

2012年3月

## マイケルソン干渉計を用いた低損失光学材料の光学吸収計測法の研究

物質系専攻 106046 渡部恭平

指導教員：三尾 典克（特任教授）

キーワード：重力波、マイケルソン干渉計、吸収係数、サファイア

### 研究の背景

重力波は一般相対性理論によって予言された現象である。重力波が存在することは R. A. Hulse と J. H. Taylor による中性子連星の公転周期の変化の観測によって間接的に証明されている[1]。しかし、重力波を直接検出した例はまだない。それは、重力波の効果が極めて小さいためである。重力波を検出するために、巨大なレーザー干渉計を用いたプロジェクトが世界各地で進行中であり、日本では大型低温重力波望遠鏡（LCGT）が建設中である。

レーザー干渉計型の重力波検出器では、重力波に対する感度を上げるために、光源には非常に出力の大きいレーザーが用いられる。レーザーの出力が大きくなるに伴って、干渉計を構成する光学素子がレーザー光の一部を吸収することによって発生する熱が、様々な問題を引き起こす。図1に LCGT の概略図を示す。LCGT では、図中の破線で囲まれているミラーは 20 K に冷却される[2]。特に near mirror では、内部を強い光が透過するため、吸収によって発生する熱が冷却の妨げとなる。このため、20 K という動作温度を実現するためには、鏡の基材となる物質の吸収係数には、20 ppm/cm 以下という極めて低い値が要求されている[3]。この要求を満たす鏡基材を得るためには、鏡基材の吸収係数を評価し、製造会社へ情報をフィードバックすることが必要不可欠である。

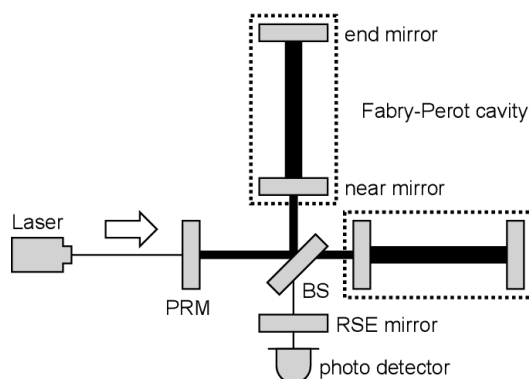


図1：LCGTの概略図。PRMはパワーリサイクリングミラー、BSはビームスプリッターの略。End mirror及びnear mirrorの基材はサファイアで、PRM及びBSの基材は石英である。また、レーザーの波長は1064 nmである。

### 実験

図2にマイケルソン干渉計を用いた吸収測定概略図を、図3に測定したサファイアの試料を示す。本実験では、まず試料をマイケルソン干渉計の片腕に配置する。このとき、試料を透過する光の一部が吸収され、熱が変わる。する

と試料の温度が変化し、屈折率の変化と熱膨張によって試料を配置した側の腕の光路長が変化する。この光路長変化をマイケルソン干渉計によって検出することで、試料の吸収係数を求める。また、入射光には機械的なチョップによって強度変調をかけているため、光路長変化もチョップの周波数に等しい周波数の成分が主となる。この周波数の成分の信号を感度良く得るため、ロックイン検出を用いている。さらに、干渉計のフリンジは、 piezoelectric actuator によって鏡を動かすことで、常に最も暗くなるように制御されている。これによって干渉計を構成する光学素子の振動や、入射光の直流成分による試料の継続的な温度上昇による光路長変化の影響をキャンセルしている。

このようにして測定した光路長変化から、吸収係数を求めるためには、熱伝導方程式と弾性変形の方程式を解く必要がある。本実験では、有限要素法解析によってこれらの方程式を数値的に解くことで、光路長変化の測定結果から吸収係数を求めた。

