

LCGT のレーザー光学系の開発要素

森脇成典

2001 年 6 月 15 日

はじめに – 「LCGT レーザー光学系」部門の担当範囲

干渉計型重力波検出器は、光を使ったパラメトリック変換器を構成している。主干涉計は、重力波を光の強度変化に転換するので、重力波-光変換器 (gravito-optical transducer) ととらえることができる。本ドラフトのいう「LCGT レーザー光学系」部門は、干渉計型重力波検出器から、主干涉計と純電気系、純機械系を除いた部分を担当する。本部門は、大きく二つに分かれる。一方は、電気光学変換器 (electro-optic converter) にあたる「レーザー光源部」で、もう一方はその逆 – 光学電気変換器 (opto-electric converter) にあたる「光検出部」となっている。光に直接触れる要素を設計する重要な部門である。しかし、まさに光に触れる光学薄膜については、特に高い専門性が要求されるので、モードクリーナ (MC) の鏡の基材と反射膜蒸着、各種光学素子の AR 膜蒸着に関しては「LCGT 光学素子」部門の担当となっている。

「レーザー光源部」は、制御信号、変調波、電力をもらって主干涉計に光を供給する部分で、レーザー源、変調器、入射光学系などからなる。入射光学系の二本柱は、モードクリーナとモードマッチングテレスコプである。また、「光検出部」は、主干涉計からの出力光を電気信号に変換する部分を指す。この部分の中心はなんといってもフォトダイオードであるが、そこに至るまでの分割光学系、Gouy 位相テレスコプ、アンロック時の保護機構なども含まれる。レーザー光源や MC の周辺で用いられる光検出器も、主干涉計の検出器と同様に耐パワー性が求められるので、「光検出部」の範疇に入る。

干渉計型重力波検出器にとって、光は最も重要な局所発振源であるが、これにまさるとも劣らず重要な局所発振源がいくつか必要になる。光位相変調のベース波となる RF 発振器、連続キャリブレーション用の AF 発振器、AD 変換器のサンプリングクロック、絶対時刻タイムベースなどである。これらの間の位相同期や相対制御については、筆者の興味をそそる部分であるので、「LCGT 信号取得・制御系」部門と綿密に協議したいが、主干涉計の変調方式が固まるまでの当面は、本ドラフトからは外しておく。

目次

1	レーザー源	2
2	モードクリーナ (MC)	2

2.1	変調透過のための変調	3
2.2	プレ変調の周波数の決定方法 (TAMA300 の例)	3
2.3	モードクリーナ部のまとめ	4
3	入射光学系	4
3.1	モードマッチングテレスコープ (MMT)	4
3.2	Faraday アイソレータ (FI)	5
4	変調器	5
4.1	位相変調器 (PM)	7
4.2	強度変調器 (AM)	7
4.3	偏光変調器	7
5	光検出部	7
5.1	集光・分割光学系	8
5.2	Gouy 位相テレスコープ (GPT)	8
5.3	アンロック時の保護機構	8
5.4	光検出器	8
6	検討項目	9
7	まとめ	10

1 レーザー源

レーザー源に対する要求として、出力パワーの高さ、横モードの単一性、偏光の単一性、周波数安定度、強度安定度、光軸安定度が「LCGT 設計の素」[1] に挙げられている。100W の単一周波数の光を提供するために、注入同期、光アンプ、コヒーレント加算といった手法があり得る。詳細は別紙参照。

2 モードクリーナ (MC)

モードクリーナ (MC) は、光源の空間モードの整形のための光共振器である。理想的な基本 Gaussian モード (TEM_{00}) の成分だけを透過させ、主干涉計の干涉効率 (ビジビリティ) を高める作用を持つ。それと同時に、観測周波数帯域での周波数参照としての役割も持っており、多くの場合、MC の存在により、主干涉計の動作点への引き込みが容易になっている。また、原理的には、受動的な強度雑音除去フィルタとしても働く。

構成方法としては、リニア型とリング型に大別される。リニア型は、リング型に比べると、固有モードの非点収差がない (出力光が楕円にならない)、散乱光が強度雑音に転換されにくい、鏡の枚数が少ない分、地面振動や熱雑音の影響が少ない (3 枚鏡に比べてパワーで因子 $2/3$ だけ少ない) などの利点がある。リニア型は、本郷 3m 干涉計、Garching 30m 干涉計、Caltech 40m 干涉計、NAO 20m 干涉計、神岡 LISM 20m 干涉計で用いられて

