

光強度変調の影響を受けにくい高安定な フォトダイオード用電流電圧変換回路

向井 誠二*

(平成17年12月16日受理)

A stable current-to-voltage converter immune to light intensity modulation for use with photodiodes

Seiji MUKAI

Abstract

A highly stable current-to-voltage converter, which features stability for use with photodiodes of wide-range shunt capacitances up to 680 nF, is developed using an LMC662 operational amplifier (op-amp) for optical power measurement. The high stability results from introduction of several parallel feedback paths each of which bears feedback signal of different frequency range. Many intermediately developed circuits are described together with their operation characteristics to explain the role of each of the feedback paths. In contrast to the general belief that a capacitor shunting the input of an op-amp leads to instability and destroys normal operation, the present study reveals that, once stability is achieved, larger capacitance of photodiodes on the input of an op-amp results in a circuit more immune to the intensity modulation or beating of input light which often occurs in the fiber-optic power measurement. This revelation leads to a circuit where a capacitor is introduced on the op-amp input to add to photodiode shunt capacitance and to make the circuit more immune to light intensity modulation even for use with a low-capacitance photodiode.

1. はじめに

GeやInGaAsフォトダイオードを用いて光パワーを測定する場合、これらの光電流は光パワーだけでなくバイアス電圧などにも影響されるので、高精度の測定のためにはバイアス電圧を一定（通常は0 V）に設定して測定する必要がある。たとえば、Geフォトダイオードではシャント抵抗が数百Ω程度まで低いものがあり¹⁾、インピーダンス10 Ω程度の通常の電流計を用いると1 %程度の誤差を生じる。このような誤差をさけるために基本的に図1で表されるように低インピーダンス入力の電流電圧（IV）変換回路をフォトダイオードに接続する。

しかしながら、このようなIV変換回路とフォトダイオードを組み合わせた系で光パワーを測定する場合、測定光の平均パワーが同じであっても、光強度変調されているか否かにより回路の平均出力電圧が異なることがある²⁾。その原因は、入射光の強度変調により光電流中に発生す

る交流成分が回路のオペアンプに影響を与え、フォトダイオード端の電圧（図1の V_i ）が本来維持されるべきバイアス電圧の値からずれてしまうためである。光強度変調は光源のコヒーレンス制御のための電流変調や光重ね合わせなどを行うときに不可避免的に生じることから、光パワーの精密測定を行うためには光強度変調の影響を受けにくいIV変換器が必要である。いろいろの種類のIV変換器が市販されているが、汎用のものは帯域など他の動作特性も考慮しなければならないため必ずしも光電流変調に対する耐性が最適化されていない。また、図1のようなフォトダイオードがオペアンプの入力に接続された回路では、フォトダイオードの容量のため回路動作が不安定になりそれがバイアス電圧値のずれを助長することが多いので、IV変換回路には高い安定性が求められる。フォトダイオードの容量は、10 mm径のGeフォトダイオードで100 nF¹⁾、5 mm径のInGaAsフォトダイオードで4 nF³⁾程度であることを考慮して、本報告では、数nFから数百nFの容量の接続に対して安定で、かつ、光強度変調の影響を受けないIV変換回路を開発したのでその詳細について述べる。

* 計測標準研究部門 光放射計測科

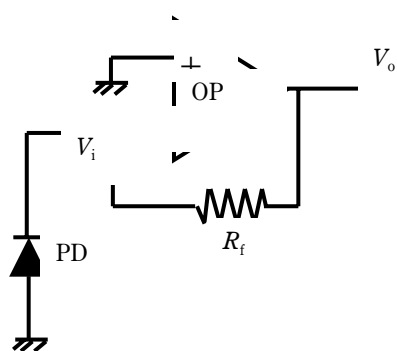


図1 IV変換回路を用いた光パワー測定の基本回路

2. 実験方法

ブレッドボードを用いて回路を試作しその特性測定と回路改良の繰り返しにより最適回路を決定した。試作した一連の回路を図2と表1にまとめる。表1の回路番号はそれぞれひとつの回路に相当する。表1で「Short」と記入されている部品はその回路中では使われず、図2の対応する部品の両端がショートされていることを示す。また「Open」と記入されている部品は、図2の対応する位置に無くその両端が切れたまま（オープン）であることを示す。また、図2の抵抗100 Ωと容量10 pFはどの回路でも使用しているので、表1には記載されていない。

