

B2: ロックイン信号計測

1 緒言

物理量の測定はある目的の信号を各種センサーで受け止め、電気信号に変換することで電気計器により行うことができる。目的の信号が微小な場合、純粋な信号のみが検出されることは稀で、雑音に電気信号に含まれることになる。その場合、そこから目的の信号を抽出する作業が必要になる。ロックイン信号計測 (lock-in measurement) とは、雑音に埋もれてしまった微小な信号の測定を可能とする計測手法である。研究や開発の現場ではロックインアンプ (lock-in amplifier) と呼ばれる装置を用いて行われる。ロックイン信号計測は例えば、微弱な光信号の測定、微小な抵抗の測定、インピーダンス (impedance) の測定、ホール効果の測定、テラヘルツ分光 (terahertz spectroscopy) などに用いられる。

本実験では、ロックインアンプの動作原理・特徴を理解し、計測の基礎技術を身に付けるため、ディスプレイ材料である液晶 (liquid crystal) を題材とした偏光計測を行う。まず、レーザー光を 2 枚の偏光素子に通し、透過光量の変化から偏光子の作用を理解する。その後、レーザー光を液晶素子に透過させ、電圧印加によって透過光量が増えることから、液晶が光スイッチとして機能することを明らかにする。

レポート課題

1. 本実験はレポートにまとめ実施日の1週間後までに提出せよ。レポートは簡単なロックインアンプの簡単な説明を含む[イントロダクション](Introduction)、何を明らかにしたかを述べる[実験目的](Purpose of study)、実験毎の[手順](Experimental Methods)と[結果](Results)、[考察](Discussion)、最後に[結論](Conclusion)を含むこととし、箇条書きをせずに文章体で書くこと。装置や物理現象などの原理に対応するような理論的な議論は必要に応じて[考察]で行う。
2. 研究室に加わった後に専門的なデータ整理・解析ソフトを用いることが多いが、最も汎用性の高いソフトは Microsoft Excel である。基本的な使い方を習得し、得られた実験データは学術的に正しく図示すること。

レポート執筆の注意点

1. 装置名は[手順]において、初見のものについて名称(メーカー, 型番)のように記述する。 [例:ファンクションジェネレータ(Agilent, 33220A)]
2. 数式は Word の数式機能を用いて挿入する。
3. 掛け算などの記号は「挿入」→「記号と特殊文字」より挿入する。 [例:×]
4. ギリシャ文字は'Symbol'フォントより挿入する。 [例: μ でなく μ]
5. 上/下付き文字(Superscript/Subscript)は「フォント」→「上付き文字」/「下付き文字」より挿入する。 [例: 10^{-9}]
6. 数字と記号の間はスペースを入れる。 [例: $6\mu\text{m}$ でなく $6\ \mu\text{m}$]

2 基礎原理

本実験ではロックイン計測を行うが、ロックイン計測はあくまで微弱な信号を計測するための手法、すなわち手段であって、ロックイン計測をすること自体は実験目的にはなりえない。本実験の目的はあくまでロックイン計測で微弱な光信号を計測することで液晶材料の光に対する作用を明らかにすることである。基礎原理の項では、測定手段であるロックインアンプおよび測定対象である液晶のそれぞれについて述べる。

2.1 ロックイン計測

2.1.1 概念

ロックイン計測とは時間的に変動する(すなわち、様々な周波数成分を含む)交流信号より任意の特定の周波数成分のみを選択して計測する手法である。ここでノイズが取り出す周波数以外の周波数成分からなる場合、除去されることとなる。この原理から明らかなように、ロックイン計測で計測できる対象はある周波数で繰り返して生じる現象となる。図 2-1 はロックイン計測の基本概念を示す。図 2-1 (a)に時間的に規則正しく(正弦的に)変動する交流信号およびフーリエ変換後の周波数領域における信号を示す。規則正しい正弦波の場合、フーリエ変換により正弦波が振動する周波数において振幅の大きさが得られる。このような信号は電圧計に入力すればそのまま実効値が読み取れる。一方、図 2-1 (b)は正弦波に加え、正弦波の信号よりも圧倒的に振幅の大きい、ノイズ(時間的に不規則な成分)を含んだ信号およびそのフーリエ変換の例を示す。周波数領域では異なる周波数および振幅を持つ信号が見られるが、これはあらゆる信号が異なる周波数と位相を持つ正弦波の組み合わせによって表現できることを表している。このような信号を電圧計に入力すると、すべての信号の時間平均値が測定されるため、信号中に存在する微小な信号の振幅を測定することはできない。目的の信号の振幅を計測するためには、ノイズを除去する必要があるが、それはどのように行えばよいのだろうか。これは周波数領域で考えると理解しやすく、周波数領域において目的とする周波数成分のみを計測すれば良い。

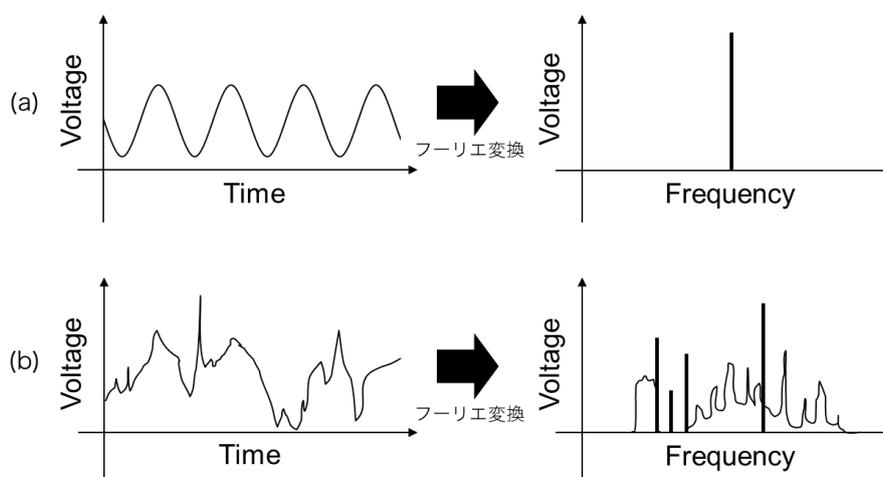


図 2-1 時間的に変動する信号の例。(a)理想的な正弦波、(b)雑音を含む不規則な波形

多数の周波数成分を含む信号より特定の周波数成分のみを抽出する方法にバンドパスフィルターを使うことが挙げられる。図 2-2 に示すように、特定の周波数のみを透過させ、その他の成分は遮断するフィルターを用いれば、一見雑音に埋もれてしまっている微弱な信号も計測することができる。バンドパスフィルターを実現する最も簡単な方法は、抵抗、コンデンサ、インダクタを組み合わせた RLC 回路を用いることであるが、そこでは周波数選択の鋭さ、すなわちいかに効率的に必要な周波数成分のみを抽出できるかが重要となる。バンドパスの鋭さ／性能の指標として、フィルタの透過する中心周波数 f_0 と帯域幅 Δf によって以下のように定義される Q が用いられる。

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (1)$$

Q が大きい程帯域幅が狭く、雑音除去能力が高くなる。一般的なフィルタではフィルタを構成する部品の精度や温度/時間安定度に限界があり、実現できる Q は 100 程度である。一方、ロックインアンプは以降述べる特殊な方法により、 10^7 程度の Q を得られる。しかも、中心周波数 f を任意の周波数に設定し、追尾させることもできる。

表 2-1 一般的なバンドパスフィルター、ロックインアンプそれぞれの Q 値

方式	$Q (=f/\Delta f)$	f
バンドパスフィルタ	~ 100 (1 kHz/10 Hz)	固定(可変は困難)
ロックインアンプ	$\sim 10^7$ (1 kHz/0.1 mHz)	測定信号に追従

