

1997年度後期 特別実験 II  
「レーザーダイオードの出力光の強度安定化」

学生証番号 ; s61528  
氏名 ; 杉保昌彦

共同実験者氏名 ; 松尾友和  
レポート提出日 ; 1998年2月16日

## 1 実験の目的

レーザーダイオードを He-Ne レーザーの代わりとして使用したいので、レーザーダイオードからの出力光の強度を安定化させたい。レーザーダイオードを使う利点は、

- レーザーダイオードに流れる電流の安定化による制御 (電流制御)

による安定化が期待でき、安定化のために出力光を無駄にしなくてすむことである。また、実験に用いたレーザーダイオードでは、内蔵されたフォトダイオードによって新たに出力光を使わずに、

- レーザーダイオードからの出力光のフィードバックによる制御 (パワー制御)

を行うことができる。そこで、実際に電流制御とパワー制御を行って、レーザーダイオードの出力光の強度安定化ができるかどうかを調べる。

## 2 実験で使用するレーザーダイオードの基本特性

実験に用いたレーザーダイオードは三洋の DL-3038-011 で、発振波長 635nm でシングルモードであり、He-Ne レーザーの波長 633nm に近い。また、連続動作出力 5mW, 発振電流 数十 mA であり、内蔵された PIN 受光素子で出力光の一部を検出して出力する部分がセットになっているものである。それを図 1 に示した DL-3038-011 の模式図のフォトダイオードから出力するようになっている。レーザーダイオードは、高温では信頼性が低下するので、真鍮製の放熱板を使い図 1 のようにして固定する。さらに、レーザーダイオードの出力光は広がってしまうので非球面レンズを使って平行光にし、直径 1cm 程のスポット状に集光する。

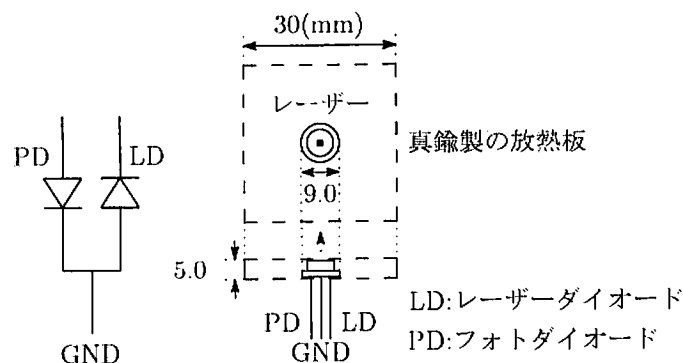
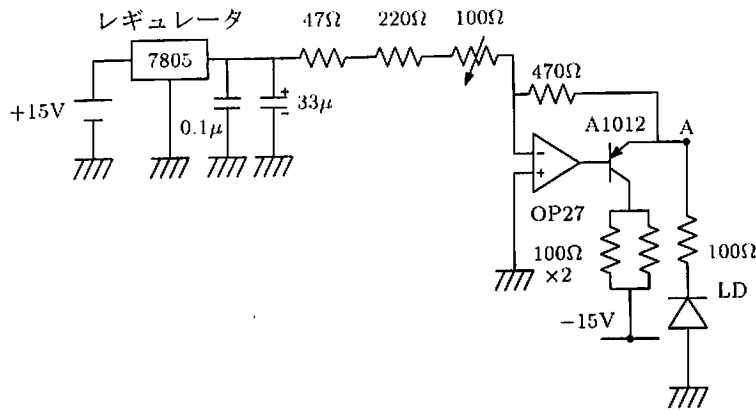


図 1: レーザーダイオード DL-3038-011 と実験に用いた放熱板の外形

図 2 に実験に用いた LD の駆動電源を示す。以降、図 2 にある A を Current In と呼ぶ。レギュレータ 7805 の出力の先にある可変抵抗は、レーザーダイオードに電圧 2V がかかり、電流 50mA が流れるとして、Current In の DC 電圧が -7V となるように調節する。

レーザーダイオード DL-3038-011 の出力光パワーの電流特性を測定したものを図 3 に示す。出力光のパワーはレンズを通して集光された光のパワーを ADVAN のパワーメーターで測定したものであり、光の広がり非常に大きくレンズ径は 5mm と小さいので、出力光の一部しか集光できていない。



A:Current In

図 2: 実験に用いた LD の駆動電源

さらに、レーザーダイオード DL-3038-011 の出力光の偏光特性を偏光子を用いて測定し、その結果を図 4 に示す。偏光特性はレーザー光を偏光子に入射し透過光強度を測ることで測定した。角度は図 1 の横方向の角度を 0 度としたもので、透過光強度が一番大きいところを 1 にしたものである。

### 3 電流制御回路

まず、電流制御によるレーザーダイオードの出力光の強度安定化を行う。

#### 3.1 実験の方法

実験に用いた電流制御回路を図 5 に示す。以降、図 5 にある B を Photo Detector と呼ぶ。さらに、図 5 にある光検出器を図 6 に示す。

電流制御による出力光の強度安定化の効果を見るために、スイッチ a を閉じた時 (電流制御 ON) と開いた時 (電流制御 OFF) で強度雑音を比較する。出力光の強度雑音を比較するためには、スペクトラムアナライザーを用いて、周波数 100kHz から 1Hz の範囲で Photo Detector でのパワースペクトル密度を測定する。

電流制御回路では、制御していない時の Current In でのパワースペクトル密度を  $V'_0(V/\sqrt{\text{Hz}})$ 、制御した時のパワースペクトル密度を  $V'(V/\sqrt{\text{Hz}})$ 、制御回路のゲインを  $G'$  とすると、

$$V' = V'_0 - G'V' = \frac{V'_0}{1 + G'} \quad (1)$$

となるので、Current In から Photo Detector への伝達関数を  $H$  とすると、制御した時の Photo Detector でのパワースペクトル密度  $V$  は、

