間での干渉効果による電界の増加を緩和する効果（ピーク値が約1/3に減少）をもっている。こうした製作・設計両面での改良により、チタンサファイアのほぼ全波長域にわたって、狭帯域ミラーと同レベルの高反射率（99.85～99.95%）が得られている（図1）。

2. 広帯域アウトプットカップラー

波長可変レーザー用アウトプットカップラーとして

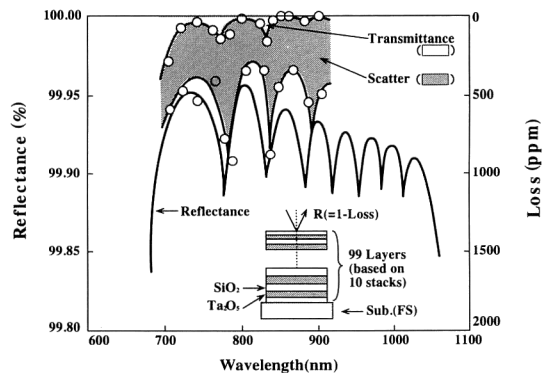


図1 広帯域・低損失ミラーの反射特性（損失）と膜構造。

Broadband mirrors for tunable lasers (1996年7月12日受理)

*Takao IZAWA 昭和オプトロニクス(株) (〒226 横浜市緑区白山1-22-1)

**Nobuhiko SARUKURA 分子科学研究所機器センター (〒444 岡崎市明大寺町)

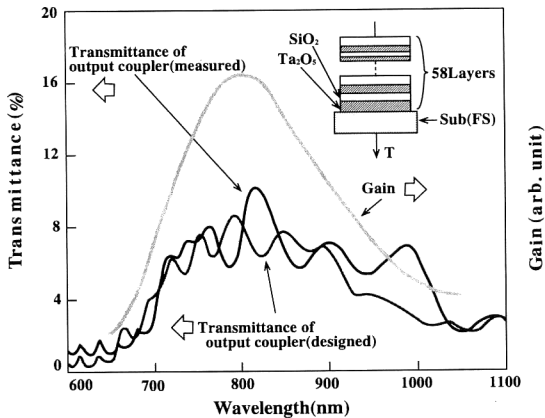


図2 広帯域アウトプットカップラーの透過特性とチタンサファイアのゲインカーブ。

は、レーザー媒質のゲインにマッチした波長透過特性が望まれる。こうしたカップラーは、膜厚の異なった何十層もの多層膜を精度よく成膜しなければならず、高度な成膜技術（特に膜厚制御技術）が要求される。

図2は筆者らがチタンサファイア用に開発した広帯域アウトプットカップラーの特性を示している。設計上の透過曲線はチタンサファイアのゲイン曲線を考慮し³⁾、2~8%の範囲に設定した。膜物質には、広帯域ミラーと同様の低損失 Ta₂O₅/SiO₂ 膜を使用し、58層からなる多層膜の各膜厚を最適化したものである。設計値とのずれは主として膜厚誤差（約1%）によるもので、シミュレーションによれば、膜厚誤差0.5%以下が望まれる。これは現状の蒸着装置の性能限界をこえた値ともいえ、今後の装置の高性能化に期待したい。

3. チタンサファイアレーザーへの応用例

前述の広帯域・低損失ミラーおよび広帯域アウトプットカップラーを用いたCWチタンサファイアレーザーのチューニング特性を図3に示す。共振器はZ-fold型（共振器長70cm）とし、波長選択素子には広帯域複屈折フィルターを用いた。この結果、チューニング波長域は670~1080nmに及び（10W Arレーザー励起）、1組

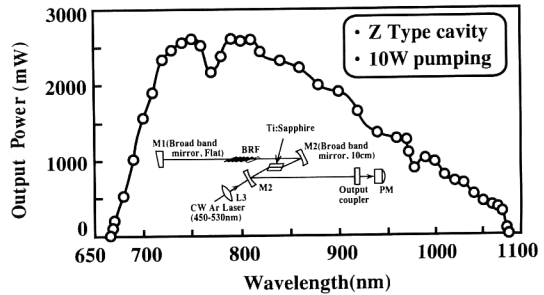


図3 広帯域・低損失ミラーとアウトプットカップラーを用いたCWチタンサファイアレーザーの波長チューニングデータ。

のミラーでチタンサファイアの全波長域発振が実現している²⁾。また、こうした広帯域ミラー技術は、膜厚の調整により、350nm~2μmの波長範囲内において応用が可能である。

波長可変レーザーにおけるミラーの帯域不足という問題は、チタンサファイアレーザーを例に述べたように次第に改善されつつある。さらに、超低損失膜が作製可能なイオンビームスパッタリング法を用いれば、将来的には99.99%以上の超低損失広帯域ミラーの実現の可能性もある。

一方、超短パルスレーザーにおけるパルス幅の限界が主としてミラーの帯域幅で制約されている現状から、群速度を考慮した広帯域ミラーの開発も今後望まれる。

文 献

- 1) 伊沢孝男, 猿倉信彦: “波長可変レーザー用広帯域低損失ミラー”, レーザー研究, 1 (1996) 74-80.
- 2) T. Izawa, M. Maeda, N. Yamamura, R. Uchimura, T. Yakuoh, N. Sarukura, Z. Liu, X. Xia, Y. Segawa and H. Tashiro: “Full-range tuning of a CW Ti:Sapphire laser with a single set of extremely broadband, low-loss mirrors,” *Tech. Dig. Conf. on Laser Electro-Optics* (Baltimore, 1995) pp. 40-41.
- 3) P. F. Moulton: “Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Sapphire,” *J. Opt. Soc. Am. B*, 3 (1986) 125-133.