回路の電源電圧はすべて±3 Vである。オペアンプは、光パワー測定用に推奨されている⁴⁾超低入力バイアス電流（～2 fA）のデュアルオペアンプLMC662を用いた。フォトダイオードは径1 mmのInGaAsダイオードである。フォトダイオードと並列の10 nF～680 nFのコンデンサ C_{in} は、より大口径のフォトダイオードの容量をシミュレートするために挿入されている。抵抗100 Ωと容量10 pFは発振防止のために設けた一般的な帰還回路⁵⁾である。 R_{f1} は、回路の変換倍率を決める帰還抵抗であり、典型的な光電流100 μAまたは10 μAに対し、出力1 Vが得られるように、10 kΩまたは100 kΩとした。また、図2では省略してあるが、どの回路においても±電源線はLMC662の直近で940 nFのコンデンサによりシャントされている。

表1に示した全回路について、「ステップ光」と「変調光」と呼ぶ2通りの時間変化をする1550 nmのレーザ光を入力しフォトダイオード端電圧 V_i を観測して回路評価を行った。「ステップ光」は、デューティ50%、繰り返し200 Hzの矩形波で、強度は入力光ONのとき回路出力が1 Vになるものであり、光パワーのステップ状変化に対する V_i の過渡応答（減衰振動となるのでその最大振幅、周期、減衰時間）を調べた。「変調光」は、中心周波数15 MHzの幅広いスペクトルの変調信号により変調深さ63%に変

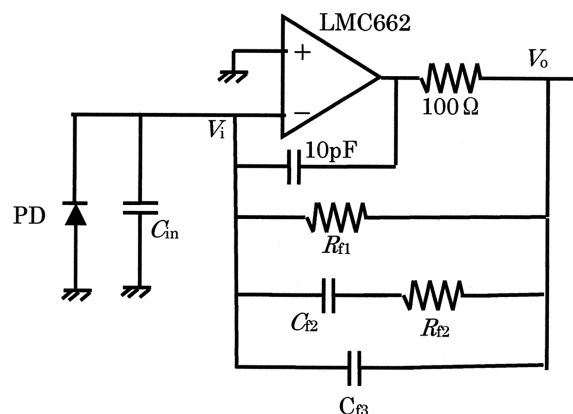


図2 種類のシャント容量に対応できるIV変換回路を実現するための帰還経路の変遷

調され回路出力の時間平均が1 Vになる光で、これを入射したときの V_i のゆらぎの大きさを調べた。なお、変調光は波長可変レーザ光源でコヒーレンス制御機能を作動させているときの典型的な出力光である。 V_i とともに必要に応じて出力電圧（図2の V_o ）も、プローブを使って直接、または、微弱信号の場合は増幅器を通した後、オシロスコープで観測した。

上記のブレッドボードを用いた実験で決定した回路が実用器としても作動することを確認するため、エポキシガラス基板上に半田付けにより実装したIV変換器を試作し、同様の特性テストを行った。

3. 実験結果

ステップ光を入射させると、 V_i は、最初にマイナス側に振れ、その後減衰振動となる。表1の「スパイク」はこの最初のディップの深さ（＝振動の最大振幅）であり、「周波数」と「減衰時間」はこの減衰振動に関する測定値である。表1の「振動全幅」は、変調光入射状態での V_i の揺らぎの分布の標準偏差の2倍を意味している。以下に、まず $R_{f1}=10$ kΩの場合における回路について、表1の回路番号順に説明する。

