

偏光 Polarization



波長板

光と物質の原子または分子との相互作用は、波長によって変化します。このような変化の結果が共鳴相互作用で、これはその物質の分散に関係しています。また、この共鳴相互作用によるもう一つの結果が複屈折で、偏光方向によって屈折率が変化するという現象が起こります。ある種の結晶では原子が規則的に配列されており、このため結晶軸に対する電界ベクトルの方向が変化すると共振周波数も変化します。この結果が、偏光方向によって屈折率が異なるという現象です。分散とは異なり、複屈折は簡単に防止することができます。ガラスのようなアモルファス材料か、NaClやGaAsなどの単純な対称結晶構造を持つ結晶を使用することです。一方、複屈折を利用して光の偏光状態を変えることができますが、これは多くの状況に応用できる便利な現象です。このようなトリックを使用した光学コンポーネントは、複屈折波長板 (birefringent waveplate) または位相板 (retardation plates) と呼ばれます (単に波長板と呼ばれることもあります)。

結晶軸に対して正しくスライスした結晶片を使用すれば、これを適切に配置することによって、図1に示すように直線偏光光におけるある電界ベクトル成分の屈折率を最小にすることができます。この場合は位相速度が最大となるため、光は高速軸に沿って偏光されたと言います。

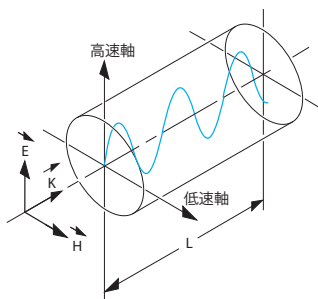


図1

図2に示すように偏光方向を90°回転させた場合の偏光光は屈折率が最大となり、位相速度は最小となります。

この場合は、低速軸に沿って偏光されたと言います。図1と2に示す波長数の差 ($2+2\beta$ と4) は2つの屈折率の比が $n_{fast}/n_{slow} = 2/3$ となることを示唆していますが、これは実際の天然結晶の場合よりもかなり大きい値です。ここでは、分かりやすくするために比率を大きく示しました。

波数 (propagation phase constant) k は $2\pi n/c$ [rad/m] で表われ、周波数 f の光が結晶中を距離 L だけ進む間には $\phi = 2\pi nL/c$ ラジアン の位相ずれ (phase shift) が生じます。したがって、図1に示す光における位相ずれは $\phi_{fast} = 2\pi n_{slow}L/c$ となり、図2では $\phi_{slow} = 2\pi n_{slow}L/c$ (8π ラジアン、図参照) となります。これら2つの位相ずれの差は位相遅れ (retardation) と呼ばれ、 $\Gamma = 2\pi(n_{slow} - n_{fast})L/c$ で表わされます。この式における Γ の値はラジアンですが、波長で表わす方がより一般的です。この場合、「全波長」は $\Gamma = 2\pi$ 、「1/2波長」は $\Gamma = \pi$ 、「1/4波長」は $\Gamma = \pi/2$ を示します。したがって、図に示す結晶は「4/3波長板」と呼びます。すなわちこの波長板は、低速軸の光の位相を高速軸の光の位相に対して4/3波長 (サイクル) 遅らせます。

光の波動は 2π ラジアンごとに繰り返されるため、 2π つまり全波長の整数倍を引いて、図に示す結晶を $2\pi/3$ ラジアンまたは1/3波長板と呼びます。図に示す周波数だけで使用する限り違いはありませんが、異なる周波数で使用する場合は位相遅れに変化が生じ、実際に1/3波長だけの位相遅れを生じさせる波長板よりも位相遅れが大きくなります。この違いは、「全波長の整数倍+1/3波長」の波長板を「高次1/3波長板」と呼ぶことで区別できます。

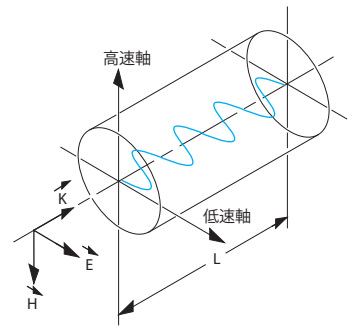


図2

1/2波長板

現在最も一般的に使用されているのは1/2波長板 ($\Gamma = \pi$) と1/4波長板 ($\Gamma = \pi/2$) です。1/2波長板は、図3に示すように直線偏光の面を回転させます。