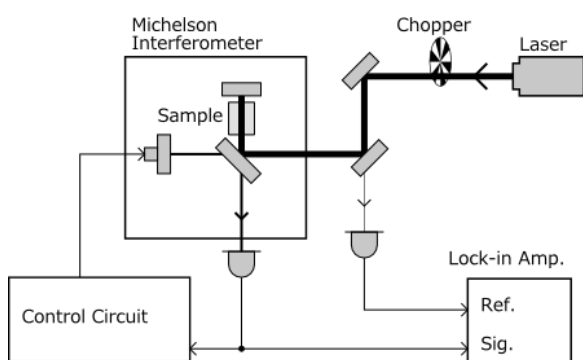


図2：マイケルソン干渉計による吸収係数測定装置の概略図。光源には Nd:YAG レーザーを Yb ドープのファイバーアンプで増幅したものをを用いている。波長は 1064 nm、パワーは最大で 10 W である。

図3：試料（サファイア）の写真。直径、長さはそれぞれ 10 mm、40 mm である。また、試料は c 軸が長手方向と一致するようにカットされている。

## 測定結果

LCGT の鏡基材として用いられるサファイア単結晶の、結晶作製時の条件の違いによる吸収係数への影響を調べるため、異なるブールから切り出された複数の試料の測定を行った。図4は、そのうち最も吸収の小さかったサファイアの測定データである。このグラフの傾きから、光路長変化は入射光強度 1 W につき 5.0 pm であり、数値計算の結果との比較から、吸収係数は 32 ppm/cm と求めた。その他の試料を含めた吸収係数の測定結果を表1に示す。この結果から、切り出されたブールによって吸収係数はかなり異なることがわかる。また、同じブールから切り出されたサンプル間にも吸収係数のばらつきが見られた。このことから、同じブールにも場所によって品質にばらつきがあるため、

ブールから切り出された位置によって吸収係数も異なっているものと考えられる。

以上の結果から、最も吸収の小さかったサファイアの吸収係数は **32 ppm/cm** であり、**20 ppm/cm** 以下という LCGT の要求は満たされておらず、LCGT の実現のためには、さらなる低吸収化が必要であることがわかった。

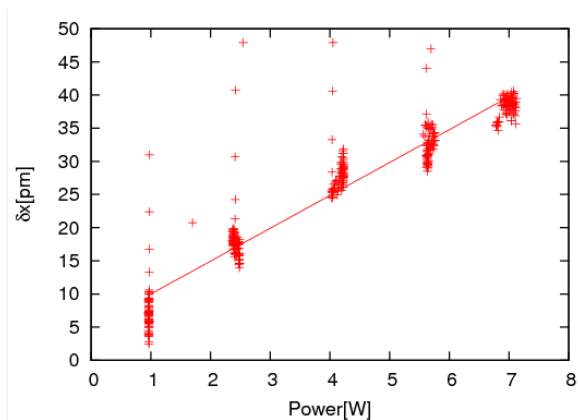


図4：サファイアの測定データ。縦軸は光路長変化、横軸は入射光のパワーを示す。点でプロットしたものが測定データで、直線はそれらのデータを直線でフィッティングしたものである。

ブール	吸収係数 [ppm/cm]			
P376	88			
AA149	47	47		
AC150	229	138	680	675
P401	34	32	64	67

表1：各ブールから切り出されたサファイアの測定結果のまとめ。複数の数値があるものは、同じブールから切り出された複数の試料の測定結果である。

### 参考文献

- [1] R. A. Hulse and J.H. Taylor. *Astrophys. J.*, Vol. 195, pp. 1320-1324, 1969.
- [2] LCGT design document 3.0 (2009).
- [3] K. Kuroda et al., *Class. Quantum Grav.* 20 (2003), S871.

### 学会発表

1. 第71回応用物理学会学術講演会「Michelson 干渉計による光学材料の微小吸収測定」
2. 第58回応用物理学関係連合講演会「Michelson 干渉計による光学材料の微小吸収測定Ⅱ」
3. 第72回応用物理学会学術講演会「Michelson 干渉計による光学材料の微小吸収測定Ⅲ」