

スペクトロ・インターフェログラムによる分散測定装置の開発

電子工学科 植田研究室 渥美貴之

概要

本研究では、スペクトロ・インターフェログラムによる分散測定装置の開発を目的とする。まず、分散の値が既知である合成石英の 600nm ~ 800nm における分散を測定し、装置の評価を行った。また、2つのファイバ(HI1060、フォトニック結晶ファイバ)の分散を測定し、誤差の評価を行った。今後のさらなる高精度な分散測定につなげるため、本研究における問題点を明らかにし、改善策を示した。

1 はじめに

フェムト秒パルスのような超短パルスは、短パルス化が進めば進むほど、群速度分散の影響が大きくなり、パルス波形の歪みが著しくなる。現在、回折格子対やプリズムなどを利用して、3次の分散までは補償が可能になってきているが、伝送速度が速くなると、2次、3次の分散を補償してもさらに4次の分散の影響が出てきて、パルス波形の歪みにつながってしまう。したがって、超短パルスの制御には群速度分散の補償が必要不可欠であり、さまざまな物質の分散の値を知っておく必要がある。

本研究では、スペクトロ・インターフェログラム¹による分散測定装置の開発を目的とする。

2 原理

2.1 スペクトロ・インターフェログラム

スペクトロ・インターフェログラムとは干渉計の片方のミラーを傾けることでY軸上に遅延を与え、分光器で分光することで得られた空間、周波数上における干渉縞のことである。合成石英の分散測定で用いた実験図を図1、その詳細図を図2に示す。分光器の出射面上での強度分布を式(1)に示す。

$$I(y, \lambda) = I_S(y, \lambda) + I_R(y, \lambda) + 2\gamma\sqrt{I_S(y, \lambda)I_R(y, \lambda)}\cos[\phi_{SR}(y, \lambda)] \quad (1)$$

$I_S(y, \lambda)$ 、 $I_R(y, \lambda)$ はサンプル光、リファレンス光の強度、 γ はコヒーレンス度(degree of coherence)を示している。

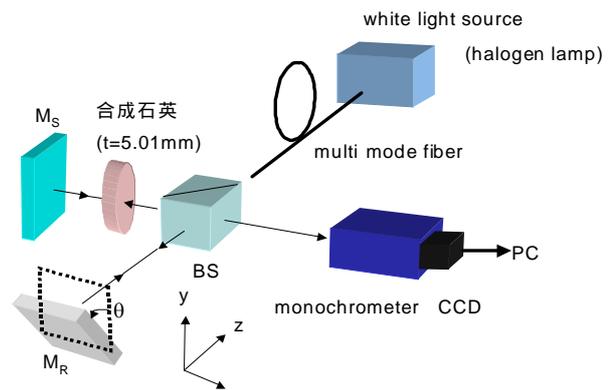


図1 合成石英の分散測定の実験構成図

式(1)から、遅延、波長を掃引することなくワンショットで位相の波長依存性を取得でき、分散を測定できることが分かる。ファイバは熱や外部の影響によって、ファイバ長が変動したり、揺らいでしまうので、遅延、波長を掃引することなく、ワンショットで分散を測定できることは、特に、ファイバの分散測定の際に有効だと考えられる。

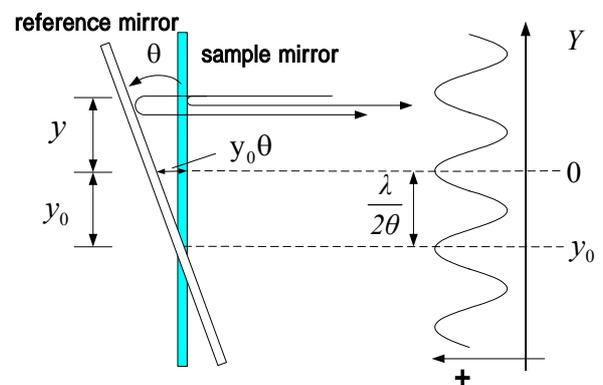


図2 スペクトロ・インターフェログラムの原理

2.2 群遅延分散の導出

位相 φ は角周波数 ω の関数なので φ を ω_0 のまわりでテーラー展開すると、

$$\begin{aligned} \varphi(\omega) = & \varphi_0 + \frac{\partial\varphi}{\partial\omega}(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2\varphi}{\partial\omega^2}(\omega_0)(\omega - \omega_0)^2 \\ & + \frac{1}{6} \frac{\partial^3\varphi}{\partial\omega^3}(\omega_0)(\omega - \omega_0)^3 + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

