

DWDM システムに応用される 光学薄膜フィルター

日本真空光学㈱

神 吉 康 文

Optical thin ^lm applied to DWDM system

Yasufumi Kanki

Research and Development Department, Optical Coatings Japan

1. 始 め に

光学薄膜フィルターは、バンド・パス・フィルター（BPF: Band Pass Filter）として波長多重分割（DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing）伝送用に広く使用されている。また、ファイバー伝送の高密度化に伴い、BPF を始めとして様々な分光特性を持つ光学フィルターが製品化され、さらなる高性能・高信頼性を有するフィルターが求められて来ている。本稿では、各種 DWDM フィルターの製品・用途紹介を含め、これらを実現するための設計技術・成膜技術と今後の課題について述べる。

2. DWDM に使用される光学薄膜フィルターの概要

光通信では、既存のファイバー網を利用した

波長多重分割伝送（DWDM）が実用面、コスト面、普及の速さの点で採用されている。

図 1 に C・L バンドを使用した基本的な DWDM システム図を示す。DWDM 伝送系は、異なる複数の波長の LD 信号光を C バンド・L バンド別々に DWDM 合波器により合波し、その後、C バンド・L バンドの合波器により多重化する。光ファイバー・その他光送信回路の損失補償の為に、EDFA(Erbium Doped Fiber Ampli^er)を使用する。EDFA にて増幅する場合、C バンドと L バンドを分波して、それぞれを増幅し、その後合波するのが一般的である。最後に多重化された信号を分波する。光学薄膜フィルターはこれらシステムのなかで随所に使用されている。

狭帯域 BPF（NBPF: Narrow Band Pass Filter）（図 1）は波長を分割したり合波したりするときに使用される。図 2 に光学薄膜を使用した DWDM 8 波合成とそのデバイスの特性図を示す。また、C バンド帯域と L バンド帯域の合波/分波をし、且つ監視用 SV 光を阻止するフィルターとして WBPF（Wide Band Pass Filter）（図 1）が使用される。さらに、図 3 には EDFA に使用されるフィルターを示

〒412-0006
静岡県御殿場市中畑字永坂 1413 番地
TEL 0550-89-0230
FAX 0550-89-7124
E-mail: kanki@ocj.co.jp
<http://www.ocj.co.jp>