（回路1）抵抗100 Ωと容量10 pFからなる帰還回路を持つ最も簡単な回路（ C_{in} は680 nFとした）の安定性を調べた。図3はステップ光に対する、 V_i と V_o の変化である。ステップ光は画面左半分ではON状態、画面右半分ではOFF状態である。入力光のOFF→ONの変化に伴い V_i は8 mVマイナス側に振れ、その後、緩やかに減衰（減衰時間3.5 ms）しながら振動（周波数6.1 kHz）する。（画面左端では切れてしまっているが、繰り返しが画面右端に現れている。）

表1 図2で試みた回路とそれぞれの特性

回路番号	図2の回路の条件					ステップ光			変調光
	R_{f1} (k Ω)	C_{in} (nF)	C_{f2} (nF)	R_{f2} (k Ω)	C_{f3} (nF)	スパイク (mV)	周波数 (kHz)	減衰時間 (μ s)	振動全幅 (mV)
1	10	680	Open	Open	Open	発振時8	6.1	無限大	測定不可
2			2.2	Short		振動時8	6.1	3500	2
3			4.4			3	6	71	0.30
4			10			1.8	純減衰	80	0.24
5	10	10	10	Short	Open	発振200	370	無限大	測定不可
6				0.68		10	185	106	28
7						1.1	230	2.2	2.4
8						0.3	9.2	196	8.3
9	10	22	10	0.68	1.1	4.6	140	6.3	1.7
10		47				3.8	91	12.1	0.95
11		100				3.1	64	14	0.54
12		220				2.3	38	16	0.30
13		470				1.7	29	17	0.2
14		680				1.5	21	14	0.14
15	100	10	10	0.68	1.1	0.7	230	2.2	0.27
16		22				0.52	133	6.2	0.19
17		47				0.41	83	6.1	0.12
18		100				0.30	59	10	0.11
19		220				0.24	40	12	<0.1
20		470				0.19	27	14	<0.1
21		680				0.15	22	13	<0.1

抵抗，容量値の欄の「Open」はその部品が使用されず配線が切れていることを示し，「Short」はその部品が使用されずその両端の配線が直接接続されてショート状態であることを示す。

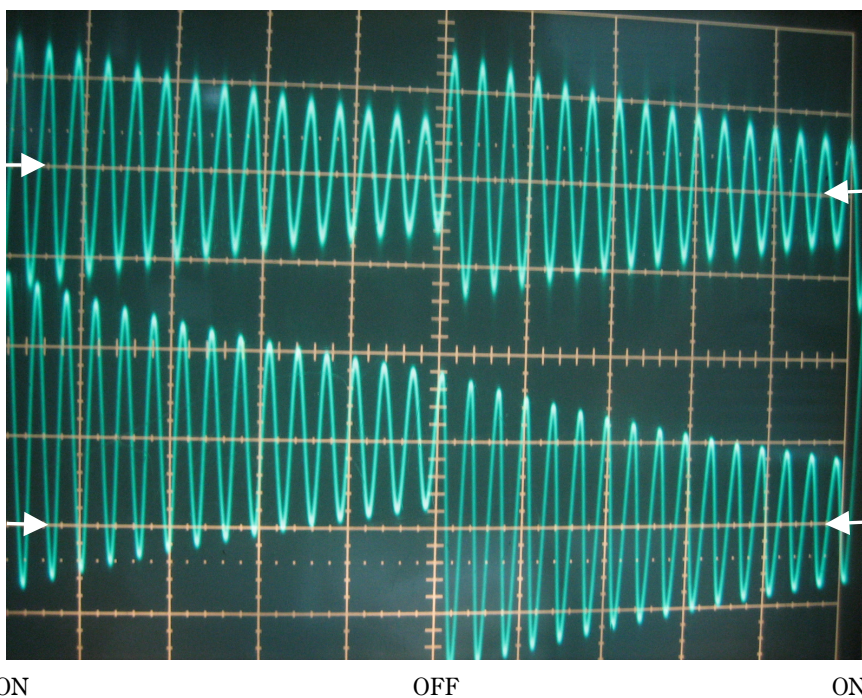


図3 ステップ光に対する回路1の V_i (上, 5mV/div)と V_o (下, 1V/div)の応答. 時間スケールは0.5ms/div. 白矢印のついた上下2本のスケール線は, V_i と V_o の0Vのレベルを示す.