$$V = HV' = \frac{HV'_0}{1 + G'} \quad (2)$$

となることが期待される。伝達関数  $H$  はループを開いて、 $G'$  はループを閉じて、スペクトラムアナライザーを用いて測定する。

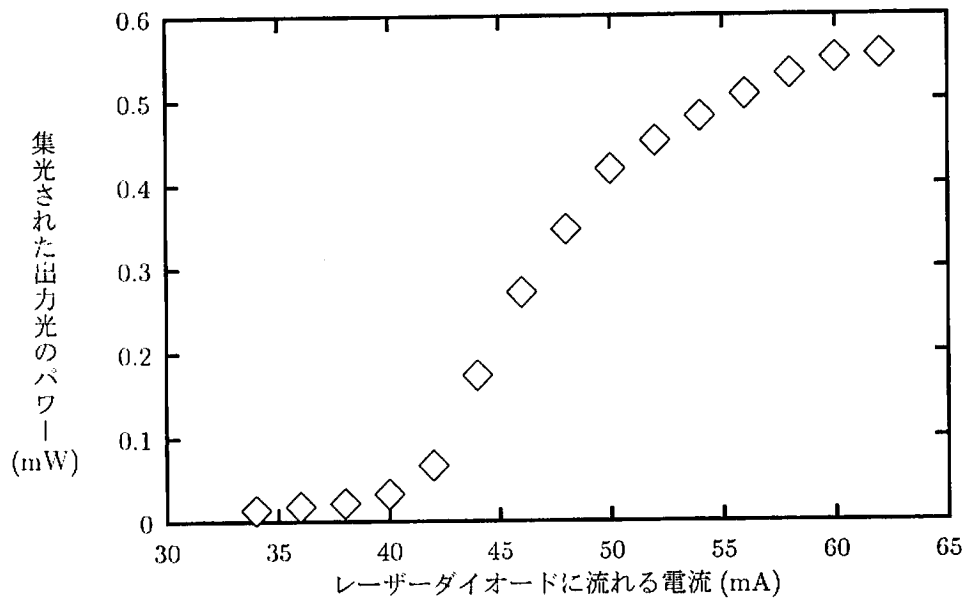


図 3: レーザーダイオード DL-3038-011 の出力光パワーの電流特性の測定結果

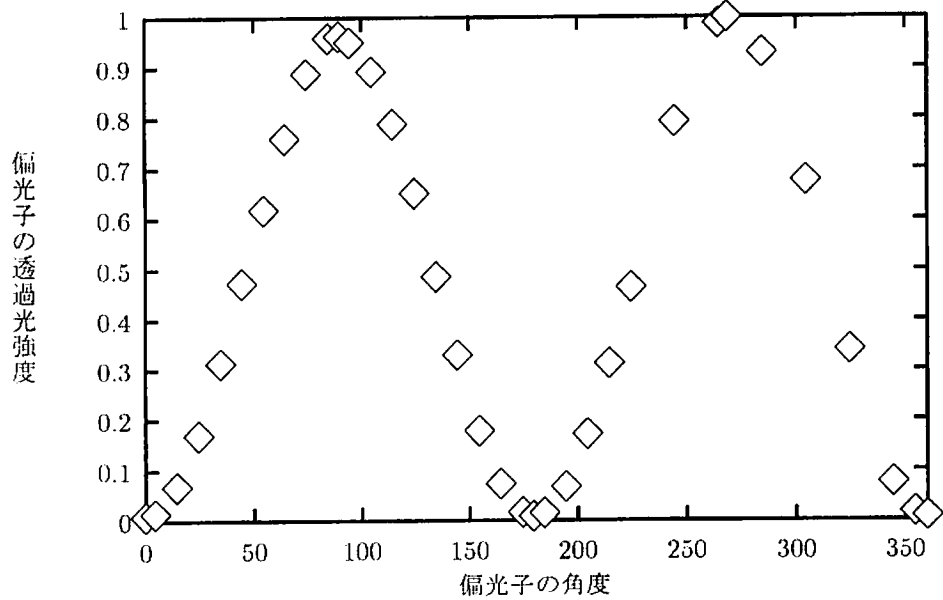
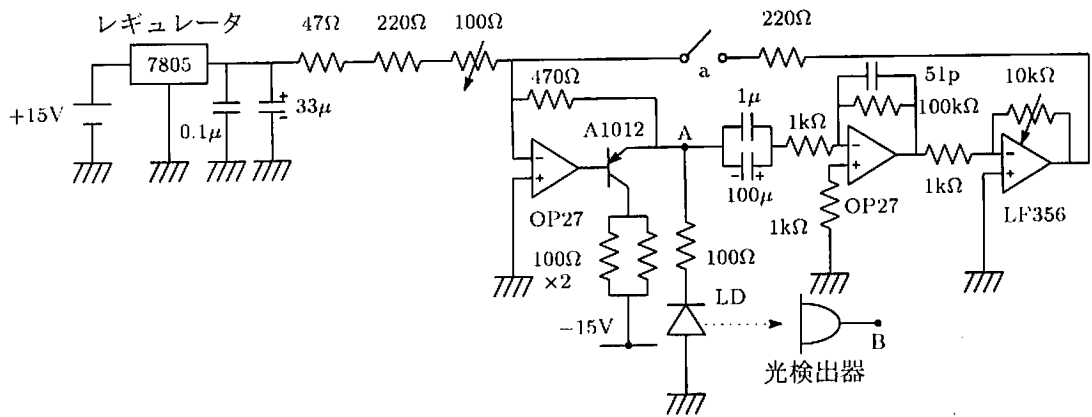


図 4: レーザーダイオード DL-3038-011 の出力光の偏光特性の測定結果



a:スイッチ A:Current In B:Photo Detector

図 5: 実験に用いた電流制御回路

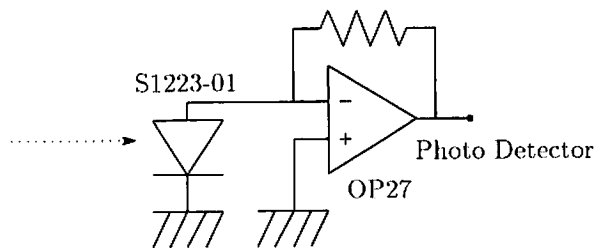


図 6: 光検出器 (抵抗は測定ごとに適当に変える)

### 3.2 実験の結果

電流制御をした時としない時の Photo Detector でのパワースペクトル密度の測定結果を図 7 に示す。図 7 のパワースペクトル密度は DC 電圧で割って相対強度雑音 ( $1/\sqrt{\text{Hz}}$ ) として表したものである。

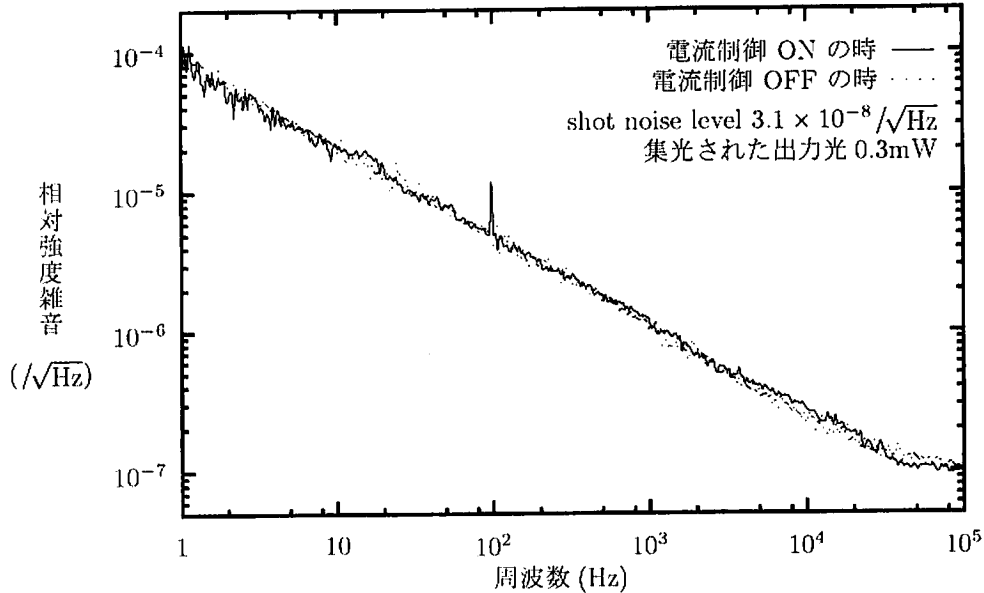


図 7: 電流制御 ON/OFF 時の Photo Detector でのパワースペクトル密度の測定結果

図 7 の測定結果は、スペクトラムアナライザのノイズ、測定系によるノイズ、外部光によるノイズよりも十分大きなところで測定できているものである。実験に用いたレーザーダイオードではレーザーを共振させてから 30 分程度の時間が経つまで、特に 10kHz 以上の周波数で、パワースペクトル密度の測定結果に時間変動がみられた。

図 7 のように、制御をしてもパワースペクトル密度は変わらず、電流制御回路では実際には出力光の強度安定化はできなかった。そこで、何がうまくいっていないのかを考えるために、Current In から Photo Detector への伝達関数  $H$  と電流制御回路のゲイン  $G'$  を測定したものを図 8 に示す。

図 8 の  $|H|$  の値は 5.5 程度で一定なので、集光された出力光のパワーの変化  $\Delta p$  は、Current In での電圧の変化を  $\Delta v$  として、

$$\Delta p \simeq 0.3(\text{mW}) \times \frac{5.5 \times \Delta v}{6.1(\text{V})}$$

である。レーザーダイオードにかかる電圧の変化は小さいと考えて、レーザーダイオードに流れる電流量の変化を  $\Delta i$  とすると、 $\Delta v \simeq 100(\Omega) \times \Delta i$  より、

$$\Delta p \simeq 0.03(\text{A}) \times \Delta i$$

となる。図 3 でパワーが 0.3mW での傾きは 0.03A から 0.04A なので、この結果はだいたい一致している。

さらに、電流制御をした時としない時の Current In でのパワースペクトル密度の測定結果を図 9 に示す。図 9 の点線は図 8 の結果から (1) 式を用いて計算した、電流制御をした時の Current In でのパワースペクトル密度の期待される値である。図 9 の電流制御をした時のパワースペクトル密度の測定値は、スペクトラムアナライザのノイズに乗っているため、正確に測定するためにはアンプをかませる必要がある、

