

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 22 年 4 月 12 日現在

研究種目: 若手研究(B)
 研究期間: 2008~2009
 課題番号: 20760584
 研究課題名(和文) 振動自己補正機能付干渉計の高性能化

研究課題名(英文) Improvement of interferometer with self-compensation of vibrations

研究代表者

秋山 毅志(AKIYAMA TSUYOSHI)
 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教
 研究者番号: 80370138

研究成果の概要(和文): 本研究では、機械振動が誤差要因とならない Dispersion 干渉計に、光弾性変調器を用いた変調強度比計測による位相差抽出手法を適用し、高精度化を図った。周波数安定化させた連続発振レーザーでは、パワー密度が小さいために通常 2 倍高調波の発生が難しいが、非線形光学結晶 AgGaSe₂ を用いて、計測に十分な 2 倍高調波成分を生成した。プラズマを模擬するセレン化亜鉛板を用い、正しい位相差を計測・抽出できることを示し、提案した手法の有効性を示した。機械振動を模擬した計測も行い、光学的に機械振動がキャンセルされ、計測結果に誤差をもたらさないことを確認した。

研究成果の概要(英文): In order to improve the measurement resolution of a dispersion interferometer, which is free from mechanical vibrations, the phase modulation method using a ratio of modulation amplitudes is proposed and adopted. The enough power of the second harmonic can be generated with a nonlinear crystal AgGaSe₂, although the generation is usually difficult for a frequency-stabilized continuous-wave laser. The feasibility of the proposed method is demonstrated by the phase shift measurement of the ZnSe plate, which simulates a plasma. It is confirmed that the mechanical vibrations are cancelled optically and gives no phase errors.

交付決定額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野: 工学

科研費の分科・細目: 総合工学・核融合学

キーワード: プラズマ計測

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合装置において、電子密

度計測は高い計測精度に加えて、いかなる条件でも計測ミスのない高い信頼性が要求される。こ

れまでの干渉計は高い計測精度を持つが、機械振動がもたらす計測誤差や、高密度領域での「フリンジジャンプ」による計測ミスの問題がある。今後、装置の大型化・高密度化が進む事が予想されるが、干渉計のために装置本体以上の巨大な除振架台を設置することは現実的でなく、またフリンジジャンプの深刻さも増してくる。

密度計測システムの簡素化、及び信頼性向上の1つの方法に、「Dispersion 干渉計」がある。これは、シンプルな光学系でありながら機械振動の影響を受けず、またその結果として短波長光源が利用できるためにフリンジジャンプを無くすことができる。しかし、Dispersion 干渉計で不可欠な2倍高調波の発生が連続発振レーザーでは難しいこと、得られる干渉信号がホモダイン干渉計とほぼ同じであるため、計測精度が低い問題がある。

2. 研究の目的

本研究では、簡素で信頼性高い密度計測器となり得る Dispersion 干渉計を高精度化する。そのために、光弾性変調器を用いた位相変調をし、更なるその変調周波数の高調波成分の振幅強度比を利用した位相抽出方法を提案し、原理検証を行う。

3. 研究の方法

(1) 光学系の概要

図1に示す光学系で、提案した位相変調・抽出方法の原理検証を行った。

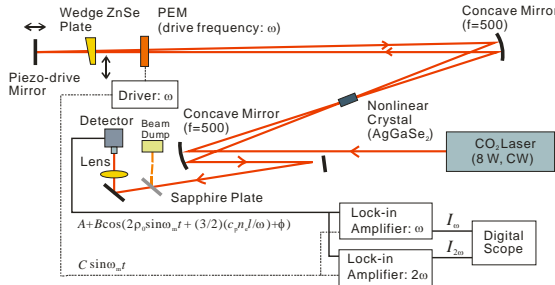


図1: ベンチテストの光学系

光源には波長 10.6 μm、出力 8 W の炭酸ガスレーザーを用い、パワー密度を高めるために凹面鏡にて非線形光学結晶中に集光する。ここで、2倍高調波を発生させ、残った基本波成分との混合光をプローブ光とする。そして、光弾性変調器(Photoelastic modulator: PEM)を用いて2倍高調波成分にのみ位相変調 $\rho_0 \sin \omega_m t$ を与える (ρ_0 : 最大光学遅延量、 ω_m : PEM の駆動周波数)。この後、プローブ光は測定対象であるプラズマを透過するが、ベンチテストではウェッジ角 (0.2-0.3 度) 付きのセレン化亜鉛 ZnSe 板でプラズマを模擬する。プローブ光を折り返すミラーは piezo 素子で振動させ、実環境での機械振動を模擬する。レーザー光は再び非線形光学結晶

