

平成 26 年度
卒業研究報告

研究題目

吸収分光法におけるフリンジノイズの低減

指導教員

由井四海

富山高等専門学校

電子情報工学科

松井智哉

平成 27 年 2 月 23 日提出

1	はじめに.....	4
2	従来の酸素濃度測定	5
2.1	ジルコニア式酸素濃度計	5
2.2	磁気式酸素濃度計	5
2.3	電極式酸素濃度計	6
2.4	蛍光式酸素濃度計	6
3	レーザー	7
3.1	原理	7
3.2	半導体レーザーの発光方法.....	8
3.3	半導体レーザーの種類.....	9
3.3.1	ファブリ・ペローダイオードレーザー.....	9
3.3.2	分布帰還型レーザー	9
3.3.3	外部共振器型ダイオードレーザー	9
4	1.5 μ m 帯レーザーの SHG 光による酸素吸収測定.....	10
4.1	理論	10
4.1.1	SHG	10
4.1.1.1	概要.....	11
4.1.1.2	原理.....	11
4.1.1.3	位相整合.....	12
4.1.1.4	疑似位相整合	13
4.1.1.5	PPLN.....	13
4.1.2	レーザー吸収分光法	14
4.1.2.1	概要.....	14
4.1.2.2	ランバート・ビアの法則	14
4.2	装置.....	16
4.2.1	機器.....	16
4.3	実験系.....	20
4.3.1	系の構成	20
4.4	酸素の吸収スペクトル	21
4.5	フリッジノイズの測定	22
5	薄膜による光の干渉	24
5.1	光の干渉とフリッジノイズ.....	24
5.2	反射スペクトルの計算	25
5.3	逐次的に多層膜干渉スペクトルを計算する方法	30
6	フリッジノイズの低減.....	31
7	まとめ	36

謝辭.....	37
参考文献	37

1 はじめに

近年、我々の生活は急速に発展し、とても豊かなものになってきている。またそれに伴い地球環境の悪化が大きな問題となっている。その中でも酸性雨や森林の減少などの地球温暖化問題は国際的な問題としてマスメディア等で大きく報じられ、人々の関心を集めている。地球温暖化の原因の多くは、二酸化炭素や窒素酸化物などの温室効果ガスによるものである。そのため、温室効果ガスを削減する対策が必要である。

二酸化炭素を高濃度で発生するごみ焼却炉などでは、燃焼排ガスのクリーン化や燃焼制御技術の開発が必要となってきている。そのために、正確かつリアルタイム性のある燃焼状態の把握が必要である。しかし、従来のガス計測方式ではリアルタイム性に課題があり、燃焼制御への適用は困難である。それに対し、半導体レーザーを光源とするレーザー吸収分光法を用いることでリアルタイム性の高いガス計測が実現できる。しかし、レーザーを用いると光路中で光が干渉し、フリッジノイズ（干渉ノイズ）が発生してしまう。フリッジノイズが発生することで検出限界が高くなる。

本研究では、レーザー吸収分光法において発生するフリッジノイズの特性、発生原理を理解し、その低減方法について考察した。

2 従来の酸素濃度測定

酸素濃度を計測するためには様々な手法が存在するものの、そのほとんどがサンプリングを有するものである。ここでは市販されている主な酸素濃度計のしくみと、利点・欠点について述べる。

2.1 ジルコニア式酸素濃度計

固体電解質であるジルコニアは、高温状態になると酸素イオンに対して誘電性を示す。ジルコニア素子の両面に多孔質の白金電極を貼り付けて加熱し、それぞれの面に酸素分圧の異なるガスを接触させると、酸素濃淡電池の作用を起こす。この反応によって両電極間に起電力が発生し、その大きさを測定することにより酸素濃度を測定する。

ジルコニア式酸素濃度計はボイラの煙道など、燃焼プロセス内に直接取り付けることができ、サンプリング装置が不要である。また、応答速度が速く比較的長寿命である。しかし、測定ガス中に可燃性ガスが含まれていると測定誤差になる。また、酸素との比較ガスが必要である。[1]

2.2 磁気式酸素濃度計

酸素は他の気体と異なり大きな磁化率をもつため、その性質を利用し測定ガス中の酸素

が磁界に引きつけられる。補助ガスとの流量比の差をサーミスタで検出することにより酸素濃度を測定する。

磁気式酸素濃度計はジルコニア式では測定できない可燃性ガスを含む混合ガスの測定ができる。また、検出部のセンサー部分は測定ガスに接しないため、腐食性ガスも測定できる。しかし、アプリケーションに対応したサンプリング装置が必要なため、他の方式に比べて高価である。

2.3 電極式酸素濃度計

陽極(卑金属)と陰極(貴金属)が接している電解液に隔膜を介して酸素を溶解させると、溶解した酸素量に比例した電流が発生する。隔膜を通過する酸素量は、測定ガスの酸素分圧に比例し、電流を測定することで酸素濃度測定を行う。

電極式酸素濃度計は検出部の小型化が可能なため、携帯性に優れている。また、他の方式に比べて比較的安価である。しかし、低寿命である。

2.4 蛍光式酸素濃度計

センサー内側の蛍光樹脂に青色 LED が照射されると蛍光樹脂が活性化し、元の状態(基底状態)に戻りながら赤色の光を発光する。酸素が存在すると赤色発光が酸素に阻害されてしだいに弱くなるため、酸素が多いほど赤色発光時間は短くなる。その性質を利用して、プ

ローブ内の受光部で赤色発光している時間により酸素濃度を測定する。蛍光式酸素濃度計は気体、液体を問わず連続して測定が可能である。また、光を用いるため非接触で測定することが可能である。また、部品の寿命が長く、校正やメンテナンスの手間がかからない。しかし、他の酸素濃度計よりも非常に高価である。

3 レーザー

ここでは本研究で使用したレーザーの原理および種類について説明する。本研究の酸素吸収測定には入手が容易な $1.5\ \mu\text{m}$ 帯の半導体レーザー[2]を用いた。

3.1 原理

レーザー媒質中に安定状態（基底状態）で存在する原子が、光などの外部からのエネルギーを吸収すると電子がいったん外側の軌道に飛び（励起状態）、一定時間後に光を放出して再び基底状態に戻る。放出される光の波長はレーザー媒質に含まれる原子の種類により異なる。

レーザー媒質に対する強力なエネルギー供給で励起状態の原子数が増え、基底状態の原子数を上回った状態を“反転分布状態”という。この状態で外から同じ周波数の光信号を送ると、励起状態の原子が連鎖反応を起こし、同一方向に向けて光を放出する。それによって

より強い光信号が得られる（光増幅）。

レーザー媒質を 2 枚のミラーで挟み込み、その間で光を往復させることによって光はさらに増幅する。増幅された光は片側の部分反射ミラーからレーザー光として取り出される。

3.2 半導体レーザーの発光方法

近赤外域半導体レーザーは主に CD や MD などの光記録媒体との情報の読み出し、書き込み用光源として市販されている。LD は、p-n 接合ダイオードからできている半導体素子である。ダイオードに順方向バイアスが印加されると、n 形領域からは電子、p 形領域からは正孔がそれぞれ活性領域に注入される。注入された電子と正孔が再結合して消滅する際に活性領域のバンドギャップエネルギーにほぼ相当する波長の発光が起こる。市販の LD の活性材料には一般的に GaAlAs 結晶などの直接遷移型半導体が用いられる。光共振器には、p-n 接合に垂直な 2 枚の反射鏡からなるファブリ・ペロー共振器で構成される。また、市販の LD では一般的にダブルヘテロ構造が用いられている。クラッド材料を活性材料より広いバンドギャップを持つ材料を選ぶことで、バンドギャップ差によって生じたエネルギー障壁のために電子・正孔は活性層内（ $\approx 0.1 \mu\text{m}$ ）に閉じ込められる。また、活性・クラッド材料間の屈折差から、光は増幅作用のある活性領域に導波される。これらの理由より、低閾値・高効率の発振が可能となる。

3.3 半導体レーザーの種類

3.3.1 ファブリ・ペローダイオードレーザー

ファセットミラーとなる結晶面を 2 枚対向させ、フィードバックをこれらの鏡で行わせてレーザー発振を起こす。出力する光信号の波長の幅が広く、構築費用が比較的低い。

3.3.2 分布帰還型レーザー

レーザーダイオード素子の内部に微細な回折格子を設けることにより特定の波長の光のみを反射させることができ、単一発振モードの条件も揃いやすいため、分光法の応用に適している。しかしながら、各波長で違う分布帰還型レーザーを必要とする。また、比較的高価な機器である。本研究で使用するレーザーである。