のように書ける。

また、一般的にバルクの場合、群遅延分散は、

$$GDD = \frac{1}{t} \frac{\partial^2\varphi}{\partial\omega^2} [fs^2 / mm] \quad (3)$$

ファイバの場合 D パラメーターは、

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} GDD = -\frac{2\pi c}{\lambda^2 L} \frac{\partial^2\varphi}{\partial\omega^2} \quad (4)$$

で表される。ここで、t は試料の厚み、L はファイバ長である。

3 合成石英の分散測定

まず、分散の値が既知である合成石英の分散を測定することで測定装置の評価を行う。

3.1 実験方法

干渉計にはマイケルソン干渉計を用い、実験構成図は図 1 に示した。この実験において 600nm ~ 800nm における合成石英(厚さ 5.01mm)の分散を測定した。PC で取得したスペクトロ・インターフェログラムを図 3 に示す。左図は合成石英、右図は合成石英が入っていない(blank)の状態でのスペクトロ・インターフェログラムである。

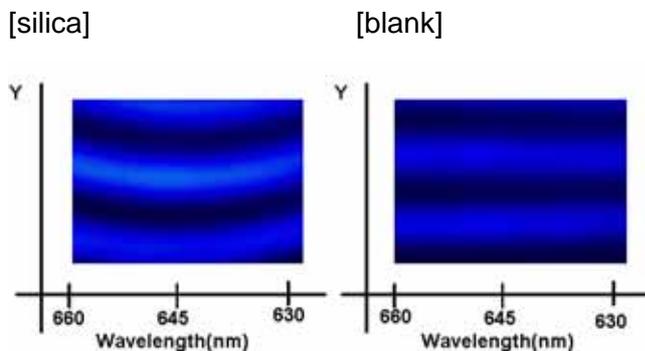


図 3 中心波長 645nm におけるスペクトロ・インターフェログラム

3.2 結果と解析

群遅延分散を求めるにあたり、計算機上では、スペクトロ・インターフェログラムを Y 方向に切り出し、振動成分を抜き出すことで位相を出している。図 4 の左図は振動成分を抜き出す前、図 4 の右図は振動成分を抜き出した後の強度を示している。振動成分とは、式(1)の右辺の第 3 項の $\gamma \cos \varphi_{SR}(y, \lambda)$ のことである。振動成分を抜き出し、正弦波でフィッティングすることにより、位相の変化が図 5 のように得られた。

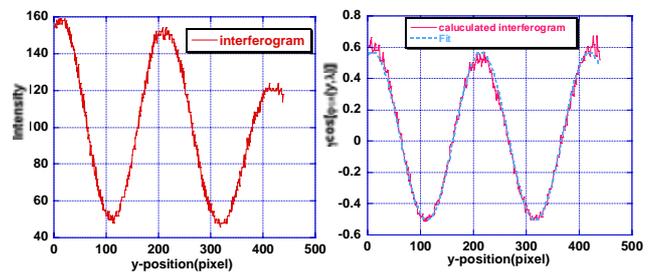


図 4 振動成分の抜き出し

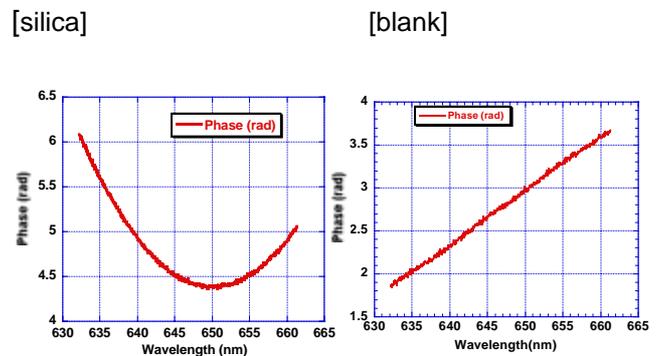


図 5 位相の変化

群遅延分散は式(3)で表されるように、位相の 2 回微分であるので、求めたい値というのは、図 5 の曲率である。したがって、図 5 を 3 次関数でフィッティングすることによって 2 次の分散の値を出した。理論値との比較を図 6 に示す。ここで言う理論値とは、セルマイヤーの分散式から GDD を算出した値である。は干渉計内(blank)に残留する分散を含んだ値であり、誤差は 8%であった。干渉計内に残留する分散の値を引くことで、 \times は誤差 4%以下に抑えられた。

