

# 白色光干渉計を利用した高精度光学定数測定の研究

電子工学科 米田研究室 中村竜介

## 1. はじめに

光学定数は光学的性質を決める量であり、光学機器や光学部品を設計、使用する際に高い精度で要求されている。過去これらを調べるために様々な方法を用いて測定されてきたが、現在の技術の進歩により今までは存在しなかったレーザー素子などの光学結晶があり、これまでのデータベースでは不十分となってきた。ここでは光学定数の中で波長に関して連続的な屈折率分散を測定するための研究を行った。

白色光干渉計はマイケルソン型で波長掃引型の干渉計を作り、干渉光をチョッパーで変調してロックインアンプを用いてコンピュータに干渉縞のパターンを取り込み評価を行う。ただし、白色光干渉計はこの方法では精度は高く取れるがその値は相対制度であり2の整数倍位相が不定になる。そこで、白色光干渉計の精度を活かせる絶対精度を別の方法で求める必要があり、本研究ではブリュスター角を測定して求まる試料の屈折率を測りそこに白色光干渉計の精度を活かせば高精度の屈折率が測定できる。しかし、ブリュスター角の決定精度が白色光干渉計で得た相対精度を活かせるだけの決定精度を持っていないのでブリュスター角を測定するも高い精度のものを必要とする。使用したステージは市販のステッピングモーター駆動のもので、これを白色光干渉計の相対精度を活かすために屈折率既知のサンプルを測定することで角度更正を行った。

本研究では試料に YAG 単結晶とセラミック YAG 結晶を用いた。結果白色光干渉計で求めた屈折率分散は5桁精度を求めることが可能になり、また白色光干渉計の結果を活かすために作り上げたブリュスター角測定用の装置も角度更正により高い精度で4桁程度の屈折率を求めることの出来るシステムとして今後も使っていけるものが完成した。

## 2. 実験装置

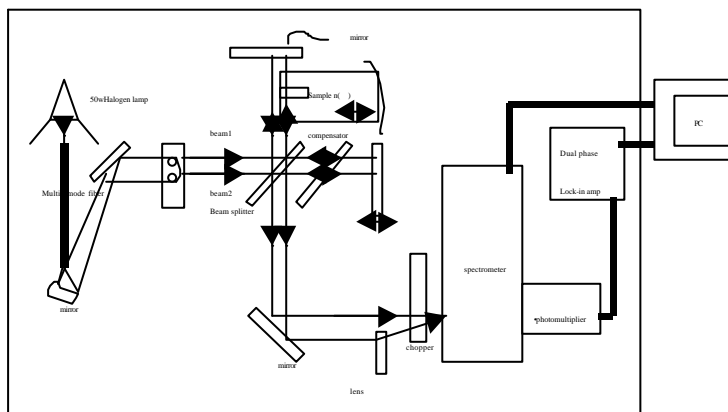
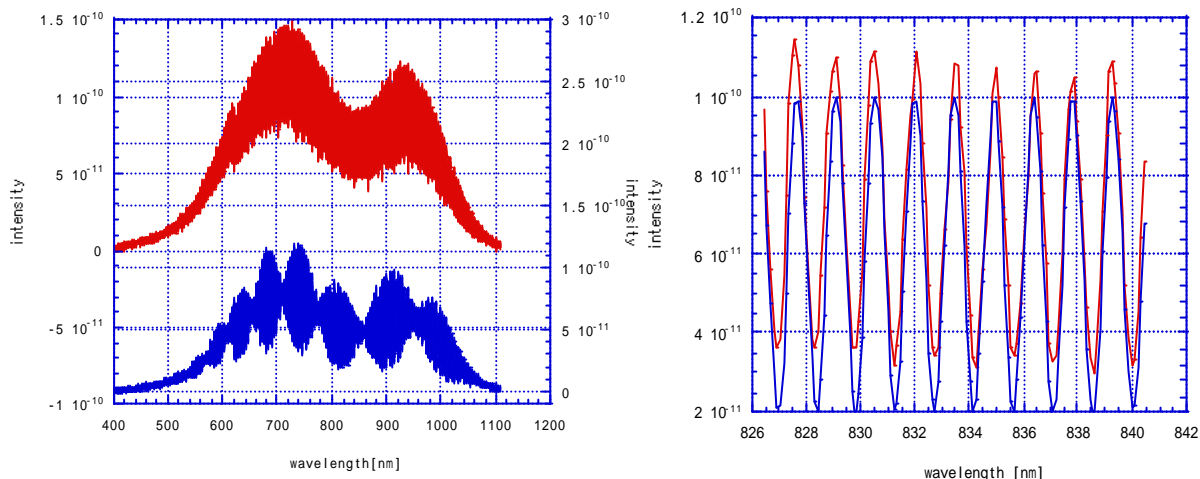


