

音響光学チューナブルフィルタ (AOTF) を使った光のスペクトル変調

音響光学チューナブルフィルタ (AOTF) は、動作上は干渉フィルタとよく似ており、多くのアプリケーションでフィルタホイール、グレーティングまたはプリズムの置き換えとして使用することができます。

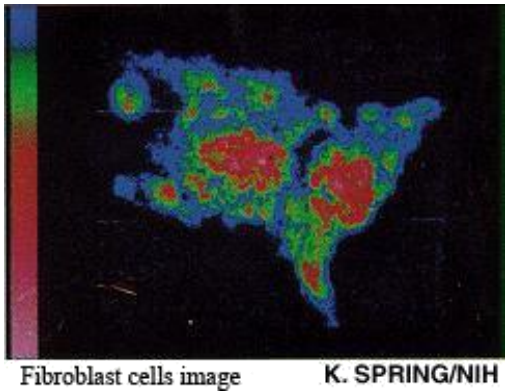
過去 20 年間のオプトエレクトロニクス・テクノロジーの発展は著しく、光の放射をコントロールして操作するさまざまなデバイスに関する研究がおこなわれてきています。音響光学素子は、光学媒体が超音波によって調節される音響光学効果に基づいています。音響光学素子の例としては、光学変調器、偏向器、スキャナー、Q スイッチ、アイソレーター、周波数シフターがあります。このようなデバイスには、高速レーザープリンター、レーザーリソグラフィ、光通信と光計算、大型スクリーンレーザープロジェクター、周波数シフター、粒子検査、光学スペクトル分析、シグナル処理、レーダー、レンジファインダー、ターゲット識別などの多くのアプリケーションがあります。

音響光学結晶の成長方法の開発、数十 MHz から数 GHz もの周波数で電気エネルギーを音響エネルギーに効率的に変換できる圧電トランスデューサの新しい製造方法などの開発によって、音響光学技術は目覚ましい進歩を遂げてきました。音響光学素子の開発の 1 つとして期待できるものに、音響光学可変フィルタ (AOTF) の商業利用の可用性が挙げられます。このフィルタ素子は、超音波と音響光学結晶内の光との間の相互作用を使用して、光のスペクトルをフィルタリングします。動作としては、音響光学チューナブルフィルタは干渉フィルタとよく似ており、フィルタホイール、グレーティングまたはプリズムが必要なアプリケーションで使用することができます。

動作原理

AOTF は、異方性媒体中の光の音響回折に基づいています。このデバイスは、複屈折結晶に結合された piezotransducer から構成されています。印加した RF 信号でこのトランスデューサが励起されると、音響波が媒体中に発生されます。伝搬する音響波は、屈折率の周期的な変調を生成します。これは適切な条件下で、入射ビームの一部を回折する移動位相格子を提供します。固定音響周波数では、光周波数の限られた帯域だけが位相整合条件を満たし、累積的に回折することができます。RF 周波数が変化するにつれ、光学パスの中心がそれに伴って変化し、位相マッチング条件が維持されます。

原理としては、等方性および異方性ブラッグ回折の両方を光学フィルタリングのメカニズムに使用することができます。ただし、等方性回折ベースのフィルタは、その光通過帯域が入射ビームの開口角に依存するため、十分にコリメートされた光（ミリラジアン程度）でないと使用できないため、実用的ではありません。この入射開口角の限界は、入射光の角度の変化が運動量の不一致をもたらすことが原因で発生します。限定された拡がり角を持つ入射光線では、パスバンドの帯域が著しく拡大します。さらに、回折ビームは各波長に対して異なる角度へと回折します。



蛍光試料で染色された2つの線維芽細胞の疑似色イメージは、 TeO_2 音響光学チューナブルフィルタで選択された514nm のアルゴンレーザーでの照射により詳細が明らかになります。この細胞は、最大径がおよそ $40\mu\text{m}$ です。