いる。一方、リング型がリニア型に優る点としては、主干涉計からの反射光 (FI で取り除けなかった成分) が散乱光として主干涉計に戻る効果が少ないこと、偏光選択性があること、共振器内で定在波が立たないため残留ガスのトラップがないことが挙げられる。3 枚鏡によるリング型 MC が、TAMA300, GEO600, LIGO, VIRGO で用いられている。特に GEO600 では、リング型を二台直列結合し、間に位相変調器を配置することで、RF 帯域でのレーザー源の強度雑音除去と MC 変調透過をうまくすりあわせている。

なお、リング型懸架 MC 黎明期には、鏡の揺れによるビーム偏向の効果の計算が繁雑で、何か良くない効果があるのでは、と心配されたが、通常的设计では問題にならないことが分かった [2]。また、球面鏡を孤立させて遠くに置く構成をとることで、非点収差の影響も無視できる程に小さくできることも分かっている。

鏡を冷やす必要がないかどうかについては、設計の早期の段階で判断する必要がある。また、MC の鏡面上での光音響雑音が問題となるかもしれない、ビーム半径パラメータを決める際には、注意する必要がある。

基線長、鏡の反射率等のパラメータを、主干涉計の方式と照らし合わせながら決める必要がある。基線長は、TAMA300, VIRGO のような変調透過法を用いる場合には、変調周波数への制限を課すことになる。変調周波数の選択は、さまざまな要素が絡み合った複雑なルールを理解しなければならない。以下の節で概観する。

2.1 変調透過のための変調

主干涉計のための光位相変調は 15.235MHz であるが、MC 自身の制御のため (MC と従レーザーの間の周波数制御のため) に、12MHz の位相変調が掛けられている。このための変調器も、TAMA300 の方式では、光源のフルパワーを通す必要がある。

2.2 プレ変調の周波数の決定方法 (TAMA300 の例)

TAMA300 のプレ変調の周波数は、15.235 MHz になっている。その決定プロセスは LCGT にとっても大変参考になるので、ここで振り返ってみる。

- 15MHz の採用。当時盛んに用いられていた NewFocus 社製の共振型位相変調器 (M4003 シリーズ) が 50MHz 程度の設計上の上限値を持っていたことに加え、周波数シンセサイザ方式の発振器として、Sony-Tektronics AFG310/320 (～ 16MHz) や Hewlett-Packard HP3325B (～ 21MHz) を保有していたことなどを考慮し、変調周波数として 15MHz という周波数に仮決定された。
- 15.25MHz への変更。15MHz の波の真空波長は約 20m であり、300m ぴったりの基線長をもつ Fabry-Perot 共振器では、周回長が波長のちょうど 24 倍となるので、キャリア波の共振と同時にサイドバンドも共振してしまう。これでは効率良く信号が取れないので、キャリア共振時にサイドバンドが反共振点の近傍になるように変調周波数を変更した。高い側に外すか低い側に外すかという二者択一であったが、周波数を高くした方が光源強度雑音が静かであろうという理由で、高い側に外すことになった。

- 15.235MHz への変更. アーム共振器でサイドバンドがぴったり反共振になるように設定すると, 変調の高調波が共振してしまうことが指摘され, わずかに周波数をずらすことになった. これも上げる, 下げるの二者択一であったが, 変更の周波数幅が小さく, 光源の強度雑音の効き方にも差がほとんどないことから, どちらを選ばなければならないという積極的な理由が消失したため, 単に前回の変更を緩和する方向ということで下げる方が選ばれた.

変調周波数の変更により, MC の基線長変更, 変調結晶の交換などが必要になるので, 注意が必要である. とくに, 変調用の結晶には, 光軸方向の伸縮モードと思われるピエゾ共振が 10MHz を越えた辺りから見られ, これに変調周波数 (や, その倍波) がぶつくと変調指数が不安定になるので, 注意が必要である.

2.3 モードクリーナ部のまとめ

MC を構成する鏡の上での光のパワー密度が大きくなり過ぎないなどの配慮をすると, 主干涉計のアーム共振器の 1/10 程度の基線長をもつ MC を用意するのが相場とされている. そこで, 基線長 100m (周回長 200m) のリング型 MC を主干涉計の直前に置き, 必要に応じて, 更にその前段に, RF 帯域での強度雑音除去を狙って基線長 10m 程度のリング型 MC を置くという方針で設計を始めることにする. 留意点は, 以下の通り.