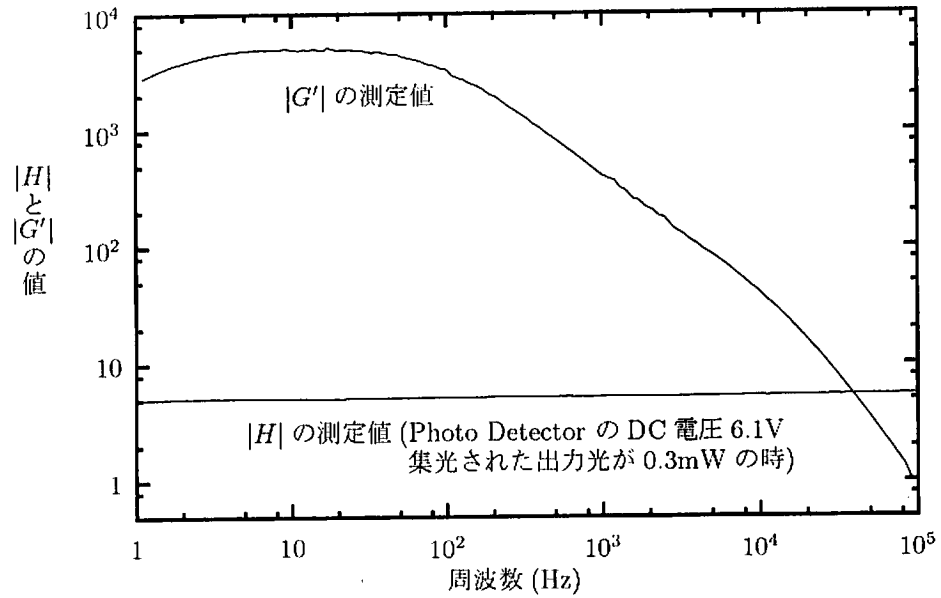


図 8: Current In から Photo Detector への伝達関数  $H$  と電流制御回路のゲイン  $G'$  の測定結果

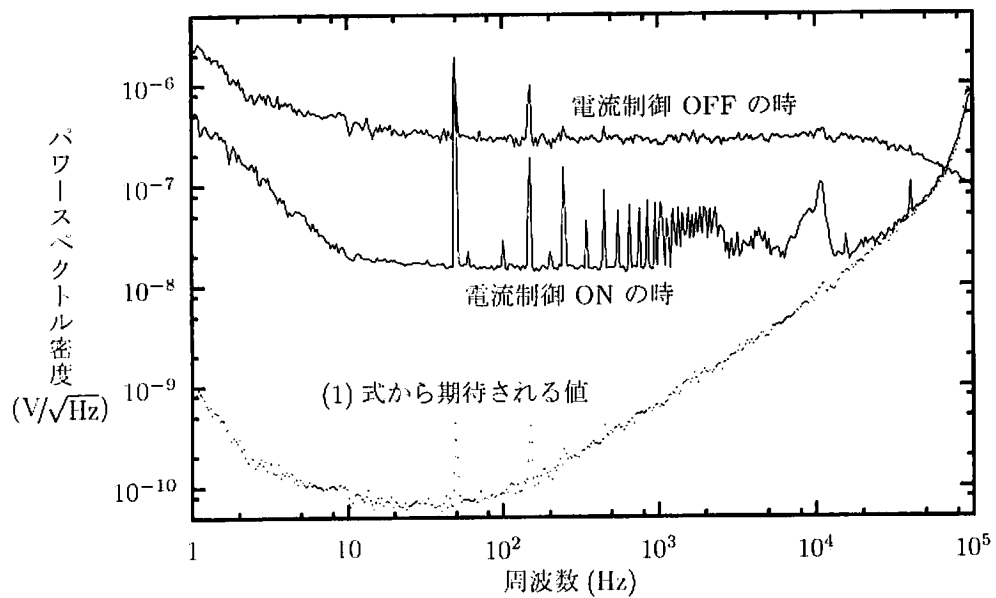


図 9: 電流制御 ON/OFF 時の Current In でのパワースペクトル密度の測定結果と、(1) 式から期待される電流制御 ON の時のパワースペクトル密度 (ただし、電流制御 ON の時の 10kHz 以下の周波数でのデータはスペクトラムアナライザノイズに乗っているため、正確なデータではない。)

また回路のノイズもあるので、必ずしも計算した値とは一致しないと考えられるが、少なくとも Current In での電圧は安定化されていることがわかる。よって、出力光の強度安定化ができなかったのは (2) 式が成り立っていないため、これは電流制御をしない時にも当てはまり、図 8 の  $H$  の測定結果はほぼ一定であるのに対して、図 7 の測定結果と図 9 の測定結果が一致していないことからわかる。(2) 式が成り立っていないのは、電源電圧がある程度安定化されていれば、出力光の強度は電源電圧のノイズに関係なく決まってしまうということが考えられる。電源を電池にしても出力光の強度はあまり安定化されなかった (図 10)。また、実験で用いた制御回路は直接電流を制御しているものではなく、定電圧型なので、定電流型にして制御する事も考えられる。

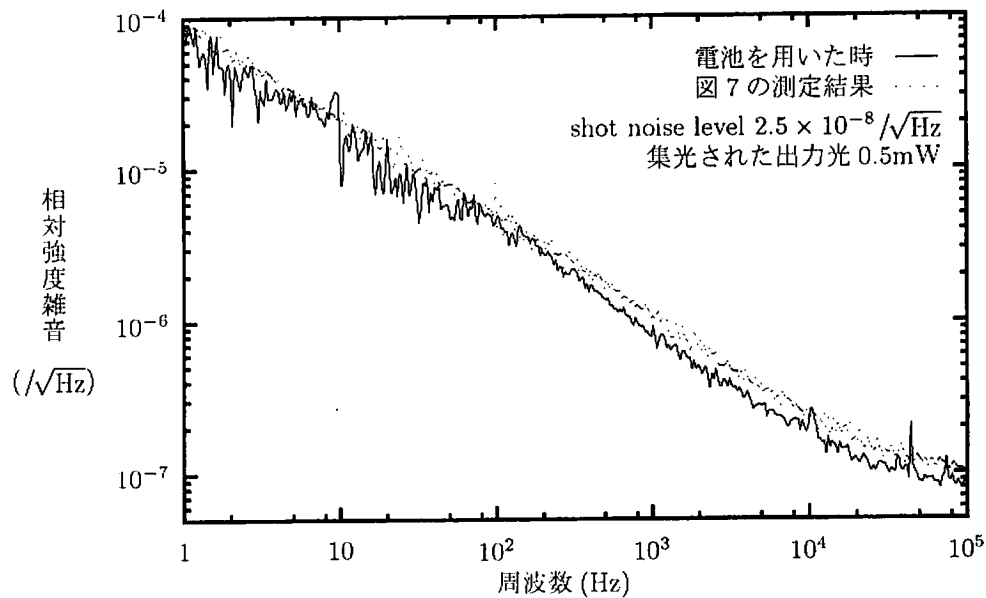


図 10: 電源を電池にしたときの Photo Detector でのパワースペクトル密度の測定結果

## 4 パワー制御回路

電流制御によるレーザーダイオードの出力光の強度安定化の効果はあまり期待できそうにないので、内蔵されたフォトダイオードによるパワー制御を行う。

### 4.1 実験の方法

実験に用いたパワー制御回路を図 11 に示す。以降、図 11 にある C を Power Monitor と呼ぶ。

パワー制御による出力光の強度安定化の効果を見るために、スイッチ b を閉じた時 (パワー制御 ON) と開いた時 (パワー制御 OFF) で強度雑音を比較する。パワー制御回路では、制御していない時の Power Monitor でのパワースペクトル密度を  $V_0''$  ( $V/\sqrt{\text{Hz}}$ )、制御した時のパワースペクトル密度を  $V''$  ( $V/\sqrt{\text{Hz}}$ )、制御回路のゲインを  $G$  とすると、

