

機関番号：12601
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20540292
 研究課題名（和文） レーザー干渉計のための光アイソレーション系の開発

研究課題名（英文） Development of an optical isolation system
 for laser interferometer

研究代表者
 森脇 成典 (MORIWAKI SHIGENORI)
 東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教
 研究者番号：60262044

研究成果の概要（和文）：本研究は、レーザー干渉計型重力波検出器の光学系での使用を想定し、ファラデー素子を用いずに電気光学結晶を用いるタイプの新しい動作原理の光アイソレーション系を提案し、動作実証実験をおこなうものである。電気光学結晶における変調指数の不足から、実用的なレベルのアイソレーションは実現できなかったが、アイソレーション系の動作に必要な順行・逆行光の透過率の非対称性が観測され、アイソレーション動作の原理検証が達成された。

研究成果の概要（英文）： The purpose of this investigation is to demonstrate a new optical isolation technique which uses electro-optic modulators instead of Faraday rotators. The principle of the operation has been proved by measuring the asymmetry on the forward/backward optical transmissions although the usable amount of isolation ratio has not been achieved due to the lack of modulation index at the electro-optic modulators.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学、応用光学、精密計測
 科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理
 キーワード：相対論・重力（実験）、応用光学、計測工学

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、大型のレーザー干渉計型重力波検出器が世界各地で建設され、天体からの重力波の検出を目指して観測・解析が行われている。しかし、検出に成功した例はまだなく、信号検出の確率を上げるために、干渉計のさらなる感度向上が熱望されている。レーザー干渉計の感度を制限する要因の一つに、散乱光雑音がある。散乱光の雑音は、量子雑音・熱雑音などの原理的な雑音とは異なり、光学素子の品質を高めるだけで除去できる可能性のある技術雑音の一つである。しかし、原理的雑音を低減化するために干渉計の光源

のパワーが次第に引き上げられる中で、光学素子の品質向上だけでは所望の性能が得られる見通しが立たないという状況が生じている。本研究計画は、干渉計からの散乱光が光源に戻るのを除去する、光アイソレータの新しい方式を提案し、その検証実験を行うものである。従来方式の光アイソレータと比べると、電氣的に特性を微調整するのが容易であることから、重力波検出器だけでなく、一般の計測干渉計や光通信の分野にも応用できる可能性を持っている。

(2) レーザー技術の進展は目覚ましく、レ

レーザー光源を用いた変位・歪みセンサでは容易に量子限界感度が達成できることから、様々な分野でセンサとして応用されている。重力波検出器の分野においても、レーザー干渉計型の検出器が世界各地で建設され、初観測に向けての気運が高まっている。日本国内では、国立天文台三鷹に TAMA300 と呼ばれる基線長 300m のレーザー干渉計が作られ、世界に先駆けて観測が行われた。後に米の LIGO 干渉計 (基線長 4km) が完成し、観測を開始したことに加え、欧州の VIRGO 干渉計 (基線長 3km) も建設を終え、本観測に向けた準備が進んでいる。日本でも LCGT と呼ばれる km クラスの基線長をもつ干渉計型重力波検出器の計画が進められているが、着工には至っていない。本計画の代表者は、TAMA300 干渉計の設計・運用に携わり、LCGT 計画の設計作業にも加わっている。LCGT 計画では、目標感度達成のために 100W 級の Nd:YAG レーザー光源を使用する。その波長 1064nm で使用可能なファラデー材料は、吸収係数を小さくすることが困難であり、光アイソレーション系は冷却系を伴ったものになってしまう。本計画書で提案する方法は、ファラデー素子を用いず、かわりに電気光学素子 (EOM) を用いて光アイソレーションを実現する方法である。本提案が実現されれば、光吸収の多いファラデー素子を使わなくて済むようになるため、真空中で水冷と防振を両立させるという付属システムを導入しなくて済むようになる。ただ、本方式は実績がないため、現在の LCGT の計画案では光アイソレーション系にファラデー素子を用いる予定になっている。本計画書で提案する方法がうまく機能し、余剰雑音も引き込まないことが確認できれば、LCGT 計画における入射光学系の単純化、建設費用削減にも寄与できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究計画では、プロトタイプ干渉計をテーブルトップ形式で製作し、原理検証実験を行い、予想される付加雑音の特定と定量的な確認を行う。これによって、将来の大型干渉計に本研究で提案される型の入射光学系を導入した場合に、スケール則によって付加雑音の大きさが予想できるようになる。そのための基礎データを収集することが本研究の目的となる。