- 多くの固体の音速は 4km/s 程度であり, 固体の棒の弾性伸縮モードの最低周波数は 7m を越えるあたりから 300Hz を下回り始める. このため, 7m を越える基線長の MC は, 全ての鏡を真空中に独立に懸架する.
- あまりに高いフィネスを設定すると, 主干涉計の δL_+ の信号を帰還する時に, MC 出力光が追従しなくなる. このため, 100m 基線長の MC のフィネスは 1000 程度に設定する (遮断周波数 750Hz に対応).
- MC を構成する鏡は低温化しないで済むようにパラメータを設定することを原則とする.

3 入射光学系

入射光学系は, モードマッチング光学系, 主干涉計からの反射光を分離する光サーキュレータを含んでいる.

3.1 モードマッチングテレスコプ (MMT)

熱の効果による主干涉計やモードクリーナのモードパラメータの変化をここで吸収させるかどうか. 熱レンズ補償は, モードクリーナと主干涉計の双方で行われることが望ましいが, そちらで補償することが困難な場合には, 熱レンズ補償器の機能を MMT に付加することも有り得る.

material	Verdet constant	conditions
石英 [3]	2.2×10^{-2} min/A	546nm, 25°C
クラウンガラス (BK7 等) [3]	2.4×10^{-2} min/A	589.3nm
terbium-gallium-garnet (TGG) [4]	60~110rad/(T·m)	700~900nm
terbium-aluminum-garnet (TbAlG) [5]	1.16min/(cm·Oe)	500nm

表 1: 代表的な光学材料の Verdet 定数.

- 散乱光による雑音の導入を抑えるため、透過型光学素子 (レンズ) の使用を極力避ける．凹面鏡を使用する．
- MMT の揺れによるビーム偏向雑音が δL_- 信号を汚さないような処置をとる．

3.2 Faraday アイソレータ (FI)

主干渉計からの反射光を分離して光検出器に導くために、Faraday アイソレータが必要となる．仮に主干渉計の反射ポートの情報が不要な信号取得方式ができたとしても、モードクリーナに光が戻って望ましくない効果を生むことを防ぐために、Faraday アイソレータに相当する素子が必要になると思われる．

一般には、Faraday 素子に軸磁場を印加することで 45 度の Faraday 回転子を作り、これを偏光子で挟むことにより FI を構成する．Faraday 回転子には干渉計への光の全パワーが通過する．耐パワーの要請からは開口は広い方がよいが、強い軸磁場を結晶内に均質に分布させるという要請からは、開口は狭い方が作りやすい．波長 1064nm の場合には素材は TGG 結晶が用いられることが多い．TAMA300 では、開口直径 15mm の TGG 結晶を用いている．現時点では、15mm 以上の開口をもつ TGG 結晶を作るのは非常に難しい．Gsänger 社の 2000 年のカタログによると、FI 製品の中では、開口直径 8mm のものが最大である．

また、TGG 結晶は高 Verdet 定数材料の中では光の吸収は比較的少ない方であるが、それでも 1.5×10^{-3} /cm 程度の吸収係数をもっており、Verdet 定数自体が温度の関数であるため、入射光量によって Faraday 回転の量が変わってしまう．特に強い光の下では、Faraday 結晶内にビームの中心からの距離に応じた温度分布が生じ、空間的に不均一な Faraday 回転が起こってしまう [4]．

テストマスに磁場を印加して変調器の代わりにするなどの奇抜技術を検討する際にも参考になるよう、代表的な光学材料の Verdet 定数を表 1 に挙げておく．但し、肝心のサファイアについては、測定例をまだ見つけていない．

4 変調器

変調器には、プレ変調などの RF 位相変調ための変調器、主干渉計の δL_+ 信号を返すための位相変調器、モードクリーナ透過光の強度信号を返すための強度変調器がある．参考に、TAMA300 での RF 変調の構成を図 1 に挙げておく．