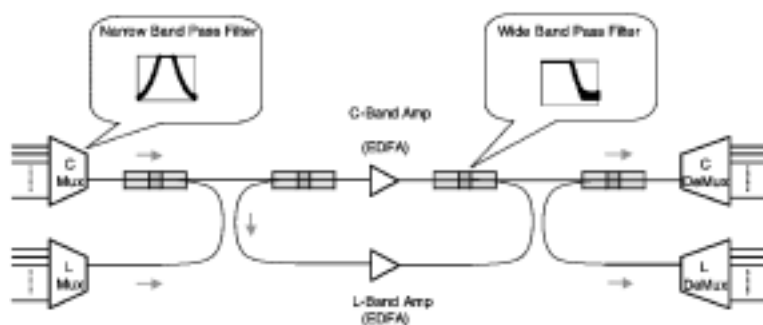


図1 C/L Band DWDM

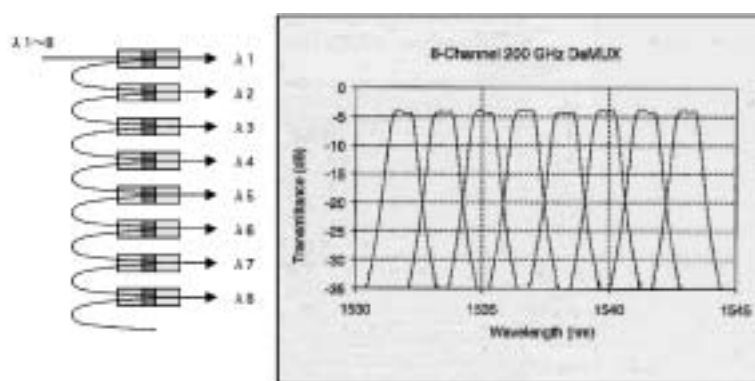


図2 Dense Wavelength Division Multiplexer 200 GHz 8-Channel

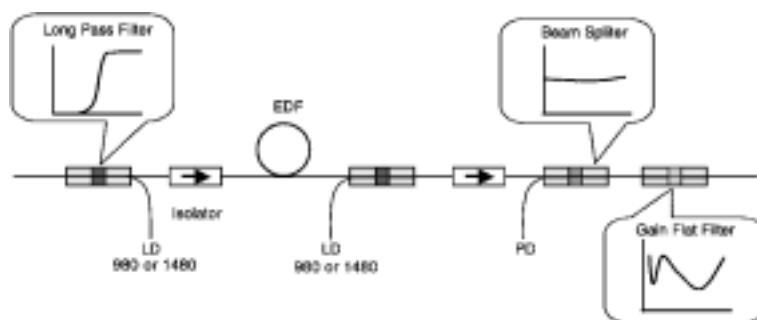


図3 EDFA に使用するフィルター

している。EDFA の励起光と DWDM の信号光の合波に使われる PF (Long/Short Pass Filter), EDFA の入出力信号をモニターするために使われるタップ用フィルター (Beam Splitter) 及び, EDFA の出力光の平坦化に用いられる GFF (Gain Flattening Filter) (図 4)