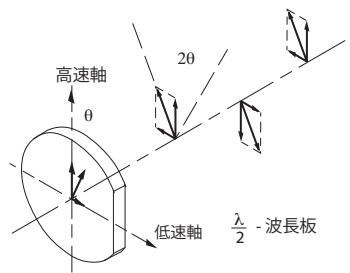


図3

直線偏光光が波長板に垂直に入射し、偏光面は高速軸に対して傾いているとします。偏光板の働きを見るために図に示すように入射光を高速軸成分と低速軸成分に分解し、波長板通過後に高速軸成分が最大となる点をとります。低速軸成分の位相は1/2波長遅れるため、同じ最大値を取りますが位相が180°遅れます。つまり、低速軸の負の方向を向きます。さらに光の進行方向にたどっていくと、波長板通過前の低速側成分と比較すると、低速軸成分の位相は高速軸成分に対して180°ずれていることが分かります。これは出射光も直線偏光であることを示していますが、高速軸の反対側に θ だけ傾いています。つまり、入射光が 2θ 回転したことになります。入射光が低速軸に対して θ 傾いている場合でも、同様の結果が得られます。

1/2波長板は、偏光レーザーの偏光面を任意の面に回転させる場合に非常に便利です（特にレーザー装置が大きすぎて回転させられない場合）。たとえばイオンレーザーの多くは垂直偏光され1/2波長板は、偏光レーザーの偏光面を任意の面に回転させる場合に非常に便利です（特にレーザー装置が大きすぎて回転させられない場合）。たとえばイオンレーザーの多くは垂直偏光されていますので、これを水平偏光にするには、ビーム経路上に1/2波長板を置いてその高速軸（または低速軸）を垂直方向から45°傾けた状態にセットします。波長板に軸方向が表示されていない場合（またはマウントに隠れている場合）は、最初に偏光子をビーム上に置いて回転させ、ビームが消光する（水平偏光される）方向にセットします。次に、波長板への入射光が垂直となるようにして偏光子の前に波長板を置き、ビーム軸回りに波長板を回転させてビームが消光する位置を探ることで、一方の軸を見つけることができます。この位置からビーム軸まわりに1/2波長板を正確に45°回転させれば（どちらの方向でも可）、ビームの偏光方向を90°回転させることができます。最終的な軸方向の確認は、偏光子をもう一度90°回転させてビームの消光が発生するかどうかを見ます。90°以外の角度で回転させる場合は、偏光方向の回転角度の半分だけ波長板を回転させます。これらの作業には、角度較正された波長板マウントRSP-1TまたはGM-1RAが便利です。

偏光子による消光が波長板を挿入する前ほどはっきりとしたものでなければ、使用している波長板がその周波数での完全な1/2波長板ではない可能性があります。多少の位相遅れ誤差は、波長板を高速軸または低速軸回りに僅かに回転させて補正することができます。高速軸回りに回転させると位相遅れが小さくなり、低速軸回りに回転させると位相遅れは大きくなります。両軸回りの修正を行って、偏光子を使用して消光比が改善されているかどうかを確認してください。

1/4波長板

1/4波長板は、直線偏光から回転偏光、またはその逆の変換に使用しますが、そのためには、入射光の高速軸成分と低速軸成分が等しくなるように波長板の角度を決める必要があります。これは、図4に示すように、直線偏光光の偏光方向を高速軸（または低速軸）に対し45°傾けて入射することで実現できます。

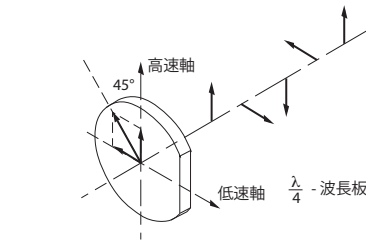


図4

反射板の射出側において、1/2波長板の場合と同じように高速軸成分が最大となる点を取ります。位相遅れは1/4波長または90°なので、この点における低速軸成分はゼロになります。さらに1/8波長分移動すると両成分の大きさは同じになりますが、その後高速軸成分は減少し、低速成分は増加します。さらに1/8波長移動すると、低速成分が最大、高速成分がゼロとなります。合成電界ベクトルの先端位置をたどると、1波長を周期とする螺旋を描きます。これは**円偏光**と呼ばれます。図に示したものは右回りの偏光で、反対方向の螺旋を描く場合は左回りの偏光です。左回りの偏光は、図4において波長板が入射光の偏光方向を90°回転させれば得ることができます。