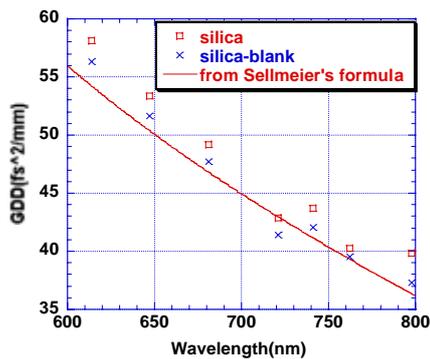


図6 理論値との比較

4 ファイバの分散測定

ファイバの分散を測定するにあたり、まず ASE 光源を作成した。そして、2つのファイバの分散を測定し、誤差の評価を行った。

4.1 ASE 光源の作成

ファイバの分散測定²では、石英の測定で使っていたハロゲンランプでは、NA が大きく、シングルモードファイバに光がほとんど入らない。また、CCD の感度が 1000nm 以上ではほとんど感度がなく、ハロゲンランプではスペクトル強度が弱すぎる。そこで、今回の実験では Yb 添加ダブルクラッドファイバを 973nm の半導体レーザーで励起することで、中心波長 1035nm、線幅 30nm 程度の ASE (Amplified Spontaneous Emission) 光源を作成した。ASE 光源とスペクトルを図 7 に示す。

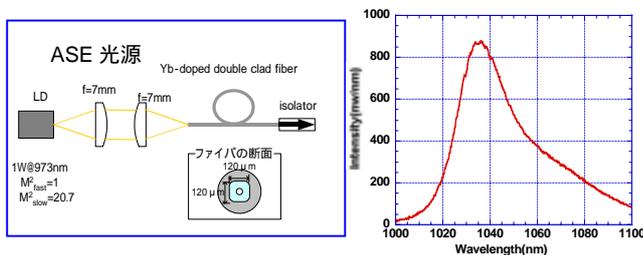


図7 ASE 光源とそのスペクトル

4.2 実験方法と結果

実験構成図を図 8 に示す。測定したファイバは、()HI-1060(980nm~シングルモード、コア径 5 μm 、29.2cm)

()フォトニック結晶ファイバ(コアの形状:楕円、コア径 1.3 $\mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$ 、28.8cm)である。

干渉計にはマッハツェンダー干渉計を用いた。

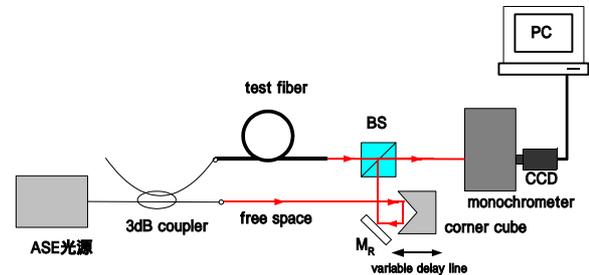


図8 ファイバの分散測定の実験構成図

まず、3dB カプラで 2 つの光にわけ、自由空間とテストファイバへと導いている。2 つの光の強度の違いを反射型可変式 ND フィルターで補正した。PC で取得したスペクトロ・インターフェログラムを図 9 に示す。

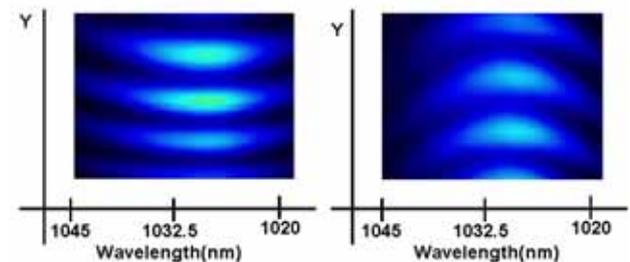


図9 HI-1060 とフォトニック結晶ファイバのスペクトロ・インターフェログラム

解析は合成石英と同様に行った。D パラメータは式(4)のように表される。各値を代入し、計算すると HI-1060 は $D=-49\text{ps/km}\cdot\text{nm}$ 、フォトニック結晶ファイバは $D=139\text{ps/km}\cdot\text{nm}$ という結果が得られた。