入力光のON→OFFの変化(画面中央)に対しても同様であるが、電圧の符号が反転する。

光入力をこの状態からわずかに増加させると、この振動は発振状態に変化する。すなわち、この回路は6.1 kHzに極を持つ不安定な回路である。この回路に変調光を入射した場合、 V_1 は6.1 kHz付近の周波数で全幅2 mVで振動する。これは、変調光の強度変調スペクトルの裾にある微弱な周波数成分のうち6.1 kHzの極付近のみが大きく増幅されて現れたものである。

図3の振動が生じるメカニズムを理解するため、 V_0 と V_1 との振動の位相を比べる。簡単のため光がOFF(図3の右半分)の状態について考える。 V_0 が+側から0 Vに接近・到達するとき、 V_1 は位相が遅れていて0 Vよりも高い値に残っている。この V_1 はLMC662の負入力端子の電圧なので、 V_0 は0 Vで停止することなくマイナス側へオーバーシュートされる。このようなことを繰り返すことにより振動が発生する。したがって、振動成分の抑制のためには、 V_0 を V_1 に帰還する際の位相を早めることが有効である。このために、次の回路2では R_{11} に並列にコンデンサ C_{12} を挿入する(このとき、図2の R_{12} は使用せずにショート状態である)。

(回路2) C_{12} の並列挿入が効果的であるためには、 C_{12} のコンダクタンス($C_{12}\omega$)が R_{11} のコンダクタンス($1/R_{11}$)と同程度以上であることが必要である。抑制すべき振動の周波数 f は6.1 kHzであるから $\omega=2\pi f=3.8 \times 10^4$ rad/sであり、この場合、上記のコンダクタンスに対する条件は、 $C_{12} \geq 2.3$ nF(程度)となる。 C_{12} として入手の容易な2.2 nFを用いて回路を組み、特性を調べた。ステップ光を入射させた場合、 V_1 は3 mVまで低下した後、急速に減衰(減衰時間71 μ s)しながら振動(周波数6 kHz)する。光入力を増加しても、発振は始まらない。すなわち、回路1よりも安定な回路となった。回路の安定化を反映して、この回路に変調光を入射した場合の V_1 の振動全幅は0.3 mVに減少した。

(回路3) 回路2で C_{12} の挿入が有効であることが明らかになったので、次に C_{12} の値の最適化を試みる。上述のように C_{12} に対する条件は、 $C_{12} \geq 2.3$ nF(程度)なので、2.2 nFを4.4 nFに変えて特性を調べた。ステップ光を入射させた場合、 V_1 の電圧降下は1.8 mVとなり、回路2よりも改善された。その後 V_1 は振動せず、単純に減衰する。減衰時間は80 μ sであり回路2より長い。振動成分がないので、変調光に対して安定である可能性がある。この点を確認するため、変調光を入射して V_1 の振動全幅を調べたところ0.24 mVと減少しており、この点で、回路2よりも本回路が望ましい。

(回路4) 更に C_{12} を10 nFに変えた。ステップ光を入射させた場合、 V_1 の電圧降下は1.2 mVと回路3よりも改善された。その後、振動せずに減衰する(減衰時間は80 μ sで回路3と同じ)。変調光を入射して V_1 の振動全幅を調べたところ0.17 mVと、更に減少しているので、回路3よりも本回路が望ましい。この振動全幅が十分小さいのでこれ以上の C_{12} の最適値探索は行わないことにし、 C_{12} の値を10 nFと決定した。