等がある。

3. 光学薄膜設計技術

DWDM 伝送に使用される複数の種類の光学薄膜フィルターの内, 狭帯域 BPF を取り上げ, その設計手法について述べる。

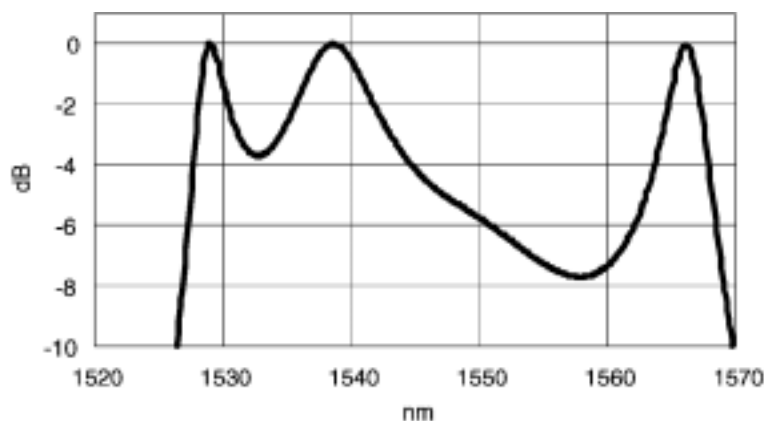


図4 Gain Flattening Filter

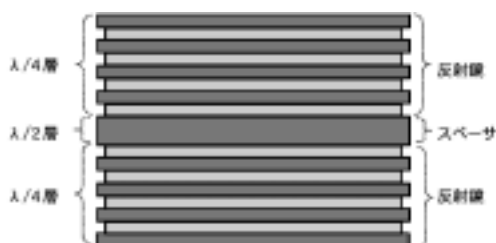


図5 全誘電体ファブリーペローフィルターの構造

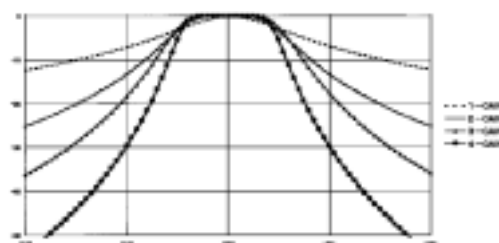


図6 1～4 cav 比較シミュレーション

3-1 設計

図5にBPFの基本構成を示す。ファブリー・ペロー干渉計を固体薄膜で置き換えたもので $\lambda/4$ の光学的膜厚の高屈折率膜と低屈折率膜からなる反射鏡と、 $\lambda/2$ 整数倍の光学的膜厚をもつスペーサー層より成り立っている。この構成はBPFの構成単位としてキャビティ(CAVITY)とも呼ばれている。図6, 7にこのキャビティを複数重ねたときの設計例を示す。キャビティを重ねることにより、透過帯域の幅を広げることができる。DWDM用狭帯域BPFに要求される特性は、いうまでもなく透過帯域については通過する光の帯域に対し広く、透過損失が少ないことが必要であり、遮断すべき波長に対しては十分な減衰量が要求される。そのため、4キャビティさらには5キャビティの特性が必要となる場合がある。

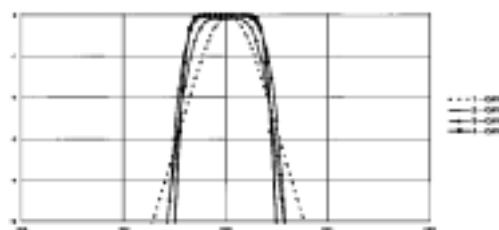


図7 1～4 cav 比較シミュレーション拡大

伝送量の高密度化のためには、ファイバー内を通過する複数の隣り合う光の波長を近接化するが、このことはBPFの透過帯域を狭めることになる。隣接する光の周波数差で表現すると約0.8 nm間隔になる。そのため、クロスオーバーを避けるために分光波形の急峻な立ち上りが必要となる。

3-2 誤差計算

100 GHz 用 BPF では層数が 150 層以上になり、仕様の分光特性を得るためには各層での高い膜厚精度が要求される。図 8 に 100 GHz 用 BPF の設計に膜厚誤差を加えたときの計算値を示す。太い実線で示される誤差を含まない設計に対し、誤差を含むと細い実線に挟まれた領域内に特性が出現する。この計算は誤差を $1/10,000$ としたときで、細い実線の領域では仕様を満足できず、厳密には $3/100,000$ 以下の誤差に抑える必要がある。

3-3 製品実測結果

蒸着により得られた製品の実測値を図 9 に示しているが、仕様を満足する特性を得てい

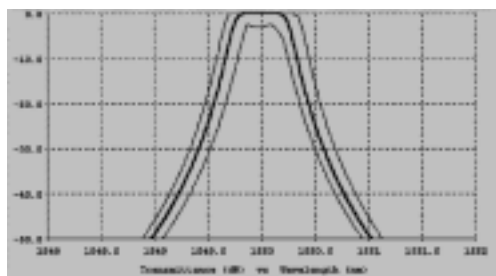


図 8 100 GHz 4 cav 誤差計算 (0.01%)

る。尚、 -40 dB 以下のノイズは測定器によるものである。

4. DWDM 用フィルターに要求される膜質

DWDM 用光学薄膜フィルターに求められる光学、物理・強度に関する膜質特性について述べる。

4-1 光学特性

4-1-1 波長シフト

光学特性の安定性とは温度や湿度の変化に対して上述した各フィルターの分光特性が変化（波長シフト）しないことである。単純な真空蒸着で得られる光学薄膜フィルターの断面構造は図 10 のような柱状構造を持っており、その構造の隙間に大気中の水分が出入りすることで光学特性が図 11 のように変化してしまう。この現象は長期間の耐久性を求められる高精度な光学薄膜フィルターには致命傷となるため、まず第一に解決しなければならない事項である。これを解決するためには少なくともフィルターの断面構造を図 12 のような柱状構造のない高密度な膜構造にする必要がある。後述する各種

