

2008年3月

## 重力波検出器用注入同期型 100 W レーザーの広帯域周波数安定化に関する研究

物質系専攻 66109 大前 宣昭

指導教員：三尾 典克（准教授）

キーワード：重力波検出器，レーザー周波数安定化，注入同期レーザー，電気光学変調器（EOM）

### 【背景・目的】

アインシュタインの一般相対性理論において重力波という波動現象が存在するとされ、世界中でその検出が試みられている。一般相対性理論が世に出て 90 年以上経ち、間接的に重力波の存在は証明されるに至ったが、直接検出は成し遂げられていない。重力波は相互作用が小さいという性質上、検出は非常に困難だが、電磁波とは違った情報をもたらす、すなわち新しい物理を提供するものであるとして、盛んに研究が行われており、近いうちに直接検出、そして重力波天文学が始まると言われている[1]。

日本においても次世代重力波検出器 Large-scale Cryogenic Gravitational-wave Telescope (LCGT) の建設が計画されている。LCGT 用の光源には 150 W・単一周波数レーザーが必要とされている。本計画では、注入同期により 100 W、増幅器 (MOPA) により 150 W 出力を実現する予定である。これまでに、注入同期による 100 W の単一周波数発振を達成しており[2]、現在はこのレーザーの周波数安定化に取り組んでいる。

### 【LCGT 用光源の周波数安定化】

LCGT では多段式の周波数安定化システム (図 1) を構築することで、 $\sigma = 10^{-8} \text{ Hz/Hz}^{1/2}$  という極度の周波数安定度を成し遂げる予定になっている。そのためには、初段の第 1 モードクリーナループの制御帯域を 1 MHz くらいの広帯域の制御を実現する必要がある。しかし、注入同期レーザーの周波数安定化に用いられる周波数アクチュエータ (主レーザー (nonplanar ring oscillator: NPRO) のピエゾ素子および結晶の温調) では、20-30 kHz 程度しか実現できない。そこで、さらなる高速の周波数アクチュエータとして、外部 EOM (広帯域 EOM) の使用を検討した。さらに、注入同期レーザーのロッキングレンジによる位相の遅れを避けるために外部 EOM を従レーザーの後に配置することを提案した。しかし、それだと外部 EOM が 100 W 以上の高出力光にさらされてしまうことになる。そこで、この提案を実現するために、高出力光に対しても使用できる Stoichiometric LiNbO<sub>3</sub> (SLN) [3] 製 EOM の評価を行い、実際に外部 EOM 使用による広帯域制御を行った。

### 【高出力光用 SLN 製 EOM の評価】

#### 1. 耐パワー性能

高出力光用 EOM にまず求められるものは耐パワー性能である。100W 以上のレーザー光に耐えうる電気光学結晶でなくてはならない。重力波検出器で必要なくらいのビームの絞具合では、吸収も少なく破断が起きることはなかった。

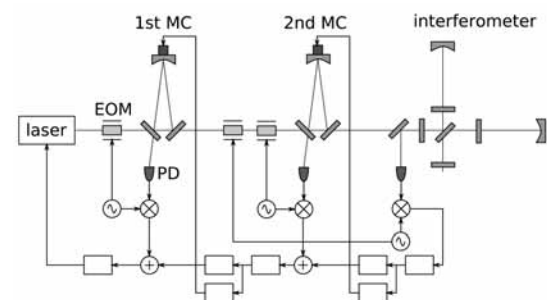


図 1. LCGT 用光源の多段式周波数安定化システム。

## 2. 熱レンズの見積もり，波面の乱れの有無

レーザー光を結晶に照射すると，熱吸収により結晶がレンズのような働きを示す（熱レンズ効果）．熱レンズ効果が大きいと波面の乱れを増加させてしまう恐れがある．重力波検出器では，波面の乱れない光が必要とされるので，SLN 製 EOM 透過後の波面にどれほどの乱れが生じるかの評価を行った．図 2 に熱レンズ効果の大きさの見積もり，図 3 に波面の乱れの評価結果を示す．熱レンズ効果はそれほど大きい値にはならず，波面の乱れに関してはほぼ無かった．