(回路5) 前回までの実験では容量の大きいフォトダイオードを想定して C_{in} が680 nFの場合の最適回路を決めた。この回路が低容量フォトダイオードに対しても使用可能かどうかを調べるため、 C_{in} を10 nFとして V_1 の時間変動特性を調べた。結果は、光入射の有無にかかわらず、 V_1 の振幅200 mV、周波数370 kHzで発振したので、この回路は使用できない。 V_1 と V_0 の位相を調べると、回路1の場合とは逆に、 V_1 の位相が V_0 より進んでいた。

(回路6) 発振を止めるために回路5の改良を試みる。その際、回路4で行われた $C_{in}=680$ nFに対する回路の安定化に影響を及ぼさないという条件にも留意しなければならない。まず、並列の帰還経路の容量10 pF、 R_{11} および C_{12} の発振周波数370 kHzに対するインピーダンスの絶対値を計算するとそれぞれ50 k Ω 、10 k Ω 、および50 Ω であるから、 C_{12} (10 nF)に対し R_{11} や容量10 pFは発振成分の帰還経路としては無視できる。おもな帰還経路がコンデンサ(C_{12})なので、バイパスコンデンサをいれても帰還位相は早まらず、発振を止めるためには役立たない。このため C_{12} を通る帰還経路の減衰を大きくして発振を止める方針で対処する。370 kHzにおけるLMC662の電圧利得は14 dB(5倍)⁵⁾であり、帰還される電圧比をその逆数

(1/5)より小さくするために C_{12} に直列に抵抗 R_{12} を挿入することとする。このとき R_{12} に対する条件は $|(1/jC_{12}\omega)/(100+R_{12}+1/jC_{12}\omega+1/jC_{in}\omega)| < 1/5$ 、すなわち $R_{12} > 130$ Ω である。ここでは、 R_{12} として680 Ω を挿入したところ発振が停止した。この時、回路1～回路3で達成した $C_{in}=680$ nFに対する安定性は、あまり影響を受けない。その理由は、 $C_{in}=680$ nFの場合の振動周波数は回路2で見たように6 kHzと低く、その際の C_{12} のインピーダンスは3 k Ω 程度になるので680 Ω を直列に付加する影響は小さいからである。この回路に、ステップ光を入射させると、 V_1 の初期電圧降下は10 mVで、その後185 kHzで振動しながら減衰した(減衰時間は106 μ s)。変調光入射時の V_1 の振動全幅は28 mVと大きく、この点で改善が必要である。

(回路7) 185 kHzの振動に対する主な帰還経路は C_{12} と R_{12} とを通る経路であり、他の経路は無視できる。帰還位相

を早めるためにこの経路に並列に挿入するバイパスコンデンサ C_{β} の容量を回路2で行ったのと同様の方法で求めると、1.2 nFとなる。 $C_{\beta}=1.1$ nFを C_{β} と R_{β} とに並列に挿入したところ以下のように大きな改善を得た。ステップ光を入射させると、 V_i のスパイクは7 mVで、その後230 kHzで振動しながら急速に減衰した(減衰時間は2.2 μ s)。変調光入射時の V_i の振動全幅も2.4 mVとなり十分小さい。

(回路8) 前回路で用いた C_{β} の値(1.1 nF)が最適値であるかどうかを確認するために、 C_{β} の値を0.3 nFに変えて特性を観測した。ステップ光を入射させると、 V_i のスパイクは9.2 mVで、その後196 kHzで振動しながら減衰した。減衰時間は8.3 μ sと長くなり、回路7に比べ変調入力の影響を受けやすくなったと予想される。実際、変調光入射時の V_i の平均振幅も7.5 mVと大きくなった。このことより、 C_{β} の値としては、1.1 nFの方がよいことがわかる。十分良好な特性が得られている C_{β} の容量をさらに大きくすると回路5に近づき発振の可能性が高まるため、 C_{β} の値として1.1 nFを採用する。