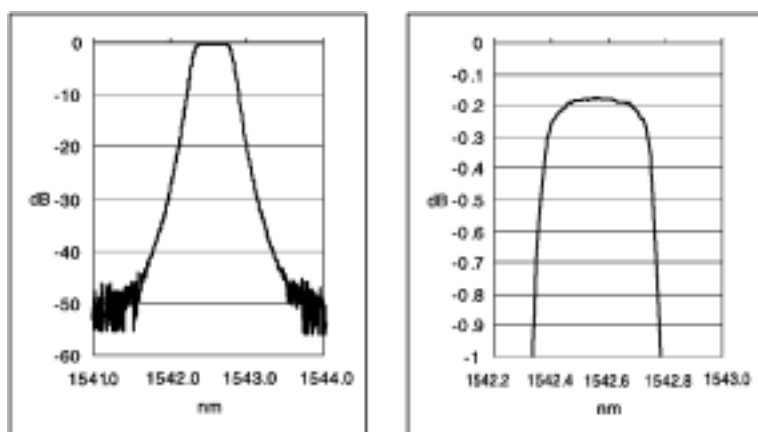


図 9 4-Cavity 100 GHz Filter

仕様：BW0.5 dB > 0.37 nm, 25 dB < 1.2 nm

実測値：BW0.5 dB = 0.42 nm, BW25 dB = 1.03 nm

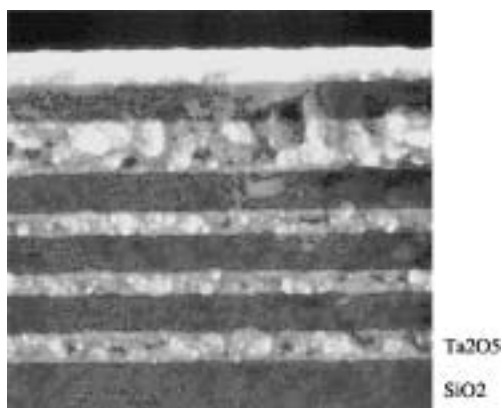


図 10 光学フィルターの断層構造と波長シフト (1)

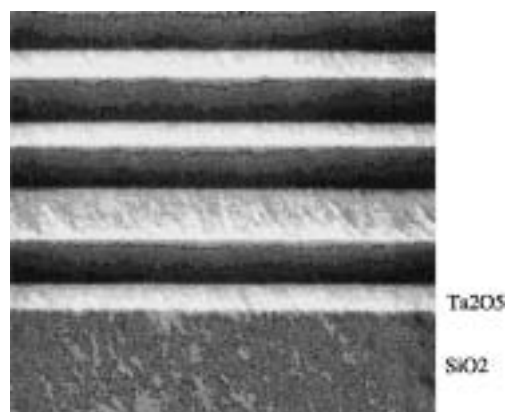


図 12 光学フィルターの断層構造と波長シフト (2)

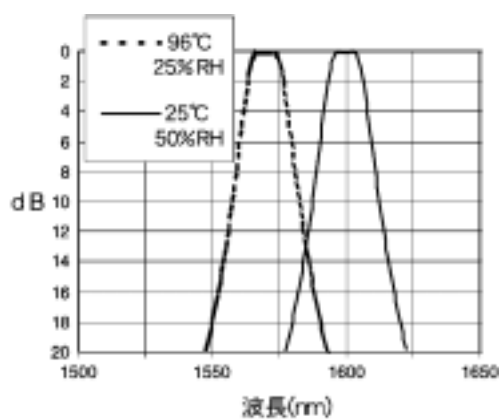


図 11 光学フィルターの断層構造と波長シフト (1)

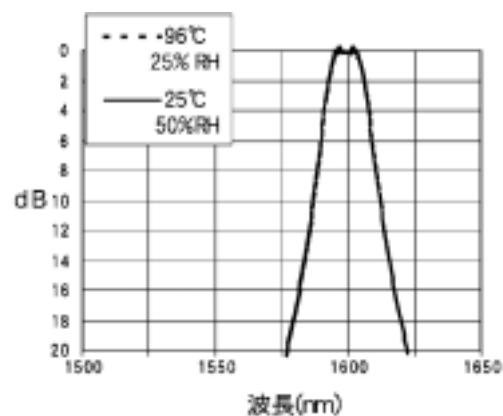


図 13 光学フィルターの断層構造と波長シフト (2)