3.3.3 外部共振器型ダイオードレーザー

一般的なダイオードレーザーはマルチモードで発振しているが、複雑なレーザーシステムを用いることで単一モードにすることができる。実用的なレーザー分光法の応用のため、モードホップ無しでの単一モードの連続的な調整が必要となる。このレーザーシステムは科学的な応用に適している。[3]

4 1.5 μ m 帯レーザーの SHG 光による酸素吸収測定

本研究では、一般的な 1.5 μ m 帯レーザーを SHG (Second Harmonic Generation) [4]により 760nm 帯とし、酸素の吸収測定にはレーザー吸収分光法を用いた。レーザーによる酸素吸収測定には、次のような利点が挙げられる。

- ・追従性がよく、リアルタイムに測定可能
- ・その場測定可能
- ・広範囲を測定可能
- ・多点測定可能
- ・測定ガスと非接触で測定可能
- ・メンテナンスが簡単

4.1 理論

4.1.1 SHG

SHG の概要および理論について述べる。

4.1.1.1 概要

SHGとは、2個の光子が2倍の振動数をもつ1個の光子に変換される二次の非線形光学現象である。光の波長は周波数の逆数なので、入射した光の半分の波長の光が発生する。つまり、SHGを用いることにより赤外光から可視光へ光子の変換することができる。今回、SHG光を発生させるためPPLNを使用して作成された波長変換器を使用した。

4.1.1.2 原理

光は物質に生じる双極子の振動により発生する。物質に電場 E を与えると電場の大きさによって、次の展開式で表されるような電気分極 P をもった双極子が発生する。

$$P = \chi^{(1)}E + \chi^{(2)}E^2 + \chi^{(3)}E^3 + \dots \quad (4.1.1)$$

ここで $\chi^{(n)}$ は n 次の電気感受率である。物質に光を照射すると物質には以下のような電場 E がかかることになる。

$$E = E_0 \cos \omega t \quad (4.1.2)$$

ここで、 ω は周波数である。式(4.1.1)の二次の項を考えると

$$P^{(2)} = \chi^{(2)}E^2 = \frac{1}{2}\chi^{(2)}E_0^2(1 + \cos 2\omega t) \quad (4.1.3)$$

ここに見られるように、 $\chi^{(2)} \neq 0$ である媒質では照射した光の2倍の周波数をもった光が発生する。等方性の媒体では、二次高調波発生はおこらない。

4.1.1.3 位相整合

強い二次高調波を得るためには入射された光と、発生した二次高調波の位相が媒質中の光路で揃っていないといけない。このことを位相整合という。位相整合条件は、二つの光の位相速度が一致することであり、その条件は二次高調波の波数 k_1 、入射光の波数 k_2 とすると次のように書かれる。

$$k_1 = 2k_2 \quad (4.1.4)$$

光の波数 k は真空での波長 λ_0 と屈折率 n を用いれば $k = 2\pi n/\lambda_0$ で表される。また、 $\frac{1}{2}\lambda_{02} = \lambda_{01}$ なので、位相整合条件は $n_1 = n_2$ となる。

一般的に媒体の屈折率は波長依存性をもつので、等方的な媒体（気体など）では二次高調波は発生しない。一方、異方的な媒体（光学軸をもった結晶）では複屈折により、媒体内に常光線(ordinary ray)と異常光線(extraordinary ray)の2つの異なる偏光の光が発生する。この2つの光線は異なる屈折率をもつ。入射光の光学軸に対する角度を変えることによって、2つの波長での屈折率を位相整合条件に一致させることができる。

常光線と異常光線はそれぞれ屈折率が異なるので波長が等しくても波数は異なる。

式(4.4)を書き直せば

$$k_1 = k_{2_0} + k_{2_e} \quad (4.1.5)$$

$$\frac{n_1}{\lambda_{01}} = \frac{n_{2_0}}{\lambda_{02}} + \frac{n_{2_e}}{\lambda_{02}} \quad (4.1.6)$$

といった位相整合条件も存在する。

4.1.1.4 疑似位相整合

非線形光学結晶による二次高調波発生において、屈折率が波長によって異なることによって光電界（基本波）と二次高調波の伝搬速度が異なる結果、結晶内で発生した二次高調波は同じ位相にならない。ある程度の距離までは二次高調波の振幅は大きくなるが、その距離を過ぎると減少することになる。しかし減少が始まる点において、その点における分極を逆転させることで同じ位相にすることができる。

非線形分極すなわち非線形光学定数の符号を反転させるには、コヒーレンス長の長さのブロックを作り、強誘電体としての分極を反転させた構造を作ることで実現できる。疑似位相整合を利用することで、複屈折などの自然に任せた制限を受けることなく、結晶の持つ非線形光学特性を最大限に利用することが可能となる。[4]

4.1.1.5 PPLN

PPLN(周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶)[4]は、半導体レーザーがカバーしにくい波長470nm から 600nm のレーザー光を、その倍の波長である 940nm から 1200nm の光から直接生成できる波長変換デバイスである。

近年、低価格の緑や青の可視光源がバイオセンシングなどの蛍光測定に必要とされている。特にナノ秒パルスの変調を簡単に行うことができれば、蛍光寿命測定などにも応用可能

である。こうしたパルスの緑・青光源はこれまで高価な固体レーザーが利用されてきたが、このデバイスを利用することで非常にコストパフォーマンスの高い分光光源として利用できる。また、このデバイスは波長が調整でき、かつ多色化も光パラメトリック発振器との融合で可能であるため、多色化もモノリシックなデバイス上で実現可能である。一方画像アプリケーションについても、同様の小型レーザーディスプレイやフルカラーホログラフィーなどでの応用展開を図ることができる。

4.1.2 レーザー吸収分光法

レーザー吸収分光法の概要および理論について述べる。

4.1.2.1 概要

単色光が吸収媒体を通過するとき、光の強度は減衰する。この原理を応用し吸収媒体を透過する光の減衰量を計測することにより、吸収媒体の量を求めることが可能である。酸素は760nm 付近の近赤外領域に吸収領域があり、これらの波長域を利用することにより酸素濃度の計測が可能となる。

4.1.2.2 ランバート・ビアの法則

ランバート・ビアの法則[5]は紫外可視、赤外、近赤外といった多くの波長領域において

有用である。ここで透過率 T と吸収率 A を定義する。図4.2に示すような長さ l cm のセルに光を入射した場合を考える。セルの入射位置における強度を I_0 、セルを透過した後の強度を I_t とする。このときの透過強度 T は

$$T = \frac{I_t}{I_0} \quad (4.2.1)$$

となる。つまり透過率 T は、入射光の強度に対する透過光の強度の比である。一方で、吸収率 A は、入射光の強度に対する吸収された光の強度 I_a の比

$$A = \frac{I_a}{I_0} \quad (4.2.2)$$

と定義する。また、セルは光を散乱せず、非蛍光性であると仮定すると

$$I_0 = I_a + I_t \quad (4.2.3)$$

が成立する。したがってこの場合は

$$A + T = 1 \quad (4.2.4)$$

となる。

次に入射光の減衰を数式で示す。セル内の入射光が入射位置からの距離 x から $x + dx$ まで進んだとすると透過強度は I から $I - dI$ まで減衰すると仮定する。このときの減衰強度 dI は、入射光強度 I 、試料の濃度 c (mol dm^{-3})、距離 dx に依存する。

$$-dI = \varepsilon^* I c dx \quad (4.2.5)$$

ここで ε^* は比例定数である。式(4.2.5)を長さ 0 から l まで定積分すると

$$-\int_{I_0}^{I_t} \frac{dI}{I} = \varepsilon^* c \int_0^l dx \quad (4.2.6)$$

よって

$$I_t = I_0 e^{-cl\varepsilon^*} \quad (4.2.7)$$

が得られる。

式(4.2.7)は光の強度が指数関数的に減衰することを示し、これをランバート・ビアの法則と

いう。

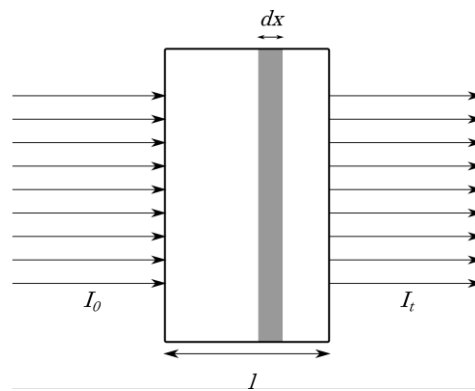


図 4.2 透明体における入出射光

4.2 装置

本研究で使用した機器および実験装置の構成について述べる。

4.2.1 機器

本研究で使用した機器について述べる。

半導体レーザー

製品名	DFBレーザー
製造元	NTT Electronics
型番	NLK1S5GAAA
波長範囲	1460-1530nm
出力	20mW
線幅	12MHz以下