## 3. 位相（周波数）変調度の低下の有無

LiNbO<sub>3</sub> (LN) 結晶はフォトリフラクティブ結晶としてもよく知られている．しかし，EOM として用いるときはフォトリフラクティブ効果による位相（周波数）変調度の低下はあってはならない．それを避けるために，今回準備した結晶は MgO をドープした SLN である．これに低出力光（1 W），高出力光（100 W）を照射したときの周波数変調度の測定を行い，その差を評価することで位相（周波数）変調度の低下の有無を評価した．結果を図 4 に示す．高出力下でも位相（周波数）変調度の低下は見られず，高出力光用 EOM として SLN 結晶を使用できる目途がついた．

しかし，今の EOM の構成では，500 kHz 付近の共振により制御帯域が制限されてしまう．しかし，それは結晶のサイズおよび支持方法の改良によってある程度改善できると考え，まずはこの EOM を用いて高出力光を実際に制御できるかを実証するために，実際に制御を行った．500 kHz の共振の影響を考慮すると，制御帯域は 70-80 kHz が限界だと思われる．

### 【外部 EOM による広帯域制御の実現】

SLN 製 EOM を注入同期レーザーの従レーザーの後に配置することによるレーザー周波数安定化の制御を行った．実験配置を図 5 に示す．モードクリーナーはリジッドボディの小さなものを用い，モードクリーナーに入れる光の量は 10 mW 程度にした．図 6 に制御時のオープンループ伝達関数を示す．実線が外部 EOM も制御

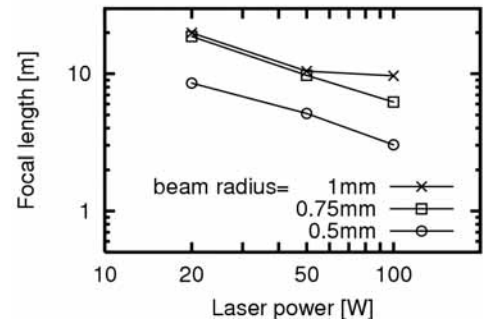


図 2：SLN 製 EOM に 100W 光を入射させた際生じる熱レンズ効果の見積もり．

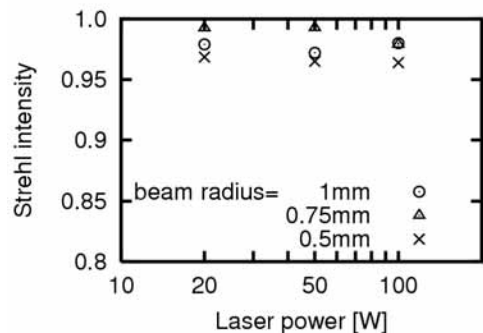


図 3：波面の乱れを表すストレル強度．1 が理想的波面．EOM に通す前のビームのストレル強度も 0.95 - 1 であったため減少はない．

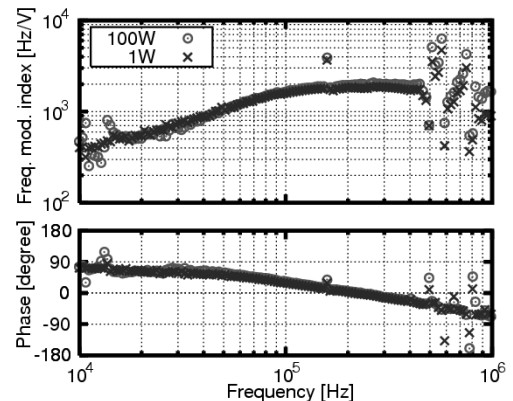


図 4：EOM の応答のボーデ線図． piezo の応答をもとに低パワー時と高パワー時を比較．

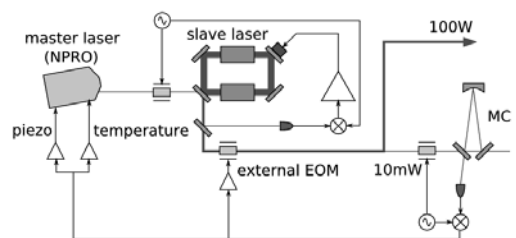


図 5：注入同期レーザーの広帯域周波数安定化のセットアップ．

したとき、破線は EOM の制御の無いときである。比較すると、ピエゾで遅れかけている位相を外部 EOM の制御により戻すことに成功し、ピエゾだけでは成し遂げられないユニティゲイン周波数 85 kHz を達成した。予想通りの制御帯域を実現でき、SLN 製 EOM を用いることで高出力レーザーの広帯域制御が実現できることを示している。また、このときのレーザー周波数雑音を図 7 に示す。