本研究は、光アイソレータとして、ファラデー素子のかわりに電気光学変調器を用いるところが、他に類を見ない特徴となっている。通常の光学素子は、光を入射するポートと取り出すポートがあり、取り出す側から光を入射したときの逆行の透過率は、順行の透過率と同じになるという一種の相反性を持っている。この相反性を破る光学素子は、損失を

持つか、時間反転対称性を持たない系になっている必要がある。高出力レーザーを用いて計測の量子限界に迫ろうとするシステムでは、損失の多い光学素子を光路に挿入することは許されない。それゆえ、時間反転対称性を破るような素子が必要となる。マイクロ波や力学の分野でジャイレータと呼ばれるものがそれで、通常、光学の分野では、磁場の効果で偏光面が回転するファラデー効果を利用する。しかし、高出力で計測に適した Nd:YAG レーザーの波長 (1064nm) では、損失の少ないファラデー材料は見出されていない。一方で、電気光学結晶では、吸収・散乱が少なく、100W 級の光パワーに耐える高品質の結晶が得られている。そこで、電気光学変調器を光アイソレーションの素子として使おうというのが本計画の提案である。二つの電気光学変調器を同一光路上にならべ、間隔を変調周波数の 1/4 波長分を選び、さらに両電気光学変調器に印加する変調波の相対位相差も 1/4 周期を選んで、順行する光に対する位相変調がトータルで無効に、逆行する光に対する位相変調がトータルで和になるようにすると、逆行光についてのみキャリア成分がなくなるように変調指数を選ぶことができる。これを光周波数フィルタと組み合わせると、光アイソレータが実現できる。時間反転対称性をもつ系は順方向と逆方向で光の透過率が等しくなるという相反定理 (いわゆる光学の原理) が破れているわけではない。ここで考えている複数変調器の系は、変調の存在のせいで系が時不変ではなく、時間反転対称性をもともと有していないからである。筆者の知る限り、このような系は今まで光アイソレータとしては応用されたことのないものである。このため、アイソレーション効果の検証、余剰雑音の有無確認、干渉計の信号取得のための変復調系との両立法を確認することが本計画の目的となる。

3. 研究の方法

(1) 本研究で提案している新しい光アイソレーション方式は、筆者の知る限り前例のない方法なので、まず原理の実験検証を行うことが肝要である。また、原理的には機能することが分かっても、何か未発見の効果により、通常ファラデー素子を用いる方式に比べて大きな付加雑音が存在したり、主干渉計の変復調による信号取得と両立できない可能性もある。このため、実験による雑音特性の評価が重要な課題となる。

基本的な構成要素は既存の実験器材で一時的に代用可能なため、実験系製作の初期段階で入射光学系部分のプロトタイプを完成させる。その後、対象となる主干渉計と組み合わせる雑音特性の調査を行い、位相雑音付加の少ない電気光学結晶の配置・マウント方法

を並行して検討しながら、低雑音化を試みる。こうして余剰雑音が深刻でないことを確認し、将来の大型干渉計に適用する際の雑音の見積りのための基礎データを得ることを目指す。

(2) 光共振器の共振状態の維持には、よく知られた Pound-Drever-Hall 法を用いる。電気光学結晶は本研究予算で新規購入したものを使用する。使用する変調周波数が数十 MHz となるため、結晶の固定機構と電極配線の構成の設計は不可分であり、自前でアセンブルして調整する。

以前から、電気光学変調器を内包するレーザー干渉計測システムにおいて、変調結晶の機械振動により計測信号の雑音レベルが上がっているのではないかと懸念がされている。仮に本実験で提案する手法が従来のファラデー素子利用のアイソレータに劣ることが判明したとしても、主干渉計の信号取得の変調で機械振動由来の雑音を低減するような電気光学結晶の使用方法は依然必要となる技術である。本計画のアイソレータでは、位相変調がキャンセルする方向の透過光では、まさに機械的振動由来の位相雑音だけが残ることになるので、この問題の調査にはうってつけである。従って、電気光学変調器の機械的外乱の抑制は、本研究の副次的な柱と位置付けて重要視している。

一方、現時点での光アイソレーションの効果のモデル化では、各々の結晶が無限小の長さを持っていると仮定している。実際には結晶は有限の長さをもっており、通常おこなわれるベッセル関数展開による解析結果からずれる可能性があり、順行する光の変調が厳密にはキャンセルしないことがあると考えられる。実測された周波数スペクトルを解析することでこの効果の調査をおこない、もし量的にトラブルを起こすようであればその低減方法を検討する。

(3) 重力波検出用 Michelson 干渉計では、Schnupp 法と呼ばれる信号検出法を用いるため、位相変調、場合によっては強度変調も、入射光学系で付加する必要がある。周波数選択のスキームによっては、光アイソレーションが実現されずに光源レーザーに戻ってしまうサイドバンド成分が残ることが予想されるため、その解析もおこなう。その結果を汲み入れてモデルとなる主干渉計の設計を行い、初期のプロトタイプ光学系で用いていた単純な反射鏡を、モデル主干渉計で置き換えて雑音特性を評価する。