フォトディテクタ

製品名	Si トランスインプीडダンス増幅フォトディテクタ
製造元	THORLABS
型番	PDA36A-EC
帯域幅	10MHz
波長範囲	350~1100nm

温度コントローラ

製品名	ペルチェモジュール用高集積温度コントローラ
製造元	maxim integrated

型番 MAX1978

PPLN

製品名 可視光発生用 SHG モジュール

製造元 NTT Electronics

型番 WH-0760-000-F-B-C

変換効率 339%/W

発振器

製品名 ファンクションジェネレータキット<miniDDS>

製造元 JYE Tech Ltd

型番 FG085

DAQ(Data AcQuisition)

製品名 NI6341

製造元 NATIONAL INSTRUMENTS

型番 370786D-0112

サンプリングレート 500kS/s

ビット数 16bits

窓板(1)

製造元 Edmund Optics

型番 45076

厚さ 4.2mm

屈折率 1.51

熱膨張係数 $7.6 \times 10^{-6}[\text{K}^{-1}]$

材質 BK7

窓板(2)

製造元 Edmund Optics

型番 45640

厚さ 2.2mm

屈折率 1.51

熱膨張係数 $9.4 \times 10^{-6}[\text{K}^{-1}]$

材質 B270

以後、窓板(1)を BK7、窓板(2)を B270 と呼ぶ。

4.3 実験系

本研究の実験系は主に半導体レーザー、波長変換器、フォトダイオードから構成される。

実験系を図 4.4 に示す。

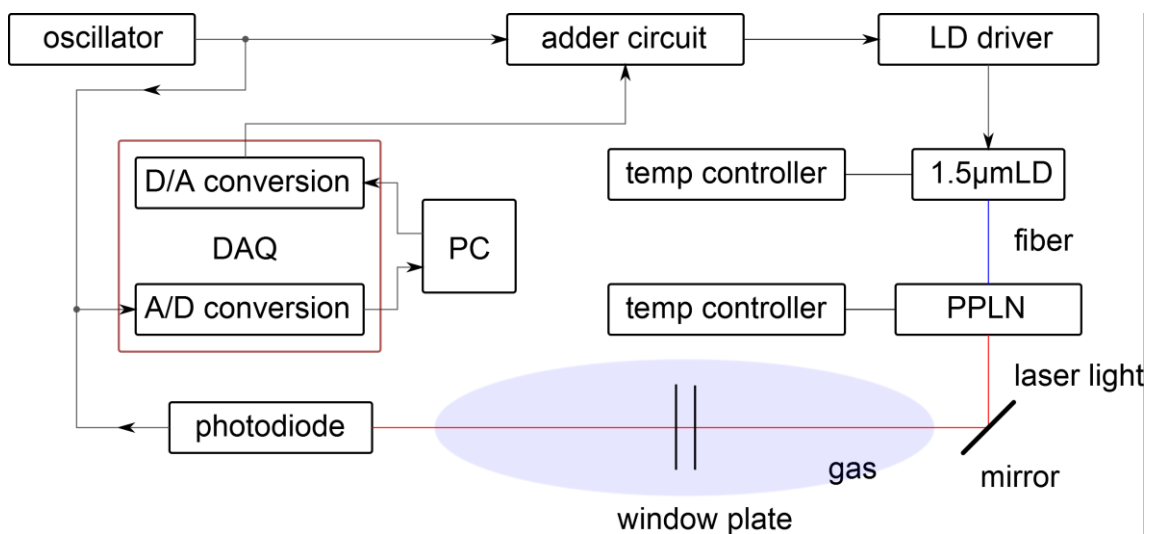


図 4.4 実験系

4.3.1 系の構成

発振器から出力される $5\text{kHz}, 250\text{mVp-p}$ の正弦波電圧信号と PC から DAQ(Data Acquisition)と通して出力される $2.5\sim 5\text{V}$ の直流電圧信号が加算回路により加算され、LD ドライバが電圧信号を電流信号に変換する ($1\text{V}/20\text{mA}$)。レーザーの波長は入力される電流の大きさに比例する。よってレーザーの波長は PPLN を通って $760.3\sim 760.5\text{nm}$ となる。酸素は約 760.4nm の光を吸収し、フォトディテクタが光強度を検出することで酸素の吸収ス

ペクトルを測定することができる。光路中に窓板を入れた場合と入れていない場合において測定をおこなう。

4.4 酸素の吸収スペクトル

実験系の窓板が入っていない場合において測定をおこなった。その結果を図 4.4 に示す。

グラフの横軸は約 394.5THz を基準とした周波数の変化量を表している。この実験系において横軸 50 付近で酸素の吸収スペクトルは計測できており、系が正常に動作することを確認できた。酸素の吸収のほかに、一定の周期をもったノイズが見られる。これは一定の周期をもっていることからフリンジノイズであると思われる。

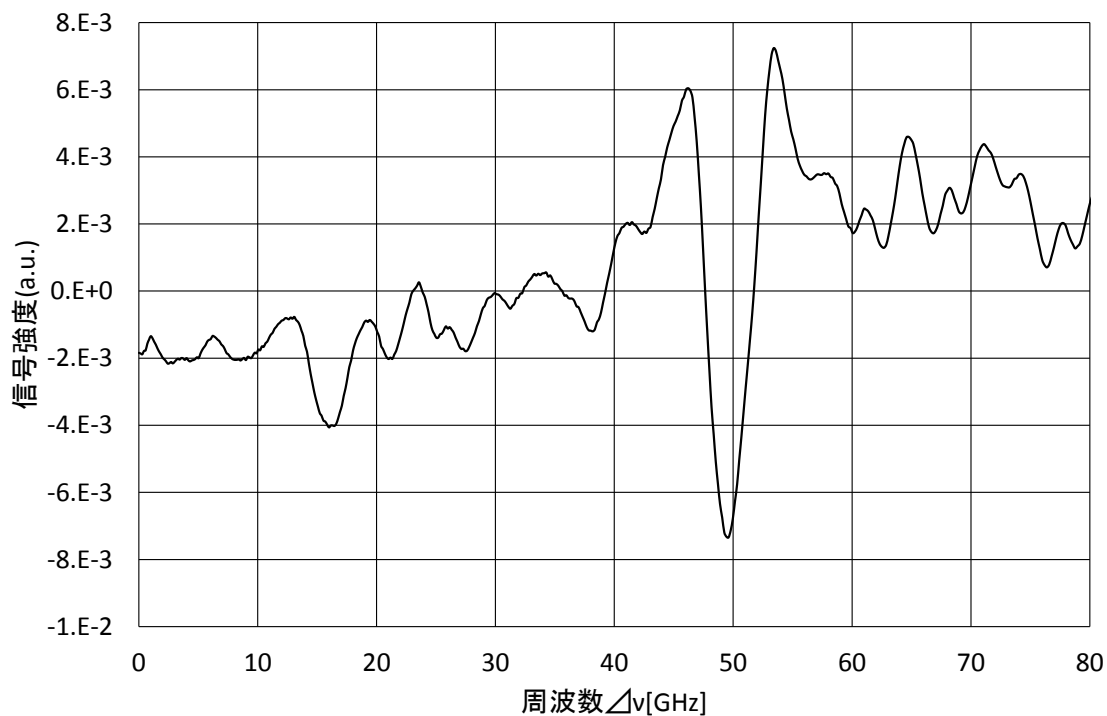


図 4.4 酸素の吸収スペクトル

4.5 フリンジノイズの測定

実験系の窓板が入っている場合において測定をおこない、窓板が入っていない場合のグラフと比較する。その結果を図 4.5.1 に示す。窓板無のグラフに大きな波が加算されているように見える。窓板を入れたことによって変化した部分のみを抽出するために、窓板有と窓板無の差を求め、その結果を図 4.5.2 に示す。なお、窓板は 2 種類使用した。