図1：白色光干渉計

実験装置は図1に示す マイケルソン型光源に白色光を用い光線を並行する2光線に分けてマイケルソン干渉計に入れ、一方の光を試料に通し、もう一方を参照光としている。そして光源のからの光強度分布を一様にするためと光源部の振動、熱の影響を干渉計から隔離するために光源からの光をマルチモードファイバに通して干渉計に導く形を取った。さらに装置全体の振動を防ぐために空気定盤の上で干渉計を設置し、干渉計の光学台として熱膨張の少ない合成石英を用いた。BSと補償板は干渉計内の残留分散の影響を少なくするために厚さ1mmで同一製造パッチの合成石英基盤を用いた。BSは単層クロムコートを使用、誘電体多層膜を使用す

ると波長に対して実効的な反射面が異なるという特徴があるため本研究には向かないと判断、金属コートのBSにした。測定試料は片側のアームに挟むように設置し、場所は室温を常に20°に温度設定されたクリーンルームで行った。干渉計からの出射光はレンズによって試料の像を波長掃引する分光器のスリット上にチョッパーで変調されながら転送されて分光器による分散後にロックインアンプでロックイン検出を行い、コンピュータで取り込むようにした。



図：測定されるフリンジパターンの例

測定対象である屈折率分散の値はオーダーは $10^{-5}$ 、それを高精度で求めようとしているのだから精度にして5桁を超えるものが必要になってくる。そして、それは上記にあげた技術により精度5桁を超えることが可能になった、ただし、出てきた値は相対精度であり、コンピュータに取り込んだフリンジパターンを解析して位相を求めた場合、その位相は $2\pi$ の整数倍不定なものになってしまう。そこでこの相対精度を活かして絶対値を決定できる方法が要求される。具体的に白色光干渉計により測定された相対精度を活かすためにはどの程度の絶対精度が必要なのかを求めてみる。

真値から $2\pi$ だけ位相がずれた場合の屈折率のずれを考えてみる。例えば測定試料の厚みが $500\ \mu\text{m}$ だとした場合。位相部分は

$$f = 2p \frac{2n(I)t - L_0}{I}$$

位相が $2\pi$ だけずれた時の屈折率 $n'$ とすると、 $-2\pi$ は

$$f - 2p = 2p \frac{2n'(I)t - L_0}{I}$$

となり、 $\frac{2nt - L_0}{I} = \frac{2n't - L_0}{I} + 1$ が出てきて、これより $n' - n$ を計算すると

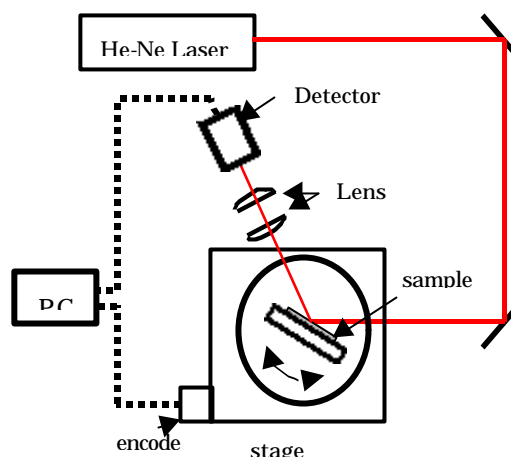
$$n' - n = \frac{1}{2t}$$

例えば He-Ne レーザーなどの波長 $633\ \text{nm}$ のところでは約 $6.3 \times 10^{-4}$ になるため、これ以上の決定精度が他にあれば白色光干渉計の相対精度を活かすことができ屈折率分散を求めることが出来る。

