

令和元年度  
卒業研究報告

研究題目

トランスインピーダンス回路の開発

指導教員 由井四海

富山高等専門学校

電子情報工学科

黒田玲矢

令和2年 2月25日提出

## 1 はじめに

## 2 光

### 2.1 光とは

### 2.2 レーザ光

## 3 フォトダイオード

### 3.1 フォトダイオードの基本原理

### 3.2 フォトダイオードの種類

#### 3.2.1.1 Pn フォトダイオード

#### 3.2.1.2 Pin フォトダイオード

#### 3.2.1.3 アバランシェフォトダイオード

#### 3.2.1.4 ショットキーフォトダイオード

## 4 補償用ダイオードのシミュレーション

### 4.1 補償用コンデンサとは

### 4.2 容量の大きさの決定方法

#### 4.3 シミュレーション結果

### 5 実験概要

#### 5.1 実験装置による測定

#### 5.2 実験装置の構成

#### 5.3 実験装置の概要

#### 5.4 実験結果

### 6 ノイズ測定

#### 6.1 ノイズ測定

#### 6.2 実験結果

### 7 まとめ

## 1 はじめに

光の測定の際には光検出器が用いられる。その中でも、フォトダイオードがよく用いられている。フォトダイオードは光の測定の際には電流出力である。その一方で、一般的な測定機器は電圧を測定するためフォトダイオードの出力を測定できない。そのためフォトダイオードの出力電流を電圧に変換する必要がある。

変換方法の一つとして、フォトダイオードと並列に抵抗をつなぎ、その抵抗の両端に発生する電圧を測る方法がある。この場合、出力電圧の大きさは  $V=RI$  で表すことができる。

しかし、微小な電流を電圧へ変換する場合には、出力電圧を大きくするために大きな抵抗を使わなければいけない。抵抗値を大きくすると電圧が飽和してしまい電圧と電流が比例しなくなってしまう。よって抵抗を用いた電流電圧変換は微小電流の測定には適していないといえる。

そのためオペアンプを用いた、トランスインピーダンス回路 (TIA) を作成する。オペアンプは入力インピーダンスが非常に高いためノイズが入力端子に入り込みにくく、ノイ

ズを減らすことができる。

本研究では TIA の作成とそのノイズ測定を行う。

## 2 光

### 2.1 光とは

電磁波の一種であり、広義には赤外線から紫外線までの電磁波を指すが、赤外線や紫外線は肉眼では見えないため一般的には可視光線（ $0.4\mu\text{m}\sim 0.7\mu\text{m}$ ）のことを指すことが多い。

### 2.2 レーザ光

レーザー光は自然光に比べて波長幅が非常に狭く、特定の方向に強く放出される、点滅速度が大きい、などの特徴を持つ。

## 3 フォトダイオード

### 3.1 フォトダイオードの基本原理

フォトダイオードは p 形のシリコンの基板の上に薄い n 形の層をつくり、pn 接合を形成させる。n 層側から光が接合部に入射する。電子は n 側、正孔は p 側に流れる。これにより、フォトダイオードに電圧を印加しない場合は n 層に負、p 層に正の電位が現れる。