AOTF のデザインは、複屈折結晶中の異方ブラッグ回折に基づいています。異方ブラッグ回折は、回折波の偏光面の回転を必ず伴います。複屈折結晶中の常光と異常光の屈折率は同じではないため、入射光と回折光の両方のグループ速度が同一直線上になるように音響波伝播の方向を選択することができます。このプロセスは、ノンクリティカル位相整合 (NPM) と呼ばれます。NPM の条件下では、入射ビームの角度偏差による運動量不一致の最大補償は、複屈折の角度変化によって達成されます。従って、NPM は、入射光ビームの角度変化に大きく渡って一次光で維持され、非線形 AOTF の視野角は $\pm 20^\circ$ まで可能です。

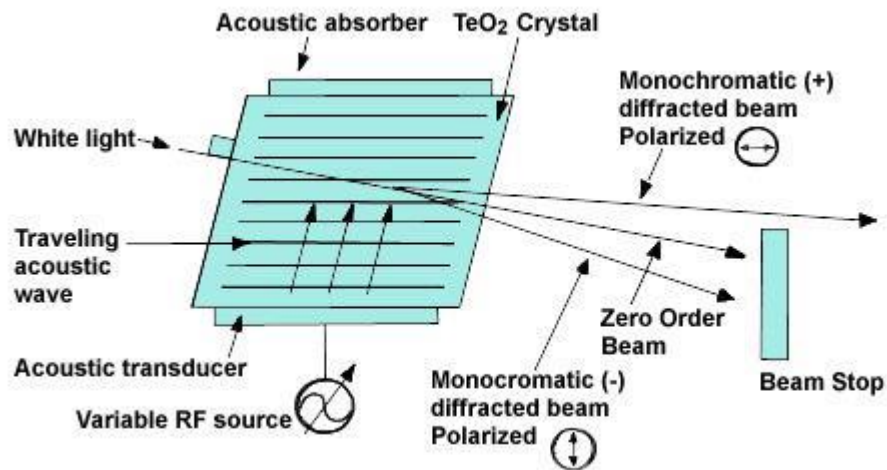


図 1. 結晶石英コリニア AOTF が生成するビームの図。本来入力光は偏光子を使って分離しなければならない (上)。二酸化テルル (TeO_2) ノンコリニア AOTF は 0 次光と回折ビームを偏光子なしで分離します。

AOTF デバイスの構成は、2つのカテゴリーに分類することができます (図 1 参照)。石英のコリニア AOTF では、入射光、回折されたフィルタ光、音響波はすべて、複屈折結晶内でコリニアに作用します。音響光学作用の結果として、フィルタのスペクトルパスバンド内の入射ビームの一部は、回折ビームに結合されます。入射ビームの偏光は、回折ビームの偏光と直交します。0 次ビームと回折ビームはコリニアであることから、これらのビームの分離には偏光子が必要です。

二酸化テルル (TeO_2) ノンコリニア AOTF では、音響波と光学波は結晶を通して全く異なる角度で伝播します。この構成では 0 次光と回折光は物理的に分離されるため、このフィルタは偏光子なしで動作することができます。また、偏光が直交した 2 つのビームは結晶から出射するまで分離せず、波長の変化を伴う 1 次光の変化において、回折ビームに角度がつきません。つまり、スペクトルのスキャン中に必要となるのは、単一の固定ディテクターのみになります。

ほとんどの AOTF デバイスは、動作波長に応じた 2 種類の複屈折結晶で設計されています。AOTF では、音響光学指数の高さから TeO_2 が好んで使用されています。この結晶は、最大 $4.5\mu\text{m}$ までの可視および赤外領域では有用ですが、カットオフ波長が 350nm であることから、紫外でのアプリケーションには適していません。紫外線領域には水晶結晶が使用されます。

高速チューナブル光源

AOTF は非コヒーレント光源やマルチライン白色光レーザと組み合わせて高速チューナブル光源を生成することができます。数ナノメートルから最大 0.1nm までの分解能で、マイクロ秒単位でランダムに選択された波長間で切り替えることができます。この光源のアプリケーションの 1 つは蛍光分光法です。⁴ 蛍光プローブは、生細胞および組織内のイオン濃度、pH、電子ポテンシャルなどの多様な特性を示すことができます。蛍光プローブから動的データを取得する際には、励起強度と色素濃度を相殺するために 2 つ（または数個）の励起波長または発光波長の比率をモニターし、目的イオン濃度を正確に推定する必要があります。可能な限り迅速に波長を切り替えることも不可欠です。従来、回転フィルタが使用されているが、それは遅く、光学的電子データ収集と同期させるのが困難であり、そしてまた顕微鏡の設定において厄介であり得る機械的振動を引き起こす。