円偏光を得るための波長板の設定は、1/2波長板を90°回転させた手順と全く同じように行うことができます。最初に、ビーム上に偏光子を置いて、偏光方向を確認します。次に、光源と偏光子の間に1/4波長板を置いて波長板をビーム軸回りに回転させてビームの消光が発生する位置を探し、波長板をこの位置からさらに45°回転させます。これで入射光の半分が偏光子を通過します（他の半分は使用する偏光子の種類に応じて吸収または反射されます）。円偏光の品質は、偏光子を回転させて確認することができます。偏光子を通過する光の強度は同じでなければなりません。強度が変化する場合、実際は光が楕円偏光されており、使用している波長板もその周波数における完全な1/4波長板ではないことを示しています。これは、波長板を高速軸または低速軸回りに僅かに傾ければ修正することができます（1/2波長板の場合と同じ）。修正後は、偏光子を回転させて強度に変わりが無いことを確認してください。

1/2波長または1/4波長以外の位相遅れが、直線偏光にどんな影響を与えるのかを考えてみます。図5は、高速軸に対して任意の傾きを持つ直線偏光に対する位相遅れの影響を示したものです。

これらの位相遅れの結果はすべて楕円偏光となります。この場合、どの程度の楕円になるかは入射直線偏光光の位相遅れの関数になり、軸の傾きは入射直線偏光光の傾きの関数となります。位相遅れが1/2波長の場合は例外で、

この場合は楕円偏光ではなく、高速軸に対して2だけ傾いた直線偏光となります。また、1/4波長の場合も、高速軸成分と低速軸成分が同じという前提ではないので、円偏光とはなりません。これらの成分を等しくするためには、入射光の傾きが高速軸（または低速軸）に対して正確に45°でなければなりません。

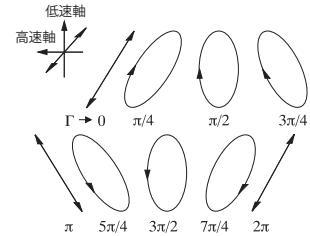


図5

波長板の用途

波長板の用途波長板には、主として2つの用途があることはすでに述べました。1/2波長板による直線偏光方向の回転と、1/4波長板による直線偏光から回転偏光への変換がそれぞれです。また、図4において入射光の方向を反対にすれば、1/4波長板を使用して円偏光から直線偏光への変換が可能なのは明らかです。

光アイソレーション—1/4波長板は、不要な反射を除去する光アイソレータとして使用することができます。これらのデバイスでは、1/4波長板と偏光ビームスプリッタキューブを使用します。

偏光クリーンアップ—光学系においては、金属コーティングミラーや誘電体ミラーによる反射を必要とすることがよくあります。光がミラーに垂直に入射する場合、または偏光面と入射面が一致するか垂直になる場合は偏光状態が変わることはありません。しかし、偏光方向が入射面に対して角度を持つ場合、反射光の垂直成分と水平成分の間にわずかな位相遅れが生じることがよくあります。これは、常にいくばくかの損失を伴う金属コーティングミラーについては特に言えることです。この結果反射された光はもはや直線偏光ではなく、わずかな楕円偏光になっています。この場合、偏光子を挿入してこれを回転させても完全な消光が発生しなくなるので、簡単にこれを確認することができます。このわずかな楕円偏光は、ほとんどの場合全波長板（通常は何の変化ももたらしません）を挿入して高速軸または低速軸回りにわずかに傾け、位相遅れをわずかに変えて楕円偏光を打ち消すことにより、除去することができます。