を通り、ここで基本波成分から2倍高調波成分を発生させる。行きと帰りのプローブ光は、両者を分離するために光軸を若干ずらしてあり、小ミラーで帰りのビームだけを検出系へ導く。最後まで残った基本波成分は、サファイヤ板を用いてカットし、行き・帰りの光路でそれぞれ発生した2倍高調波成分の干渉信号を測定する。ここで、測定対象(プラズマとする)前・後で生成した2倍高調波の位相 ϕ_1, ϕ_2 はそれぞれ、

$$\phi_1 = 2\alpha + 2\omega\Delta d/c + 2\rho_0 \sin \omega_m t + c_p n_e L / 2\omega + \phi_1^0$$

$$\phi_2 = 2(\alpha + \omega\Delta d/c + c_p n_e L / \omega + \phi_2^0)$$

n_e : 線平均電子密度、 c_p : 定数、 L : プラズマ中の光路長、 ω : 光源の角周波数、 Δd : 機械振動による光路長変化、 ϕ_1^0, ϕ_2^0 : 初期位相

であり、得られる干渉信号 I は、

$$I = A + B \cos(\phi_1 - \phi_2)$$

$$= A + B \cos\{2\rho_0 \sin \omega_m t + \phi^0\} \quad (1)$$

$$A = I_1 + I_2, B = (I_1 I_2)^{1/2}, \phi^0 = \phi_1^0 - \phi_2^0$$

I_1, I_2 : 2倍高調波成分の検出信号強度

となる。このように、波長に反比例する機械振動による位相変化は、二つの2倍高調波成分で共通であるためにキャンセルされるのに対し、測定対象の波長分散による位相変化は、両者の間で異なるために、キャンセルされずに残ることになる。なお、測定対象物がベンチテストのように ZnSe 板であれば、計測される位相変化 ϕ は、

$$\phi = 4\pi d (n_{2\omega} - n_\omega) / \lambda \times 2 \quad (2)$$

d : ZnSe 中の光路長、 $n_\omega, n_{2\omega}$: 基本波・2倍高調波の屈折率、 λ : 光源の波長

となる(“×2”は往復するため)。

(2) 位相抽出手法の概要

ホモダイン干渉計では、干渉信号の直流成分 A と振幅成分 B が予め求めておく必要があり、それぞれが測定中に変化した場合、それが計測誤差となる問題がある。従来型の Dispersion 干渉計は、これと同じ問題があったが、本研究で提案する手法は、計測結果が A, B に依存しない特長がある。

式(1)は、

$$I(t) = A + B \left\{ \cos(2\rho_0 \sin \omega_m t) \cos\left(\frac{3 c_p n_e L}{2 \omega} + \phi\right) \right. \\ \left. - B \left\{ \sin(2\rho_0 \sin \omega_m t) \sin\left(\frac{3 c_p n_e L}{2 \omega} + \phi\right) \right\} \right\} \quad (3)$$

となり、更に $\cos(2\rho_0 \sin \omega_m t), \sin(2\rho_0 \sin \omega_m t)$ は、

$$\cos(2\rho_0 \sin \omega_m t) = J_0(2\rho_0) + 2\sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(2\rho_0) \cos(2n\omega_m t) \quad (4)$$

$$\sin(2\rho_0 \sin \omega_m t) = 2\sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(2\rho_0) \sin\{(2n-1)\omega_m t\} \quad (5)$$

と展開できる (J_n : ベッセル関数)。

これより、PEM の駆動周波数 ω_m の基本波、2 倍高調波成分の振幅強度 I_{ω} , $I_{2\omega}$ は、

$$I_{\omega} = 2BJ_1(2\rho_0) \cos\phi, \quad I_{2\omega} = 2BJ_2(2\rho_0) \sin\phi \quad (6)$$

となる。ここで、PEM への駆動信号強度を調整して $\rho_0=1.3$ rad. に設定して $J_2(2\rho_0)=J_1(2\rho_0)$ とし、両者の比のアークタンジェントをとることで、測定対象の位相変化が得られる。

$$\phi = \tan^{-1}(I_{2\omega} / I_{\omega}) \quad (7)$$

本手法では、 I_{ω} , $I_{2\omega}$ をロックインアンプ等を用いて測定することで、直流成分 A の変動の影響は除去でき、また両者の比を取るために、振幅強度 B もキャンセルすることができる。そのため、検出信号強度の変動に影響を受けないため、位相抽出を高精度化することが可能である。

4. 研究成果

(1) 位相差計測

本手法で正しく位相差が測定可能かを原理検証するため、ウェッジ角付き ZnSe 板を光軸に垂直方向にスキャンし、その際の位相変化を測定した。その結果を図 2 に示す。ウェッジ角を θ 、スキャン距離を δl とすると、得られる位相変化 ϕ は、

$$\phi = 4\pi(\delta l) \tan\theta (n_{2\omega} - n_{\omega}) / \lambda \times 2 \quad (8)$$