AOTF を使用すると、可動部品がないソリッドステートデバイスであるため、これらの問題を回避できます。また、単一の AOTF を多波長変調器として使用することができます。AOTF を広帯域光源（またはマルチライン白色レーザ）に結合し、2 つの RF 周波数で AOTF を駆動することによって、2 つの励起波長を同時に発生させることができます。さらに、各波長は異なる周波数で電子的に変調することができ、ロックインアンプは蛍光発光をその 2 つの成分に復調することができます。

一例として、AOTF は、同時に 1 2 の波長を放射するアルゴン - クリプトン白色レーザと結合することができます。同時に適切に調整されたパワーレベルでいくつかの RF 周波数を加えることによって、人工の複合レーザカラーを生成することができます。

米国国立衛生研究所（メリーランド州ベセスダ）の科学者たちは、AOTF の革新的な生物医学的および化学的応用を開拓しています。ある実験では、AOTF を装備したアルゴンレーザを蛍光顕微鏡用の光源として使用します。⁵ 狭い帯域幅、迅速な波長選択（マイクロ秒）、および強度制御により、極めて短時間でさまざまな測定を行うことができます。最近、このシステムは、蛍光色素で染色された 2 つの線維芽細胞における流速と拡散を決定するために、 514nm で定期的にサンプルの小領域を漂白するために使用されました（ページ上部の最初の図を参照）。シャープなディテールと高い S / N 比は、レーザと AOTF の組み合わせによって生成される励起光の狭い帯域幅から生じます。

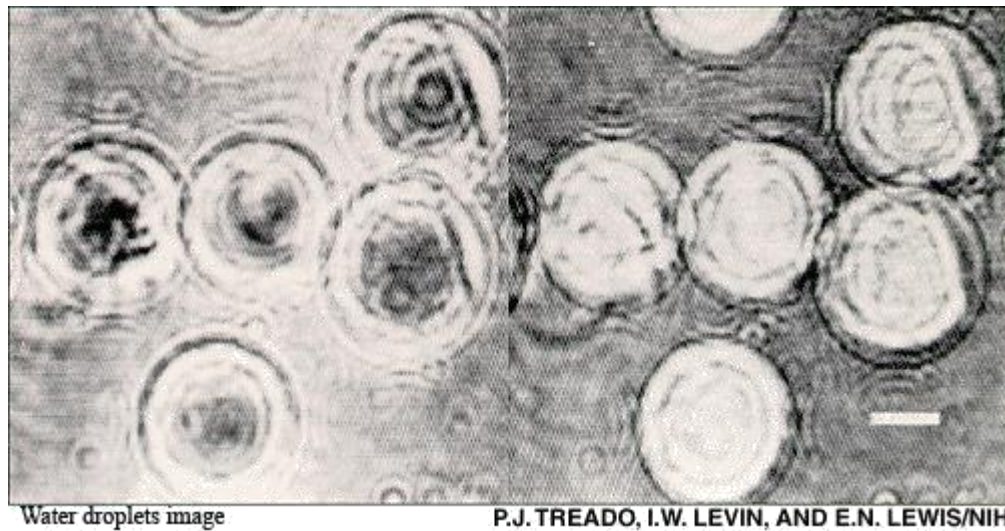
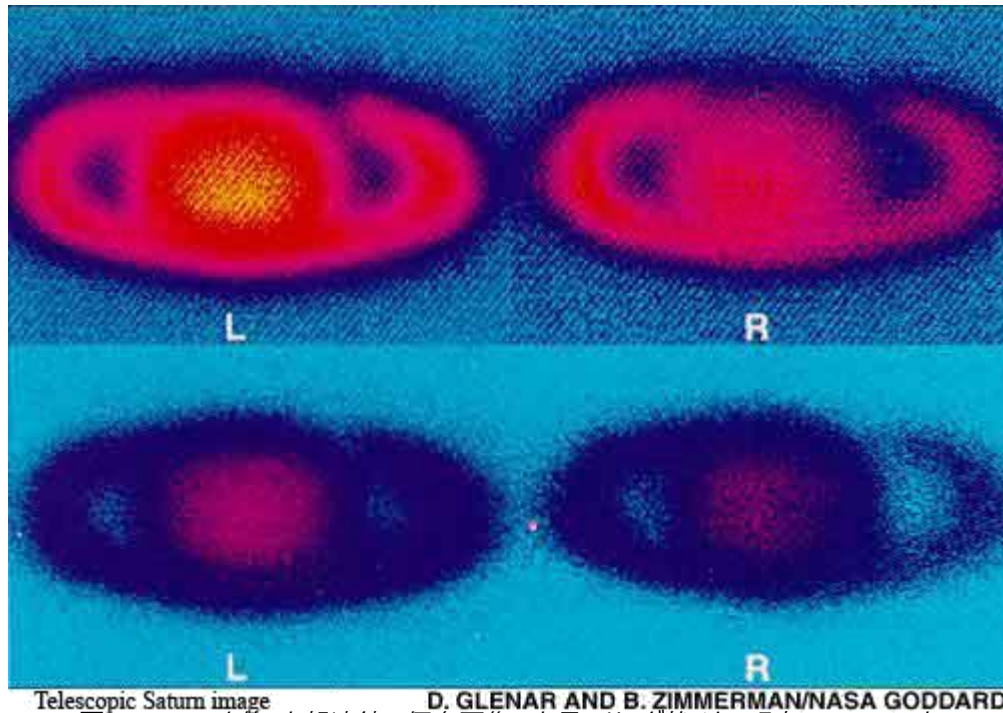