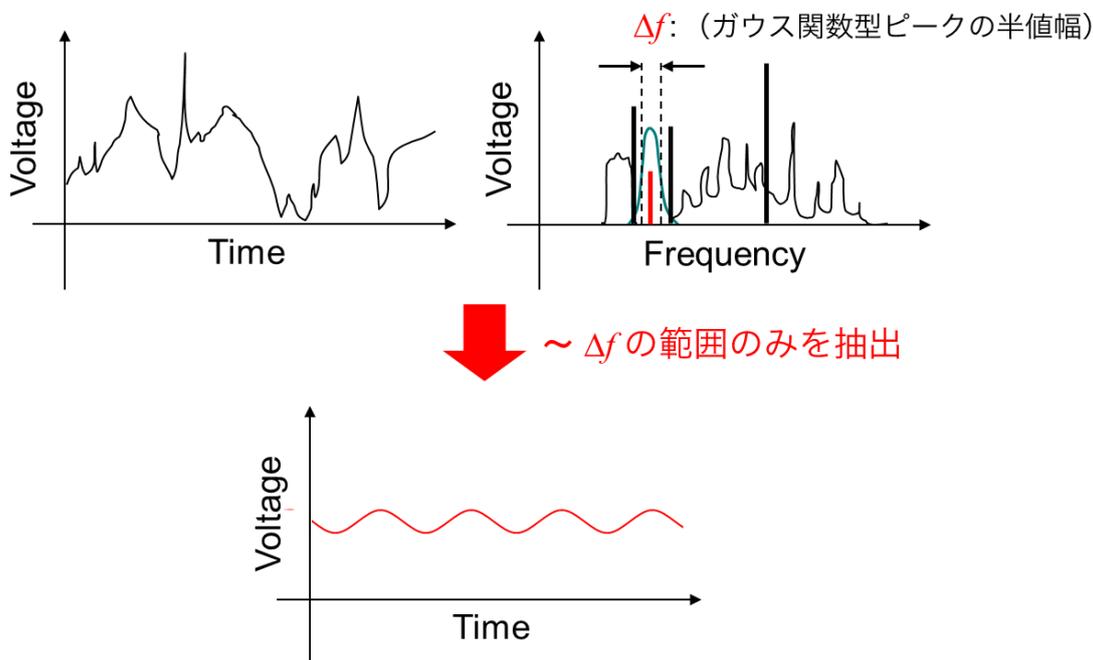


図 2-2 バンドパスによる特定周期信号の抽出

2.1.2 ロックインアンプによる特定の周波数成分の抽出の仕組み

図 2-3 にロックインアンプにおける信号処理のブロック図を示す。測定信号 (input signal) および参照信号

(reference signal)の2つを入力し、それらが位相検波器(Phase Sensitive Detector, PSD)で乗算され、その後ローパスフィルタ(Low Pass Filter, LPF)を通して目的の信号の強度成分を持つ出力信号を得る。ここで測定信号とは雑音を含んだ測定する信号、参照信号とは実験者が別途作成し装置に入力する信号である。以下、その動作原理を述べる。

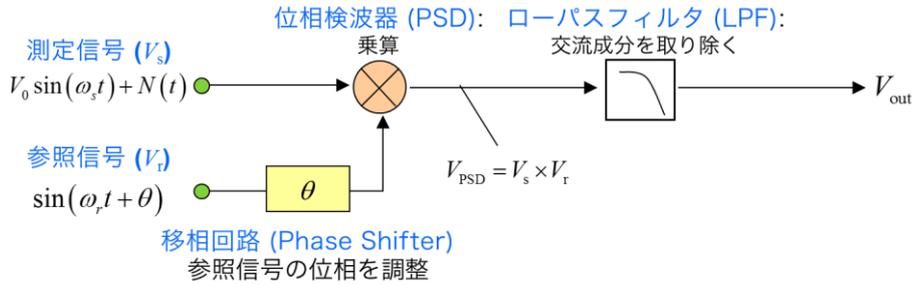


図 2-3 ロックインアンプの概要

測定したい周波数 $\omega_s = 2\pi f_s$ とそれ以外の周波数成分を持つ雑音 $N(t)$ からなる測定信号 V_s と、実験者が準備する参照信号 V_r を考える(s: signal, r: reference). 参照信号は一般的に正弦波であり、信号の位相は回路に設けられている移相回路(phase shifter)によって任意の値に調整可能である。

$$V_s = V_0 \sin(\omega_s t) + N(t) \tag{2}$$

$$V_r = \sin(\omega_r t + \theta) \tag{3}$$

これらを PSD で積算すると、2つの周波数の和成分と差成分に分離される。

$$V_s \times V_r = \underline{\hspace{10em}} \tag{4}$$

$$= \underline{\hspace{10em}}$$

上述の式変形は、入力信号のうち参照信号と同じ周波数(角振動数)をもつ信号は直流成分に変換されることを意味している。この乗算結果を LPF に透過させると参照信号と異なる周波数を持つ雑音の成分は PSD による乗算後も交流成分を持つため、LPF を透過することができない。すなわち、直流成分のみが取り出されて以下の出力が得られる。このことから、目的とする入力信号の振幅 V_0 がノイズを除去した状態で得られることが分かる。

$$V_{out} = \underline{\hspace{10em}} \tag{5}$$

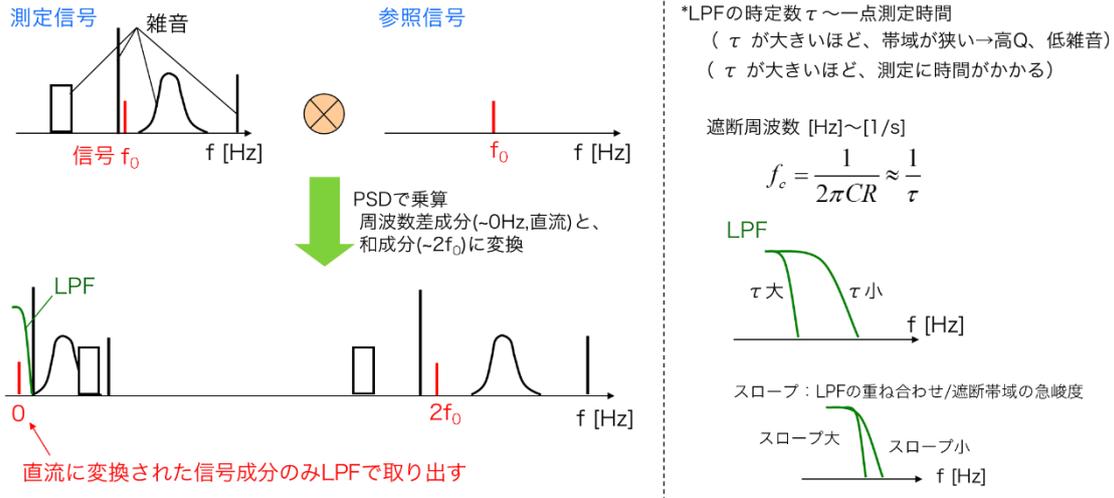


図 2-4 周波数領域で考えたロックインアンプの概要および LPF の役割

2.1.3 PSD: スwitchングによる乗算(もう少し実際の回路に近い内容で考える)

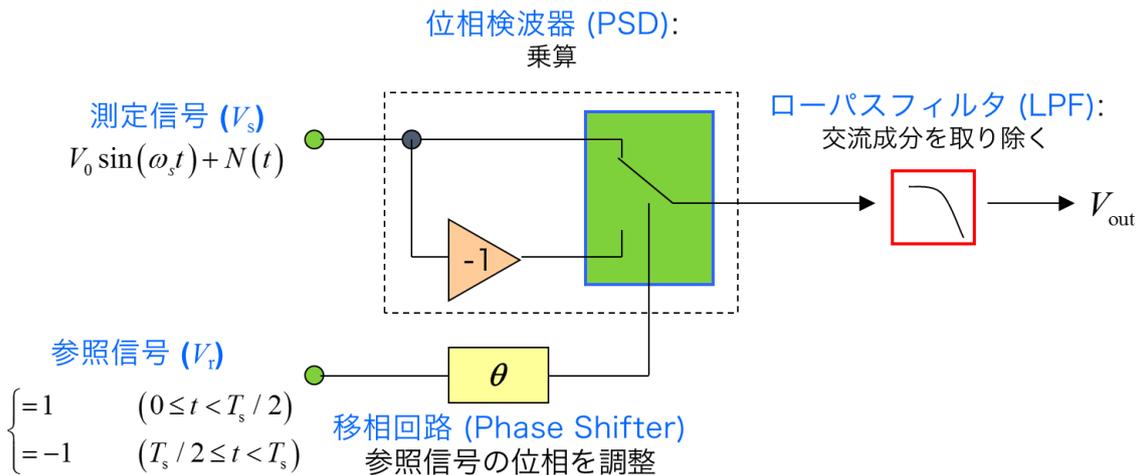


図 2-5 スwitchを用いたロックインアンプの構成

一部のロックインアンプでは、微小な信号抽出のための大きなダイナミックレンジ(120dB)を PSD で実現するため、スitchングによる乗算を PSD で行っている。スitchングによる乗算を行う場合には、参考信号は矩形波となり、PSD のスitchを切り替えるのに用いられる。PSD 内のスitchによって測定信号はそのまま出力あるいは反転されて出力されるため、結果として矩形波を乗算したのと同じ結果がえられる。この信号を LPF を通すことで正弦波を乗算した場合と同様に参考信号の周波数以外の成分は除去される。以下、この原理に基づいた信号処理について説明する。なお測定信号には本来、雑音が含まれるが、原理的に除去されることになるため、簡単のためここでは無視する。

$$V_s = V_0 \sin(\omega_s t) \tag{6}$$

$$V_r = \underline{\hspace{10em}} : \text{方形波} \quad (7)$$

θ は測定信号と参照信号の位相差である。

(4)、(5)が PSD で乗算され、以下のようになる。

$$V_s \times V_r = \underline{\hspace{10em}} + \underline{\hspace{10em}} + \underline{\hspace{10em}} + \dots \quad (8)$$