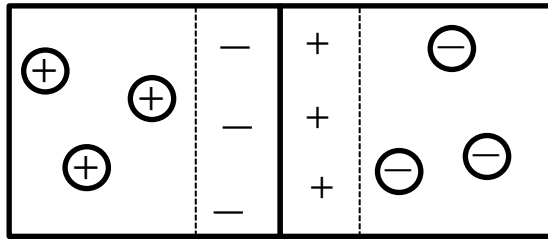


図 pn 接合の様子

## 3.2 フォトダイオードの種類

### 3.2.1.1 pn フォトダイオード

基本的な構造を持つフォトダイオードで基本原理と同じ様な動作をする。

### 3.2.1.2 pin フォトダイオード

pn フォトダイオードと基本的には同じで p 層と n 層の間に i 層（真性半導体）を厚く作り

光電流を効率よく発生できるようにしたもので、静電容量を小さくすることができる。

### 3.2.1.3 アバランシェフォトダイオード (APD)

微弱な光の検出の際に用いられる。検出限界が読み出し回路で決定されている場合に検出

限界を APD の増倍分だけ引き下げることができる。しかし pin フォトダイオードよりも雑

音が大きい。

### 3.2.1.4 ショットキーフォトダイオード

pn 接合の代わりに p 形の部分をとても薄い金属を接合したもので短波長帯での感度が高い。

## 4 補償用コンデンサ

### 4.1 補償用コンデンサ

TIA は  $C_{in}$  があることによって位相が遅れ、位相が 180 度に達することによって発振する。

今回作成した TIA では発振防止のために  $R_f$  と並列に補償用コンデンサ  $C_f$  を取り付ける。

$C_{in}$  で遅れる位相を  $C_f$  によって補正することで発振を防ぐことができる。この  $C_f$  を取り

付けることによって  $C_f$  の大きさに応じて帯域幅が変化し、それによってノイズの大きさ

も変わる。そのため、 $C_f$  の大きさは  $C_{in}$  の大きさやオペアンプの種類、ノイズの大きさを

考慮して、調整する必要がある。 $C_{in}$  は入力容量と呼ばれ、オペアンプの入力容量とフォト

ダイオードの容量の合計で表される。

### 4.2 容量の大きさの決定方法

$C_f$  の影響で帯域幅を損なわないようにする場合、その大きさは以下の式で表される。

$$Cf = \sqrt{\frac{C_{in}}{2\pi \times Q^2 \times GBW \times R1}}$$

$GBW$  はオペアンプの帯域幅、 $Q$  は回路の安定性とセトリング特性を決める定数で、スピードと安定性の両立のために臨界制動条件の $\frac{1}{\sqrt{2}}$ とする。

### 4.3 シミュレーション

今回はオペアンプの  $GBW$  は 22MHz、抵抗は 100k $\Omega$ 、 $C1$  は 1pF とした。 $Cf$  の理論値は  $1.208 \times 10^{-12}$  [F]となる。

シミュレーションソフト TINA を使用して、以下の図の回路を作成し、 $C2$  の値を数通りに変化させたときのノイズ、利得をシミュレーションした。[2] シミュレーションではフォトダイオードの代替としてフォトダイオードの接合容量相当のコンデンサを用いた。