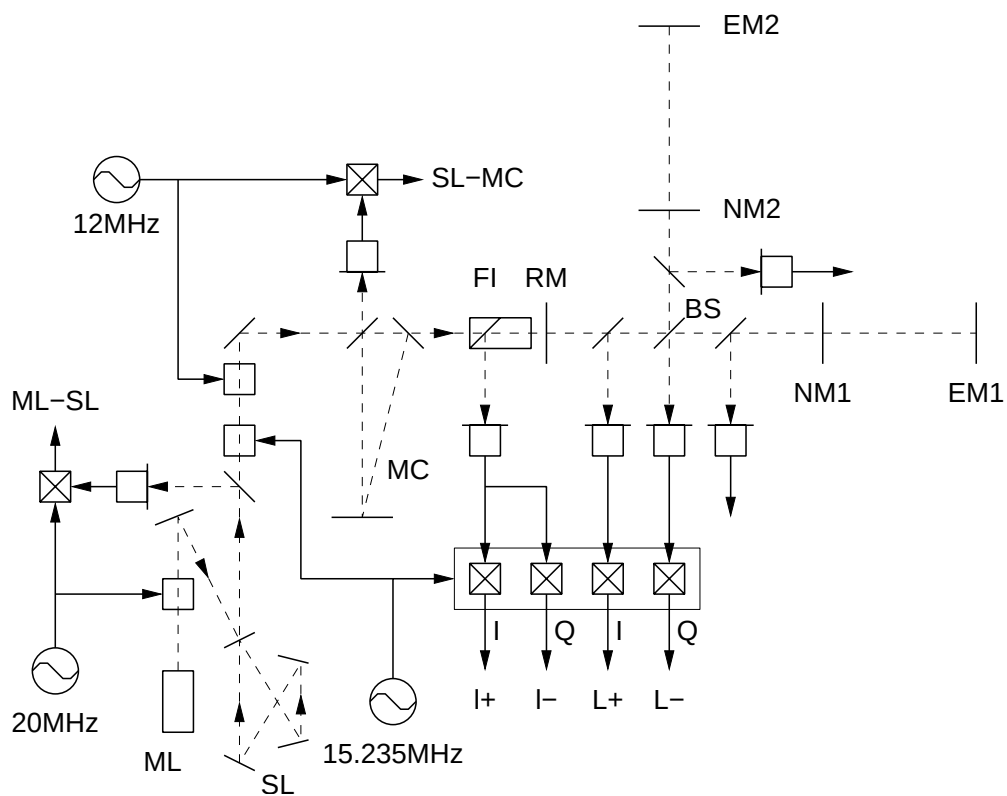


図 1: TAMA300 の RF 変調系

4.1 位相変調器 (PM)

光源パワーが非常に強いため、現状の技術では、フルパワーを透過させるタイプの変調器を製作することが難しい。このため、光源レーザーの励起光 (LD 電流) に変調を掛けることが検討されている。また、主干涉計の鏡のコーティング面上で変調を掛ける技術や、真空中のレーザー光に粒子線を横断させて変調を掛ける技術も検討に値する。

サファイア結晶に AC 成分を重畳した DC 電場を掛けると、Kerr 効果によって位相変調が掛かる可能性がある。これについても、機会があれば、調査する予定である。

4.2 強度変調器 (AM)

FP 腕 Michelson 干涉計では、ビームスプリッタ (BS) の並進に相当する自由度の誤差信号が腕共振器の光路長信号に比べて悪い SN 比でしか得られない。このため、BS 位置の逸脱にカップルして、重力波ターゲットの周波数帯域にある入射光の強度雑音そのまま主信号 $\delta L_{\perp}$ に混入する。

$$\delta x_{\text{int}} = x_{\text{rms}} \cdot (\delta P / P_0) \quad (1)$$

このため、RF 変調の 15MHz 近傍だけではなく、重力波観測帯域の AF 周波数領域のについても、光源の強度を安定化する必要がある [7] [8]。

TAMA300 では、BS の逸脱 rms は $x_{\text{rms}} = 10^{-12}$ 程度で、強度安定度は $\delta I / I_0 = 1 \times 10^{-7} / \sqrt{\text{Hz}}$ が達成されている¹。両者ともに、振幅であと一桁程度、改善できる可能性がある。これらの数値を仮定し、LCGT 目標感度スペクトルでどのようなレベルになるかは、近日中に本ドラフトに追加する予定である。

4.3 偏光変調器

テルビウムをドーブしたガラスは、TGG 結晶に迫る Verdet 定数を持っている [4]。もしサファイアにもテルビウムをドーブすることができれば、テストマスに交流磁場を印加して偏光変調器を構成できる可能性がある。

また、MnBi 基板に H:ZnS, L:MgF の誘電体膜を蒸着して作成された磁化鏡 (magnetic mirror) は、Faraday 回転成分をもつ高反射鏡としてリングレーザージャイロに応用されている [6]。

5 光検出部

ダイナミックレンジを稼ぐための光の分割、保護用シャッターなど、Gouy 位相テレスコプもここに含まれる。

¹新井宏二氏 提供, 2001-06.