成膜技術を選択することでフィルターの分光特性は図 13 のように温度・湿度の変化に対して安定化させることができる。

4-1-2 透過損失

DWDM 用の光学薄膜フィルターは、物理膜厚が 30 nm にも達するものがある。そのため積層する層数が増えると各層の微小な吸収でも、最終的な光学薄膜フィルターの透過損失を増大させるため、各層毎の吸収係数を極力抑える必要がある。光学薄膜フィルターには高・低屈折率物質として、主に五酸化タンタルと二酸化珪素が使用される。図 14 は DWDM 用に使用される 4 キャビティの狭帯 200 GHz 用 BPF

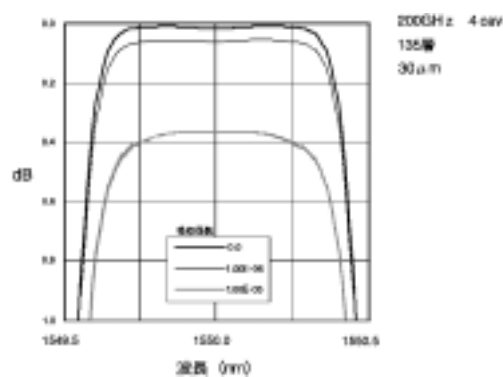


図 14 吸収係数と透過損失の関係

の吸収係数と透過損失の関係を示す。これら BPF に要求される透過損失は通常 0.5 dB 以下は必要であることより、本要求を十分満たすためには吸収係数は $1.0E-6$ が必要になる。

さらに、フィルターの透過損失に影響を与えるものとして **nodule**¹⁾ がある。大きさは直径にして数 mm から数十 mm でフィルター表面に肉眼で観察される場合がある。基板成膜面への蒸発源からの直接的な飛来物や、装置内のコンタミ等の付着により、最初は mm 以下の **nodule** が積層するにつれて大きく成長する。図 15 は蒸発源から飛来してきた **nodule** の上に膜が積層されたものできれいな湾曲した表面が観察されたり、図 16 は断層構造は持たず周りを破壊しながら巣のように大きく成長したものも観

察される。図 17 は **nodule** が基板表面から成長しており基板表面の清浄度にも注意する必要がある。いずれの場合もフィルター内部や表面にこのようなものが存在すれば透過光は遮られたり、散乱させられたりして損失の原因とな