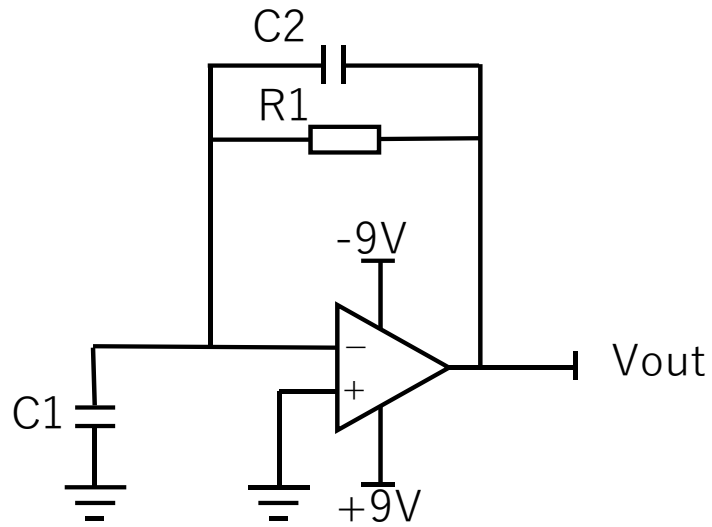


図 シミュレーション用に作成した TIA

#### 4.4 実験結果

C2 の大きさによる出力ノイズの変化を図に、C2 の大きさによる利得の変化を図に示す。

結果は、縦軸電圧[nV/√Hz],横軸周波数[Hz]になっており、TINA のノイズ解析を用いた。

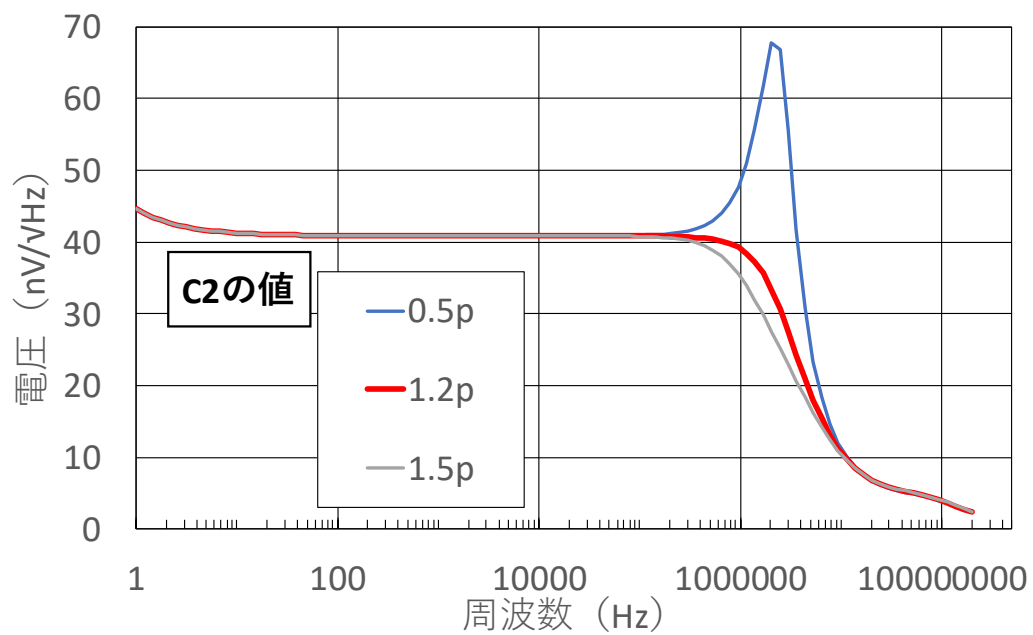


図 C2の大きさによる出力ノイズの変化

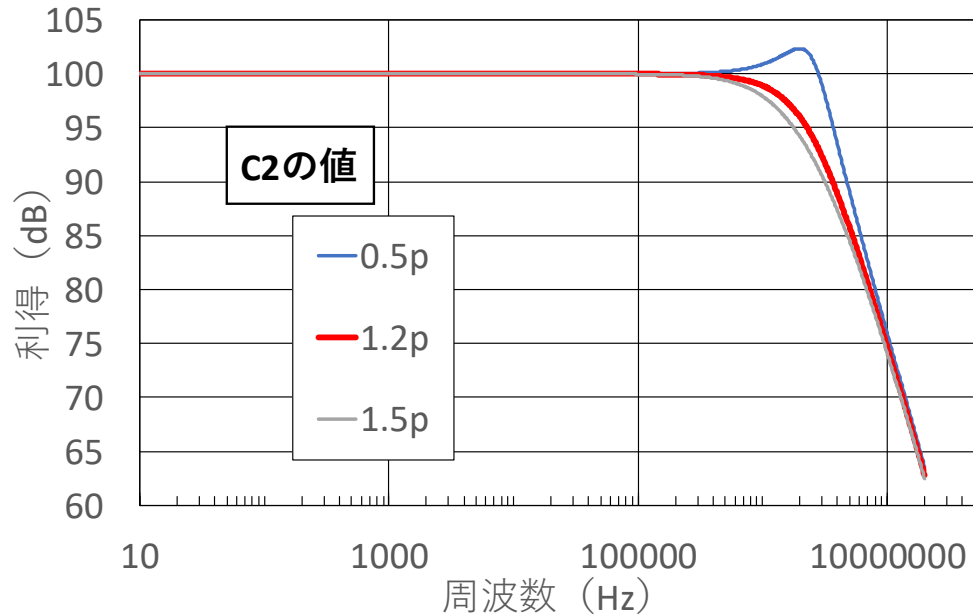


図3 C2の大きさによる利得の変化

図の結果を見ると、600kHz から 3MHz の間で比較した場合ではノイズは 1.2p の方が最大で  $4\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  大きい。図の結果を見ると、C2 が 1.2p の場合の利得と 1.5p の場合の利得を比較した場合 1.5p は 660kHz ほどから利得が落ちていくが 1.2p は 950kHz ほどまで利得が保たれていることがわかる。2つのグラフを比較すると、Cfの値を大きくするほどノイズが小さくなるが、帯域幅は小さくなっていく。