5.1 集光・分割光学系

フォトダイオード単体では必要なダイナミックレンジが得られないので、光ビームの段階で複数のビームに分配し、複数のフォトダイオードで光電流に換算し、さらに電圧に換算した上で加算回路により統合するといったことが行われる。50:50 のビームスプリッタでカスケード分割するのが主流であるが、ホログラムやマイクロレンズアレイが検討されたこともある。

5.2 Gouy 位相テレスコープ (GPT)

主干涉計のアラインメント制御の信号をとるために、二種類の異なる Gouy 位相遅延量をもつ二次光学系で二つの 4 セグメントフォトダイオードに光を導く。TAMA300 phase I は FP 腕 Michelson 干涉計の構成なので、GPT が 3 系統用いられている。

TAMA300 では、テレスコープはレンズで構成されているが、透過型の光学素子が AR 面での残留反射が主干涉計側に悪影響を及ぼす事例が見つかっている。反射型グレーティング鏡で分割・4 セグメント配分・集光を一度に行ってしまう方法は検討してみる価値があると思われる。

5.3 アンロック時の保護機構

とくに MC の反射光と主干涉計の RM 反射光では、アンロック時に大量の DC 光が検出器に到達する。TAMA300 では、フォトダイオードの保護のために、逆バイアス電圧源に電流リミッタを設けている [9]。液晶の高速光シャッターも検討されたが、シャッター開放時の吸収が大きく、ハイパワーの光での使用は問題を起こすと予想されたので、採用は見送られた。

5.4 光検出器

光検出器は、光強度を電気信号に変換する部分である。光強度を電気信号に変換する素子としては、光伝導性 (PC – photoconductive) のもの、光電圧性 (PV – photovoltaic) のものがある。CdS などの PC モードの素子は、一般に時間応答が遅い²。また、微弱光に対しては、光電子増倍管が用いられるが、フォトダイオードに比べて、原理的な SN の優位性はないので、重力波干涉計の場合、PV モード素子の代表格であるフォトダイオードが用いられることが多い。TAMA300 では浜松ホトニクス社の InGaAs-PIN フォトダイオードを採用している。いままでのところ、決定的な欠点は見つかっておらず、LCGT では単に個数を増やすことでしのぎ切れないことはない。しかし、10W 光源の TAMA300 で既にダークポート 4 個、ブライポート 4 個の分割数になっており、単純に 10 倍すると分割光学系への負担が大きい。特に、散乱光を通じて主干涉計に悪影響が出ると心配される。

²しかし、PC モード素子でも、RF バイアス電流を流し、受光素子上で復調を行うことで、PV モード素子を持ってしても容易ではない周波数帯で復調信号を得る例がある (浜松ホトニクスの一連の研究参照)。

フォトダイオードを冷却する必要があるかどうかを検討すべきであろう。通常、光の周波数領域では、黒体輻射による雑音より散乱雑音（背景黒体の温度をゼロ度を持っていったときに残る真空の揺らぎ）の方がはるかに優勢であるため、フォトダイオードの黒体輻射を考えないでよいが、LCGT のように鏡を冷却し、しかも RSE を採用して光の輻射圧によって標準量子限界を乗り越えることを期待する場合には、フォトダイオードからの黒体輻射がシビアでないかチェックしておく必要がある。また、輻射を通じて、フォトダイオードの温度変動が鏡の温度に影響する（鏡の温度を微調整できる）可能性もある。

ダークポートの光検出部は、真空槽内に入れるべきかどうかを判断する必要がある。また、散乱光の一部を偏光素子で除去する機構の効果についてはいくつかの報告があり、TAMA300 でも採用されている。除去された光の方でも復調を行うことは興味深い。

LCGT 目標感度は、片腕あたりの有効光パワー 2500W で達成される。リサイクリングゲイン 50 を見込んで、光源のパワー P_{src} (MC に入る直前での値) は 100 W を予定している。フォトン流は、中心波長 $\lambda_0=1064\text{nm}$ を仮定すると

$$\Phi = \frac{P}{h\nu} = \frac{P\lambda}{hc} \quad (2)$$

$$= \frac{(100\text{W}) \cdot (1064\text{nm})}{(6.63 \times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s}) \cdot (3.00 \times 10^8\text{m/s})} = 5.3 \times 10^{18}/\text{s} \quad (3)$$