ロックインアンプでは、参照信号と同期した信号の処理による検波を行う(同期検波)。

従って、入力信号のうち参照信号と同周波数、すなわち同角振動数 $\omega_s = \omega_r$ の成分について考えると、以下のようになる。

$$V_s \times V_r = \underline{\hspace{10em}} + \underline{\hspace{10em}} + \underline{\hspace{10em}} + \dots \quad (9)$$

この信号について、LPF を通して周波数成分(ω を含む成分)を取り除くと、以下の V_0 に比例した直流成分のみが取り出され、目的の信号中の強度成分を観測することが可能になる。

$$V_{\text{out}} = \underline{\hspace{10em}} \quad (10)$$

* θ は位相差であり、通常固定されていることに注意。

検討課題

1. 上の欄の空白を埋め、スイッチングによる乗算を行った場合の LPF 透過後の信号出力を求めよ。

2.1.4 参照信号の位相調整

式(5)及び(10)で示されたように、同期された信号であっても、位相によって出力は変化する。測定信号と参照信号の位相差が無い場合($\theta=0$)のみ、ロックインアンプは交流電圧計で測った場合と同様に信号の振幅を出力する。ロックインアンプには図 2-3 に示すように移相回路が組み込まれているため、参照信号と測定信号間の位

相差を 0° に調節することで以下の出力が得られる。

$$V_{out}(\theta = 0) = \text{_____} \quad (11)$$

同期した出力信号において位相を変化させた場合、次のページ図 2-6 に示すように、LPF 出力が変化する。従って、 V_0 を正確に把握したい場合、厳密に位相を調節し、 $\theta = 0$ とする必要がある。

* 手で正確に位相を調整するには、図 2-6 の特性を利用し、まず、出力が 0 になるように位相を調整する。その後、位相を 90° 戻して正確な出力を得るのが有効である。

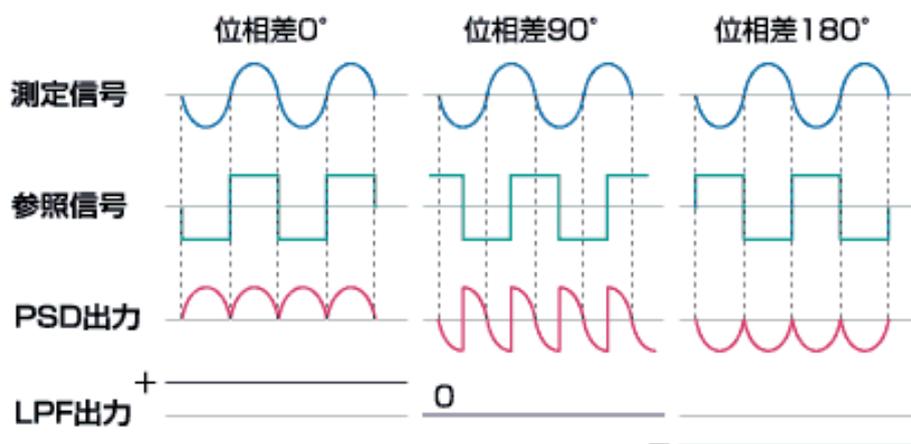


図 2-6 同期信号における位相差依存性 (～X 出力)

2.1.5 2 位相ロックインアンプ

先に示したように、ロックインアンプにおける位相調整は、正確な出力を得るために非常に重要である。ただし、入力信号の位相が不安定な場合は、連続的に正確な出力を得ることが困難となる。

そこで、現在は以下に示す、2 位相式のロックインアンプが多く用いられている。図 2-7 は 2 位相式のロックインアンプのブロック図を示す。通常の参照信号に加え、 90° 位相の異なる参照信号を用い、2 つの PSD 出力を同時に処理する。これにより、式(8)および(9)で得られる出力 V_{out1} (以降 X と呼ぶ)に加え、位相の 90° 異なる出力 V_{out2} (以降 Y と呼ぶ)を得る。得られた測定値の絶対値および正接を算出することで、以下に示すように位相調整無しで目的信号強度 V_0 が得られると共に、参照信号との位相差 θ が計測可能になる。

$$X = V_{out1} = \underline{\hspace{10em}}$$

$$Y = V_{out2} = \underline{\hspace{10em}}$$

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} = \underline{\hspace{10em}}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{Y}{X}$$

(12)

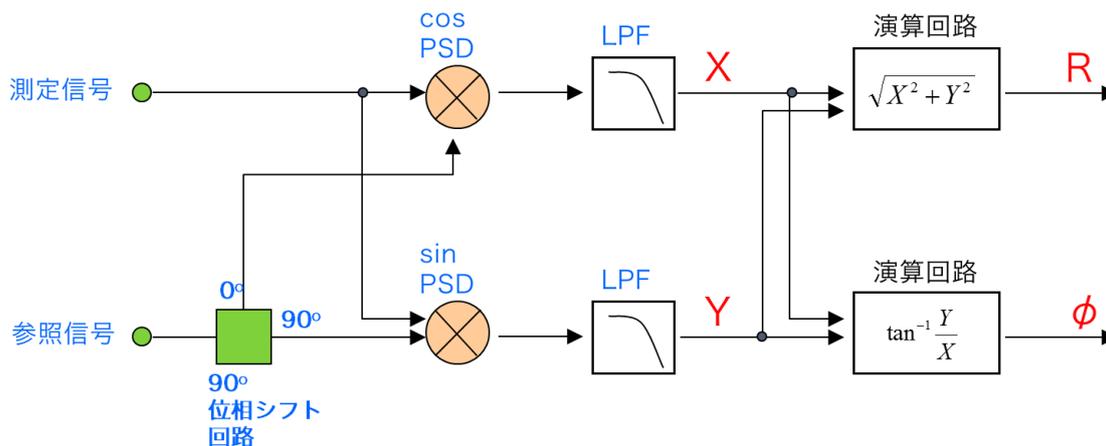
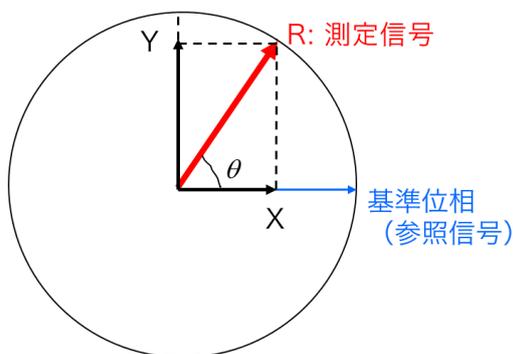


図 2-7 2位相ロックインアンプの構成

X, Y, R, θ のそれぞれのパラメータは、以下図 2-8 のように理解することもできる。

ロックインアンプで出力されるR、X、Y、 θ は、互いに以下のような関係にある。



Rを選択すると、位相 θ に係わりなく信号の大きさを測定できる。
 ただし、位相が安定しているのであればYを0に調整して、Xで信号の大きさを求める方が、回路が簡素であり雑音の影響が少ない。

図 2-8 2位相ロックインアンプにおける、X, Y, R, ϕ の定義

2.1.6 ロックインアンプの性質

時定数と遮断周波数—簡単なローパスフィルタ (LPF) を例に

LPF は図 2-9 に示すような抵抗とキャパシタの直列回路やオペアンプを用いることで実現可能である。

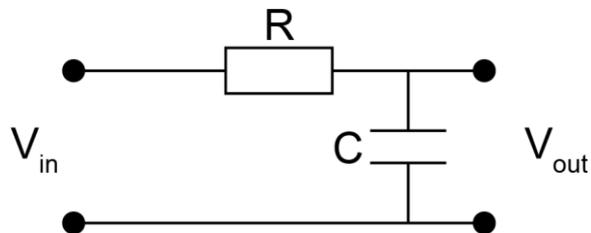


図 2-9 抵抗とキャパシタを用いた簡単なローパスフィルタ回路

上記の LPF の入出力特性は以下の式で与えられ、周波数によって出力が変化することが分かる。

$$\frac{|V_{out}|}{|V_{in}|} = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}} \quad (13)$$