$$V'' = V_0'' - GV'' = \frac{V_0''}{1+G} \quad (3)$$



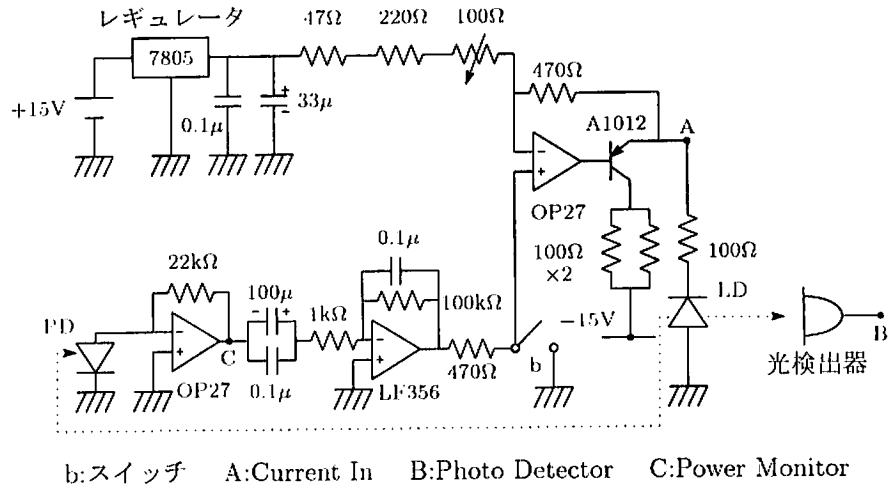


図 11: 実験に用いたパワー制御回路

となるので、制御していない時の Photo Detector でのパワースペクトル密度を  $V_0(V/\sqrt{\text{Hz}})$ 、制御した時のパワースペクトル密度を  $V(V/\sqrt{\text{Hz}})$  とすると、

$$V = \frac{V_0}{1+G} \quad (4)$$

となることが期待される。伝達関数  $G$  はループを閉じて測定する。

## 4.2 実験の結果

### 4.2.1 強度雑音の測定

パワー制御をした時としない時の Photo Detector と Power Monitor でのパワースペクトル密度の測定結果を図 12 に示す。さらに、パワー制御回路のゲイン  $G$  を測定し (図 13)、図 12 の結果から (3) 式と (4) 式を用いて計算した、パワー制御をした時の Photo Detector と Power Monitor でのパワースペクトル密度の期待される値を同時に示す。

図 12 のように、Photo Detector と Power Monitor でのパワースペクトル密度はパワー制御をした時には落ちているが、その落ち方が違っているので、(3) 式と (4) 式のように同じ落ち方はしていないことがわかる。Power Monitor でのパワースペクトル密度は、(3) 式から期待されるパワー制御 ON の時のパワースペクトル密度とよくあっていて、Power Monitor での shot noise level  $3.7 \times 10^{-8}(\sqrt{\text{Hz}})$  程度にまで安定化されているが、レーザーダイオードの出力光の強度はそれほど安定化されていない。よって、(3) 式は成り立っているが、(4) 式は成り立っていないことがわかる。その原因を絞り込むために次のような実験をする。

Photo Detector の出力をパワー制御に用いて Power Monitor の出力のパワースペクトル密度を測定し、その結果を図 14 に示す。図 14 のように、Photo Detector と Power Monitor の役割を変えても結果は変わらないので、内蔵されたフォトダイオードと光検出器に用いたフォトダイオードは同等のものであると考えられる。

また、レーザーダイオードからの出力光はレンズですべては集光できず、集光した光も直径 1cm 程度のスポット状に広がり光検出器にすべては入らないので、振動によって光検出器に入る出力光の強度分布が

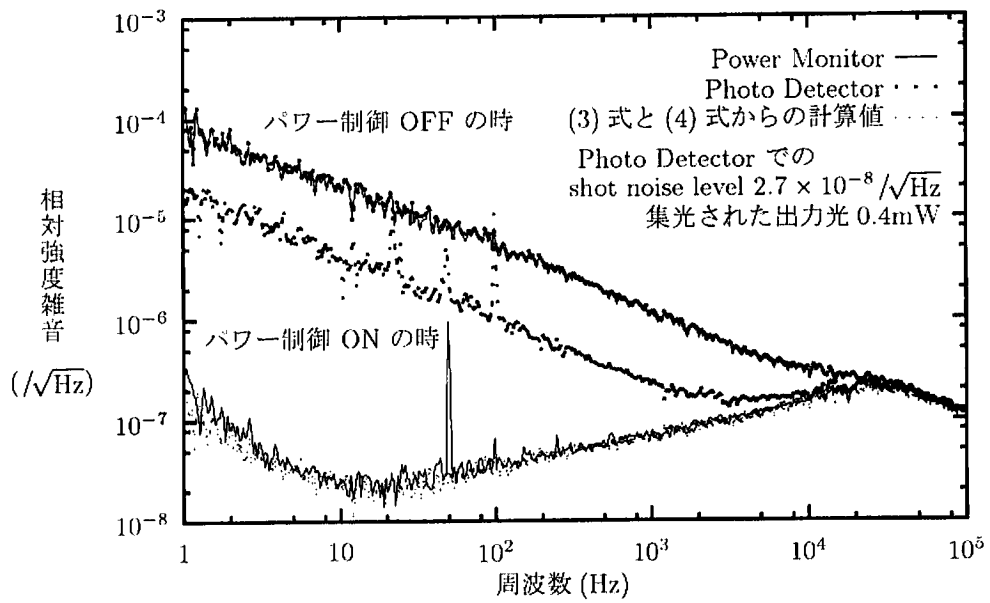


図 12: パワー制御 ON/OFF 時の Photo Detector と Power Monitor でのパワースペクトル密度の測定結果と、(3) 式と (4) 式から期待されるパワー制御 ON の時のパワースペクトル密度