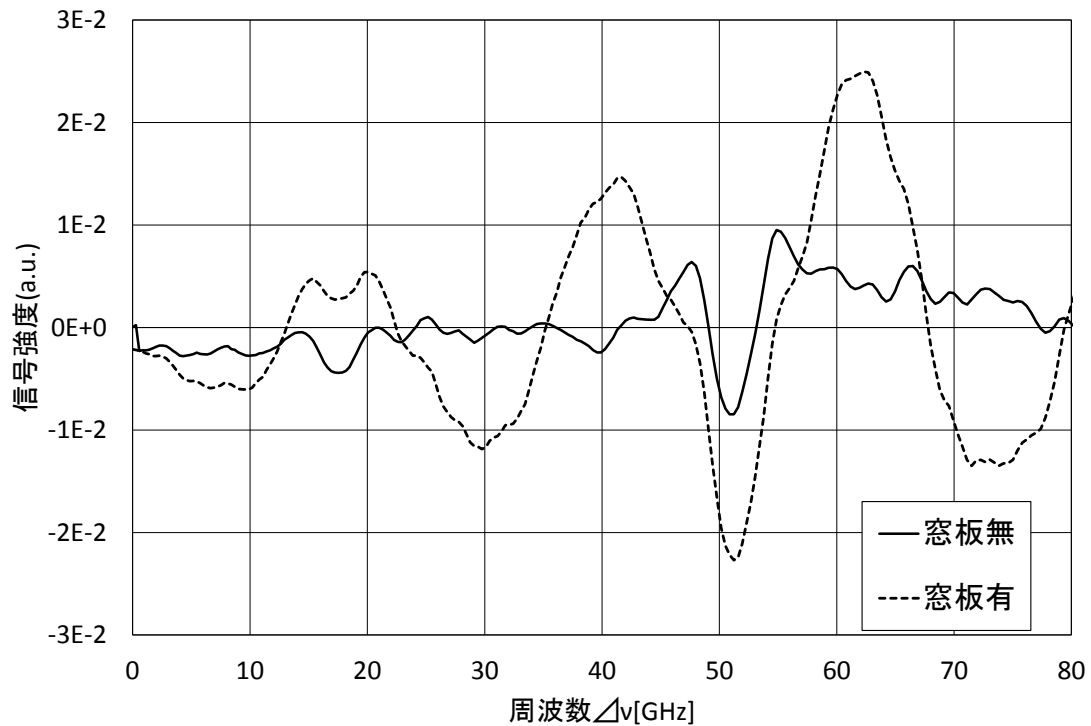


図 4.5.1 窓板有無比較

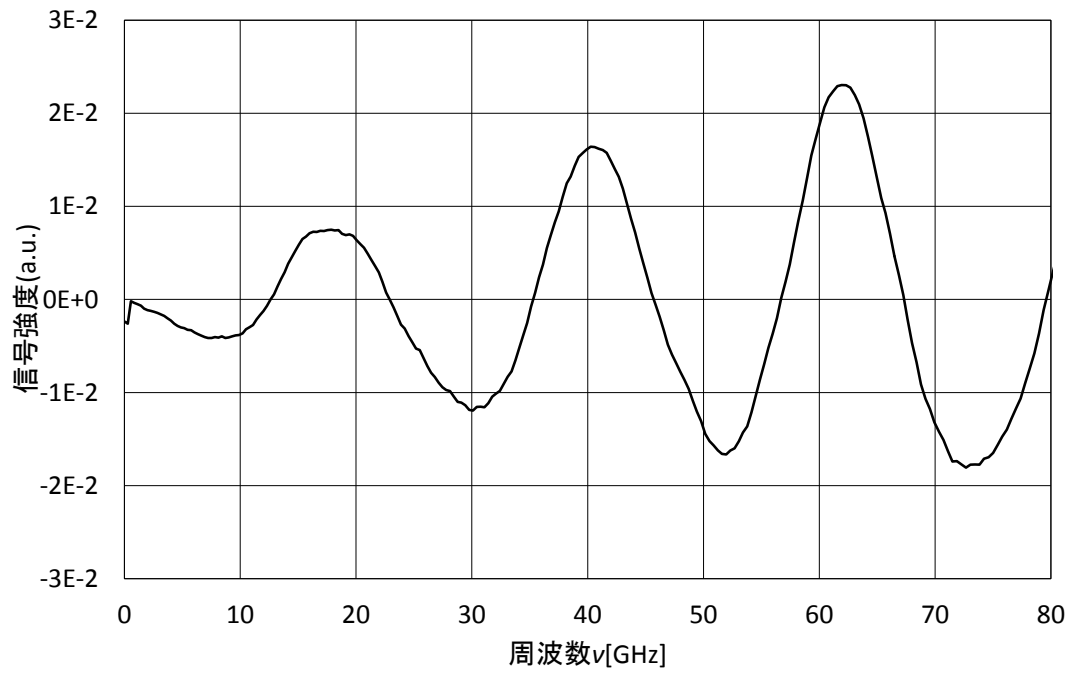


図 4.5.2 窓板有無差(BK7)

窓板を変えて同じ実験を行った。結果を図 4.5.3 に示す。

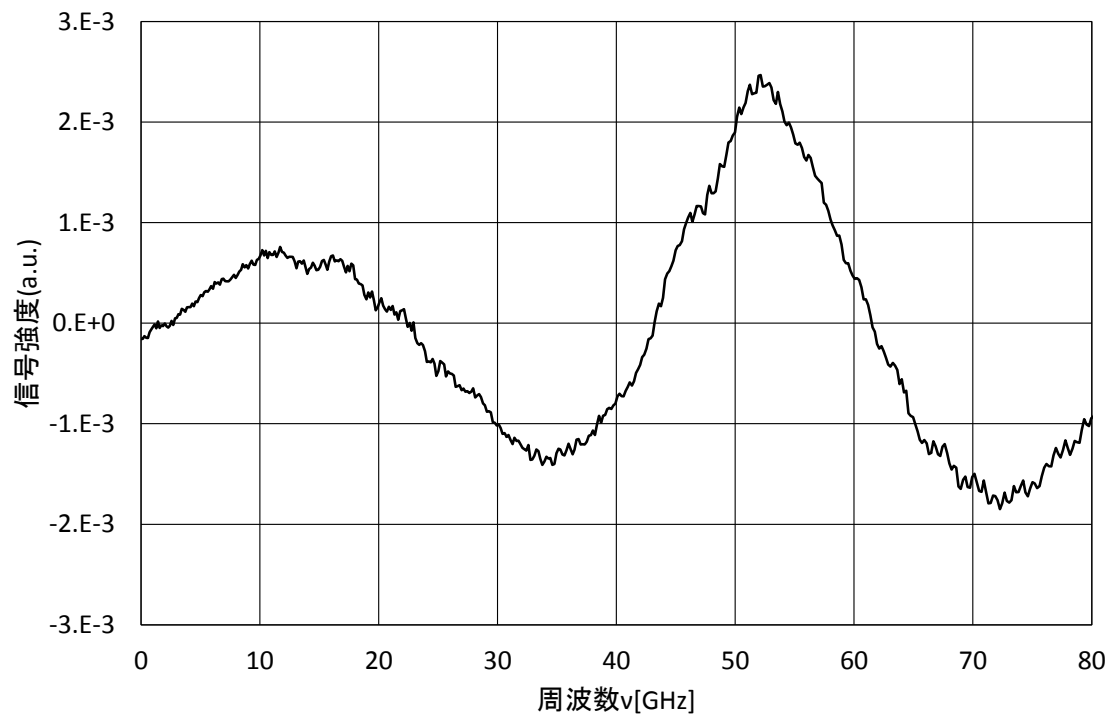


図 4.5.3 窓板有無差(B270)