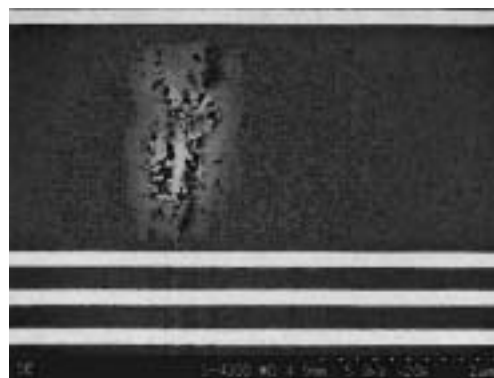


図 16 スペース層内に形成された欠陥

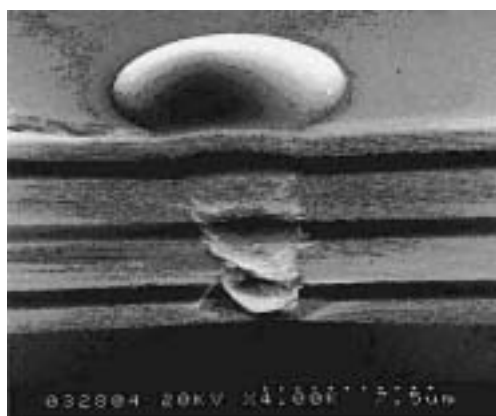


図 15 代表的なノデュール

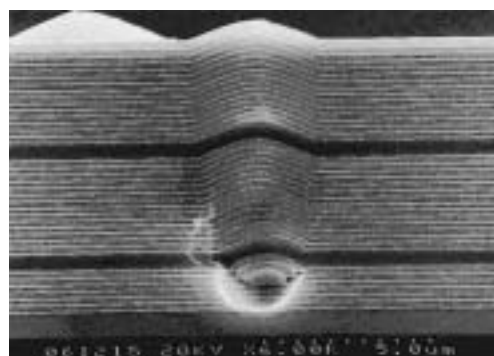


図 17 基板表面から発生したノデュール

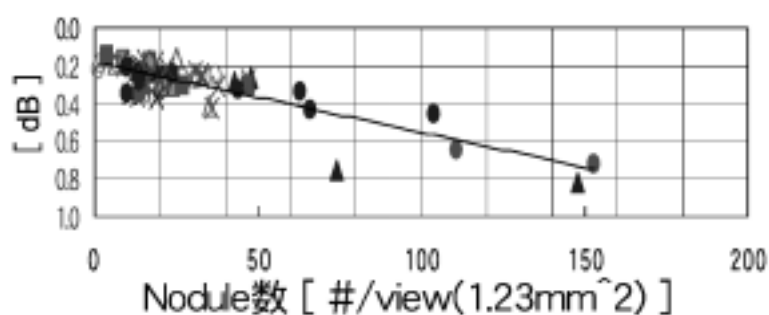


図 18 透過損失とノデュール数

る。図 18 のグラフは **nodule** の数が透過損失に影響を与えていることを示している。

4-2 物理・機械特性

4-2-1 膜応力

成膜後に発生する膜応力が品質に及ぼす影響も大きい。超多層膜となると、成膜プロセスにも依存するが、500 Mpa 以上の膜応力が発生する場合もある。その結果、製品化のための加工・切断時に膜剥がれが生じたり、基板そりによる特性不良が発生する。波長公差の仕様がロングストロームまで要求されると、切断後の膜応力の変化による波長変化に留意する必要がある。図 19 は 100 GHz 用 BPF を 1.4 mm 角に切断すると応力が開放されることを示しており、応力値にして 240 Mpa から平均 130 Mpa まで減少している。そのときの BPF の中心波長変化は短波長側に 0.2 nm シフトしており、仕様波長を得ることができない。膜応力の発生は成膜条件やプロセスにより左右されるため、各種光学フィルターに対応した適切な膜設計・材料・プロセス条件を設定してから発生応力を

軽減させている。

4-2-2 波長の温度依存性

狭帯 BPF の中でも 100 GHz の波長の温度依存性は $0.5 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ が要求されており、一般的に用いられる BK7 基板を使用すると $4.2 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ となり、仕様を満たすことは困難である。図 20 は 2 種類の基板材料 A, B により温度ドリフトが逆転することを示しており、最適な基板材料を選択する必要があることを示している。この解決にあたり、種々の基板材料が各社から提案されている。尚、波長の温度依存性に関しては、高橋氏²⁾の「膜と基板材料の線膨張係数の差による中心波長の温度依存性」についての研究を参照されたい。