4.3 誤差の評価

本研究では装置の開発を目的としているので測定装置の誤差を評価する必要がある。今回の測定において誤差につながった理由は、

- カプラ部のファイバ長の違いによる誤差
 - ND フィルターを入れたことによる誤差
 - フィッティングによる誤差
 - モードミスマッチングによる誤差
- などが挙げられる。

これらの誤差は、

$$\frac{\Delta D}{D} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L_{\text{coupler}}}{L_{\text{fiber}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L_{\text{NDfilter}}}{L_{\text{fiber}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varphi_{\text{fitting}}}{\varphi}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2} \quad (5)$$

のように書ける。ここで、今回の実験において

$$\begin{aligned} \frac{\Delta L_{\text{coupler}}}{L_{\text{fiber}}} &= 0.0033, & \frac{\Delta L_{\text{NDfilter}}}{L_{\text{fiber}}} &= 0.010 \\ \frac{\Delta \varphi_{\text{fitting}}}{\varphi} &= 0.0076, & \frac{\Delta m}{m} &= 0.046 \end{aligned}$$

であったので、 $\frac{\Delta D}{D} \cong 0.05$ であった。

誤差を考慮し、 $D \pm \Delta D$ を計算すると [HI-1060]

$$D \pm \Delta D = -49 \pm 3 [\text{ps/km-nm}]$$

[フォトニック結晶ファイバ]

$$D \pm \Delta D = 139 \pm 7 [\text{ps/km-nm}]$$

という結果が得られた。

5 結論、今後の展望

本研究では、石英の分散は誤差 4%以下で測定できた。また、2つのファイバの分散を測定し、誤差を評価した。ファイバの分散測定において4章から分かるようにモードミスマッチングによる誤差が一番の問題となった。このモードミスマッチングを解消する今後の実験予定図を図10に示した。自由空間、テストファイバからの光を、一度同じ長さで同一のファイバに結合する。そうすることで、テストファイバのコア径やNAが変わってもモードミスマッチングによる誤差の影響を抑えることができると考えられる。

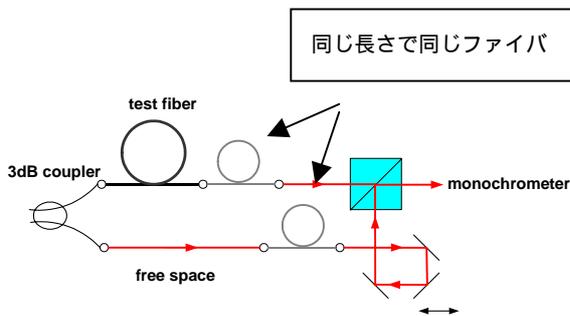


図10 今後の実験予定図

今後の展望として、

今回の実験では、光源に合成石英ではハロゲンランプ、ファイバでは ASE 光源を使用した。ハロゲンランプはスペクトル幅は広いが、スペクトル強度が弱く、ASE 光源は、スペクトル強度は強いが、スペクトル幅(約 30nm)と狭い。そこで、赤外中心のフェムト秒レーザーを使用することで、スペクトル幅が広く、スペクトル強度が強い光源を使用する。

今回使った CCD の感度は 620nm を 1 とすると、1000nm では 0.1%以下になってしまい、1000nm 以上ではほとんど感度がなかった。今後は赤外での様々なファイバの分散を測定していきたいので、0.8 μm ~1.7 μm で感度のある InGaAs の 2次元検出器を使用する。

今回使った分光器は、分解能の高い分光器を使ったため一度に 30nm 程度の範囲の分散しか測定できなかった。今後はもっと広帯域の分散を測定していくため、一度にもっと高帯域(100nm 程度)の分散を測定できる分光器を使用する。

今回測定した2つのファイバは分散の値が既知のものではなかったので、誤差の評価を行うことはできなかったが、実際にその値が正しいかどうかはわからなかった。したがって、1.5 μm 帯で分散の値が既知のファイバの分散を測定することで測定器の評価を行う。

などが挙げられる。

本研究を通して、バルク、ファイバの分散を測定する足がかりを築くことができた。本研究における問題点が明らかになったので、今後の展望で述べたことを改善し、さらなる高精度な分散測定装置の開発を目指す。

参考文献

- 1.A.P.Kovacs, K.Osvay, and Zs.Bor, Opt.Lett.20,788 (1995)
- 2.Hen-Tai Shang, Electron.Lett.17,603 (1981)