

光学薄膜の微小光散乱測定

物質系専攻 086038 徳田 祐太郎

指導教員：三尾 典克（准教授）

キーワード：誘電体多層膜，光学薄膜，光散乱，レーザー，表面粗さ

【背景・目的】

宇宙を見るには、可視光で見る光学望遠鏡だけでなく、様々な波長の電磁波や宇宙線、ニュートリノを観測するという様々な方法がある。その次に来る観測手段は重力波によるものであろう[1]。重力波とは、重力の影響が波動として空間を伝播していく現象であり、微小な空間の歪として検出される。重力波は、1915-1916年にA. Einsteinの一般相対性理論によってその存在を予言された。これまで間接的には、その存在が証明されたものの、重力波の相互作用が非常に小さいことから直接検出には未だ至っていない。そこで現在、世界各国でレーザー干渉計型検出器を用いた重力波の検出が試みられている。

日本では、TAMA計画により基線長300mの検出器が、CLIO計画により基線長100mの検出器が稼働している。さらに平成22年6月には、基線長3kmのLIGO計画が承認された。

これらの検出器では、マイケルソン干渉計の両腕をファブリ・ペロー共振器で構成した干渉計が用いられる。共振器内では、光が何度も鏡に反射されるため、鏡の損失の影響が大きくなってしまふ。そのため用いられる鏡には、非常に高い性能が要求される。それは、およそ反射率99.99%以上、損失で数ppm(parts per million:百万分の一)以下である。

上記のような高性能な鏡は、反射率が1に近いので、性能を評価することが難しい。高性能な鏡を評価する方法として、同時成膜された2枚の鏡で共振器を組み、その共振器のフィネスや透過光強度を計測することにより間接的に反射率や損失を測定する方法がある。この方法では、有効数字6桁の反射率と1.6ppmの損失の測定に成功している[2]。しかし、この方法では共振器を組む必要があることから、測定は容易であるとは言えない。そこで当研究室では、反射面での光散乱に着目し、散乱による損失を直接測定する装置を開発している[3]。

先の実験[3]では狭い領域でしか測定出来ておらず、散乱像と実表面との関係が完全に理解されていなかった。従って、本実験では装置の測定範囲を広げ、サンプル全体をマッピング出来るようにし、散乱像とサンプル表面との関係を調べ、様々な成膜条件で作製されたサンプルを測定し評価した。また装置の雑音を測定して、装置の感度の評価及び向上を行なった。

【実験装置】

本研究では、レーザーが照射されたサンプルからの散乱光を積分球にて集めた。装置の全体は、図1のようになっている。

実験に用いたレーザーは、重力波検出器で主流とな

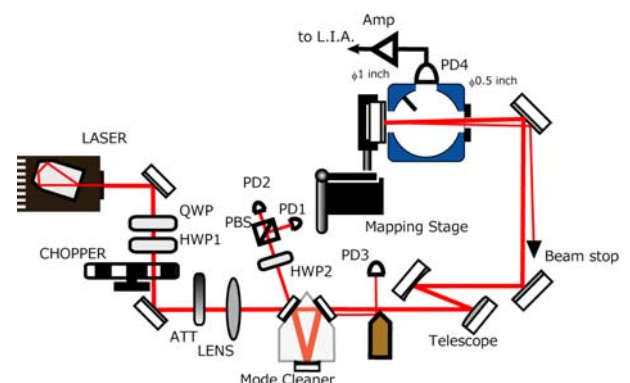


図1 実験装置全体図。

っている Nd:YAG レーザーで、波長は 1064 nm、最大出力は 200 mW である。レーザー光には基本モード以外の高次モードも含まれるため、モードクリーナー(MC)と呼ばれる三角形の光共振器を用いて基本モードのみを透過させている。また、透過した光が純粋な基本モードに保たれるように反射型望遠鏡を用いて光を絞り、サンプルに照射している。サンプルから得られる散乱信号は、とても小さく外部雑音に埋もれてしまうため、チョッパーを用いて同期検波を行なっている。また散乱像を作成するために、電動マイクロメータで構成されるステージにてサンプルを走査した。

【実験結果】

本研究では、散乱の指標として TIS(Total Integrated Scattering)を用いた。TIS とは、サンプルからの全散乱光と散乱光との比で算出される値である[4]。

また、サンプルに直径 0.37 mm のビームを照射し、0.25 mm のステップでサンプルを走査して散乱像を取得した。

1. 誘電体多層膜鏡の散乱測定

まず、散乱像と実表面の状態とが一致するかを高出力共振器内で焦げた鏡を測定して確認した。図 2 が、その結果である。四角で囲まれた範囲に大きなピークがあるのが分かる。さらに拡大すると、このピークが二重構造を持っているのが分かる。同箇所を電子顕微鏡を見て観察すると同様の構造が見られた。

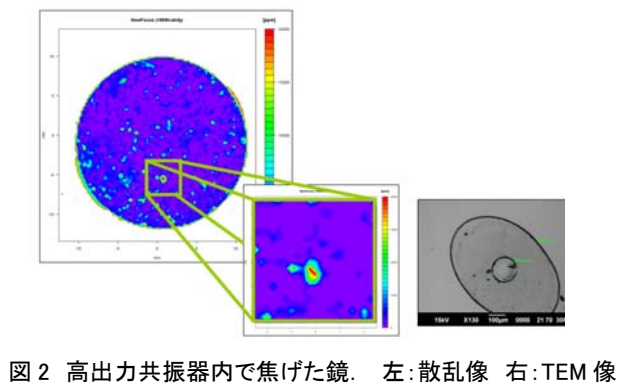


図 2 高出力共振器内で焦げた鏡. 左:散乱像 右:TEM 像

散乱を測定することで、鏡の成膜条件や方法などの違いを評価することができる[5]。そこで、違う成膜方法(電子ビーム蒸着法とイオンビームスパッタリング)で成膜された鏡、同じ成膜方法で作製メーカーが違う鏡を測定し、評価を行なった。その結果の一例を図 3 示す。