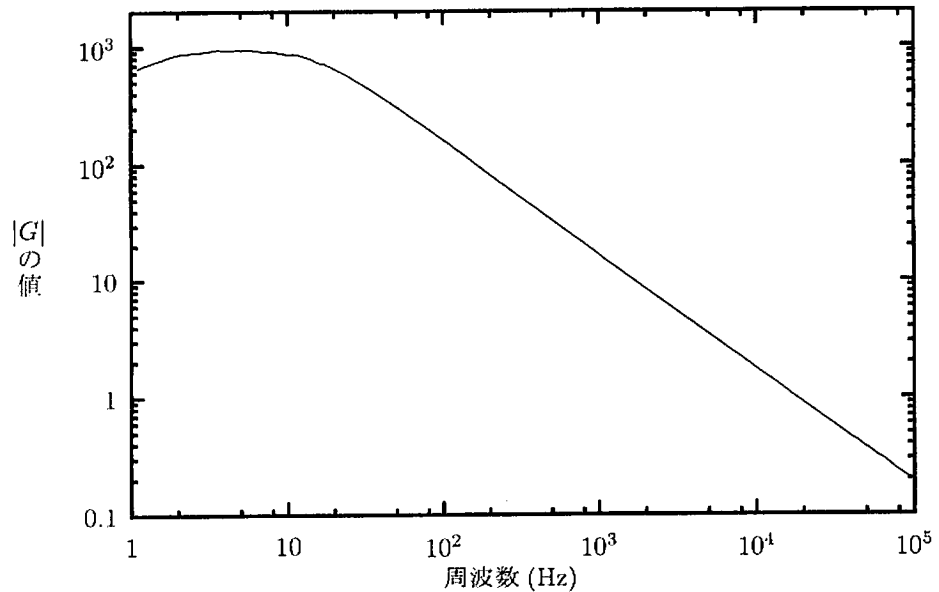


図 13: パワー制御回路のゲイン  $G$  の測定結果

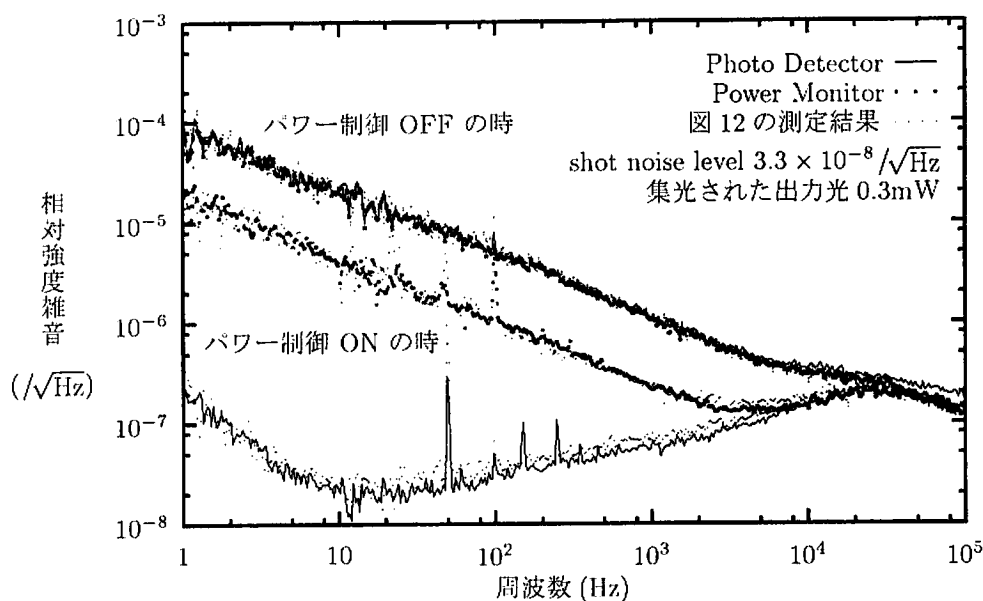


図 14: Photo Detector と Power Monitor の役割を変えた時のパワースペクトル密度の測定結果

変化することより実質的な強度雑音が増すことや、さらに、空気中を伝わることの影響も考えられるので、レーザーダイオードからの出力光をレンズを通さずに光検出器に直接密着させてすべての光が入るようにして、パワースペクトル密度を測定し、その結果を図 15 に示す。図 15 のように 10kHz 以上の周波数で変化はみられたが大きな変化はないので、パワースペクトル密度があまり落ちないのは、振動による影響や空気中を伝わることの影響(ほこりや空気の揺らぎなど)によるものではないと考えられる。

この他に考えられる原因としては、レーザーダイオードの出力光強度の電流特性は温度によって変化するので、温度の変化によるものが挙げられる。もしそうであるならば、レーザーダイオードの温度のフィードバックによる制御によって出力光の安定化ができると考えられるが、この実験は行っていないのでわからない。さらに信号の回り込みなどの外部からの影響の可能性も捨てることはできない。

#### 4.2.2 電気系のノイズ

さらに、出力光の強度が安定化されない原因として、電気系のノイズの寄与について考える。図 16 に示したパワー制御回路の模式図のように、Current In でのパワースペクトル密度が制御をかけ  $V'_0 (V/\sqrt{\text{Hz}})$  から  $V'_1 (V/\sqrt{\text{Hz}})$  になった時、Current In から Power Monitor へ伝わる時に加わるノイズを  $v_n (V/\sqrt{\text{Hz}})$  , Power Monitor から Current In へ伝わる時に加わるノイズを  $v'_n (V/\sqrt{\text{Hz}})$  , Current In から Power Monitor への伝達関数を  $\alpha$  , Power Monitor から Current In への伝達関数を  $\beta$  とすると、

$$\begin{aligned} V'_1 &= V'_0 - \{\beta(\alpha V'_1 + v_n) + v'_n\} \\ &= \frac{V'_0 - (\beta v_n + v'_n)}{1 + \alpha\beta} \end{aligned}$$

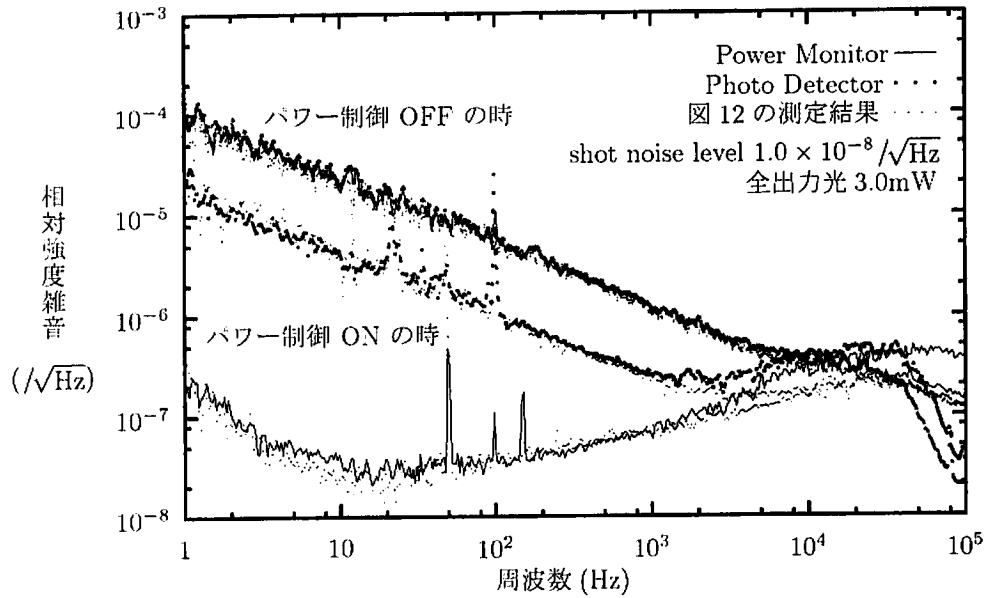
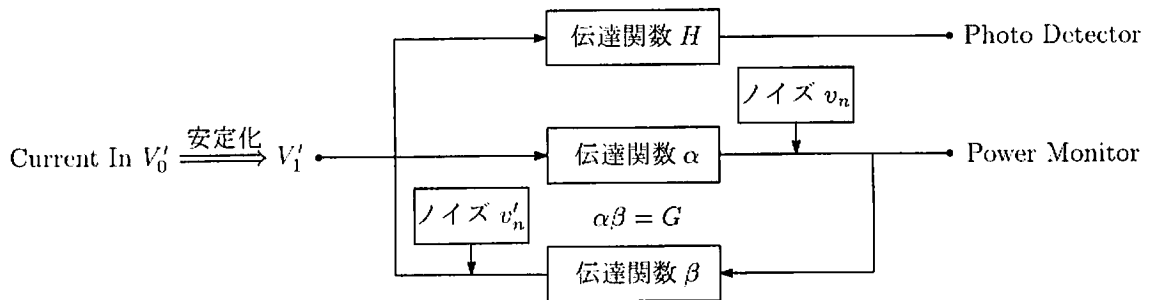


図 15: 出力光をすべて光検出器に入るようにした時の Photo Detector と Power Monitor でのパワースペクトル密度の測定結果



$v_n$ : Power Monitor の OP アンプのノイズ  
 $v'_n$ : レギュレータ 7805 の出力電圧のノイズ + ドライバのノイズ  
 + Power Monitor の次段の OP アンプのノイズ

図 16: パワー制御回路の模式図

となるので、Photo Detector での電気系のノイズの寄与は、

$$\frac{H(\beta v_n + v'_n)}{1 + G} \quad (5)$$

となる。 $H$  と  $G$  の測定結果はそれぞれ図 8 と図 13 に示されている。

電気系のノイズを測定するために、レーザーダイオードから光を出さないで Current In でのパワースペクトル密度を測定する。図 17 の状態で、レギュレータ 7805 の出力電圧のノイズとドライバのノイズと Power Monitor の次段の OP アンプのノイズ  $v'_n$  を測定したものと、図 18 の状態で、さらに Power Monitor の OP アンプのノイズを入力し、電気系のノイズ ( $\beta v_n + v'_n$ ) を測定したものを図 19 に示す。