### 3. プリュスター角測定装置による角度更正

測定器はコンピュータ制御で $0.005^\circ$ づつ動くステッピングモーターをつけたシータステージその中心に試料を設置できるホルダを取り付けて、その上で試料の角度を振るという

方法。光源には波長 632.8 nm の He-Ne レーザーを使用。試料表面で反射した反射光をフォトディテクターで検出し、その強度がもっとも低くなる時の角度を取り出せば良い。ここでの問題点としてこのシステムに使用するステージは市販のステッピングモーター自身のエラーがあることであり、先に求めた要求される精度にプリスター角を持っていくためにステージのエラーを測り角度修正を行い  $d = 0.0111^\circ$  内に収まる精度の角度測定システムを作らなければならない。このためオハラ光学から頂いたプリズム法で測定した 8桁精度で屈折率のわかっている 27種類



のガラスをサンプルとして真値と測定値のずれから角度修正を行った。この結果だけではサンプルの屈折率は飛び飛びのために間の角度修正が出来ない、そのため厚さ 500  $\mu\text{m}$  の石英を試料としてディテクターで測定される薄膜の干渉縞から角度のずれを読み取り連続的な角度修正を行う。ただし、この干渉縞から出した角度修正曲線は相対制度である。これを活かすためには先のガラスによるプリスター角測定から求めた角度修正と比較すればよく、これにより白色光干渉計の相対精度を活かすことの出来る絶対角度制度を持ったプリスター角測定システムを作り上げることが出来た。結果を図 2, 3 に示す。

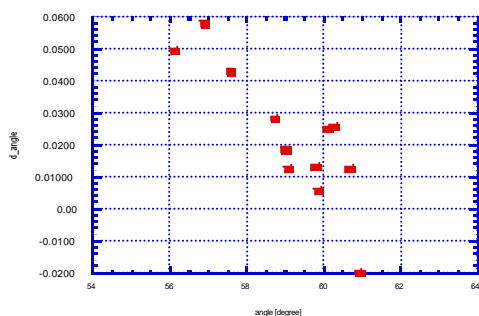


図 2 : ガラスサンプルによる角度修正

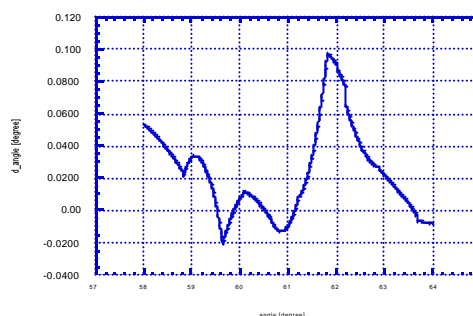


図 3 : 石英による角度修正

#### 4 . YAG 結晶測定結果

この装置を用いた実際の測定では単結晶の YAG、セラミック YAG、そしてそれぞれの 1% Nd ドープした YAG、あわせて 4つの屈折率を測定した。プリスター角を測定。

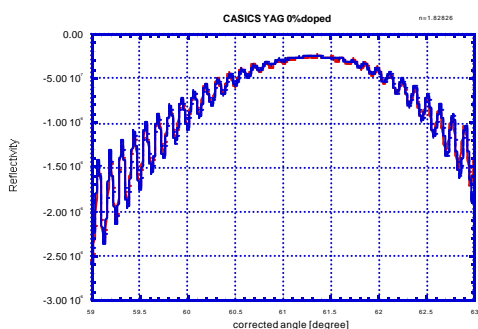


図: 4プリスター角測定

厚み 543.34  $\mu\text{m}$  の YAG 単結晶

$$= 61.3228$$

$$n = 1.82826$$

ブリュスター角より求めた屈折率により白色光干渉計で測定された屈折率分散の波長 6328 での屈折率の絶対値が決定し、測定した YAG 結晶の 5 桁精度の屈折率分散曲線が求まった。