5 薄膜による光の干渉

ここでは薄膜による光の干渉の原理と、薄膜を通る光の透過率の理論値の導出について説明する。

5.1 光の干渉とフリッジノイズ

光には波としての性質と、粒子としての性質が備わっている。干渉とは光の波動性による

現象のひとつで、同じ波長の光が 2 つ以上存在しているときに、位相のずれによって光の振幅に影響を与える。例えば、図 5.1 のように互いに同位相の場合は強めあい、互いに逆位相の場合は弱めあう。フリッジノイズはこのような光が干渉することで発生する。

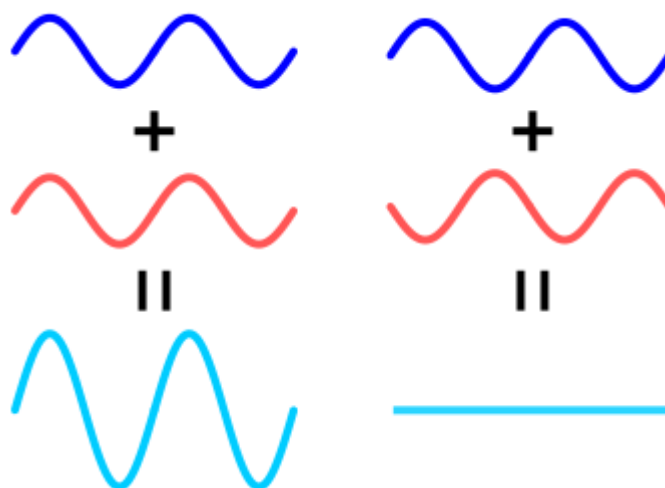


図 5.1 光の干渉の例

5.2 反射スペクトルの計算

図 5.2 のように領域を三つに分けられる場合において、そのときの反射スペクトルを計算する。三つの領域の屈折率を n_1 、 n_2 、 n_3 、入射角を θ_1 、ガラス中の屈折角を θ_2 とあらわす。

はスネルの法則 ($n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$) より計算できる。

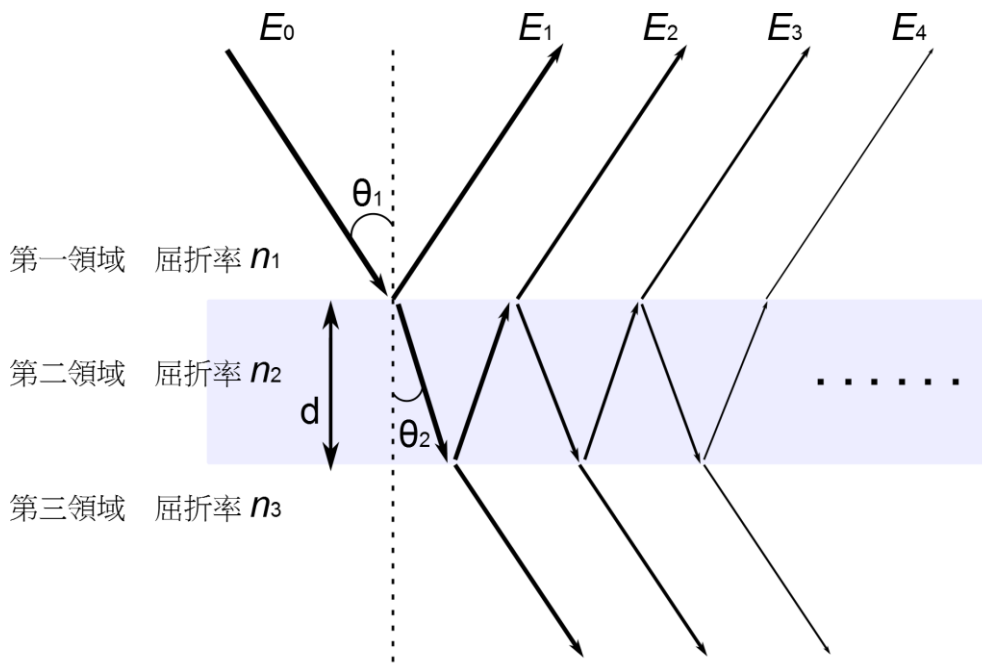


図 5.2 薄膜干渉の模式図

反射した光の電場 E は、多重反射を考慮して次式のように無限級数で書き表すことができる。ここで、 E_0 は入射光の電場を表す。

$$\begin{aligned}
 E &= E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \dots \\
 &= E_0 (r_{12} + t_{12} t_{21} r_{23} e^{i\Delta} + t_{12} t_{21} r_{23}^2 r_{21} e^{2i\Delta} + t_{12} t_{21} r_{23}^3 r_{21}^2 e^{3i\Delta} + \dots) \\
 &= E_0 (r_{12} + t_{12} t_{21} r_{23} e^{i\Delta} (1 + r_{23} r_{21} e^{i\Delta} + r_{23}^2 r_{21}^2 e^{2i\Delta} + \dots)) \\
 &= E_0 \left(r_{12} + t_{12} t_{21} r_{23} e^{i\Delta} \frac{1}{1 - r_{23} r_{21} e^{i\Delta}} \right) \tag{5.1}
 \end{aligned}$$

ここで Δ は第二領域を V 字型に往復したときの位相差で、光の波長 λ 、周波数 ν を用いて次式で与えられる。

$$\Delta = \frac{4\pi n_2 d \cos \theta_2}{\lambda} = \frac{4\pi n_2 d \cos \theta_2}{c} \nu \tag{5.2}$$

振幅反射率 r_{12} や r_{21} 、振幅透過率 t_{12} などは、次に示すフレネルの公式によって計算される。

二つの添え字は、二つの媒質のどちら側から入射するかを表し、 r_{12} 、 r_{21} のように両者を区別していることに注意。フレネルの公式は電磁場に境界条件をかすことによって得られるが、光の偏光（偏光面と反射面が垂直か平行かでS波、P波と区別する）に依存して、屈折率と屈折角を用いて次のように書くことができる。

S波

$$r_{12} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}$$

$$t_{12} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}$$

P波

$$r_{12} = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2}$$

$$t_{12} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2}$$

フレネルの公式は座標系の取り方によって符号が異なる場合があるが、ここでは光学の教科書「ヘクト光学」(Eugene Hecht 著、尾崎義治・朝倉利光訳、丸善)に従っている。(この方法では、入射角が 0° のとき、S波とP波で反射係数の符号が逆になる。)以下の計算では特に偏光を示さないが、対応したフレネルの係数を用いるだけで、偏光依存性を計算できる。太陽光などの無偏光な光に対する反射率は、二つの偏光について計算結果を平均すればよい。

後の計算の見通しをよくするため、さらに振幅反射率 r の計算を進めると、

$$\begin{aligned} r &\equiv \frac{E}{E_0} \\ &= r_{12} + t_{12} t_{21} r_{23} e^{i\Delta} \frac{1}{1 - r_{23} r_{21} e^{i\Delta}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{r_{12} - r_{12}r_{23}r_{21}e^{i\Delta} + (1 - r_{12}^2)r_{23}e^{i\Delta}}{1 - r_{23}r_{21}e^{i\Delta}} \\
&= \frac{r_{12} + r_{23}e^{i\Delta}}{1 + r_{23}r_{12}e^{i\Delta}} \tag{5.3}
\end{aligned}$$

(5.3)のように簡略化される。上の式変形中では、 $r_{21} = -r_{12}$ 、 $t_{21}t_{12} + r_{12}^2 = 1$ を用いた。最初の関係はフレネルの公式から明らかで、二つ目の関係式も下の計算からすぐにわかる。(S波の場合のみ示す)

$$\begin{aligned}
t_{21}t_{12} &= \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \frac{2n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \\
&= \frac{4n_1 n_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2}{(n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2)^2} \tag{5.4}
\end{aligned}$$

$$r_{12}^2 = \left(\frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \right)^2 \tag{5.5}$$

式を(5.3)のように書き直したポイントは、全体の反射率が上側と下側の二つの境界面での振幅反射率のみで表され、またどちらの反射率も、上の層から下の層へ光が入射する場合の係数になっていることである。エネルギー反射率 R は(5.3)式の絶対値二乗をとって、

$$R = |r|^2 \tag{5.6}$$

で与えられる。 R を Δ 中に含まれる ν の関数としてプロットすると反射スペクトルが得られ、 $1 - R$ を求めることで透過スペクトルが得られる。

本研究では、 $n_1 = 1, n_2 = 1.51, n_3 = 1, d = 4.2\text{mm}, \theta_1 = 0^\circ$ で実験を行うので、その場合