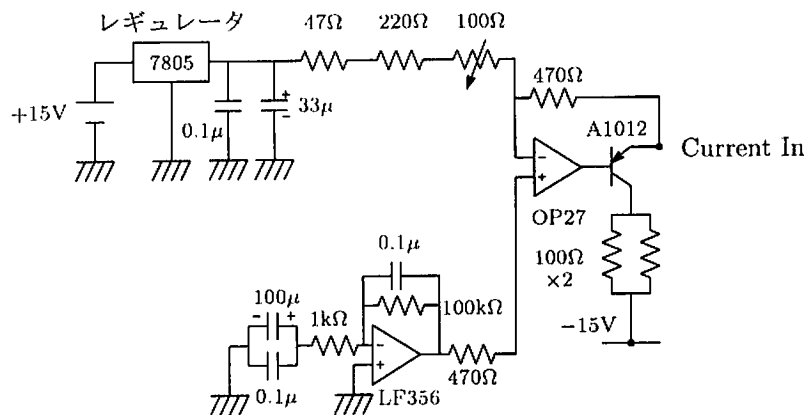


図 17: レギュレータ 7805 の出力電圧のノイズとドライバのノイズと Power Monitor の次段の OP アンプのノイズ  $v'_n$  の測定

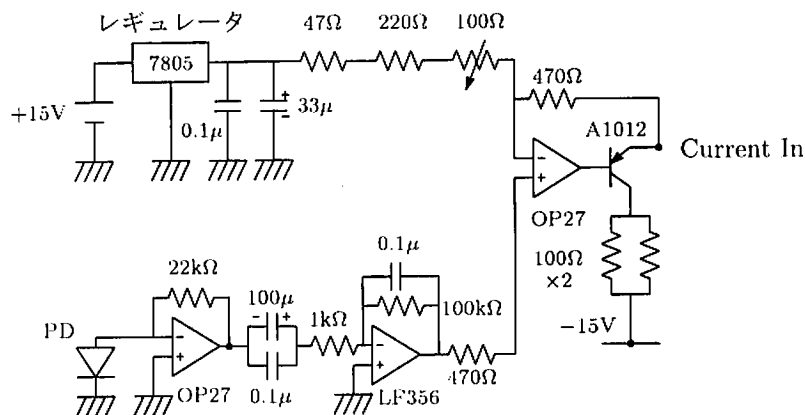


図 18: 電気系のノイズ ( $\beta v_n + v'_n$ ) の測定

Current In での電圧が一定だととして、LD につないだ抵抗の熱雑音は、温度を  $T \simeq 300(\text{K}) \simeq 2.6 \times 10^{-2}(\text{eV})$  とすると、

$$\sqrt{4 \times T(\text{eV}) \times 100(\Omega)} \simeq 1.3 \times 10^{-9}(\text{V}/\sqrt{\text{Hz}})$$

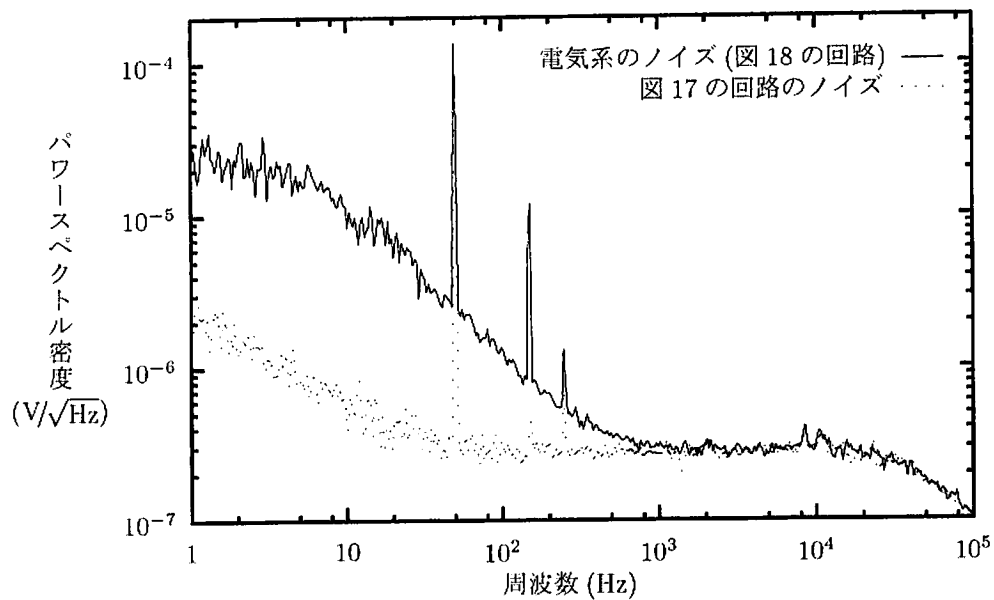


図 19: レーザーダイオードから光を出さない時の Current In でのパワースペクトル密度の測定結果

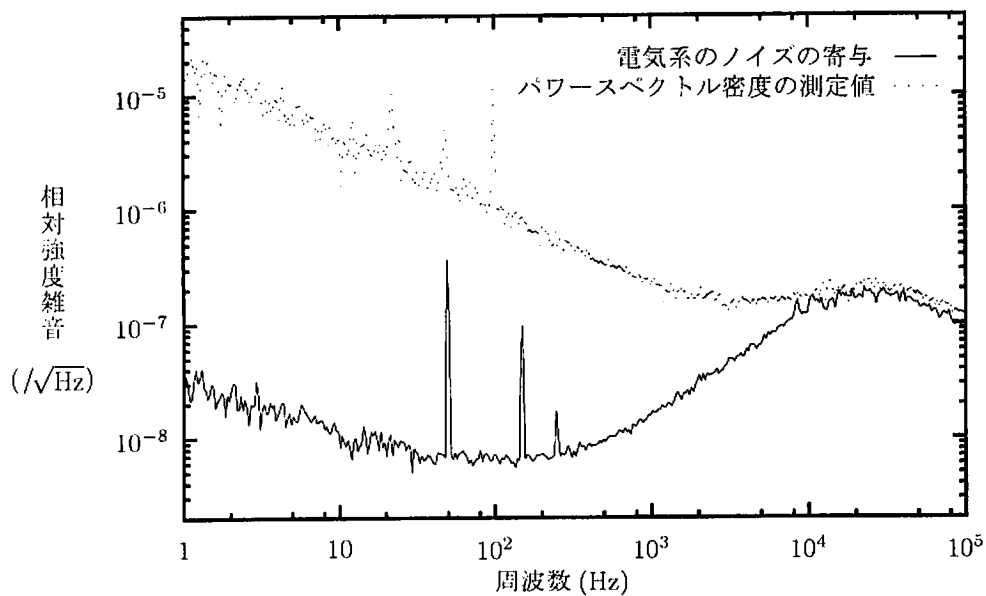


図 20: Photo Detector での電気系のノイズの寄与とパワー制御 ON の時のパワースペクトル密度

となり、LD につないだ抵抗に流れる電流の shot noise は、

$$\sqrt{2 \times 1.6 \times 10^{-19}(\text{C}) \times 5(\text{V}) \times 100(\Omega)} \simeq 1.3 \times 10^{-8}(\text{V}/\sqrt{\text{Hz}})$$

となるので、図 19 の電気系のノイズよりも十分小さいところにある。

図 19 の実線の電気系のノイズの測定結果から (5) 式を用いて計算した、Photo Detector での電気系のノイズの寄与を図 20 に示す。点線はパワー制御をした時の Photo Detector でのパワースペクトル密度の測定値である。

図 19 からは、1kHz 以下の周波数では Power Monitor の OP アンプのノイズが大きいことがわかる。また、図 20 からは、パワー制御回路のゲイン  $G$  の小さい 10kHz 以上の周波数では、レーザーダイオードの出力光の強度は電気系のノイズで決まっているが、10kHz 以下の周波数では電気系のノイズの寄与は小さく、レーザーダイオードの出力光の強度は別のもので決まっていることがわかる。

#### 4.2.3 Power Monitor と Photo Detector の間の相関

出力光の強度が安定化されない原因はよくわからないので、Power Monitor と Photo Detector の間の相関を調べるために、適当に抵抗を変えて Power Monitor と Photo Detector での DC 電圧を同じにして、図 21 の差動増幅器に入力し、差動増幅器の可変抵抗で入力抵抗を変えて差のパワースペクトル密度を小さくなるようにして測定する。

