

チュートリアル 光ファイバの偏光 Polarization in Fiber Optics

はじめに

光ビームは振幅と周波数が相互に直交しながら変化する電気ベクトル場から構成されていると見なすことができます。場を作り出すこの2つの成分の位相または振幅に違いが生ずることによって偏光が発生します。光ファイバに関連して起こる偏光現象については広く研究されており、この現象を利用または押さえ込むための様々な方法が開発されて利用できるようになっています。このチュートリアルでは光ファイバにおける偏光がどのように機能するのか、その原理と基本的な技術について説明します。偏光のさらに一般的な説明についてはP1420を参照してください。

光ファイバにおける偏光現象の発現

光ファイバの複屈折

ある種の物質中では複屈折と呼ばれる、光が2つの異なる経路に分割されて伝播するという現象が起こります。この現象を起こす物質は光の偏光の向きによって異なる屈折率を示し、これが複屈折の原因となります。

光ファイバでも複屈折が起こりますが、その原因となるのはファイバのコア断面がファイバの長さ方向に沿って僅かな非対象性を持つこと、およびファイバの曲げによって外部から応力が加わるためです。一般的には断面形状よりも応力によって誘起される複屈折の方が全体を支配します。

偏波面保存 (PM) ファイバ

偏波面保存 (PM : Polarization Maintaining) ファイバと呼ばれる特別なタイプの光ファイバはその長さ方向に沿って意図的に複屈折パターンを作り込むことにより、2方向の (直交する) 偏光の向きがカップリングしないように設計されています。設計の方法は様々ですが、どの場合もファイバの幾何形状と材質を工夫することにより、一般に起こるランダムな複屈折ではなく、一方向にのみ大きな複屈折が起こるように設計します。商用ベースで使用されている設計にも数多くの方法があり、たとえばバンダとポウタイPMファイバのように構造的に応力を与える方法による方式によるファイバが様々な遮断周波数で提供されています。

ポアンカレ球

ポアンカレ球は伝播する電磁波の偏光とその変化を簡単に表現するための方法のひとつです。この方法を用いることにより、任意の遅延回路が偏光の形態をどのように変えるかを予測することができます。あらゆる偏光状態は球面上のポイントに対応付けられます。球上の2つの極は右および左回転の偏光を表し、赤道上的ポイントは線形偏光を表します。球上のそれ以外のポイントは楕円偏光の状態を表します。赤道上的任意のポイントHを選択すると、そのポイントは水平方向へ直線偏光した光を表し、その正反対に位置するポイントVは垂直方向への直線偏光を表しています。

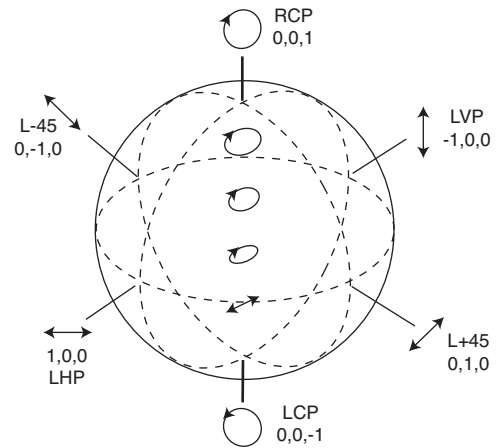


図1 : 偏光状態をポアンカレ球で表現する

測定可能な偏光特性

DOP

偏光度 (DOP : Degree Of Polarization) は次式で定義されます。

$$DOP = I_{pol} / (I_{pol} + I_{unp})$$

ここに、 I_{pol} および I_{unp} はそれぞれ偏光した光の強度と偏光していない光の強度をあらわします。

DOP=0のときの光はを非偏光と呼び、DOP=1のときを完全偏光と呼びます。その中間の値を持つ光は中間偏光と呼びます。

PER

偏光消光比 (PER : Polarization Extinction Ratio) は最小偏光パワーと最大偏光パワーの比率をdB単位で表した値です。偏光成分はどれでも、仕様としてこの値を指定します。

PDL

偏光依存損失 (PDL : Polarization Dependent Loss) とは偏光入力とそのすべての状態にわたって変化するときの挿入損失変化最大量 (ピークからピークまで) をdB単位で表した値です。

PMD

偏光モード分散 (PMD : Polarization Mode Dispersion) は実際には物質の分散を表現する指標の1つです。シングルモードファイバは、ただ一つのモードだけを持つように見えますが、そのモードは実際には2つの、または直交する偏光モードから構成されています。光ファイバのコアは理想的には真円であるべきですが、実際には完全な円断面ではなく、またファイバの曲げなどによる機械的応力にもさらされるために複屈折が発生します。これにより直交する偏光モードのいずれかのモードが他よりも速く移動することが光パルスに分散が生ずる原因となります。

分散により発生するモード伝播時間の差の最大値をDGD (Differential Group Delay) とよび、標準的にはピコ秒単位で表現されます。PMDは動的特性であるためファイバのあるポイントだけを考慮しても一定の固定した値をもつ訳ではなく、DGD値を時間にわたって分布させたものとなります。ある特定の時間にDGDが特定の値を持つ確率はマクスウェル分布に従います (図2参照)。近似的には、DGDの瞬間最大値はそのファイバの平均DGDの約3.2倍になることが知られています。