5. 成膜技術

5-1 制御技術

上述したように、光学薄膜フィルターが特定の分光特性を持つためにはフィルターを構成する各層が正確な膜厚で加工されていなければな

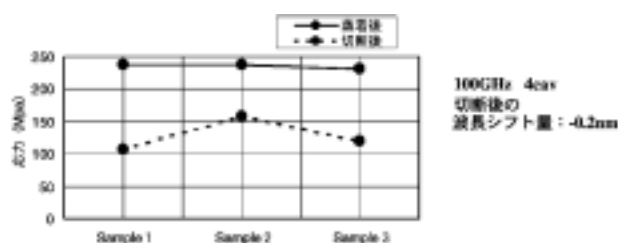


図 19 切断加工による応力変化

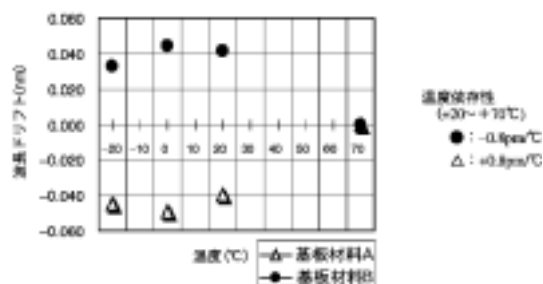


図 20 基板材料による波長ドリフト

らない。このため、各種フィルター特性に対応した種々の制御法が開発されている。例として、図 21 に光学式膜厚モニターの概要図を示す。光学式膜厚制御には単色測光法、二色測光法などがある。単色測光法は成膜中に透過率（反射率）が監視波長で $1/4$ 毎に極値をとることを利用し、ドームに搭載した製品基板を直接測光し、光量のピーク位置（ $1/4$ ）を高精度に検出し膜厚を制御している。この方法は狭帯 BPF に対し、広く使用されている。

さらに、制御された膜厚を基板面上の広い領域で均一に積層させることが必要である。通常、飛翔むらによって発生する膜厚分布を補正するためには、基板近傍に補正板を配置したり、蒸発源を基板回転中心の位置から離す方法や、基板自体を数百～千 rpm の高速で回転させるなどの方法が取られている。

5-2 成膜装置

光通信用フィルターに使用される蒸着膜の性能は、波長安定性、高密度、耐久性、低損失（低散乱、低吸収）、更に制御性が良いことが要求される。これらの膜品質を達成するために幾

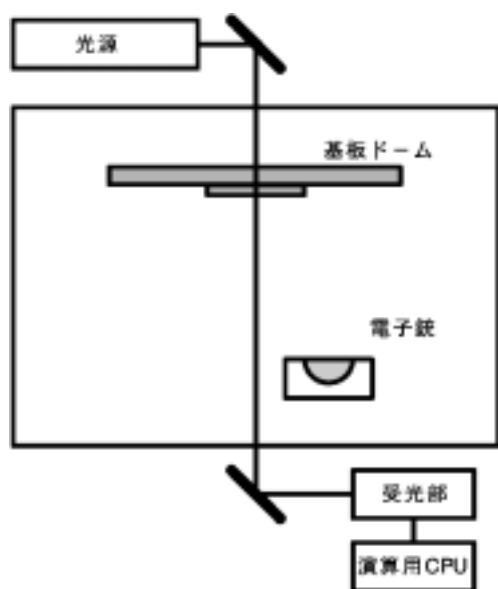


図 21 光学式膜厚制御方式

つかの成膜方法が用いられてきているが、その代表的な方法を以下に示す。

1) イオンアシスト蒸着法（Ion-Beam Assisted Deposition: IAD）（図 22）

電子銃による従来の蒸着方式に、基板に向けて適切に加速したイオン源からのイオン照射を加えたプロセスである。加速したイオンにより蒸発粒子が運動エネルギーを得て、その状態で成膜することで基板に対する付着強度が高まり且つ高密度膜を得ることができる。