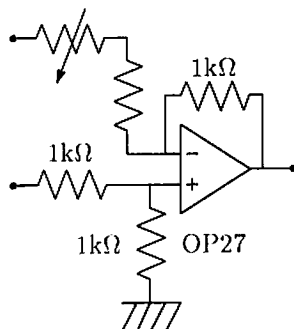


図 21: 差動増幅器

Power Monitor と Photo Detector での DC 電圧を同じにした時、それぞれのフーリエ成分  $P_0''$ 、 $P_0$  は、Power Monitor と Photo Detector で相関のある部分  $p_c$  と相関のない部分に分かれ、

$$\begin{aligned} P_0'' &= p_c + p'' \\ P_0 &= p_c + p \end{aligned}$$

と表せる。ただし、 $\langle \rangle$  は統計平均を表すとして、

$$\langle p'' p \rangle = 0 \quad , \quad \langle p_c p \rangle = 0 \quad , \quad \langle p_c p'' \rangle = 0$$

とする。さらに、パワー制御をしたときのそれぞれのフーリエ成分  $P''$ 、 $P$  は、

$$\begin{aligned} P'' &= p_c + p'' + p_s \\ P &= p_c + p + p_s \end{aligned}$$

と表せる。パワー制御をした時の Power Monitor でのパワースペクトル密度  $V''(V/\sqrt{\text{Hz}})$  は図 12 より、パワー制御回路のゲインが大きい低周波数では、

$$V'' \propto \sqrt{\langle P''^2 \rangle} \simeq 0$$

とできるので、パワー制御をした時の Photo Detector でのパワースペクトル密度  $V(V/\sqrt{\text{Hz}})$  は、フィードバック成分を  $p_s$  として、

$$V \propto \sqrt{\langle P^2 \rangle} = \sqrt{\langle \{p_c + p - (p_c + p'')\}^2 \rangle} = \sqrt{\langle p^2 \rangle + \langle p''^2 \rangle}$$

となる。また、差のパワースペクトル密度  $V_1(V/\sqrt{\text{Hz}})$  は、

$$V_1 \propto \sqrt{\langle (P_0'' - P_0)^2 \rangle} = \sqrt{\langle p^2 \rangle + \langle p''^2 \rangle}$$

となる。つまり、差のパワースペクトル密度を測定すれば、2つの間の相関がわかり、Photo Detector でのパワースペクトル密度はその値よりは下らない。

同一条件で測定した、差のパワースペクトル密度とパワー制御をした時の Photo Detector でのパワースペクトル密度の測定結果を図 22 に示す。

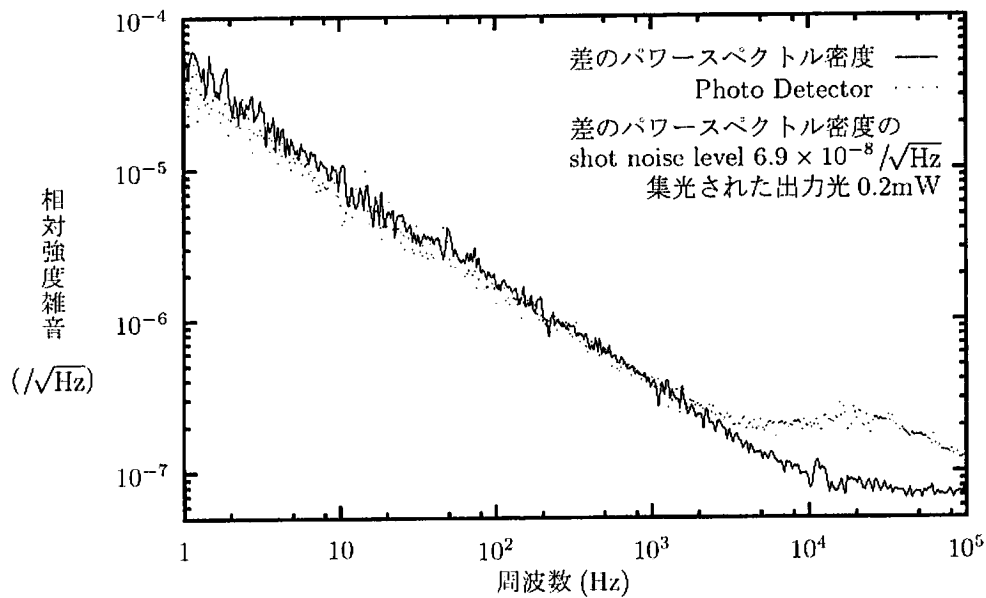


図 22: Power Monitor と Photo Detector の差のパワースペクトル密度と、パワー制御をした時の Photo Detector でのパワースペクトル密度の測定結果

図 22 のように、低周波数では 2つの結果はよくあっているのですが、Photo Detector でのパワースペクトル密度が落ちないのは Power Monitor と Photo Detector の間の相関が小さいことによると考えられる。結局、レーザーダイオードの出力光の強度安定化ができない原因はよくわからないが、何らかの原因でこれ以上は安定化できないということはわかった。



## 4.3 beam splitter を用いたパワー制御回路

### 4.3.1 実験の方法

Power Monitor と Photo Detector との相関は小さいと考えられるので、当初の目的とは違うが、内蔵されているフォトダイオードの代わりに beam splitter で分けた光をフィードバックに用いてパワー制御をする。その回路を図 23 に示す。さらに Photo Detector 1 と Photo Detector 2 を図 23 のように決める。

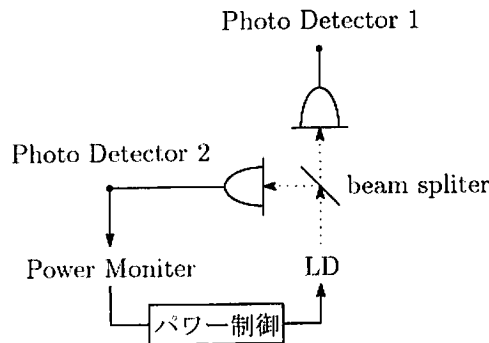


図 23: beam splitter を用いたパワー制御回路

### 4.3.2 実験の結果

図 23 の回路を用いてパワー制御をした時としない時の Photo Detector 1 と Photo Detector 2 でのパワースペクトル密度の測定結果を図 24 に示す。

図 24 のように、beam splitter を用いたパワー制御回路でも、Photo Detector 1 で検出される光の強度はあまり安定化されていない。そこで、Photo Detector 1 と Photo Detector 2 の差のパワースペクトル密度を測定し、その結果を図 25 に示す。図 25 の点線は同一条件で測定したパワー制御をした時の Photo Detector 1 でのパワースペクトル密度の測定結果である。図 25 の結果は低周波数ではよく一致しているので、パワー制御をしてもこれ以上は安定化できないと考えられる。

ここで、レーザーダイオードの他の光源の性質を調べてみる。まず LED を使い、その出力光のパワースペクトル密度と beam splitter で分けた光の差のパワースペクトル密度を測定し、その結果を図 26 に示す。次に He-Ne レーザーを使って同様の測定をして、その結果を図 27 に示す。

図 26 や図 27 の結果から、レーザーダイオードよりも LED や He-Ne レーザーの方が強度は安定であることがわかる。また、beam splitter を用いた安定化制御を行って、差のパワースペクトル密度の測定値まで安定化できるとすると、それぞれの光源で安定化の効果は違っているので、レーザーダイオードの出力光の強度安定化ができないのは beam splitter の性質ではなく、光源の性質であると考えられる。

## 5 まとめ

レーザーダイオードの出力光の強度を安定化させるために、電流制御とパワー制御とさらに、beam splitter を用いたパワー制御を行ったが、出力光の強度安定化はできなかった。原因は電流制御回路では、強度雑音が発電源電圧のノイズに関係なく決まっているため、できることとしては、定電流型にして制御する事も考えられる。パワー制御回路では、光源の性質によるものであると考えられるがよくわからず、何らかの