4. 研究成果

(1) 本研究で提案する検証実験を実現するには、二つの変調器でそれぞれ変調指数 1.2

の位相変調を生じさせる必要がある。そのため、まず位相変調器を構成するためのニオブ酸リチウム結晶を調達し、ガラス強化型 PEEK 材を切削加工して結晶のマウント台を作製し、性能確認をおこなった。当初心配された結晶の機械的共振による特定周波数での変調効率の低下は、市販の導電性接着剤を結晶の電極蒸着面に塗布することで、問題とされないレベルに収まることが確認できた。さらに、結晶マウント台に由来する機械的外乱振動が光位相に転換されて雑音となるプロセスが当初心配されたが、フィネス 300 程度の光共振器との組み合わせでは問題とされないことが確認できた。この結果をふまえ、結晶マウントの第二系統を作成し、変調周波数を 60MHz に合わせこんだ上で原理検証実験の光学系に組み込み、変調器間距離と変調位相を調整した。その結果、順行光・逆行光の透過率対称性の破れが観測できた。

第一系統の結晶で変調指数が不十分であったため、完全な光アイソレーションは実現できていないが、逆行光除去効果として光強度比での除去率 0.68 を得た。なお、本実験で目標としている完全アイソレーション状態は、除去率 1.0 に対応する。その後アイソレーション比の向上をねらい、まず変調結晶への印加電圧の不十分を補うための電気系の改作をおこなった。この作業の過程で、第一系統の結晶マウント台上で電極を固定するポリカーボネート製絶縁ねじが破損し、マウント台部分が修復不可能な状態となったので、結晶マウント台の第三系統を製作した。このとき、印加電圧昇圧部から発生する電磁波が光検出器の出力に不要な干渉を発生させることが問題となっていたが、この効果を低減するために、電圧印加用の高周波増幅器の構成を変更し再作成した。光アイソレーションの実現にはまだ至っておらず、主干渉計を代用している反射鏡を Michelson 干渉計に置き換える実験も実現できておらず、光学系の構築は継続中であるが、レーザー干渉計型重力波検出器の実機で問題となっている電気系統の雑音干渉を低減し、変調の長期安定性を保つための手法について新しい知見が得られた。

(2) 本実験で使用した電気光学結晶の光学的開口は 2x2mm であるが、これは光源レーザーの出力が 100mW と比較的小さいことから選ばれたものである。将来のレーザー干渉計型重力波検出器では、電気光学結晶がより高いパワーにさらされるので、結晶自身の耐パワー性の問題から、より開口の大きな結晶を用いる可能性が出てくる。結晶の光軸方向の大型化にも、共振周波数の観点で限界があることから、結晶開口の結晶に印加する電圧を上げなければならないことを意味する。この要

求に応えるため、トロイダルトランスを利用して出力を統合することにより印加電圧を上昇させるタイプの高周波電圧ドライバの製作をおこなった。これにより、安価な部品だけで必要な変調電圧を確保する方法に見通しが立った。

また、将来のレーザー干渉計型重力波検出器では、位相変調結晶とそれに付随する共振昇圧回路が大型真空槽の内部や大型光学定盤の上に配置されるので、ドライバ回路と結晶の間を数メートルのケーブルでつなぐことになる。このような状況の下では、共振のQ値が高いと素子の温度変動などで変調パラメータが変化してしまうが、この効果を電気端で検出して補償するような機構を検討し、実用化にそなえてモデル化を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計5件)

①森脇 成典, 「電気光学変調器を利用した光アイソレーション系の開発 V」, 日本物理学会, 2011年3月27日, 新潟大学五十嵐

②森脇 成典, 「電気光学変調器を利用した光アイソレーション系の開発 IV」, 日本物理学会, 2010年9月14日, 九州工業大学戸畑

③森脇 成典, 「電気光学変調器を利用した光アイソレーション系の開発 III」, 日本物理学会, 2010年3月22日, 岡山大学津島

④森脇 成典, 「電気光学変調器を利用した光アイソレーション系の開発 II」, 日本物理学会, 2009年9月10日, 甲南大学岡本

⑤森脇 成典, 「電気光学変調器を利用した光アイソレーション系の開発」, 日本物理学会, 2009年3月30日, 立教大学池袋

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森脇 成典 (MORIWAKI SHIGENORI)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教
研究者番号：60262044

(2) 研究分担者

(なし)

(3) 連携研究者

(なし)