LPF の大事な特性に時定数 τ と遮断周波数 f_c がある。 $\tau=R \times C$ であり、最終的な出力の 63.2%に達するまでの時間を示している。すなわち、 τ が大きいと応答が遅く、早い信号に追従して出力を出すことができず、早い周波数の信号は遮断される。 τ が小さい回路は、早い信号にも応答することができるため、高周波数の信号も出力される。一方、遮断周波数は回路の出力が半分になる周波数であり、式(4)より $f_c = 1/2\pi RC$ であることが分かる。回路の時定数が遮断周波数(どの周波数の信号が出力されるか)を決定している、ということは遮断周波数の式からも明らかである。

本実験で用いる装置の LPF は図 2-9 で示したような単純なものではないが、時定数が遮断周波数を決定する、という点では共通している。すなわち、時定数を長くした方がより効果的に高周波信号(ノイズ)を遮断することができる。しかしながら、時定数が大きいと測定時間も長くなってしまいますので、精度と実験効率の両立を考えて測定条件を選ぶ必要がある。

測定レンジ

ロックインアンプに限らず通常の電圧計であっても、測定レンジは適切に設定する必要がある。例えば 12.5 μV の信号を 1 V のレンジを使って測定しても、0.000 V などと表示されるのみである。装置内部の回路設定の安定性を担保しながら測定精度を良くするためには、計測する値の 1.2 倍程度の測定レンジに設定するのが良い。

ダイナミックリザーブ

ロックインアンプでは、雑音に埋もれた微小な信号を取り出す。一方、ロックインアンプは電氣的な機械であるため、測定する信号に対し雑音があまりに大きいと、安定した測定を行うことができない。ダイナミックリザーブとは、測定する信号の大きさに対して、どれほど大きい雑音まで許容できるかを示す値であり、以下の式で表される。

$$\text{Dynamic reserve [dB]} = 20 \times \log_{10} \frac{\text{最大雑音電圧 (Peak-to-peak)}}{\text{信号入力フルスケール (rms)}} \quad (14)$$

※実際の装置では、測定感度:Sensitivity と、ダイナミックリザーブ High-Low-Medium のボタンで、ダイナミックレンジが決定される。各設定値において、装置に依存した一定の値が決定される。(詳しくは、各装置の取扱説明書で確認→本指導書巻末 p. 15 の「付録 1 : NF LI5640 のダイナミックリザーブ値」参照)

装置の安定性を高めるため、出来る限り小さなダイナミックリザーブで測定を行うことが好ましい。

ロックインアンプを取り扱う上での注意

ロックインアンプに限ったことではないが、電気的な測定を行う機器では接地を適切に行わないと感電する恐れがある。必ず接地することを心がける。

ロックインアンプはロックイン信号計測を行うための装置で、株式会社エヌエフ回路設計ブロックなどより市販されている。スペックにもよるが価格は数十万円以上の高価な計測器であるため、取り扱いには十分注意する。

2.2 液晶の基礎

2.2.1 ネマティック液晶

一般に物質は固相(crystal)、液相(liquid)、気相(gas)の 3 つの安定状態(相, phase)を有することが知られており、これらの状態は温度や圧力に依存して変化する。しかし、一部の物質は上記の 3 態の中間的な性質を示す中間相(mesophase)を呈することが知られている。液晶(liquid crystal)とはその名のとおりに固相と液相の中間的な性質を持つ中間相の一種である。現代社会ではディスプレイの代名詞となっている液晶であるが、その本質は物質の状態であり、その歴史は 1888 年オーストリアの植物学者 F. Reinitzer が一部のコレステロール誘導体において 2 つの融点らしきものを発見したことにさかのぼる。その後、多くの物理学者・化学者の研究によって 2 つの融点の間では液体の特徴である流動性と固体(結晶)の特徴である異方性(見る方向によって物理的性質が異なる性質)を兼ね備えていることが明らかとなり、「液晶」と命名された。

液晶は構成する分子の形状および分子集団的配列によって様々な相に分類されている。ディスプレイに用いられている最も基本的な相はネマティック相であり、棒状の分子が液体と同様に重心の秩序はランダムでありながら、結晶のように分子の配向を揃えて存在している状態をとる。すなわち、流動性を持ちながら異方性を示す。液晶固有の専門用語として、分子の集団的配向方向をダイレクタ(director)と呼び、ダイレクタを主軸として誘電率(dielectric constant)、屈折率(refractive index)、導電率(conductivity)や粘性(viscosity)などが方向によって異なることとなる。棒状分子材料の固相・液晶相・液相および気相における分子配列の模式図を図 2-10 に示す。

液晶は流動性を持つため、応用する場合には容器に保持する必要がある。一般的にはガラス 2 枚を数 μm の空隙を隔てて対向させたサンドイッチ型の素子構造が用いられる。ガラスには透明電極・TFT や液晶を界面で配向させるための配向膜が付与されており、液晶の配向方向を電圧により制御できるようになっている。

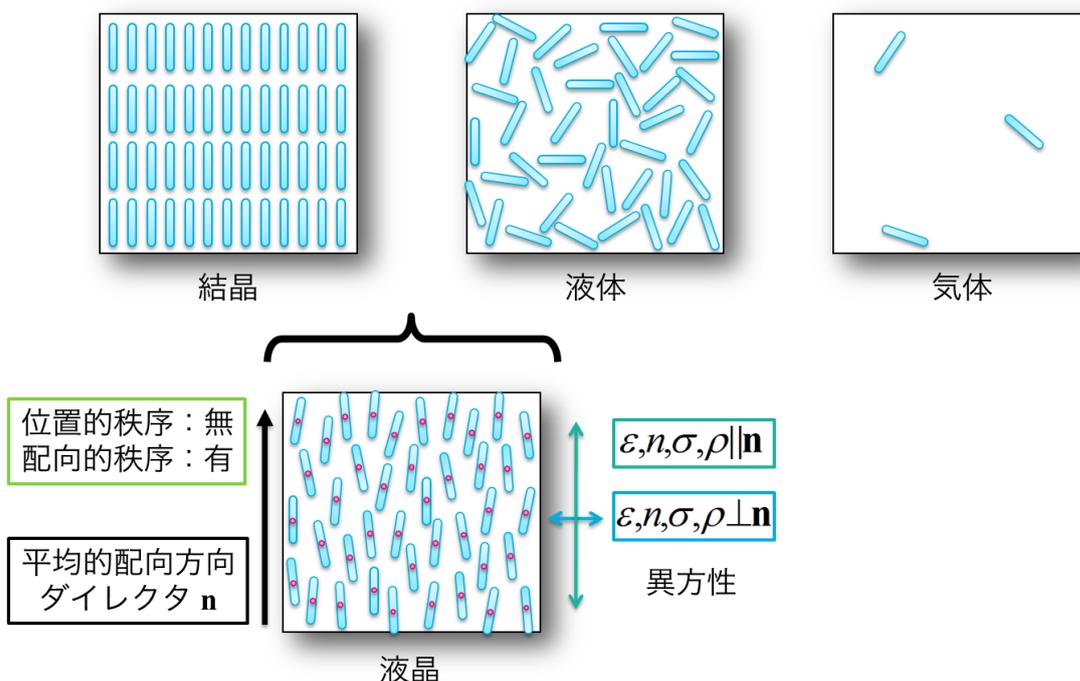


図 2-10:棒状分子材料の異なる相における分子配列状態の模式図

2.2.2 液晶の光学的性質

ディスプレイ応用されるネマティック液晶は波長 400 – 700 nm の可視光領域において透明である。すなわち、光を吸収することは無い。一方、液晶の屈折率はダイレクタとその他の方向とで異なる値を持つ。このように、ある特定の(1つの)軸に沿ってのみ屈折率が異なる材料のことを一軸異方性媒質と呼び、一つだけ異なる屈折率のことを異常光屈折率(extraordinary refractive index), 他の 2 つの屈折率のことを常光屈折率(ordinary refractive index)と呼ぶ。一般的に異常光屈折率は n_e , 常光屈折率は n_o で表現される。簡単のため、ある 3 次元空間において液晶のダイレクタが z 方向に存在すると仮定すると、 z 方向と x, y 方向では屈折率が異なる。それぞれの方向における屈折率を n_x, n_y, n_z とあらわすと、ディスプレイ応用されるネマティック液晶は $n_e = n_z \neq n_x = n_y = n_o, n_z > n_x = n_y$ という性質を持つ。液晶の一般的な屈折率は $n_z = n_e \sim 1.7, n_x = n_y = n_o \sim 1.5$ 程度であり、水($n = 1.33$)よりも屈折率が高い。方向による屈折率の差 $\Delta n = n_e - n_o$ のことを屈折率異方性又は複屈折と呼ぶ。また、 $\Delta n > 0$ および $\Delta n < 0$ の材料をそれぞれ正および負の屈折率異方性をもつ材料と呼ぶが、ネマティック液晶は基本的に正の屈折率異方性を示す。