図2 近赤外光源で、水滴を 960 nm (左) と 850 nm (右) で照射；
波長は AOTF で選択。暗くなっているスポットは水の吸収です。参照バーは 7 μm を表します。

別の実験では、タングステンランプと結合した A O T F は、水の分光イメージングのための高速同調近赤外 (NIR) 光源を提供しました (図 2 参照)。⁶ 水の顕微鏡像は 960nm と 850nm で集めました。9 6 0 n m での液滴の暗色化は、水の振動吸収 (具体的には、第 2 倍音 O - H ストレッチ) に対応します。提示のために、画像は機器の反応および背景の寄与について補正されます。



Telescopic Saturn image D. GLENAR AND B. ZIMMERMAN/NASA GODDARD

図3. AOTFを使った望遠鏡の偏向画像。土星のリング状メタン吸収 727 nm (上)、753 nm (下)の吸収が乏しい部分がバンド間に空間があることを示しています。

スペクトルイメージング

AOTF は広い視野角と高い空間分解能 (>100 lines/mm) を持つため、スペクトルイメージングアプリケーションにも使用できます。生体細胞内の蛍光プローブからの空間情報、分光情報、偏光情報の取得、宇宙および地上での観察、および画像センシングに使用できます。直交偏光でのスペクトルイメージングは、それらの反射率スペクトルから固体表面の性質を明らかにすることに加えて、ガスおよびエアロゾルのスペクトル特性およびサイズ分布を与えることができます。図3は、NASA /ゴダード宇宙飛行センター（グリーンベルト、メリーランド州）の科学者によって記録された727および753 nmでの土星の直交偏光画像を示しています。画像の取得には、TeO₂ AOTFを積み込んだ望遠鏡システムが使用されました。メタン吸収波長において、偏光コントラストは増強されます。

参考文献

1. S.E. Harris and R.W. Wallace, *J. Opt. Soc. Am.* 59(6), 744 (1969).
2. I.C. Change, *Appl. Phys. Lett.* 25, 370 (1974).
3. P. Katzka, *Proc. SPIE* 753, 22 (1987).
4. I. Kurtz et al., *Rev. Sci. Instrum.* 58(11), 1996 (1987).
5. K. Spring et al., *Biophysical Journal* 60, 1229 (1991).
6. P.J. Treado, I.W. Levin, and E.N. Lewis, *Appl. Spectros.* 46 (3) (1992).
7. Application Note on AOTFs, Vol. 1, Internal document, Brimrose Corp. of America (1992).