となる。これは、量子効率 1 で電流に換算できたと仮定すると、85 A に相当する。リサイクリングや RSE などの技術により、主干涉計の動作点における各ポートでの DC 光量は、これより 1~2 桁減少すると期待できるが、それでも単一のフォトダイオードで光強度を電流に換算するのは難しいと考えられる。

6 検討項目

前節までに述べた個々の構成部位に含められないような、横断的な検討項目について、ここで振り返ってみる。「LCGT 設計の素」[1] に指摘されている項目も含め、検討すべき選択肢には以下のようなものがある。

- 用いる光の波長は 1064nm でよいか。テストマスのバルク基材の光損失が、単純に Rayleigh 散乱と赤外吸収だけで決まっていると考えた場合、倍波 (532nm) を用いると、サファイア基材での光吸収による発熱が減少して好ましいのではないか。
- 光ビームの対テストマス センタリングのために補助光学系が必要かどうか。
- 光ビームの対真空ダクト センタリングのための機構が要るかどうか。
- 光ビームの水平化の機構。特に、BS やニアミラーにウェッジ角を設けた場合に、その調整機構はどうするか。
- プレ変調 (Schnupp 変調) を固持すべきか。結晶型の変調器を用いない変調方法 (テストマスの機械変調, アーム内の粒子線変調) や, delay line 型干渉計でポピュラーな外部変調などの技術を検討すべきかどうか。

- MC と主干涉計の間の光学系 (MMT と FI) や射出光学系, 光検出器のために個別の真空槽を用意すべきかどうか. GT も真空中に配すべきかどうか.
- 出力光 MC は検討すべきであろうか? VIRGO 計画では, 主干涉計はパワーリサイクリング付き FP 腕 Michelson であるが, ダークポートに “output mode cleaner” が入っている.
- 入射光学系の MMT や FI, ピックオフプレート (PO) の支持方法はどうするか. TAMA300 では, MMT と FI については, それぞれサイクリングミラー用, MC カプラ用の防振スタックの上に簡易振り子を組んで吊られている. また, ピックオフプレートについては, 傾きによる雑音導入が心配されたので, BS と同じグレードのサスペンション系を用いて吊られている. LCGT では防振スタックが倒立振り子 (IP) に置き替わる可能性が大きいので, MMT, FI, PO に専用の真空タンクを作る必要が出るかもしれない.

7 まとめ

MC 透過光を FI に全パワー入れられないとなると, 主干涉計の反射光を分離する技術が最も厳しい. FI を MC の上流に移動させたスキームで干涉計を動かすことが現実的かどうか, 検証実験が必要であろう.

また, フォトダイオードについて, ダイナミックレンジの確保とアンロック時の損傷保護についても, 画期的な技術の出現を待たなければならないであろう.

参考文献

- [1] 安東正樹, 「LCGT 設計の素」, LCGT 内部文章, 2001 年 5 月 7 日.
- [2] 安東正樹, 新井宏二, 「3 枚の鏡からなる Ring 型共振器の解析と計算」, TAMA 内部文章, 1995 年 7 月 28 日.
- [3] 「理科年表 平成 13 年」, 丸善, 2000.
- [4] Wynands et. al., “A compact tunable 60-dB Faraday optical isolator for the near infrared,” Rev. Sci. Instrum. vol.63 (1992) p.5586.
- [5] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, “Fundamentals of Photonics,” John Wiley and Sons, 1991.
- [6] H. Statz, et. al., “The Multioscillator Ring Laser Gyroscope,” pp.229, vol. 4 in “Laser Handbook,” edited by M. L. Stitch and M. Bass, Elsevier, 1985.
- [7] 安東正樹, 「TAMA300 Phase I での差動制御系の設計」, TAMA 内部文章, 1998 年 6 月 5 日.

- [8] S. Nagano, “Stabilized Laser for TAMA300,” p.89 in “Gravitational Wave Detection II,” edited by S. Kawamura and N. Mio, Universal Academy Press, 2000.
- [9] N. Mio et. al., “High-Power and Low-Noise Photodetector for Interferometric Gravitational Wave Detectors,” Jpn. J. Appl. Phys. vol.40 (2001) p.426.