後述のように、光はその伝搬方向ではなく偏光方向に対応する屈折率を感じるようになる。したがって、例えば光が z 方向に伝搬する場合、光は偏光状態に関係なく n_x を感じることであり、あたかも等方的な媒質を伝搬しているのと同じような振る舞いを示す。また、光が x 方向に伝搬する場合、光の偏光が z 方向に向いていれば n_z を感じ、 y 方向に向いていれば n_y を感じるようになる。光の偏光が円偏光や斜めの直線偏光の場合など、 z, y の両方の成分を含んでいる場合、偏光は n_z, n_y を感じる成分に分解され、各々の成分が異なる屈折率を感じながら伝

搬した後、液晶を通り抜けた時点で重ね合わされることとなる。このように、異方性媒質中を伝搬する光はその偏光面内で最大と最小の屈折率を感じる偏光成分に分解され、各々が独立して伝搬する。このように独立して伝搬する偏光成分のことを固有モードと呼び、また、この理由から、異方性媒質を伝搬した光の偏光は一般的に変化する。

2.2.3 ネマティック液晶の電気的性質

ディスプレイ応用されるネマティック液晶材料は有機分子が液体のようにランダムに存在している状態であり、電気を通すことはできない、すなわち誘電体である(イオンなどの不純物が媒体となり電気が流れる場合もある)。液晶の誘電率も屈折率と同様に、方向によって異なる値を示す。誘電率の場合は、一般的にダイレクタ長軸に平行な成分 ϵ_{\parallel} と直交する成分 ϵ_{\perp} と記述される。光学的性質と同様にネマティック液晶のダイレクタが z 方向に配向していると仮定し、それぞれの方向における比誘電率を $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ と表すと、 $\epsilon_z \neq \epsilon_x = \epsilon_y$ となる。一方、誘電率は屈折率とは異なり、 $\epsilon_z > \epsilon_x, \epsilon_z < \epsilon_x$ の両方の場合が存在する。誘電率の異方性も屈折率の異方性と同様に分類されており、 $\Delta\epsilon = \epsilon_z - \epsilon_x > 0$ のものは正の誘電異方性、 $\Delta\epsilon < 0$ のものは負の誘電異方性を持つと呼ばれる。

液晶に電圧を印加した際の最も特徴的な振舞いに、電界による分子再配向が挙げられる。これは液晶に電圧を印加した際に、静電気力によって誘電率が大きくなるように液晶分子の向きが変わるような力が働く挙動である。すなわち、誘電異方性が正の場合はダイレクタの長軸を電界方向に向け、誘電異方性が負の場合はダイレクタの短軸を電界方向に向ける。図 2-11 に誘電異方性が正の場合の模式図分子配向の模式図を示す。

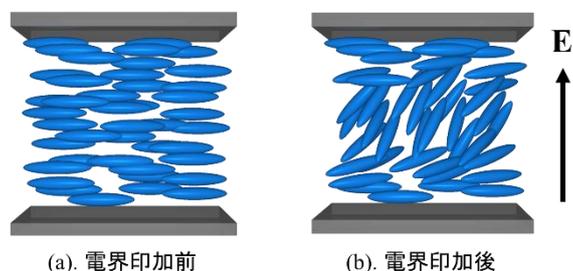


図 2-11: 電界印加による液晶の分子再配向の模式図 (a)電界印加前, (b)電界印加後

2.2.4 実験で使う液晶素子

本実験では、ITO と呼ばれる透明電極を 30 nm 程度製膜したガラス基板をおよそ 10 μm の空隙を隔ててサンドイッチしたセルを用いる。透明電極の上には、基板界面でダイレクタを素子の長手方向に配向させる機能を持つ配向膜(日立化成, LX-1400)が 20 nm 程度の厚みで製膜されている。また、封入する液晶は 4-cyano-4'-pentylbiphenyl(Merck, 別名 5CB)と呼ばれる分子であり、22-35 $^{\circ}\text{C}$ の温度範囲でネマティック相を示し、正の誘電異方性($\Delta\epsilon > 0$)を有する。したがって、2 枚の基板間に電圧を印加することにより、図 2-11 に示すように、ダイレクタが基板に平行に並んでいる状態から、垂直方向に向きを変える。なお、一般的に配向膜は強い配向規制力を持つため、界面近傍の分子は高い電圧が印加された時でも向きを変えない(図 2-11(b)の界面近傍参照)。

2.3 偏光

2.3.1 偏光の記述方法

光は電磁波であり、波の性質を持っている。等方的かつ非導電性の媒質中(真空中などに相当)におけるマクスウェルの方程式を解くことにより、光は電界と磁界が直交しており、更に伝搬方向と右手系をつくるベクトル波であることが導かれる。偏光とは電磁波の電界成分の振動方向を指すが、上の性質より(一部の特殊な媒質を除いて)光の電界は光の伝搬方向とは直交した面内に存在する。ここでは光の偏光状態の記述方法について述べる。

時刻 t におけるある点 \mathbf{r} での偏光状態は電界ベクトル $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ で記述されるが、単色光である場合、その変化はある振動数 $\omega (=2\pi f)$ であり、 $f = c/\lambda$ は光の振動数)の正弦波で表される。光が z 方向に伝搬しているとする、電界ベクトルは xy 平面内に存在し、以下のように x, y 方向の直交した2つの独立した正弦波の振動の和で表現できる。

$$\begin{cases} E_x = A_x \cos(\omega t - kz + \delta_x) \\ E_y = A_y \cos(\omega t - kz + \delta_y) \end{cases} \quad (15)$$

上式で A_x と A_y はそれぞれ x, y 方向の電界の振幅である。式 (1.5) から $\omega t - kz$ を消去すると以下のような式が得られる。

$$\left(\frac{E_x}{A_x}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{A_y}\right)^2 - 2\frac{\cos\delta}{A_x A_y} E_x E_y = \sin^2 \delta \quad (16)$$

ここで、 $\delta = \delta_y - \delta_x$ である。式(16)から、電界ベクトルの振幅は一般的には xy 平面内で楕円を表していることが分かる(これを楕円偏光と呼ぶ)。その状態は楕円の長軸の方向、楕円率(長軸、短軸の長さの比)および電界ベクトルの回転の向き(右回り、左回り)によって特徴づけられる。この場合、 δ の変化によって楕円の形が変化する。電界ベクトルの回転の向きは式(16)中の $\sin \delta$ の符号によって決まり、 $\sin \delta > 0$ のときは z 軸正方向から見て時計回りに回転し、 $\sin \delta < 0$ のときは反時計回りに回転する。図 2-12 に位相差 δ と偏光状態の関係を示す。 $A_x = A_y$ の場合、偏光状態は δ が 0 から大きくなるにつれ、直線偏光(図 2-12 (a)) → 楕円偏光(図 2-12 (b)) → 円偏光(図 2-12 (c))へと変化する。さらに δ が大きくなると、図 2-12 (d) → 図 2-12 (h) の順に偏光状態は変化する。また、円偏光には光の伝搬方向に対して右回りに回転する右円偏光(図 2-12 (c))、左回りに回転する左円偏光(図 2-12 (h))がある。

我々が日常的に見る光には、多くの異なる偏光が混ざっている。しかし、人間の目は一般的に偏光を感知することができず、例えば、反射などによって特定の方向に偏光した光を観察したとしても、通常の光と違いを感じることは無い。偏光を検知するためには、偏光子と呼ばれる、特定の偏光のみ透過させる素子を使う必要がある。光の位相がそろっている点で特殊な光波であるレーザー光は、一般的に偏光している。