## 5 実験概要

TIAの電流電圧変換においてノイズを小さくするためには用いるフォトダイオードの容量

や必要な出力電圧の大きさによって  $C_f, R_f$  の大きさを変更する必要がある。図に今回作成

した TIA の回路図を示す。

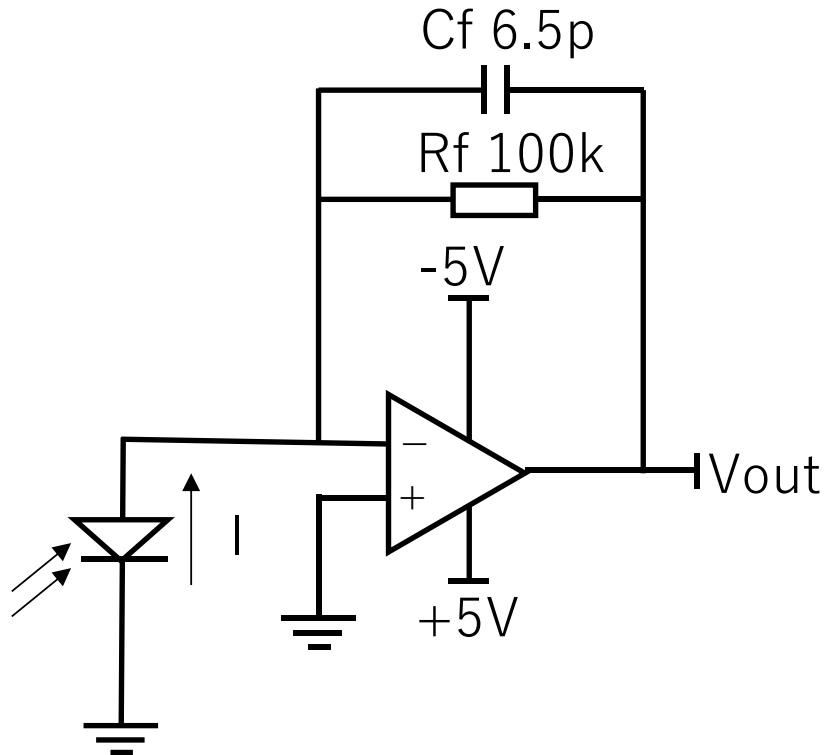


図 作成した TIA の回路図

TIA の動作について述べる。まずフォトダイオードに光が入射し、発生した電流は逆方向

電流なので図の通りに流れる。オペアンプの反転入力端子は入力インピーダンスが非常に

高いため発生した電流は全て  $R_f$  に流れる。よって  $V_{out} = -(R_f * I)$  で計算できる。

## 5.1 実験装置による測定

今回作成した TIA の動作確認のために以下の実験を行った。図に動作確認のための実験構成図を示す。

成図を示す。