波長板材料とその使用例

材料—天然結晶の多くは複屈折性を示し、原則として波長板に使用することが可能です。カールサイトおよび水晶は代表的な材料です。これらの素材は耐久性も高く、光学品質も良好です。しかし、屈折率の差 $n_{\text{slow}} - n_{\text{fast}}$ が大きき1/2波長板を作ろうとした場合、研磨を考慮に入れると非常に非現実的な厚さになってしまいます。

また、基本的には等方性を持つ物質に、応力によってわずかな複屈折性を与えることも可能です。たとえば、ほとんどのポリマーは、製造時に加えられた応力による複屈折性を示します。ポリマー波長板材料は1/2または1/4波長板に使用でき、これを2枚の高品質ウィンドウでサンドイッチすれば、高精度の0次波長板を作ることができます。

高次波長板—研磨または劈開によって極めて薄い波長板を作る代わりに、水晶など耐久性のある素材を使い、たとえば1mm厚のプレートで15.5波長の波長板といったように、現実的な厚さで高次波長板を作ることができます。このような波長板は、設計波長においては1/2波長板とまったく同じ動きをします。しかし、光の波長が変わると、完全な1/2波長板に較べて位相遅れの変化がはるかに大きくなります。この変化を示す式は、の定義から容易に導くことができます。

$$\Gamma = (2m + 1)\pi \left(\frac{\delta f}{f_0} \right) \\ \approx -(2m + 1)\pi \left(\frac{\delta \lambda}{\lambda_0} \right)$$

ここで、 f_0 と λ_0 は設計周波数と波長、 m は波長板の次数です。したがって、周波数 $\alpha\Gamma/\alpha f$ における m 次波長板の位相遅れの変化率は、本当の1/2波長板 ($m=0$ すなわち「0次」波長板) の $2m+1$ 倍となります。つまり、1mm厚の15.5波長板における値は31倍となります。このように、高次波長板を使用する場合はシステムに求められる周波数または波長の範囲を計算し、その範囲に対する高次波長板の位相遅れエラーが許容し得るものであるかどうかを確認する必要があります。

同様の理由により、高速軸および低速軸まわりの回転に対する位相遅れへの影響の度合いも、高次波長板の場合は本当の1/2波長板に比べて $(2m+1)$ 倍になることがわかります。これは、同じ位相遅れエラーを修正する場合でもはるかに少ない回転での修正が求められることを意味します。しかしこれは、光学軸に平行でない光線では、 $(2m+1)$ 倍大きい位相遅れの変化が生じることも意味します。光学系内の拡散または集束の度合いが大きいビーム部分に高次波長板を使用することは推奨できません。

同様に、温度変化による光路長の変化に対する影響の度合いも $(2m+1)$ 倍になりますので、より厳密な温度制御が必要になります。可視領域用の1mm厚1/2波長板における代表的な温度感度は、 $0.0015\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ です。1つの波長板で異なる2つの波長に対応したい場合、たとえばアルゴンイオンレーザーの488nmおよび514.5nm、またはNd:YAGレーザーの532nmまたは1064nmといった場合には、高次波長板を使用してその両方の波長に対応することができます。1つの波長で $(2m_1+1)$ 波長板、もう1つの波長で $(2m_2+1)$ 波長板となるように厚さを設定することで、両方の波長（これら2つの中間の波長ではなく）で「1/2波長板」として使用することができます。これら2つの整数を決定するにあたっては屈折の分散も考慮に入れる必要もあるため、コンピュータプログラムを使用する必要がありますが、2つの周波数が近すぎない限り、適切な厚さの波長板を作ることができます。

0次波長板—幸い、水晶波長板の高い光学品質と頑丈な構造を保ちながら、本当の1/2波長板の性能を実現する技術は存在します。位相遅れの差が正確に1/2波長の波長板2枚を組み合わせることで、本当の1/2波長板を作ることができます。一方の波長板の高速軸をもう一方の波長板の低速軸に合わせ、全体としての位相遅れが波長板同士の位相遅れの差となるようにします。周波数（または波長）に伴う位相遅れの変化は、最小にすることができます。また、温度感度も下げることができ、代表的な値は $0.0001\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ です。回転に伴う位相遅れの変化は製造条件に大きく依存し、おおむね高次波長板と同じか大きくなります。

これらの波長板は、ダイオードレーザーや白色光など、調整可能な光源を使用する光学系に適しています。