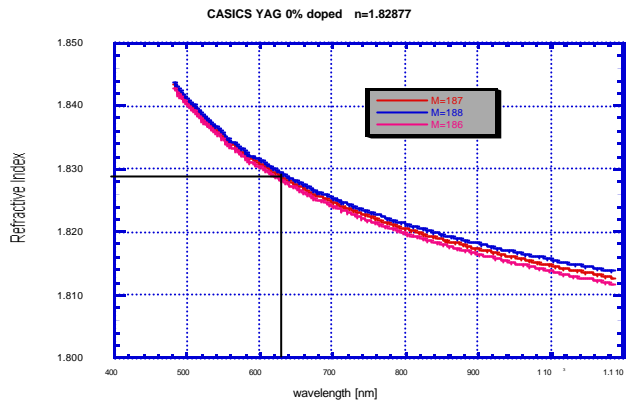


図5 YAG単結晶の屈折率分散曲線  
ブリュスター角測定結果と照らし合わせれば  
2 の整数倍だけ不定だった部分が決定し、  
結果、この曲線がこの波長内でのYAG単結  
晶の屈折率分散である。

同様にセラミック YAG 結晶、1%Ndドープさせたものを測定すると図6の結果が得られた。

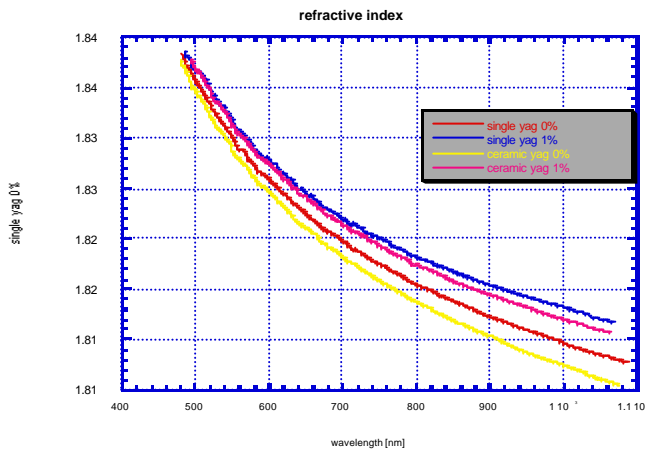


図6：YAG結晶の屈折率分散比較  
波長633nm

Single yag	n=1.8286
Single yag 1% doped	n=1.8308
Ceramic yag	n=1.8273
Ceramic yag 1% doped	n=1.8301

## 5. まとめ

結果として、本研究で用いた波長掃引型白色光干渉計を利用して5桁精度の屈折率分散を測定することが可能となり、今回の測定結果からレーザー素子の YAG 結晶はドープさせたものは通常の結晶より屈折率が高くなり、セラミック YAG は単結晶 YAG よりも屈折率が低いというデータが得られた。これはセラミックが多結晶のために様々な方向に軸性を持っていることが影響しているのではないかとされる。

また、波長掃引型白色光干渉計は以前はアライメントの時に測定波長内にステーションナルフリンジが入るようにアライメントをしていた。ステーションナルフリンジとは波長空間上で干渉計のアームの長さによる位相変化と測定媒質の屈折率分散による位相変化の向きがそれぞれ異なることで位相の向きが反転するところ。このステーションナルフリンジが測定波長内に入ることにより位相の絶対値の決定精度をあげていた。今回はそれとは変わって、同じ白色光干渉計の中で絶対精度をあげるのではなく物質のもつブリュスター角を利用して絶対精度の高い屈折率を測定し、その上で白色光干渉計の測定結果を活かし、さらに高い精度での屈折率を測ろうとした研究である。結果として本研究ではブリュスター角の装置の更正によりステップモーターを利用したこの装置を今後も利用していくに十分なシステムを作り上げることが出来た。