となる。

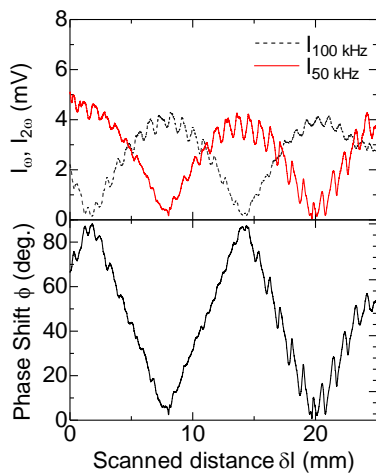


図 2: ウェッジ角付き ZnSe 板をスキャンした際の位相変化

図 2 より、 $\phi/\delta l=13.75$ rad./mm が得られた。この値から式 (8) より評価したウェッジ角は 0.225 度であり、製作精度の範囲内で一致している。なお、計測された振幅強度に変動が載っているが、これはレーザーに戻った光によって共振器長の帰還制御が乱され、発振不安定性が起きているためである。これを解決するためには、プローブ光をミラーで折り返すのではなく、プラズマもしくはその模擬体の後にもう一つの非線形光学結晶を置き、レーザー本体方向に光を戻さない光学系に変更すれば良い。

これにより、本手法で妥当な位相変化が得られ、その有効性を示すことができた。

(2) 振動除去性能の確認

Dispersion 干渉計は機械振動の影響が少ないことが特長であるが、本システムで機械振動が測定誤差をもたらさないことを確認したのが図 3 である。 piezo 振動子付きミラーを振動させ、光路長を $\pm 10 \mu\text{m}$ 程度変化させている。これに対して、線電子密度 $n_e L$ に換算した値では、印加した機械振動 1.3 Hz の振動成分は見られず、波長以上の振動成分に対しても、計測結果に影響されないことが確認された。なお、振動に同期した小さなスパイク成分が存在するが、これは前述の戻り光の位相成分が光路長変化によって変化するために、レーザー発振の不安定性が変化しているためである。従って、前述の通り、レーザー光が非線形光学結晶を往復しない光学系とすることで、本問題を根本的に解決することができると思われる。

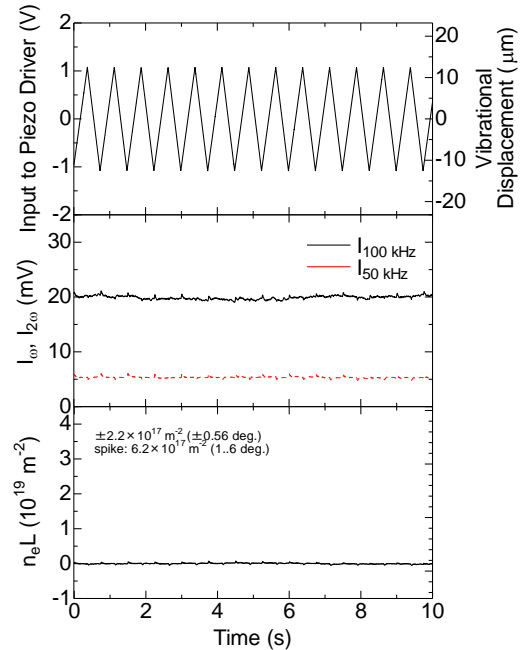


図 3: 機械振動を与えた場合の計測例

また、計測のゼロ点のドリフトは、典型的には 10 秒間で $\pm 4 \times 10^{17} \text{ m}^2$ である。これを決めている誤差要因はまだはっきりしていないが、戻り光の影響で、数十秒~数分オーダーで発振強度が変動していることから、戻り光をなくすことである程度の改善が図られると予想される。また、基本波と 2 倍高調波は厳密には全く同じ光路ではないので、波面の不一致とそれが振動で干渉率や計測されるビーム断面(等位相面)が変化することも、要員の可能性がある。これについては、ウェッジ角付き板を挿入し、基本波・2 倍高調波の光路を僅かに調整することで改善が得られると考えられる。

今後の課題として、非線形光学結晶を測定対象の後に追加し、レーザーへの戻り光の影響がない光学系にし、計測精度・安定性の改善を図ることが挙げられる。

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)

[雑誌論文] (計1件)

- ① T.Akiyama, K. Kawahata, S. Okajima, K. Nakayama, “Design of dispersion interferometer using ratio of modulation amplitudes”, Plasma and Fusion Research, 5, 2010, S1041-1-S1041-5. 査読有.

[学会発表] (計3件)

- ① T. Akiyama, K. Kawahata, S. Okajima, K. Nakayama, “Design of dispersion interferometer using ratio of modulation amplitudes”, 17th Meeting of the ITPA Topical Group on Diagnostics, 2009. Oct. 14, Pohang, Korea
- ② T. Akiyama, K. Kawahata, S. Okajima, K. Nakayama, “Design of dispersion interferometer using ratio of modulation amplitudes”, 8th Japan-Australia Plasma Diagnostics Workshop, 2009. Feb. 3, Canberra, Australia
- ③ T. Akiyama, K. Kawahata, S. Okajima, K. Nakayama, “Design of dispersion interferometer using ratio of modulation amplitudes”, 18th International Toki Conference, 2008. Dec. 10, Toki, Japan.

[産業財産権]

○出願状況(計1件)

名称: ディスパーション干渉計及び被測定物の物理量の計測方法

発明者: 秋山毅志、川端一男、岡島茂樹、中山和也

権利者: 秋山毅志、川端一男

種類: 特許

番号: 特願 2008-282085

出願年月日: 2008 年 10 月 31 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

秋山 毅志 (AKIYAMA TSUYOSHI)

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教

研究者番号: 80370138