の透過スペクトルをこれまでの式より計算した。その結果を図 5.3 に示す。

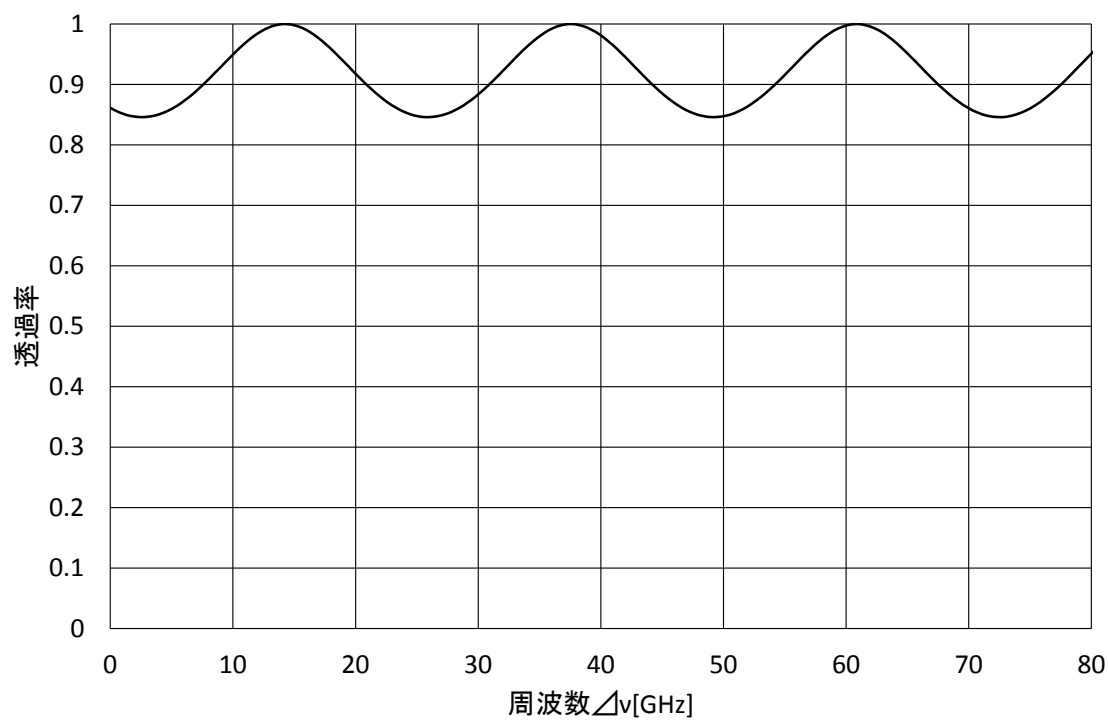


図 5.3.1 透過スペクトル(窓板 1 枚 BK7 4.2mm)

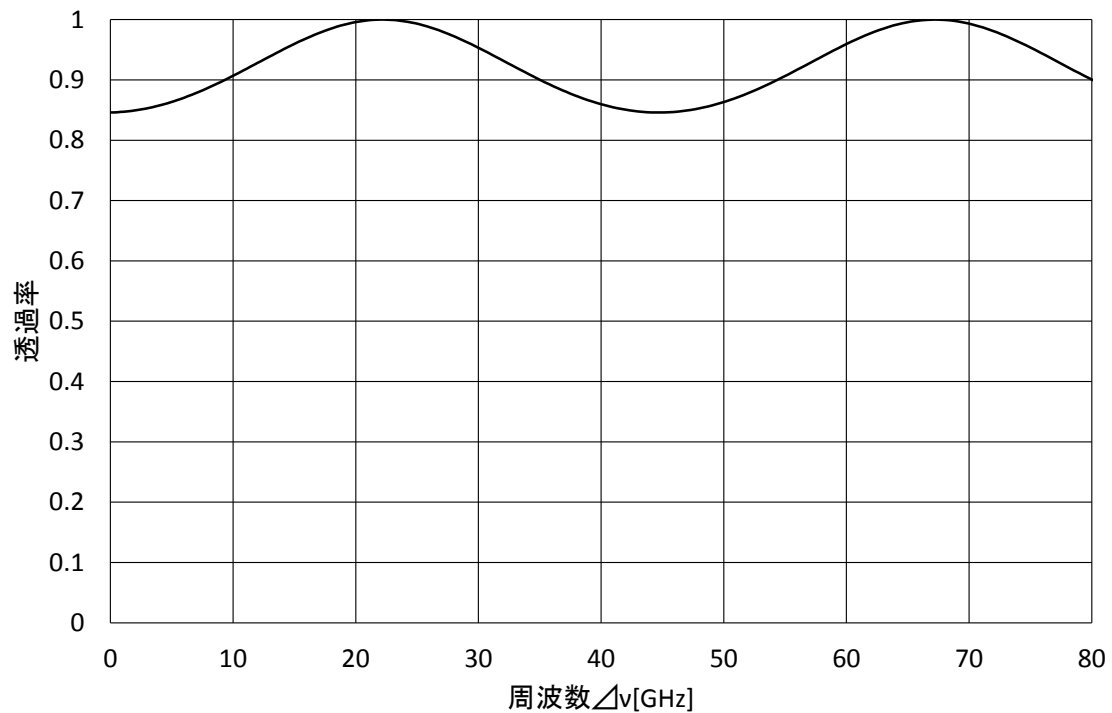


図 5.3.2 透過スペクトル(窓板 1 枚 B270 2.2mm)

本研究で扱っている光源の周波数領域が約 394.5THz～394.4THz なので、394.5THz を基準に変化量 $\Delta\nu$ [GHz]を横軸とした。

図 5.3.1 と図 4.5.2、図 5.3.2 と図 4.5.3 を見比べてみると、出力波形の周期がほぼ一致している。よって、窓板を入れることによってフリッジノイズが発生したと言える。

5.3 逐次的に多層膜干渉スペクトルを計算する方法

薄膜干渉スペクトルを与える①を繰り返し用いることで、多層膜干渉スペクトルを計算することができる。考えとして、第 3 層を抜けた光が、次の入射光として同じように計算す

る。窓板が2枚のとき（5層）の場合の透過スペクトルは図5.4のようになった。

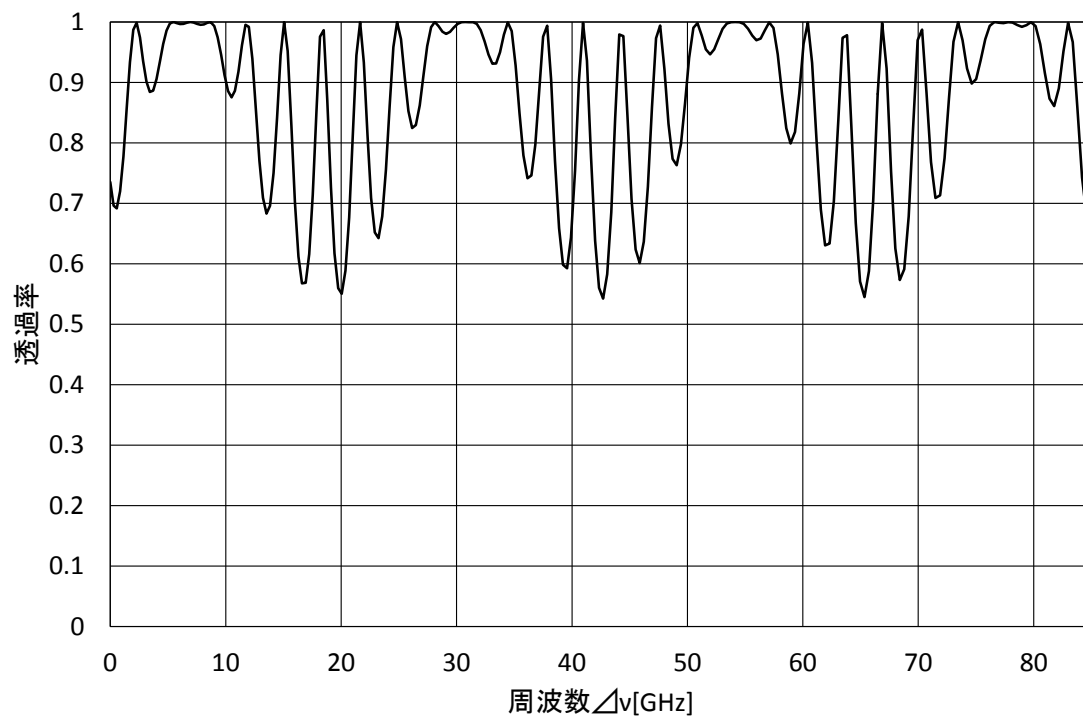


図 5.4 透過スペクトル(窓板2枚)