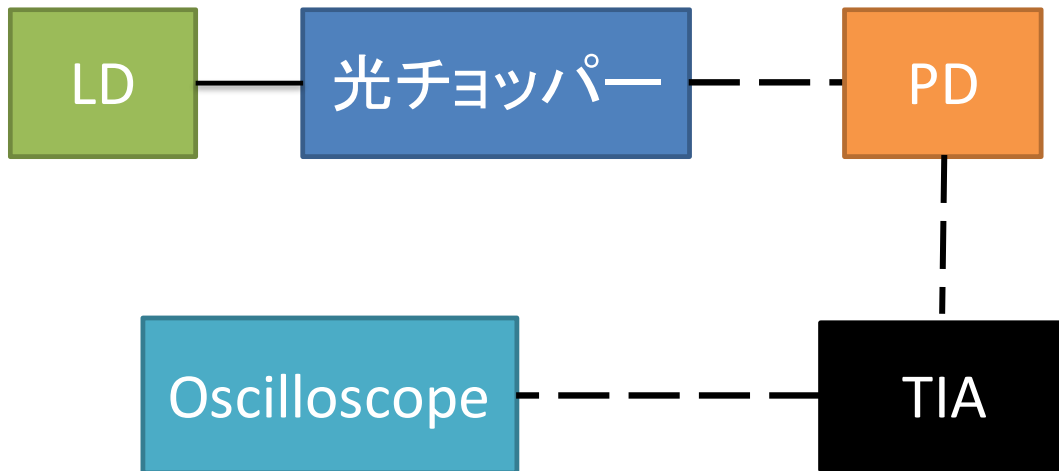


図 動作確認のための実験構成図

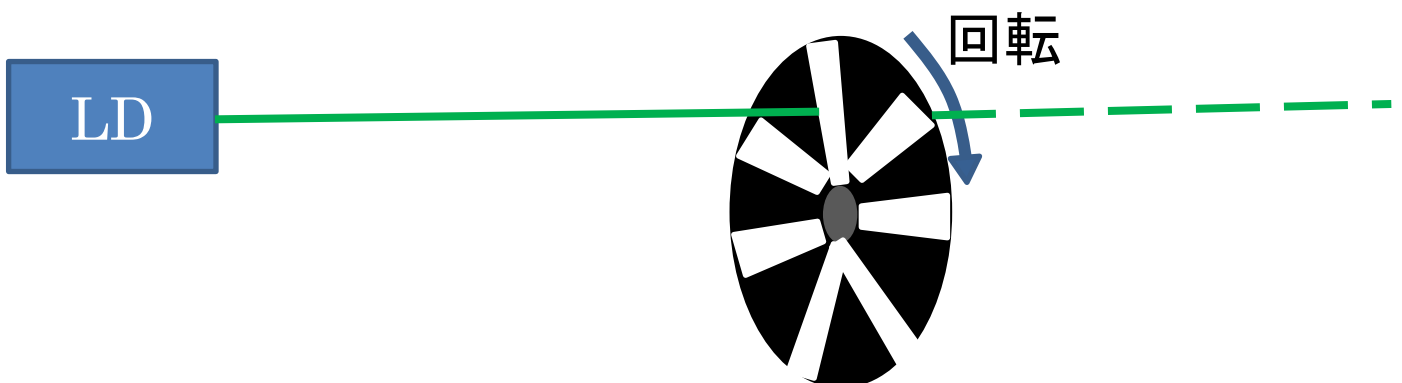
## 5.2 実験装置の構成

緑色レーザー (LD)

光チョッパー

図にレーザー光変調の様子を示す。光チョッパーは円形のブレードで、回転させることによ

ってレーザー光の変調を行うことができる。



## 図 レーザ光変調の様子

フォトダイオード (PD) S5821-02K

オペアンプ OPA827

オシロスコープ (Oscilloscope)

### 5.3 実験装置の概要

出射されたレーザ光は光チョッパーによって 1kHz の信号としてフォトダイオードに入射する。フォトダイオードでは入射光に応じた電流が発生する。発生した電流は TIA の入力となる。TIA の出力電圧をオシロスコープで測定する。