この測定から、ほぼ予想されていた散乱値の違いが確認された。

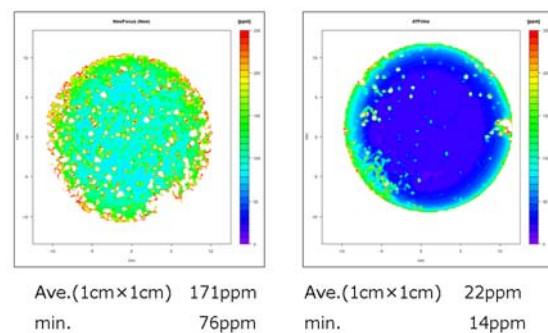


図 3 成膜方法の違う鏡の散乱像。

2. 光学薄膜の散乱測定

誘電体多層膜については、上記の実験で散乱像の有用性が確認された。単層膜でも同様の知見が得られるか、ダイヤモンド・ライク・カーボン(DLC)を用いて散乱測定を行なった。行なった実験のうち、中間層があるものと無いものとを比較した結果を図 4 に示す。

この実験では、明らかに違いが見られた。両者

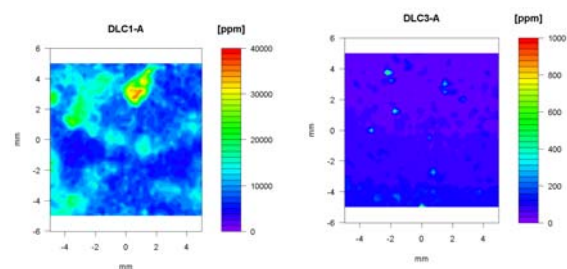


図 4 DLC の散乱像. 左:中間層なし 右:中間層あり

のピークやムラの多さの違いや、散乱の平均値の違いが確認できる。

3. 装置の感度評価

これまでの装置では、不確かさが1 ppm程度であった。この感度では、重力波検出器用の鏡の要求値である数 ppmの散乱を測定するには十分でない。そこで、感度の評価及び向上を図るため実験を行なった。散乱信号の取得系の雑音を評価したところ、ロックインアンプによってリミットされていることが分かった。そこで、ロックインアンプに入力する前に信号を増幅して感度が向上するかを実験した。積分球にレーザーを通過させビームダンパーにより光をダンプしている(図5)。

この実験では、ダンパーの後方散乱(数 ppm程度)を測定していることになる。この散乱信号が、ロックインアンプの雑音に埋もれないアンプの倍率を求めた。結果は、図6である。この結果より信号をロックインアンプに入力する前に5倍以上に増幅すれば、信号が埋もれないことが分かった。以後、測定では10倍増幅を行い、従来の感度を一桁改善した状態で測定した。

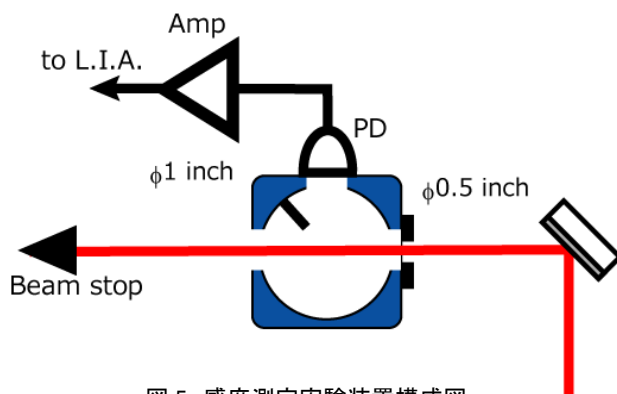


図5 感度測定実験装置構成図。

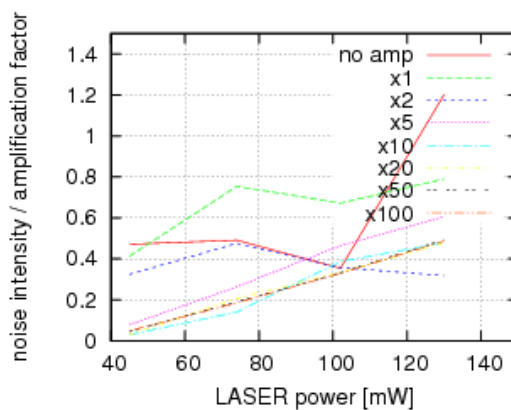


図6 感度測定実験結果。

【まとめ】

装置を改良することにより、サンプルの全面を走査することを可能にした。これにより、得られた散乱像が実表面の状態を正しく反映したものであるかを確認した。散乱は、サンプルの成膜方法や条件により違いが出ることを、得られた散乱値の平均値とピークの分布から確認した。以上から、この装置はサンプルの散乱を正しく測定することが出来ると言える。

また装置の雑音を評価し、信号取得系を改良することで、感度を向上させることが出来た。これは、重力波検出器用の鏡を評価するのに十分な感度である。

以上から、この装置を用いてサンプルの散乱を評価することで、サンプルの作製技術の評価し、向上させる手助けとなることが分かった。

【参考文献】

- [1] 日本物理学会(編), 宇宙を見る新しい目, 日本評論社, 2004
- [2] 上田暁俊, 電通大博士論文, 1999
- [3] 太斎徹, 東大新領域修士論文, 2007
- [4] KH. Guenther *et al.*, Appl. Opt., Vol. 23, No. 21, 1984
- [5] E. Ritter., Appl. Opt., Vol. 20, No. 1, 1981