層の数が増えてもこの考えを繰り返し用いることで対応することができる。図5.4のように反射面の数が増えるとフリッジノイズは複雑になる。

6 フリッジノイズの低減

実験で発生させたフリッジノイズを低減させる方法を考える。

窓板に角度をつけてフリッジノイズを測定することによって、反射面と反射面の間隔を変化させてみた。実験に用いた窓板の厚さは 4.2mm なので、窓板を θ °ずらすと図 6.1 より以下の式が与えられる。 L は光路長を示す。

$$L = \frac{4.2}{\cos \theta} [\text{mm}] \quad (6.1)$$

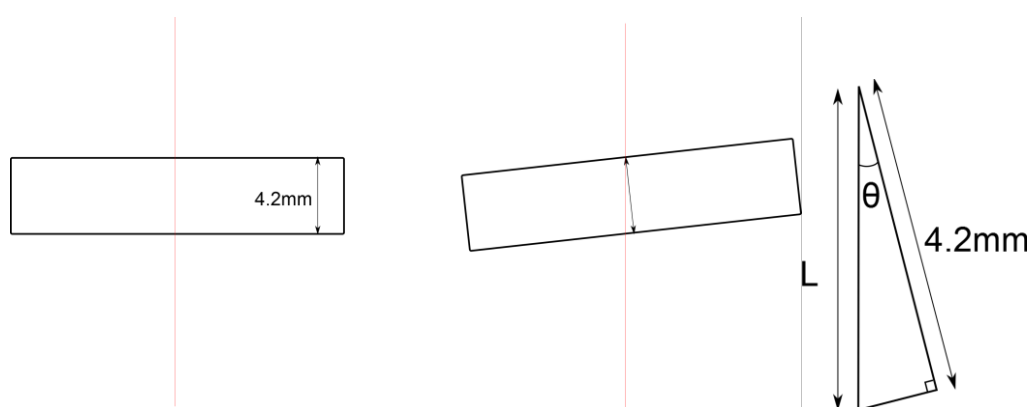


図 6.1 窓板の角度と光路長

実験の結果は下図のようになった。図 6.2 は様々な角度で窓板光路中に入れた場合のフォトダイオードの出力信号をグラフ化したもので、図 6.3 は図 6.2 から窓板無のデータを引き算し、窓板の影響のみを示している。この結果から、酸素の吸収スペクトルはどのグラフも同じ位置にあるが、フリッジノイズは角度をつけることによって変化することが分かる。

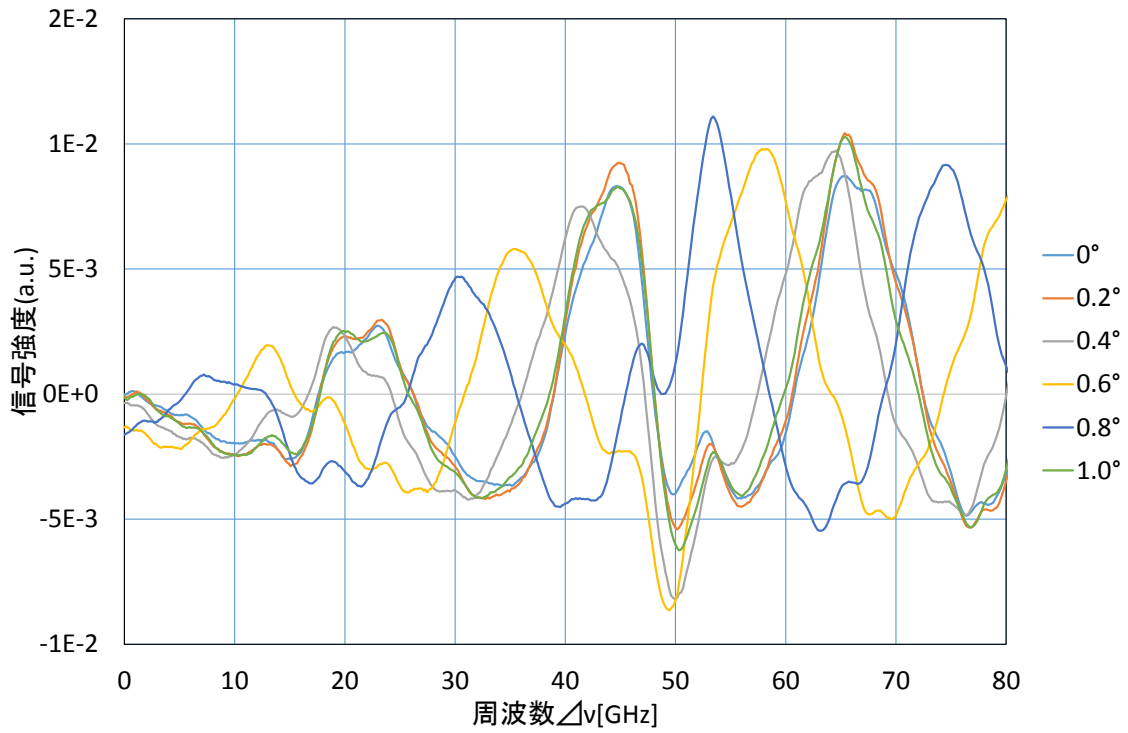


図 6.2 出力結果の比較 (生データ)

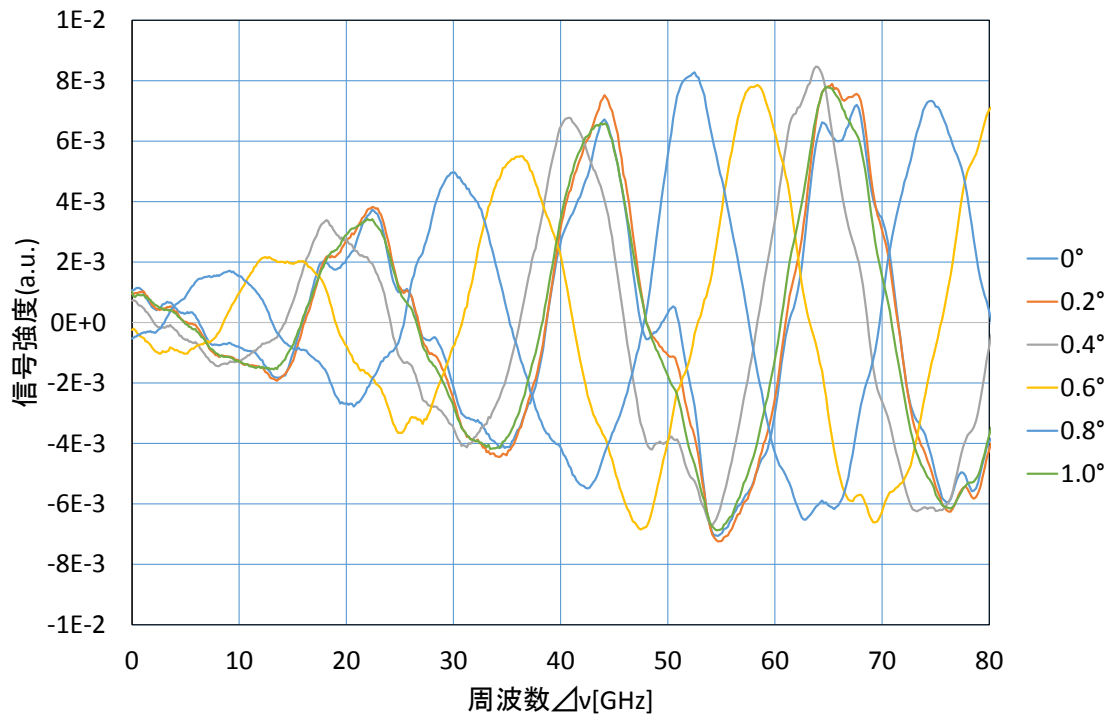


図 6.3 出力結果の比較 (窓板による影響)