(回路9~回路14)は、以上の経緯で決定された複数の帰還経路を持つ回路が広範な容量値のフォトダイオードについて安定な動作をすることを確認するための実験回路である。このために、フォトダイオードの容量をシミュレートするコンデンサの容量 C_{in} を22~680 nFのあいだでいくつかの値に設定し、回路の応答特性を調べた。その結果、どの容量値に対しても発振は起きず安定な動作が得られた。容量 C_{in} が大きくなるにつれ、ステップ光入射に対する V_i のスパイクは小さくなり、また、これに続く減衰振動の周波数は低下した。減衰時間は C_{in} が50 nF程度までは増加するがその後は10 μ s程度であまり変化しなくなる。変調光入射時の V_i の平均振幅は、容量が大きくなるにつれ、単調に減少し、 $C_{in}=680$ nFでは0.14 mVと非常に小さな値になる。

すべての容量値に対し安定動作が得られたが、このことは帰還回路の決定に至るプロセスからも予想される。すなわち、この複数の帰還経路を持つ回路は、「回路6」でも述べたように、10 nFと680 nFの C_{in} に対し安定であるように定められた。10 nFと680 nFの両者に対し回路が安定であるのは異なる C_{in} 値に対して最適の帰還経路が選択されるよう複数の経路を付加したためである。これと同様に、回路9~回路14のさまざまな C_{in} 値に対して回路が安定なのは、振動周波数の違いにより最適の帰還経路が選ばれるためであろう。

以上が帰還抵抗(R_{β})が10 k Ω の場合の結果である。

(回路15~21: $R_{\beta}=100$ k Ω) $R_{\beta}=10$ k Ω に対する手順と同様に $R_{\beta}=100$ k Ω に対しても最適帰還経路を決めるこ

とも可能であるが、簡単のため、 R_{β} を10 k Ω から100 k Ω に置き換えいくつかの容量 C_{in} に対する特性を調べた。結果は、10 nFから680 nFの間でどの容量値に対しても動作は安定であった。容量 C_{in} が大きくなるにつれ、ステップ光入射に対する V_i のスパイクは小さくなり、また、それに続く減衰振動の周波数は低下した。減衰時間は C_{in} が100 nF程度までは増加するがその後は10 μ s程度であまり変化しない。変調光入射時の V_i の振動全幅は、容量が大きくなるにつれ、単調に減少する。また、この振動全幅はどの C_{in} 値に対しても十分に小さく、 $R_{\beta}=10$ k Ω の場合と比較しても小さい値が得られている。以上の結果から $R_{\beta}=100$ k Ω に対し $R_{\beta}=10$ k Ω の場合と独立に帰還経路の最適化を行う必要は無いと判断し、 $R_{\beta}=100$ k Ω の場合も $R_{\beta}=10$ k Ω に対して定めた回路定数をそのまま使用する。

4. エポキシガラス基板上に実装したIV変換器

以上の実験結果を参考にして、エポキシガラス基板上に半田付けで回路を実装し、それを用いたIV変換器を作製した。回路図および回路とフォトダイオードとの接続の様子を図4に示す。もともとコンデンサ C_{in} はフォトダイオード容量をシミュレートするために用いてきたが、これまでの実験からこの容量が大きいかほどフォトダイオードにかかる電圧の変動を抑制できることが判明した。それで、ここではIV変換器の入力端子直後にフォトダイオード容量を補うための独立のコンデンサ $C_{in}=470$ nFを付加した。また、IV変換器の後段に接続するコードや計測器の容量の影響を避けるため、図2の回路の出力端にLMC662(デュアルオペアンプ)の未使用のチャンネルを使った電圧バッファを付加した。10 k Ω と100 k Ω の帰還抵抗に温度係数の小さい精密抵抗を用いる理由は、光を入力すると光電流を補償する電流がこの抵抗に流れ発熱し、温度係数が大きい抵抗であれば電流電圧変換係数が変化してドリフトの主因になるためである。電源線をシャントする940 nFはブレッドボードの実験中も存在したもので、図2では帰還経路に注目するために表記を省略していたが、図4では作製時に参照することを考慮して描きこんだ。