### 【まとめ】

次世代重力波検出器用光源の周波数安定化に必要とされる広帯域制御実現のための高出力光用 EOM の評価を行い、SLN 結晶が高出力光用の電気光学結晶として利用できることが分かった。そして、SLN 製 EOM を用いて実際に制御帯域の拡大に成功し、注入同期型 100 W レーザーの制御を行えることが分かった。今後は、結晶のサイズの見直し、支持方法の改善により、さらなる広帯域制御の実現を行う必要がある。

また、本研究の高出力光用 EOM の評価結果は、周波数安定化用広帯域 EOM に役立つものであるだけでなく、重力波検出器の主干渉計の制御に用いる位相変調用 EOM (狭帯域 EOM) のための知見としても非常に有用である。

### 【参考文献】

- [1]三尾 典克 著, 相対性理論 - 基礎から実験的検証まで -, サイエンス社, 2007 年
- [2]K. Takeno, T. Ozeki, S. Moriwaki, and N. Mio, Opt. Lett. **30**, 2110 (2005)
- [3]K. Kitamura, Y. Furukawa, and N. Iyi, Ferroelectrics **202**, 21 (1997)

### 【論文・学会発表】

- 1 . N. Ohmae, K. Takeno, S. Moriwaki, and N. Mio, "Development of an Electrooptic Modulator for Advanced Ground-Based Gravitational Wave Telescopes Using Stoichiometric MgO-Doped LiNbO<sub>3</sub> Crystals", Appl. Phys. Express, **1**, 012005 (2008)
- 2 . N. Ohmae, K. Takeno, S. Moriwaki, and N. Mio, "Frequency stabilization of a light source for next generation gravitational wave telescopes", poster presentation, 18<sup>th</sup> International Conference on General Relativity and Gravitation and 7<sup>th</sup> Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves, Sydney, Australia, July (2007)

他, 国内学会にて口頭発表 3 件 (うち 1 件は 3 月発表予定)。

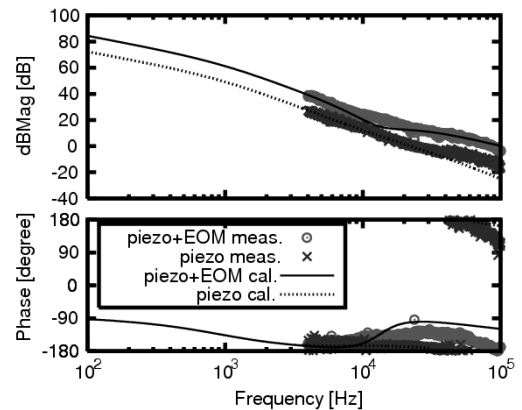


図 6 : 周波数安定化サーボのオープンループ伝達関数のポード線図。10kHz 以上の外部 EOM の効果により広帯域制御が実現。

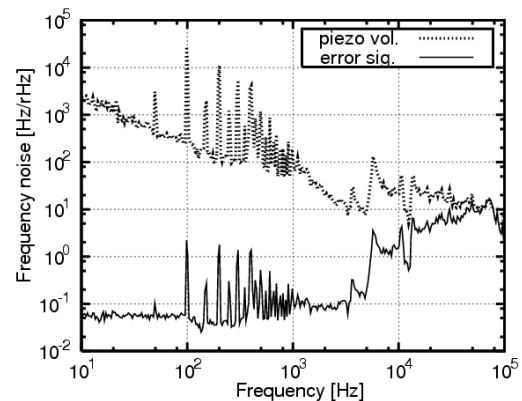


図 7 : 周波数雑音スペクトル。フリーランの雑音はピエゾにかかる電圧から、安定化後の雑音は誤差信号から見積もることができる。