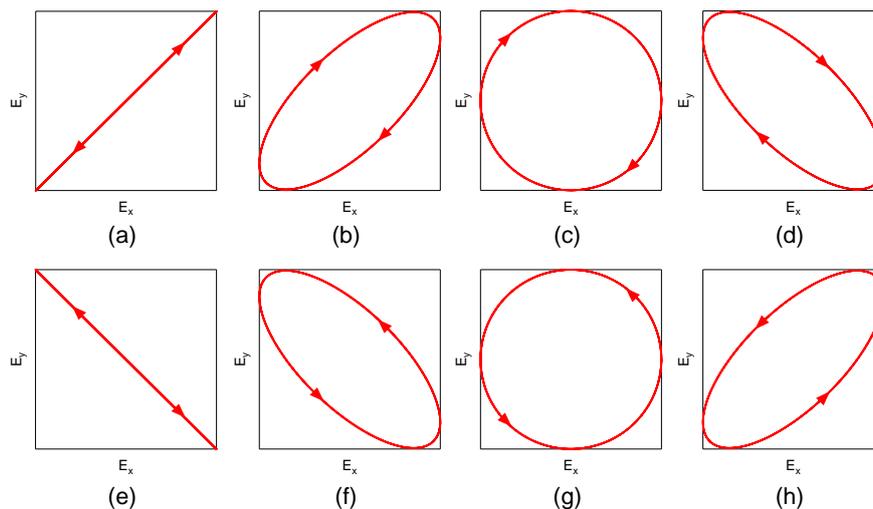


図 2-12: $A_x=A_y$ かつ異なる位相差を持つ偏光状態 ((a) $\delta=0$, (b) $\delta=\pi/4$, (c) $\delta=\pi/2$, (d) $\delta=3\pi/4$, (e) $\delta=\pi$, (f) $\delta=5\pi/4$, (g) $\delta=3\pi/2$, (h) $\delta=7\pi/4$)

2.3.2 ジョーンズ解析法

平面波光の偏光状態の記述の方法としてジョーンズベクトル (Jones vector) がある。これは偏光状態を直交する 2 成分ベクトルで表し、光が伝搬する媒質を 2×2 行列で表すものである。 z 方向に伝搬する式(15)の電界成分を持つ光をジョーンズベクトルで記述すると、以下のように定義される。

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} A_x \exp(i\delta_x) \\ A_y \exp(i\delta_y) \end{bmatrix} \quad (17)$$

ジョーンズベクトルは複素数となっており、これによって x 方向, y 方向の電界成分の振幅と位相を表現している。光の強度は以下の式で与えられる。

$$I = |E_x|^2 + |E_y|^2 \quad (18)$$

ジョーンズベクトルを用いて光学素子を伝搬する光に生じる偏光状態の変化を記述する方法を述べる。入射する光のジョーンズベクトルを \mathbf{V}_{in} , 出射する光のジョーンズベクトルを \mathbf{V}_{out} とし、伝搬する媒質の偏光特性を記述するジョーンズマトリックスを \mathbf{M} とすると、以下の関係式が成立する。

$$\mathbf{V}_{out} = \mathbf{M}\mathbf{V}_{in} \quad (19)$$

簡単な例を考える。斜め 45° に偏光した入射光が x 方向に透過軸を持つ直線偏光素子を透過すると、出射した光は x 成分のみを持つ。すなわち以下のような式変形となる。

$$\begin{aligned}
\mathbf{V}_{\text{in}} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}; && \text{斜め方向に偏光した光} \\
\mathbf{M} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; && x \text{方向に透過軸を持つ偏光素子のジョーンズ行列} \\
\mathbf{V}_{\text{out}} = \mathbf{M}\mathbf{V}_{\text{in}} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}; && x \text{成分のみが透過}
\end{aligned} \tag{20}$$

$\mathbf{V}_{\text{in}}, \mathbf{V}_{\text{out}}$ の絶対値をとって比べると、強度も半分となっており、実験的に得られる結果を再現できることが分かる。

ジョーンズ解析を行う上で重要な要素に回転がある。例えば、偏光子の透過軸が x 軸より θ 傾いている場合などである。この場合、入射偏光を表現している標準基底から θ 回転した基底を考えれば、上の例と同じ偏光子のジョーンズベクトルを用いることができる。したがって、標準基底における偏光子のジョーンズベクトルは以下で与えられる。

$$\mathbf{M} = R(\theta) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} R(-\theta) = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \tag{21}$$

液晶素子のように、透明であるが方向によって屈折率が異なる場合、伝搬する距離に応じてジョーンズベクトルを構成する二つの電界成分の位相差が変化することになる。屈折率 n の媒質を距離 d だけ伝搬した光の位相は $\exp(-i2\pi nd/\lambda)$ だけ変わる(式(15)の位相因子に $k=2\pi n/\lambda$ を代入)ため、例えば、 x 軸方向にダイレクタが向いている場合、ジョーンズ行列は以下で表される。すなわち、 x 方向と y 方向に相対的な位相差が生じられる。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \exp\left(-i\frac{2\pi n_e d}{\lambda}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(-i\frac{2\pi n_o d}{\lambda}\right) \end{bmatrix} = \exp\left(-i\frac{\pi(n_e + n_o)d}{\lambda}\right) \begin{bmatrix} \exp\left(-i\frac{\pi\Delta n d}{\lambda}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(i\frac{\pi\Delta n d}{\lambda}\right) \end{bmatrix} \tag{22}$$

このような素子が基準となる基底(x 軸)から Ψ だけダイレクタを傾けて存在している場合を考えよう。若干複雑だが、偏光子の場合と同様に以下のジョーンズマトリックスが得られる。

$$\begin{aligned}
\mathbf{M} &= R(\theta) \begin{bmatrix} \exp\left(-i\frac{\pi\Delta n d}{\lambda}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(i\frac{\pi\Delta n d}{\lambda}\right) \end{bmatrix} R(-\theta) \\
&= \begin{bmatrix} \cos \Gamma/2 - i \cos 2\Psi \sin \Gamma/2 & -i \sin 2\Psi \sin \Gamma/2 \\ -i \sin 2\Psi \sin \Gamma/2 & \cos \Gamma/2 + i \cos 2\Psi \sin \Gamma/2 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{23}$$

上の式変形を行う中で $\Gamma=2\pi\Delta n d/\lambda$ とした。また、 E_x, E_y 方向の相対的な位相の差のみに注目しているため、全体的な位相の変化である $\exp(-i\pi(n_e+n_o)d/\lambda)$ は省略した。

最後に、図 2-13 のように、液晶素子が直交した 2 枚の偏光子間に設置されている場合の透過率を考える。偏光子の場合の例の同様に、斜め偏光した入射光から始まり、 x 方向を透過軸とする偏光素子、 x 軸より Ψ 傾いた液

晶素子, y 方向を透過軸とする偏光素子を順に伝搬することを考える. 結果は以下のように与えられる.

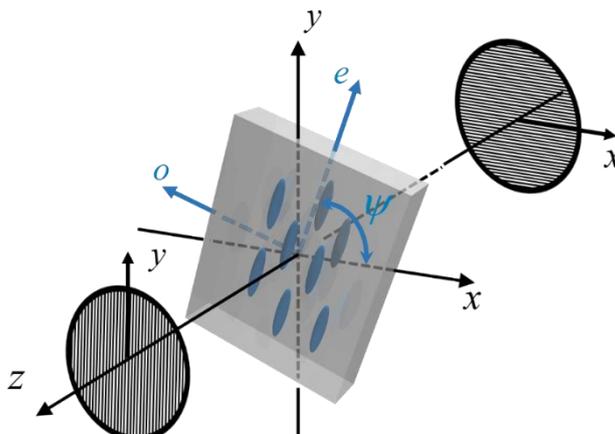


図 2-13: 直交する偏光子の間に設置された液晶素子

$$\begin{aligned}
 \mathbf{V}_{\text{in}} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}; && \text{斜め方向に偏光した光} \\
 \mathbf{P}_x &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; && \text{x方向に透過軸を持つ偏光素子のジョーンズ行列} \\
 \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} \cos \Gamma/2 - i \cos 2\Psi \sin \Gamma/2 & -i \sin 2\Psi \sin \Gamma/2 \\ -i \sin 2\Psi \sin \Gamma/2 & \cos \Gamma/2 + i \cos 2\Psi \sin \Gamma/2 \end{bmatrix}; && \text{液晶素子のジョーンズ行列} \\
 \mathbf{P}_y &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; && \text{x方向に透過軸を持つ偏光素子のジョーンズ行列} \\
 \mathbf{V}_{\text{out}} = \mathbf{P}_y \mathbf{M} \mathbf{P}_x \mathbf{V}_{\text{in}} &= \frac{-i}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ \sin 2\Psi \sin \Gamma/2 \end{bmatrix}; && \text{y成分のみが透過}
 \end{aligned} \tag{24}$$