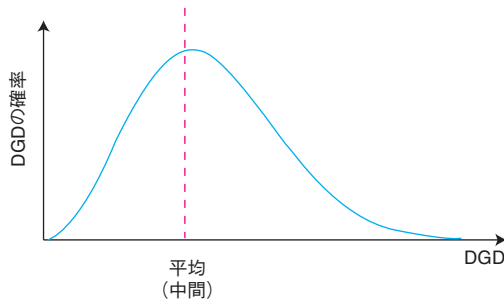


図2: DGDのマクスウェル分布

光学ファイバの偏光コントロール

偏光をコントロールする方法

通常の空間では波長板を用いて2方向の直交する偏光状態をコントロールしますが、光ファイバの偏光をコントロールする方法もこれによく似ています。一般的に使用される方法は次の3種類です。

第1の方法では半波長板 (HWP) を2枚の1/4-波長板 (QWP) で挟み、遅延板を光学ビーム軸に対して自由に回転できる構造で取付けて、半波長板および1/4-波長板と任意の角度をとれるようにします。この構成では最初のQWPが入射光の持つ任意の偏光を直線偏光へ変換し、続いてHWPがその直線偏光を希望する角度へ回転させます。これにより2番目のQWPが直線偏光を任意の希望する偏光状態へ変換できるようになります。

このメカニズムを基礎としてすべての要素を光ファイバで構成したコントローラの例を図3に示します。この例は挿入損失の低減と低コストという点でも優れた特徴を持っています。このデバイスでは3個の光ファイバコイルを使用して3枚の空間遅延板を置き換えています。光ファイバをコイル状に巻いて応力を発生させることによりコイル直径の二乗に逆比例する複屈折を作り出しています。直径と巻き数が調節することで任意の特性を持つ波長板を光ファイバで作りに出している訳です。ただし、ファイバを曲げると一般的に挿入損失が発生しますからコイルは比較的大きくしなければなりません。

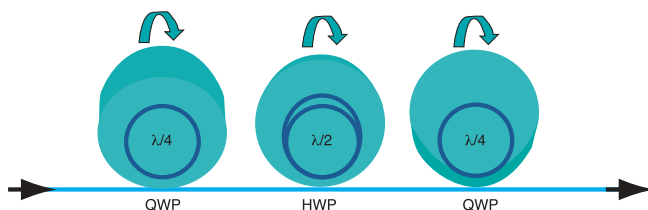


図3: 複数のコイルに巻いたファイバを使用して偏光をコントロールする

第2のアプローチ方法はバビネーソレイユ (Babinet-Soleil) 補償板を使用します。この方法を使用してすべての要素を光ファイバで構成したコントローラを図4に示します。このデバイスは光ファイバの周りを回転できるファイバスクイーズから構成されています。このファイバに圧力を加えて線形性を持つ複屈折を発生させることにより実質的にファイバによる波長板を構成し、加える圧力を変化させて遅延を調節します。単純な絞りと回転操作を行うことで入射する任意の偏光から希望する偏光状態を作り出すことができます。NewportのF-POL-xxシリーズ手動コントローラはこの方法を応用した装置です。

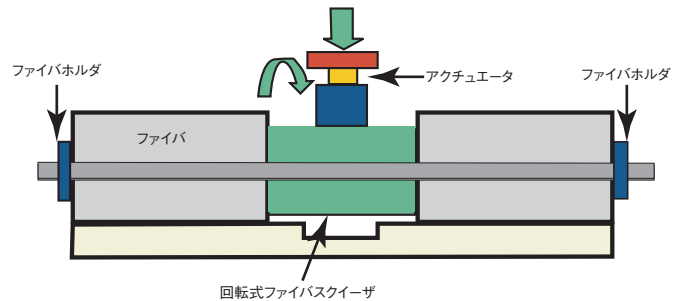


図4: バビネーソレイユ補償板の原理を使用する偏光コントロール

相互に45°回転した複数の空間波長板を使用して偏光をコントロールすることも可能です。この原理をすべて光ファイバで実現したデバイスは挿入損失とコストが低いという利点を持っています。波長板に相当するそれぞれのファイバスクイーズコンポーネントの遅延は加える圧力によって変化します。この方法で難しいのは信頼性が高く、コンパクトで安価なデバイスを作成することです。

圧電素子アクチュエータを使用すればファイバスクイーズを高速駆動することができます。すべてを光ファイバで実現したデバイスであるため反射が発生せず挿入損失と偏光依存性損失を極めて小さくできるのが利点です。

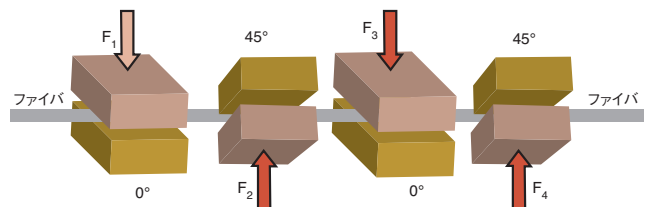


図5: ファイバを様々な角度から締め付けて偏光をコントロールする