次に、なぜ窓板に角度をつけることによってフリンジノイズの位相が変化したのかを考える。

$\theta=0$ のとき、自由スペクトル領域 (FSR:free spectral range) は

$$FSR = \frac{c}{2nL} \approx 23.6[\text{GHz}]$$

である。

同様に、窓板を 1° 傾けると光路長は $L = 4.20064\text{mm}$ となる。そのときの FSR は以下のようになる。

$$FSR' \approx 23.6\text{GHz} - 4\text{MHz}$$

このモードは周波数軸上に無数に存在する。しかし、この中で実際に使用される波長領域は 760nm である。この領域にあるモードの番号 (n) は、約 $17000(= \nu/FSR)$ である。この n 番目のモードに着目すると、反射面間隔が変化することによって次式で示されるだけ周波数がずれる。

$$\Delta\nu = n \times (FSR' - FSR) = -61\text{GHz}$$

図 6.4 に簡単な図を示す。反射面間隔が変化する前を上、に変化した後を下に示している。

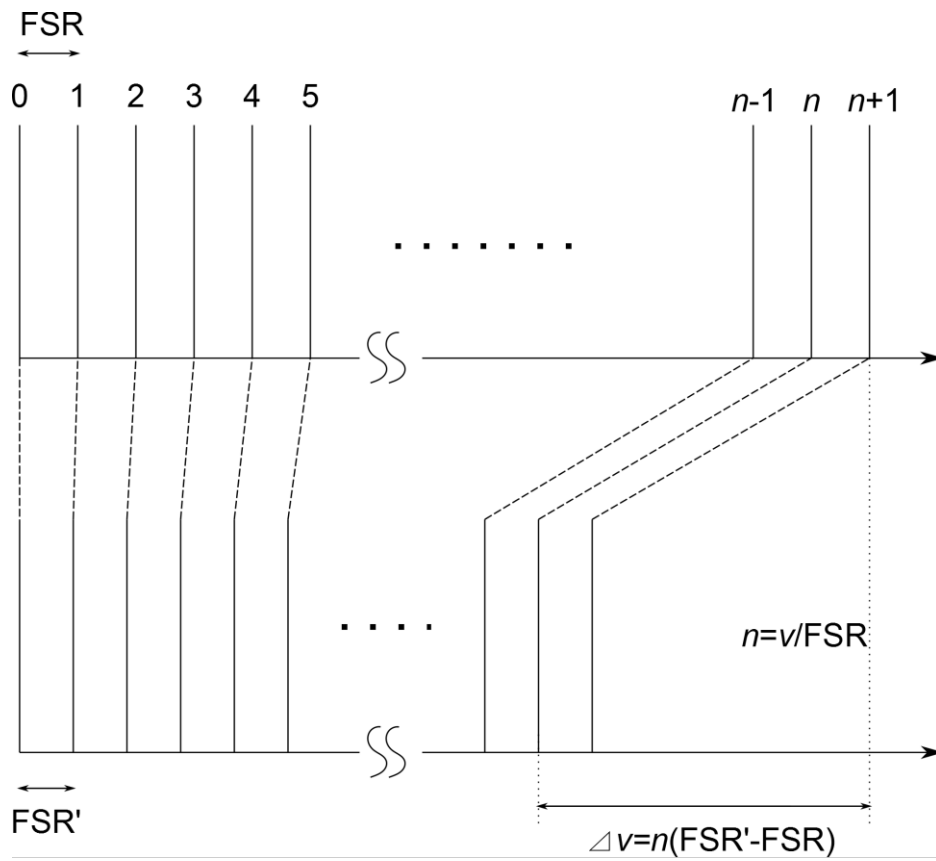


図 6.4 モード掃引

この理論によってフリッジノイズの位相を逆相にし、その2つを足し合わせることでフリッジノイズは消えるのではないかと考えた。ここで、図 6.3 を見てみると、 0.2° のグラフと 0.8° のグラフはノイズの位相が逆の関係になっている。この2つを足し合わせたグラフと窓板無のグラフを比較した結果を図 6.5 に示す。窓板を光路中に入れることによって発生したフリッジノイズは除去されていることがわかる。

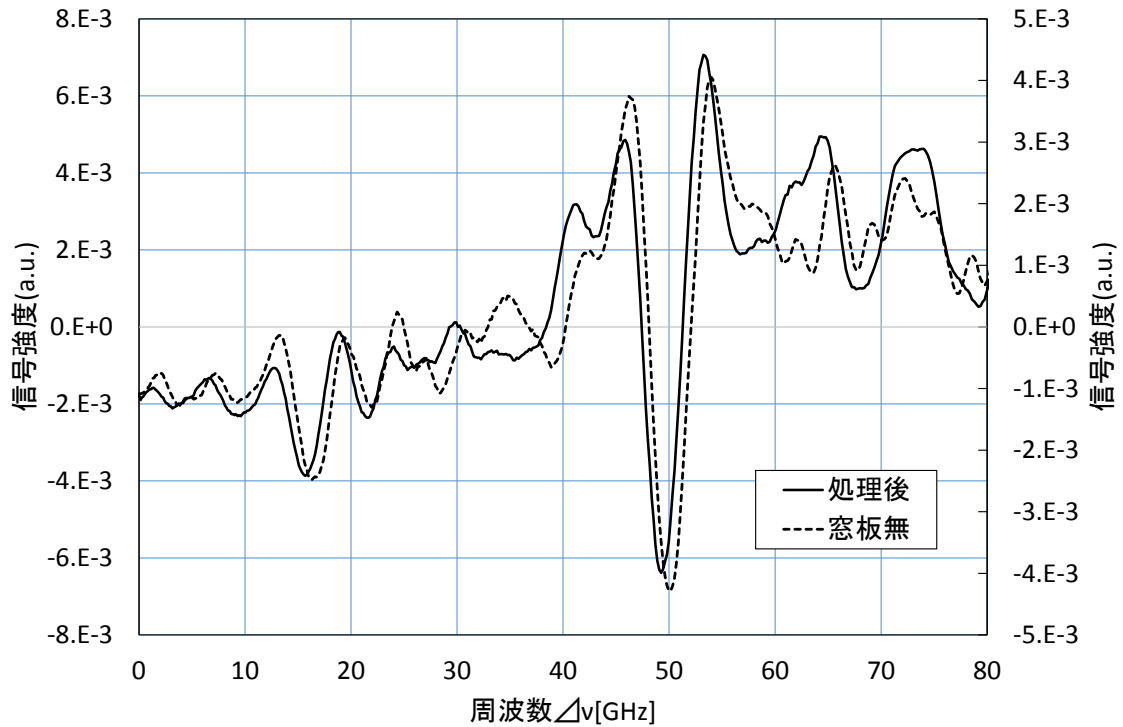


図 6.5 窓板を入れない場合の出力結果と処理後の結果

7.まとめ

光源として、汎用性の高い光通信用 DFB レーザーと導波路型 PPLN モジュールを組み合わせたものを使用し、酸素ガスを計測するシステムを作成した。光路中に窓板を入れることによって疑似的にフリッジノイズを発生させることができた。フリッジノイズの発生源である窓板に角度をつけることにより、フリッジノイズの位相を変化させることができ、疑似的に発生させたフリッジノイズを低減させることができた。

今後は今回の実験を踏まえて、実際のフリッジノイズに対しても同様の手法が適用する

ことができるのか検討する。

謝辞

本研究を通して 1 年間ご指導ならびに様々な経験をする機会を与えていただきました。国立高等専門学校、由井四海教授に尽きせぬ深謝の念を捧げます。

参考文献

- [1]. 由井四海, 水本巖, 久世宏明, 光通信デバイスを利用した酸素ガス計測システムの開発, 電気学会論文誌 C, Vol. 134 No. 11, 2014
- [2]. 栖原敏明 (著) . 半導体レーザーの基礎. 共立出版, 1998.
- [3]. 清水忠雄 (監) . レーザー入門. 森北出版, 1989.
- [4]. 黒澤宏 (著) . 入門まるわかり非線形光学. オプトロニクス社, 2008.
- [5]. 尾崎幸洋・河田聡 (編) . 近赤外分光法. 学会出版センター, 1996.