透過光強度は \mathbf{V}_{out} の絶対値の二乗をとれば良いので, 以下の式で与えられる.

$$I = \left| -\frac{i}{\sqrt{2}} \sin 2\Psi \sin \Gamma/2 \right|^2 = \frac{1}{2} \sin^2 2\Psi \sin^2 \frac{\pi \Delta n d}{\lambda} \tag{25}$$

透過率は, 何を基準とするかによるが, 透過軸が平行な 2 枚の偏光子を通った光強度を基準とすると,

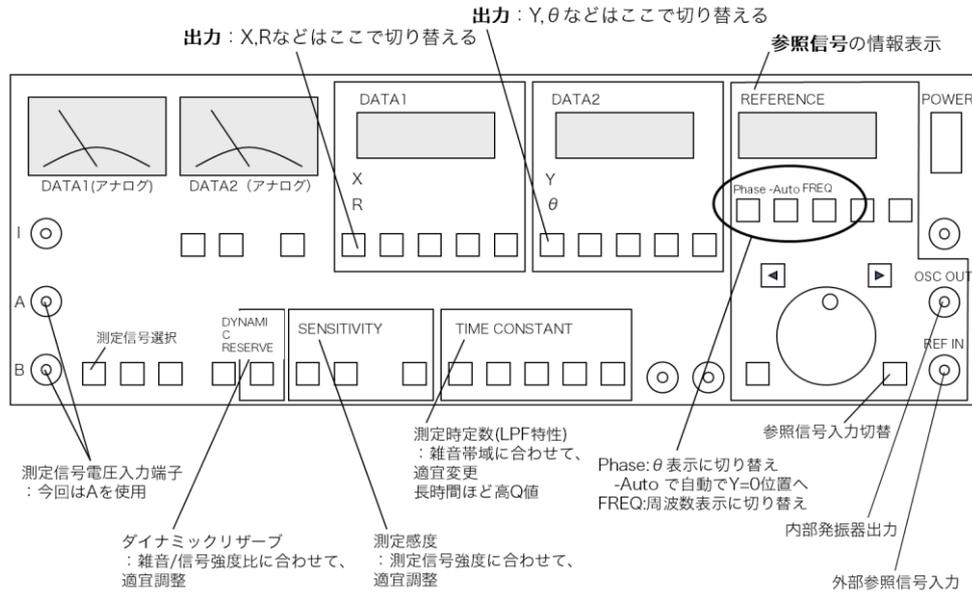
$$\begin{aligned}
 I_0 &= |\mathbf{P}_x \mathbf{P}_x \mathbf{V}_{\text{in}}|^2 = \frac{1}{2}; && \text{基準透過光強度} \\
 T &= \frac{I}{I_0} = \sin^2 2\Psi \sin^2 \frac{\pi \Delta n d}{\lambda}; && \text{透過率}
 \end{aligned} \tag{26}$$

式(26)より, $\Psi = \pi/4$ の時に T が最大となることが分かる. また, 透過率は異方性媒質の複屈折 Δn , 厚み d , 伝搬する光の波長 λ に依存する. 本実験では, 液晶素子の層厚は固定であり, また, 波長は単色光のレーザーを用いているため固定である. したがって透過光量の変化が生じる要因は 2 つに絞られる.

実験装置

本実験では以下の装置を使用する。

- ロックインアンプ (Lock-in amplifier) 型番: _____



- ファンクションジェネレーター (Function Generator) 型番: _____

別名信号発生器とも呼ばれ、矩形波や三角波、正弦波などの電圧信号を発生させる装置。本実験ではレーザー駆動用のものと液晶駆動用の2種類のものがある。

- ファンクションジェネレーター (Function Generator) 型番: _____

別名信号発生器とも呼ばれ、矩形波や三角波、正弦波などの電圧信号を発生させる装置。本実験ではレーザー駆動用のものと液晶駆動用の2種類のものがある。

- ボルトメータ (Digital Voltmeter) 型番: _____

入力した電圧の平均値を測定するための装置。

- 半導体レーザー (Semiconductor Laser) 型番: _____

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation の略。実験は波長 650 nm のものを使う。

- Si フォトディテクター (Photo Detector) 型番: _____

可視光に感度を持つ光の検出器。

- プリアンプ (Current Input Preamplifier) 型番: _____

フォトディテクタの出力する電流信号を電圧信号に変換する装置。

検討課題

- 実験装置 (光学部品を含む) の名称・メーカー・型番は全てもらさずノートに記録し、レポートでは装置が初見で現れた時に装置名称(メーカー名, 型番)のフォーマットで記述すること。

3 実験

光通信などの応用研究から材料物性などの基礎研究まで、レーザー光を用いた光学実験は極めて広い分野で行われる。レーザー光を用いた実験を行う場合、ミラー、レンズ、偏光素子など様々な光学部品を用いて光を計測対象まで導き、その後再び光学部品を用いてフォトダイオードや分光器などの検出器まで導く。光学部品の規格は世界的に大きく2つに分かれており、日本やヨーロッパで用いられるミリ規格、およびアメリカで用いられるインチ(2.54 mm)規格である。例えば、日本の規格では一般的に用いられるロッドは直径が12 mmであるが、アメリカの規格では半インチ(12.7 mm)であり、微妙にサイズが合わないため注意が必要である。光学部品のメーカーは日本(シグマ光機など)・アメリカ(Newport, Edmund Optics, Thorlabs など)・ドイツ(Qiopic など)などに存在する。

本実験は3つのセクションからなる。まず、レーザー光の光路が光学ルールに沿うようにアライメントを行い、ルール上の検出器でロックイン信号検出ができることを確認する。その後、2枚の偏光子を用いることでレーザー光の透過光強度の変調が可能であることを確認し、フィルム型偏光子を用いた場合に達成できるコントラスト比を調べる。最後に、液晶を通すことで光の偏光状態が変わることを確認し、更に電界によって偏光状態の変わり方が変化するために、液晶が電気光学的なスイッチとして応用できることを確認する。

以下のことに注意して実験を進めること

1. レーザーはパワー密度が高く失明の可能性があるので極めて危険である。絶対に射出口または光線を覗かないこと。紙などにあてて確認すること。
2. 指導書に実験の手順をすべては書いていないので、必要に応じて実際の手順を書き、それを見返しながらレポートを書くこと。役割分担して、実験を行うものと、手順をノートに書くものに分かれても良いが、お互い責任を以てデータおよび手順を共有すること。
3. 役割分担を行った場合も、レポートでは自分の言葉で手順や考察を書くこと。
4. 使った装置のメーカーおよび型番は必ずノートに記録すること。
5. 班員で話し合い、理解を深めながら実験をすすめること。
6. 実験はおおよそ、特定のパラメータを制御し、出力を観測する、という手順からなる。各々の実験について何が独立パラメータであるかを考え、独立パラメータを横軸、出力を縦軸に表示したグラフを図示すること。

3.1 レーザー光のアライメント

レーザー光のアライメントとは、狙った場所にレーザー光を導くことを意味し、光学実験の基礎中の基礎となる。本実験ではレーザー光を光学ルールに沿わせることを指す。

- 光学ルール上にはアイリス(虹彩絞り)のみが設置されていることを確認する。
- 半導体レーザーの電源を入れる。レーザー駆動用ファンクションジェネレータの電源をONにし、周波数270 Hzの片側矩形波(0/3.0 Vで、デューティ比50)を印加する。発光ダイオードが発光することを確認する。

●

(レーザー光は2枚の可動式ミラーを使えばあらゆる方向に導くことができる。2枚のミラーを使って光学レー
ルに平行にレーザー光を導く。)

※レポートには具体的な手順を書くことが求められるので、手順はしっかり記録すること。

● アイリスより手前側(レーザー入射側)に偏光子を設置する。この時、治具(ホルダー)は精密調整可能でな
いものを設置する。偏光子設置後もレーザー光路が変わらないことを確認する。

● レーザー光は強度が強いためロックイン計測をしなくても電圧計で強度が読み取れるが、偏光子対を光路に
挿入した場合には強度は極めて微弱となり得るため、ロックイン計測を行う。

※本実験では使わないが、直流の信号を計測するためにはチョッパーを挿入する目的を述べる検討課題が
あるので、その必要性を理解する。

●

(ファンクションジェネレータの OUT 端子・SYNC 端子の役割を理解する。ロックインアンプに適切に接続し、
参照信号の周波数を求める)

(レーザー光強度のロックイン計測を行う。)

※フォトダイオードの校正は行っていないため、相対的な強度しか測れないことに注意。

※レーザー光は特定の直線偏光を持っているため、偏光子を回転させると値が変化してしまう。この実験を
行い際は触らないこと。

※安定した値が得られていれば、レーザー光をロックイン計測できている。

●

(ロックイン計測の位相が出力値に与える影響を確認する。)

※レポートでは X, Y, R, θ が原理で説明した通りの関係を持っていることを確認し、述べること。 .