2) イオンプレーティング蒸着法（Ion Plating Deposition: IPD）（図 23）

1963 年に、D. M. Mattox³⁾ により提案されたプロセスである。

基本的には、グロー放電プラズマ中で基板を

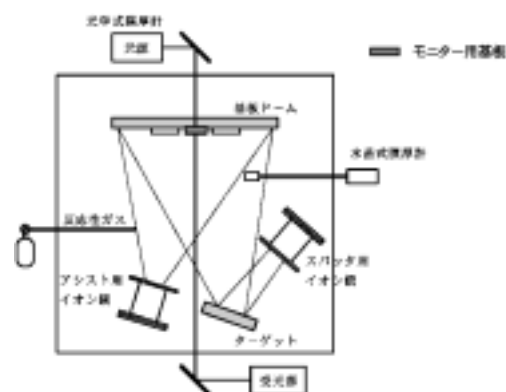


図 22 Dual Ion Beam Sputtering

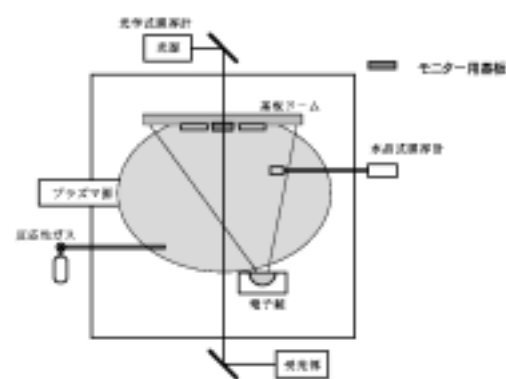


図 23 Ion Plating Deposition

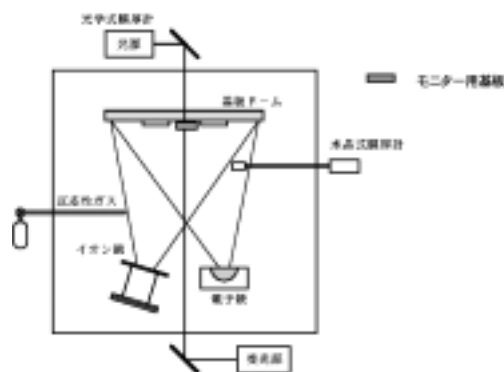


図 24 Ion-Beam Assisted Deposition

負にバイアスした状態で成膜する蒸着プロセスであり、提案者である Mattox は、「膜の析出前及び析出中の基板の表面に高エネルギーのイオン束が入射して、スパッタリングが行われる様な状態で進行する成膜プロセス」と定義している。発生させたプラズマにより基板回りに自己バイアスが生じ、そのシース内で蒸発粒子が運動エネルギーを得て、その状態で成膜する事で基板に対する付着強度が高まり且つ高密度膜を得ることができる。蒸着チャンパー内にプラズマを発生させる主な方式としては、RF 励起によるものと電子ビーム励起によるものがある。

3) イオンビームスパッター法 (Ion Beam Sputtering: IBS) (図 24)

真空チャンパー内に設置されたイオン源 (スパッター用) から引き出されたイオンで、ターゲット材料をスパッターし、膜物質を基板表面に成膜するプロセスである。

最近では第二のイオン源 (アシスト用) を設置し、引き出されたイオンを基板に照射する方式 (イオンアシストを併用する方式) が一般的である (Dual Ion-Beam Sputtering)。材料を溶

解しその蒸気を成膜する従来の蒸発源 (電子ビーム、抵抗加熱) と異なり、材料のスパッターのみで成膜するため、吸収、散乱が少ない低損失の膜が期待される。

以上代表的な成膜装置について紹介したが、最近では、各装置メーカーから種々の新規プロセスの提案がなされて来ている。しかし、上述した膜品質はこれら装置の購入のみで得られる訳ではなく、導入後の各種光学フィルターに相応しい制御法への改善や、安定性向上施策等の現場での生産技術を高めることにより達成されることに留意すべきである。

6. 纏 め

以上、DWDM 用の光学フィルターの用途、また、それらに求められる成膜技術について述べて来た。

昨今の北米キャリアの投資抑制によりブロードバンド化が低速化して来ているように見受けられるが、長期的に見るとロングホール→メトロ→アクセスと市場の拡大が始まっており、全光化に向けたあらゆる課題を継続的に解決していく必要がある。

参考文献

- 1) Haruo Takahashi, "Temperature stability of thin-film narrow-bandpass filters produced by ion-assisted deposition", 1 February 1995/Vol. 34, No. 4/APPLIED OPTICS.
- 2) Karl H. Guenther, "Columnar and nodular growth of thin films", SPIE Vol. 346 Thin Film Technologies and Special Applications (1982).
- 3) D. M. Mattox, Electrochem. Technol. 2.295 (1964).