この回路において帰還抵抗を10 k Ω にした場合、ステップ光を入射させた場合のスパイクは1.5 mVで振動はその後急速に減衰し、また、変調光を入射した場合の V_i の振動全幅は0.5 mV以下であった。すなわち、同じ回路定数を持つブレッドボード上の回路13の特性をほぼ再現している。帰還抵抗を100 k Ω にした場合、ステップ状光入射時のスパイクは0.1 mVで、また、変調光を入射した

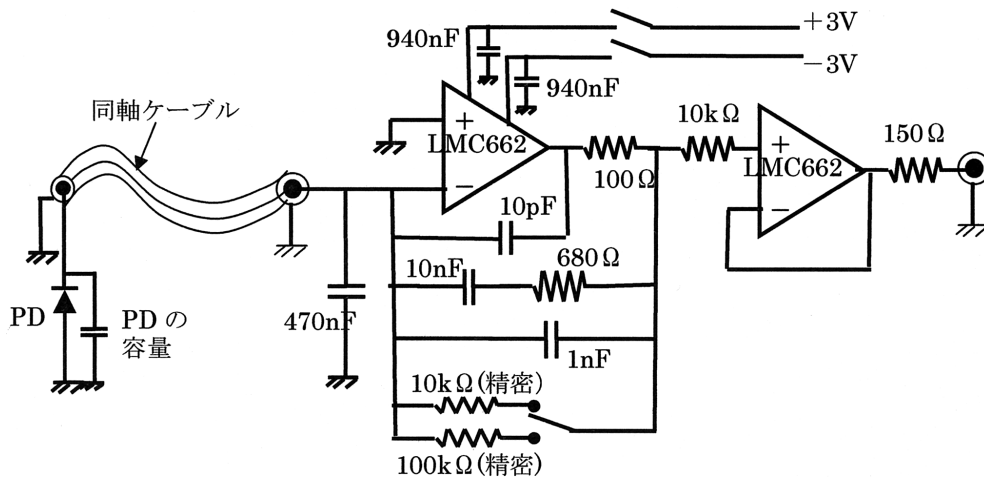


図4 回路図および回路とフォトダイオードとの接続

場合の V_i の振動全幅は 0.5 mV 以下であった。これは、同じ回路定数を持つブレッドボード上の回路20の特性をほぼ再現している。

このような回路の安定化により、入力光の強度変調が V_i のオフセット値に及ぼす影響がどの程度軽減されたかを調べるため、強度変調光をフォトダイオードに入射したときの V_i のオフセット値を、フォトダイオードを図4の安定化された回路に接続した場合と回路番号1の未安定化基本回路（但し C_m は取り付けられていない）に接続した場合とで測定、比較した。変調は深さ 100% 、デューティ 50% のパルス変調であり、また平均光パワーを $24.2 \mu\text{W}$ とした。フォトダイオードは容量 0.1 nF のInGaAs製で、このときの平均出力電流は $25 \mu\text{A}$ であった。IV変換回路の R_f を $10 \text{ k}\Omega$ にした。図5に示したように、このような変調光を照射することによる V_i のオフセットは、安定化されていない基本回路では最大 4.7 mV であるのに対し、図4の安定化回路では、 $-1 \mu\text{V} \pm 1 \mu\text{V}$ であった。後者は出力電圧レベル（ 0.25 V ）に比べ十分小さいので、回路の安定化により V_i のオフセット値に及ぼす影響が十分抑制されたと判断される。