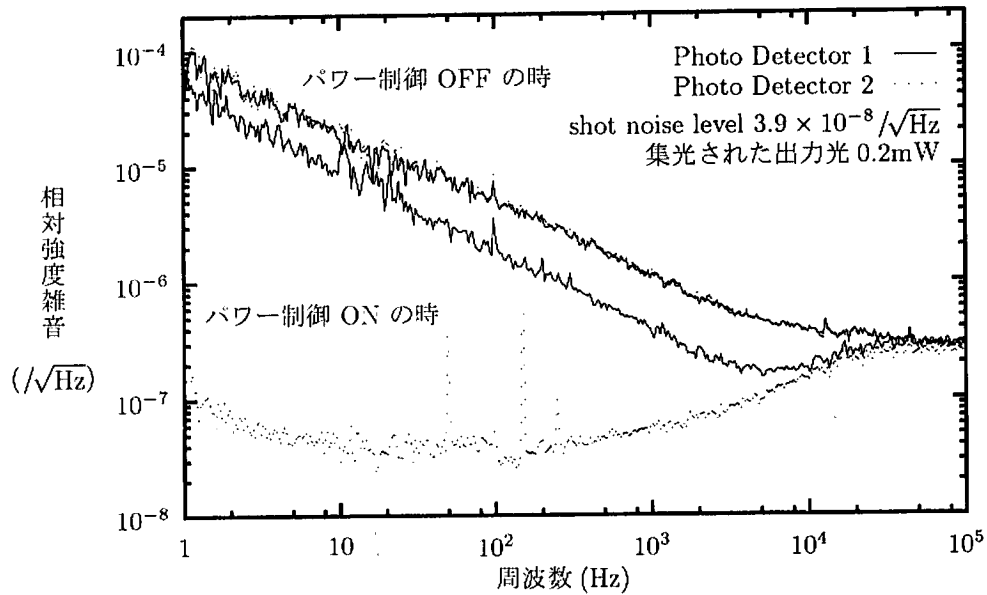


図 24: パワー制御 ON/OFF 時の Photo Detector 1 と Photo Detector 2 でのパワースペクトル密度の測定結果

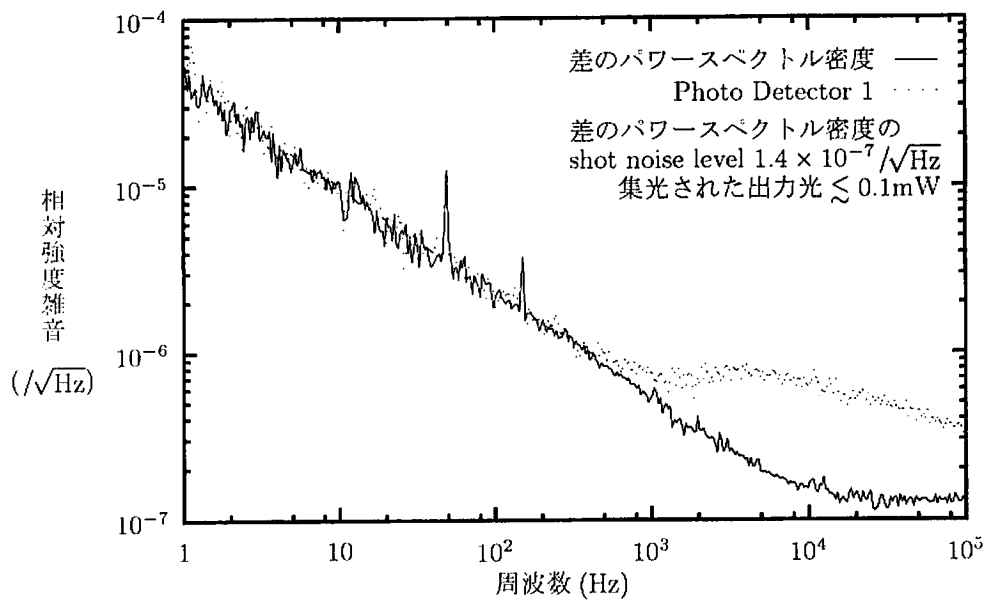


図 25: Photo Detector 1 と Photo Detector 2 の差のパワースペクトル密度と、パワー制御をした時の Photo Detector 1 でのパワースペクトル密度の測定結果

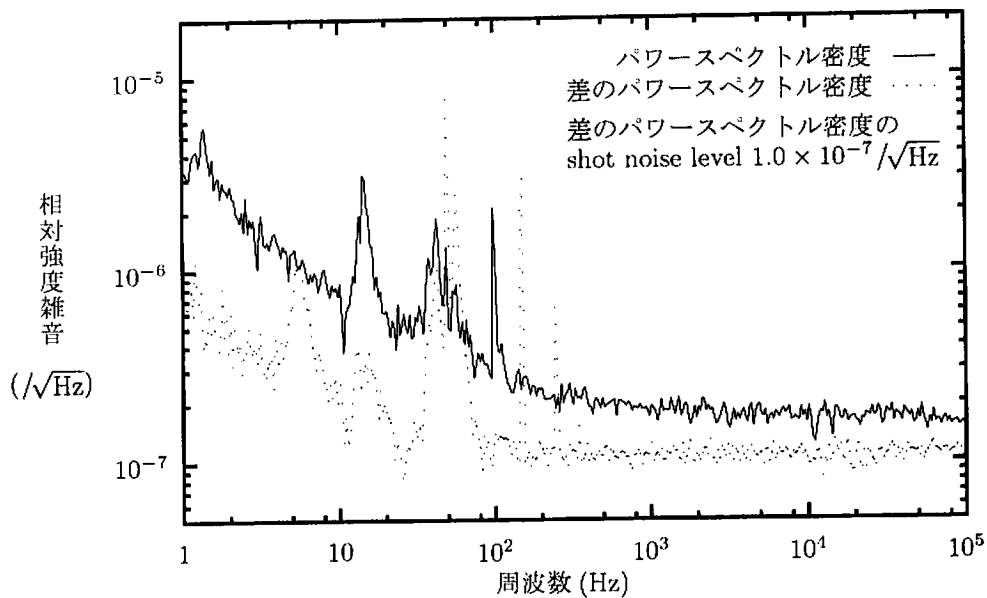


図 26: LED 光のパワースペクトル密度と差のパワースペクトル密度

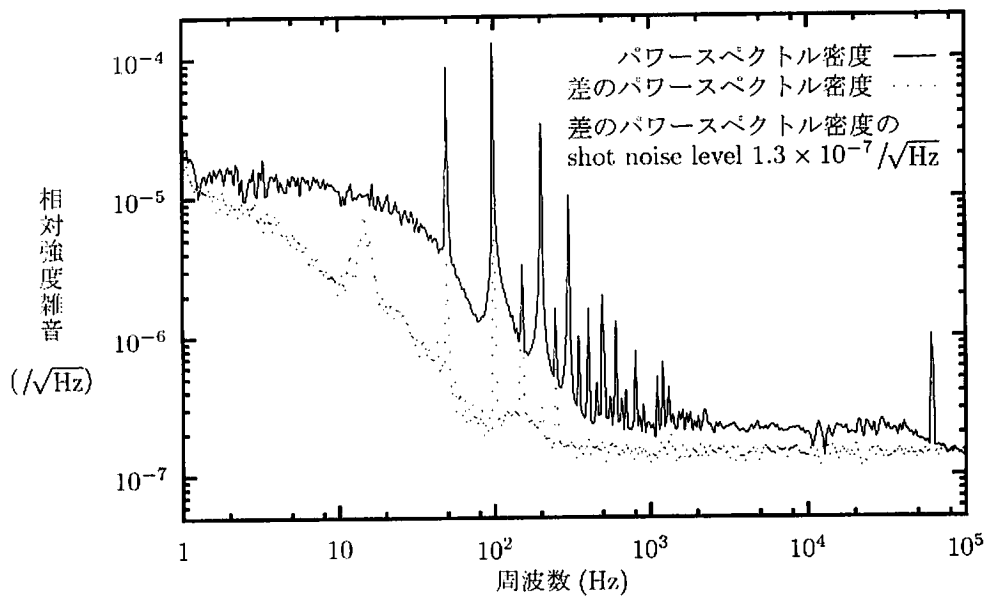


図 27: He-Ne レーザー光のパワースペクトル密度と差のパワースペクトル密度

原因で相関がないため、これ以上は安定化できないということはわかった。まずできることとして、レーザーダイオードの温度のフィードバックによる制御が考えられ、さらに光源を代えて安定化制御を行うことが考えられる。

## 6 今後の課題

今回の実験では強度に着目したが、レーザーダイオードを He-Ne レーザーの代わりとして使用するためには、周波数雑音についても調べる必要がある。