検討課題

(※検討課題はレポート中でセクションを分けて書くのではなく、それぞれについて手順・
結果・考察の中の適切な場所に記すこと。)

1. 実施した実験手順を箇条書きではない文章体で書き、適切と思われるところで段落分けし、その結果を述べよ。特に、ミラーを2枚使ってレーザーのアライメントを行う手順は具体的に書くこと。
2. ミラーを2枚使えばあらゆる方向にレーザー光を導ける理由を簡潔に述べよ。
3. ロックイン計測を行う際に光路にチョッパーを挿入した理由を述べよ。
4. 理想的な実験ではレーザー光の出力は一定だが、長い時間実験を実施していると、レーザー光の出力がぶれてしまい、何もしていないのに出力が変わってしまう可能性がある。このような出力のブレを補正するためには、実験系にどのような工夫をすればよいか述べよ。

3.2 偏光子のコントラスト比計測

光の重要な性質の一つに偏光(電磁波の電界成分の振動方向)がある。光の偏光は偏光子と呼ばれる光学部品により制御できるが、実際には完全な偏光を達成するのは不可能であり、素子ごとに特定の偏光性能がある。例として直線偏光を生成する偏光子を考え、2枚の偏光子を透過軸が平行および直交するように設置したとする(このような配置をそれぞれパラレルニコル、クロスニコルと呼ぶ)。パラレルニコルおよびクロスニコル下で透過する光量の比はコントラスト比と呼ばれ、偏光性能の簡便かつ重要な指標である。ここでは光学実験で頻繁に用いられる吸収型のフィルム偏光子のコントラスト比を実験的に求める。

- 前節の通り実験を行ってれば、レーザー光は光学レールに平行に照射されており、光学レールには入射側から偏光子、アイリスおよびフォトディテクターが配置されている。
- アイリスとフォトディテクターの間で精密調整が可能なホルダーに固定されたフィルム偏光子を設置する。光路に偏光子の対が存在する場合、出射側の偏光子のことを検光子と呼ぶ。検光子の角度を変えるとレーザーの出力が変化することを確認する。

● _____

 (偏光子対を透過するレーザー光強度の偏光子軸間角度依存性の概形を測る)

※測定の際は適切な装置設定(測定レンジ, 時定数など)としていることを確認し、条件を記録すること。

● _____

 (偏光子対を透過するレーザー光強度の偏光子軸間角度依存性をより細かく測る)

● _____

 (パラレルニコル下での透過光強度を測る)

●

(クロスニコル下での透過光強度を測る)

● パラレルニコル・クロスニコルにおける透過光量の比よりコントラスト比が算出できる。

検討課題

(※検討課題はレポート中でセクションを分けて書くのではなく、それぞれについて手順・結果・考察の中の適切な場所に記すこと。)

1. 本実験の目的は、出力が最低および最大となる検光子角度を実験的に求め、偏光子対のコントラスト比を調べることである。実施した実験手順を、箇条書きではない文章体で書き、適切と思われるところで段落分けし、その結果を述べよ。
2. 2枚の偏光子の間の角度を θ とすると、出力は θ にどのように依存するか実験結果より述べよ。依存性を数式によってモデル化し、結果に対してプロットした上で実験結果との一致度を議論せよ。指導書に示したジョーンズ行列を使った理論予測を用いてモデル化ができるとなお良い。
3. 本実験で用いた偏光子は吸収型のフィルム偏光子である。動作原理を調べて述べよ。本実験で用いたもの以外の偏光原理にどのようなものがあるか、調べた場合には述べるとなお良い。

3.3 液晶素子の電気光学効果の計測

実験原理の項で述べたように、液晶は異方性を持つため、液晶素子を透過する光は一般的に偏光状態を変える。クロスニコル配置の偏光子間に液晶素子を設置した場合には、入射光の偏光状態が液晶素子によって変わる結果、出射光量が増減する。ここで液晶素子に電圧を印加すると、分子の配向方向が変化し、偏光状態の変化の度合いも変化する。偏光状態の変化の度合いは印加電圧の大きさによって制御できるので、液晶素子は電圧に透過光量を制御できるスイッチとして応用できる。この動作原理を実験的に確認し、液晶素子の電気工学的特性を明らかにする。

● 前節の通り実験を行っていれば、光学レールには入射側から偏光子、アイリス、検光子、フォトディテクターが設置されている。アイリスと出射側偏光子の間に液晶素子を設置する。

※レポートでは実験で使う液晶素子のスケッチが求められているので、素子厚さと配向処理方向などを記録すること。

● 液晶素子を回転させると透過率が周期的に増減することを確認する。透過率が最小となる角度に合わせた後、角度を 45° 回転させ、透過率が最大となるようにする。最大の出力を確認する。

● 液晶素子に電圧印加用の配線をつなぐ。

※最終的な測定系における光学系および配線の図は実験レポートに含める必要があるため、配線などは記

録しておく。

(液晶素子の透過光強度の電圧依存性を調べる)

検討課題

(※検討課題はレポート中でセクションを分けて書くのではなく、それぞれについて手順・結果・考察の中の適切な場所に記すこと。)

1. 本実験の目的は、液晶に電圧を印加した際の透過率の変化の挙動を明らかにすることである。実施した実験手順を、箇条書きではない文章体で書き、適切と思われるところで段落分けし、その結果を述べよ。
2. 液晶分子の配向方向、電界印加方向、素子厚さ、光の進行方向が分かるように、用いた液晶素子のスケッチを描け。
3. 配線の変更などを手順にて記した後に、最終的な実験系のレイアウトを図示せよ。光学素子や装置等はそのまま書く必要なく、極めて単純化して構わない。
4. 本セクションではプログラム制御により測定を実施している。プログラムの制御(どの装置から何を読み取った、など分かるように)の流れを説明せよ。
5. 液晶素子の透過光強度対印加電圧グラフよりみられる、液晶素子の特徴について述べよ。
6. クロスニコルの間に設置された液晶素子の透過率は式(26)で表される。理論的に予想される透過率の最大値と、実験で得られた透過率の最大値は一致しているかどうか、述べよ(一致していない場合は差の大きさについて述べよ)。差がある場合、この差の要因について、述べよ。
7. 電圧を印加した時の Δn が0に近づくことから、電圧を印加していないときの液晶の Δn を求めよ。

4 参考情報

ロックインアンプのしくみ、フィルター関係

1. 遠坂俊昭「計測のためのフィルタ回路設計」
2. NF ホームページ、雑音に埋もれた信号の測定 <http://www.nfcorp.co.jp/keisoku/noise/>

液晶に関する文献

3. 吉野勝美, 尾崎雅則共著, 『液晶とディスプレイの基礎』, コロナ社(1994)

レポートのチェック項目

実験1

- | | | |
|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1. 検討課題の抜けはないか | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2. 実験データを適切な表と図で示しているか | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3. 考察が一文で終わってしまうことはないか | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

実験2

- | | | |
|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 4. 実験データを妥当に説明し得る理論的なモデル式を提案しているか | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 5. 予測される結果を実験データにあうようにプロットしているか | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 6. 具体的な残差を議論しているか | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

実験3

- | | | |
|---|--------------------------|--------------------------|
| 7. 液晶素子の具体的なサイズを書いているか | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 8. 配線をどのように変えたか、記述しているか | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 9. 測定の流れについて、どの計測器からデータを読み取っているか、分かるように書いているか | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 10. 適切なデータをグラフにプロットしているか | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

その他

- | | | |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 11. レポートを過去形で書いているか | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 12. 段落が一行で終わるなど、不自然な改行はないか | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 13. 数値について、記号と単位の間スペースが入っているか | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |