

超高品質ミラーの微少散乱測定装置の開発

物質系専攻 56127 太斎 徹
指導教員:三尾 典克(助教授)

キーワード: 超高品質ミラー、誘電体多層膜、微少散乱測定、積分球

背景と目的

1916年にアインシュタインの一般相対性理論によって存在が予言された重力波は、未だ直接検出されるには至っていない。現在、重力波による空間の歪みを、マイケルソン干渉計で検出しようという試みが世界各国で成されているが、重力波の相互作用は非常に弱い為検出すべきひずみが $\Delta L/L = 10^{-21}$ 程度となり、極めて高い感度の検出器が必要とされている。²⁾ そのため、検出器を構成する各要素へはそれぞれ最高級の品質が求められている。例えば干渉計の腕の部分のミラーに対する散乱損失への要求値は3 ppm以下と大変小さい。このような重力波検出用の超高品質ミラーには $Ta_2O_5-SiO_2$ の誘電体多層膜が用いられている、成膜方法には電子ビーム蒸着法やイオンビームスパッタリング法等が知られているが、電子ビーム蒸着法では成膜温度が高い、粒界を持つ、ダングリングボンドの発生率が高いなどの問題があり、超高品質なミラーを得られる可能性がないのに対し、イオンビームスパッタリング法は、粒子の持つエネルギーが高く ($> 20eV$)、また低温プロセスであるために、アモルファスで緻密な膜が得られる事からイオンビームスパッタリング法が採用されている。¹⁾

本実験では超高品質ミラーの散乱損失が要求を満たしているかを測定するための、測定系の開発を目的とした。微少散乱を精密に測定する事は成膜技術の評価し成膜プロセスにフィードバックすることが出来るという意味で重要である。

微少散乱測定装置

微少散乱測定の光学系を図1に示す。実験

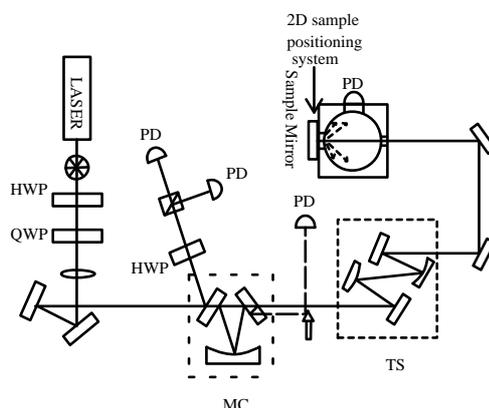


図1: 微少散乱測定系

におけるレーザーは、重力波検出器で主流のNd:YAGレーザーであり、波長は1064 nm、出力パワーは100 mWである。測定対象のミラーは、2次元マッピング用のスキャンステージ上に取り付け積分球の下流に配置している。チョッパー（290 Hz）で強度変調した光をサンプルミラーに入射し、その散乱光を、積分球（直径101.6 mm）に取り付けたフォトダイオード（PD）で検出して、ロックインアンプで同期検波する。また、図中のモードクリーナー（MC）は、高次モードによるビーム径の広がり及び、チョッパーからの散乱による雑音を低減するために挿入してあり、MCへのマッチングは波長板及びレンズによって行っている。テレスコープ（TS）は、サンプルミラー付近でビームがウエストになるよう利用した（理論よりウエスト半径約0.18 mm）。さらに、時間経過によるMCからの出力変化の影響をなくす為、MCのAR反射光を測定する事によって積分球への入射パワー及びビーム品質に影響を与えずに散乱光との同

時測定を出来るようにした。また、100%散乱のリファレンスとしては、サンプルミラーを傾け全ての反射光を積分球に入射させた時の値とした。図2にAR反射光とリファレンスの間の

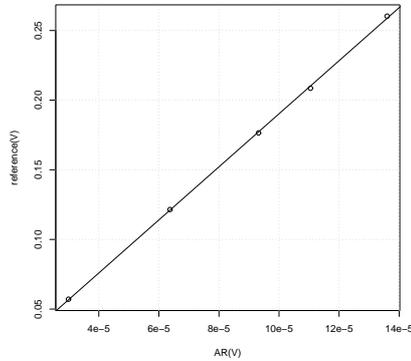


図 2: AR 反射光とリファレンスの線形性確認

線形性を示す、この測定より 0.77% の範囲内で両者は線形であることを確認した。この構成によりサンプルミラーを取り除き、透過光をビームストッパーでダンプしたときのバックグラウンドを測定したら 1.1 ppm であった。ただし、この値は測定に用いたビームストッパーの性能でリミットされており、バックグラウンドの上限を示している。MC なしでの測定の場合、直径 15 mm のサンプルミラー用ホルダーの影響でバックグラウンドが 8.43 ppm と大きい値になってしまい、口径の小さなミラーでの微少散乱測定が不可能であった。この事は高次モードによるビーム径の広がり及び、チョッパーからの散乱光に起因すると考え、MC を導入する事によって改善を図った、その結果直径 15 mm ホルダーにおいてバックグラウンドが 1 ppm となり、バックグラウンドを MC なしの場合の約 1/8 に改善する事が出来た。

実験結果及び考察

4 種類のミラーで散乱測定を行った。サンプルミラー 1 の成膜法は、電子ビーム蒸着法 (EBE)、サンプルミラー 2~4 は、イオンビームスパッタリング法 (IBS) である、しかし、サンプル 2~4 はそれぞれ別の会社で成膜されており、基板の粗さ及び、成膜技術の違いにより散乱に固有の差が現れる事が予想される、それぞれのミラーの 2 次元マッピングを図 3~ 図 5、

表 1: 各種ミラーの散乱測定結果

名前	最小値 (ppm)	最大値 (ppm)	平均 (ppm)
sample1	38.6	115	46.8
sample2	26.3	61.2	28.7
sample3	15.5	443	57.2
sample4	4.07		

表面の平均、最大値、最小値を表 1 に示す。なおサンプルミラー 4 についてはミラーの直径が小さい為ホルダーの影響が出てしまい 2 次元マッピングを取得する事は出来なかった。サンプルミラー 1~4 の最小値を比べてみると、EBE のミラーは、全ての IBS のミラーより、散乱が大きい事が分かる、この事は述べた事と一致している。一方、イオンビームスパッタリング法 (IBM) でも基板の研磨技術及び成膜プロセスの違いによって散乱損失に差が出ている事が分かる。サンプルミラー 4 に関しては 4.07 ppm という小さな値が得られた。この値が正確に測られた値であるか調べるためレーザーの出力パワーを 100 mW、60 mW、40 mW、20 mW、10 mW のそれぞれで測定して比較してみた、結果を図 6 に示す。黒い線は、電気系の雑音を引く前の測定結果である。レーザーパワーの小さい領域で散乱が大きくなっている。赤い線はレーザーを止めた時の出力を電気系の雑音と考え補正した結果である、その補正によりほぼ一定の値に近づいた、この結果からパワーの小さい領域では電気系の雑音の影響を強く受けている事が分かる。

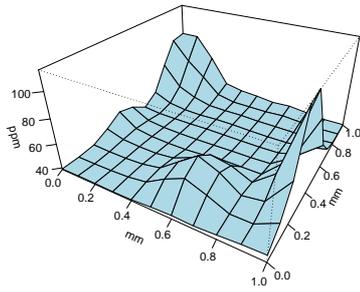


図 3: サンプルミラー 1 の 2 次元マッピング

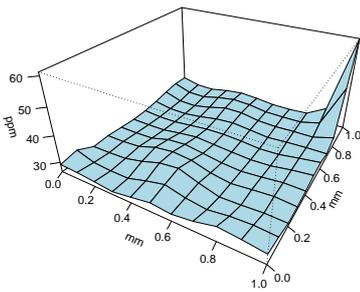


図 4: サンプルミラー 2 の 2 次元マッピング

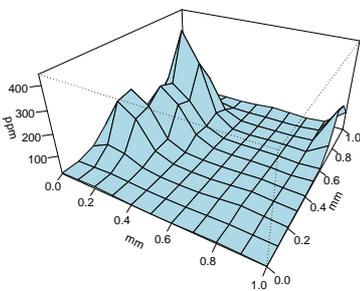


図 5: サンプルミラー 3 の 2 次元マッピング

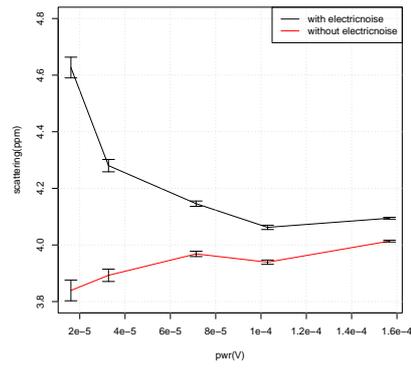


図 6: レーザーの出力パワー vs 散乱

結論及び今後の展望

MC の使用により口径の小さなホルダー (直径 15 mm) の影響を約 1/8 に改善出来た (8.43 ppm → 1 ppm)。口径の大きなミラーでの 2 次元マッピングの取得に成功したが、直径 15mm 以下のミラーではホルダーの影響の為マップを取得する事が出来なかった。光パワーの増大にともなう雑音の為サンプルミラー 4 の 100mW 出力による測定においては、6 % 程度誤差が生じてしまう事がわかった、しかし補正を行う事によってサンプルミラー 4 の散乱は 3.84ppm 程度であると結論付ける事が出来た、この値が今回得られた最小の値である。

今後、ミラー全体をマッピングする事で、ハイパワーレーザーによるミラーの消耗等を測る等、実際の測定に用いる事が出来る。

参考文献

- 1) 上田 暁俊., 重力波検出用超高品質光学素子の開発と評価. 1999 年電通大博士論文.
- 2) 三尾典克, 大橋正健., 重力波アンテナ技術検討書、1992 年 10 月