安定性以外に重要な基本特性として入力抵抗と応答時間とがある。入力抵抗は、 $R_f=10 \text{ k}\Omega$ および $100 \text{ k}\Omega$ の場合、それぞれ、 0.051Ω 、 0.51Ω であった。また、応答時間として、ステップ光を入力したときに出力電圧 V_o が定常値の 90% に達するまでの時間を測定したところ、 $R_f=10 \text{ k}\Omega$ および $100 \text{ k}\Omega$ に対してそれぞれ、 0.2 ms と 2 ms であった。入出力ケーブルなどの影響を受けないことを確認するため、入力側に 3 m の同軸ケーブルおよび出力側に 2 m の同軸ケーブルを接続し、さらに、これらにデジタルマルチ

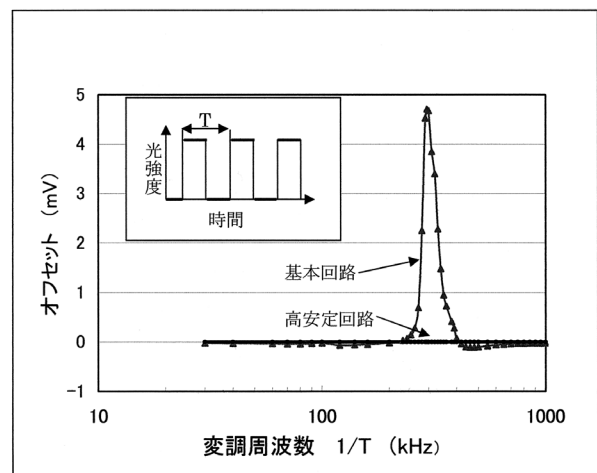


図5 基本回路と高安定回路とにおける強度変調光入力下の V_i のオフセットの比較

メータやオシロスコープなどを接続して特性変化を調べたが、影響は見られなかった。また、大きなシャント容量を持つGeフォトダイオードが接続された場合を想定し、フォトダイオードに 100 nF のコンデンサを並列接続したものをケーブルの先に接続して応答特性を調べても変化は見られなかった。

5. 結論

680 nF までの広範囲の容量を持つフォトダイオードを接続しても安定で、かつ、光強度変調の影響を受けにくい光パワー測定用のIV変換回路を開発した。フォトダイオードのシャント容量は帰還信号の位相を遅らせIV変換

器の動作を不安定にすると、考えられてきたが、回路が安定な条件下では、フォトダイオードの容量が大きいほど測定光の変調成分の影響を抑えた正確な平均光パワーの測定ができる、ということが明らかになった。この知見を生かし、試作器ではコンデンサをオペアンプの入力をシャントするように付加した。この試作IV変換器では、このコンデンサが入力端子に接続されたフォトダイオードの容量を補うため、高容量フォトダイオードだけでなく、低容量のフォトダイオードを接続しても入力光の強度変調の影響を受けない特性が実現した。

謝 辞

レーザ標準研究室の木村眞次氏と雨宮邦招氏には実験上さまざまなインスピレーションを与えていただいています。また、同研究室長の遠藤道幸氏と光放射計測科長の三戸章裕氏には研究遂行上で多大の支援をいただい

おり、本報告文に対してもご批評・ご助言をいただきました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) http://www.judsontechnologies.com/PDF_files/shortforms/Ge%20shortform%20August2004.pdf
- 2) 向井, 「光減衰量標準(6):光パワーメータ応答特性の光強度変調依存性と直線性校正の問題点」2005年秋季応用物理学会講演会予稿I,p.143
- 3) http://www.hpk.co.jp/Jpn/products/ssd/pdf/g8370-81_etc_kird1064j03.pdf
- 4) <http://www.national.com/onlineseminar/2004/photodiode/photodiode.html>, Paul Rako “Photodiode Amplifiers” Aug. 31,2004
- 5) <http://www.national.com/JPN/ds/LM/LMC662.pdf>