この実験では光チョッパーを用いて、光を入射していないときと入射しているときの TIA の出力電圧を比較する。

### 5.4 実験結果

図に TIA の動作確認の結果を示す。

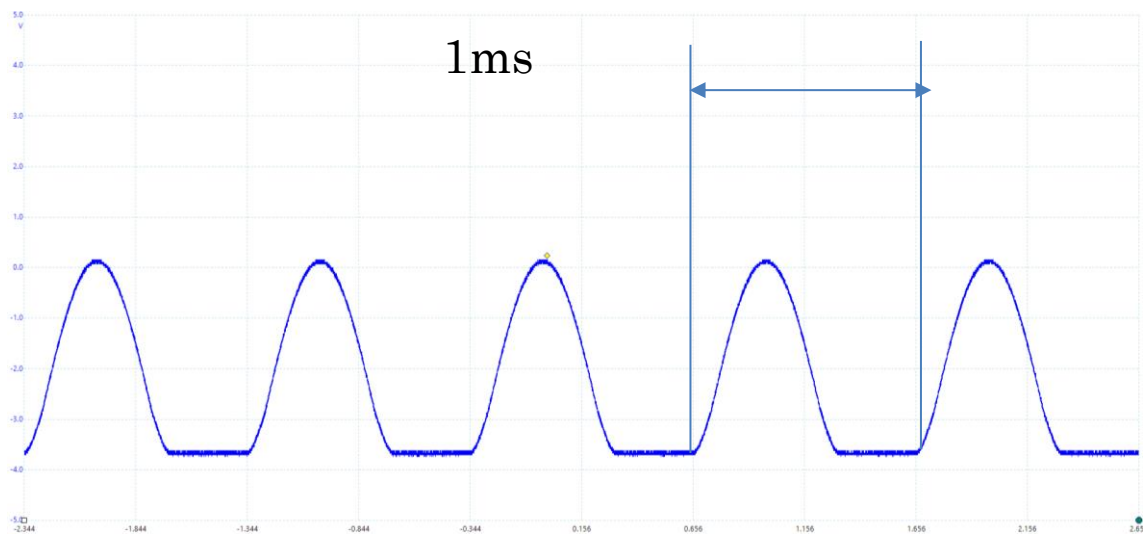


図 TIA の動作確認結果

-3.5V でオペアンプが飽和していることがわかる。

1 周期の時間はグラフから読み取ると 1ms となる。今回光チョッパーは 1kHz に設定しているため電流電圧変換ができていることが確認できた。

## 6 ノイズの測定

TIA のノイズ測定を行う際には、フォトダイオードに光を入射しない状態で測定する。

この状態では TIA の出力はオペアンプのバイアス電流、フォトダイオードの暗電流を考慮しても数 10nA ほどしかないので出力電圧を測定するためにはさらに出力電圧を増幅する必要がある。そのためにポストアンプを用いる。ポストアンプの回路図を図に示す。

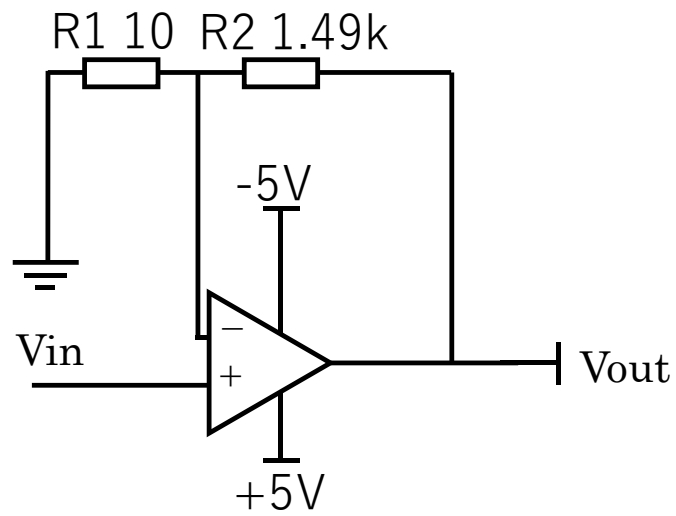


図 ポストアンプの回路図

非反転増幅回路になっており、その増幅率は以下の式で表される。

$$V_{out} = V_{+} * \left( 1 + \left( \frac{R2}{R1} \right) \right)$$

式からわかるように $V_{out}$ は入力 $V_{+}$ と  $R1, R2$  のみで増幅率が決定するため今回作成した回路の場合、約 150 倍となる。

## 6.1 ノイズ測定

図にノイズの測定を行うために作成した回路図を示す。

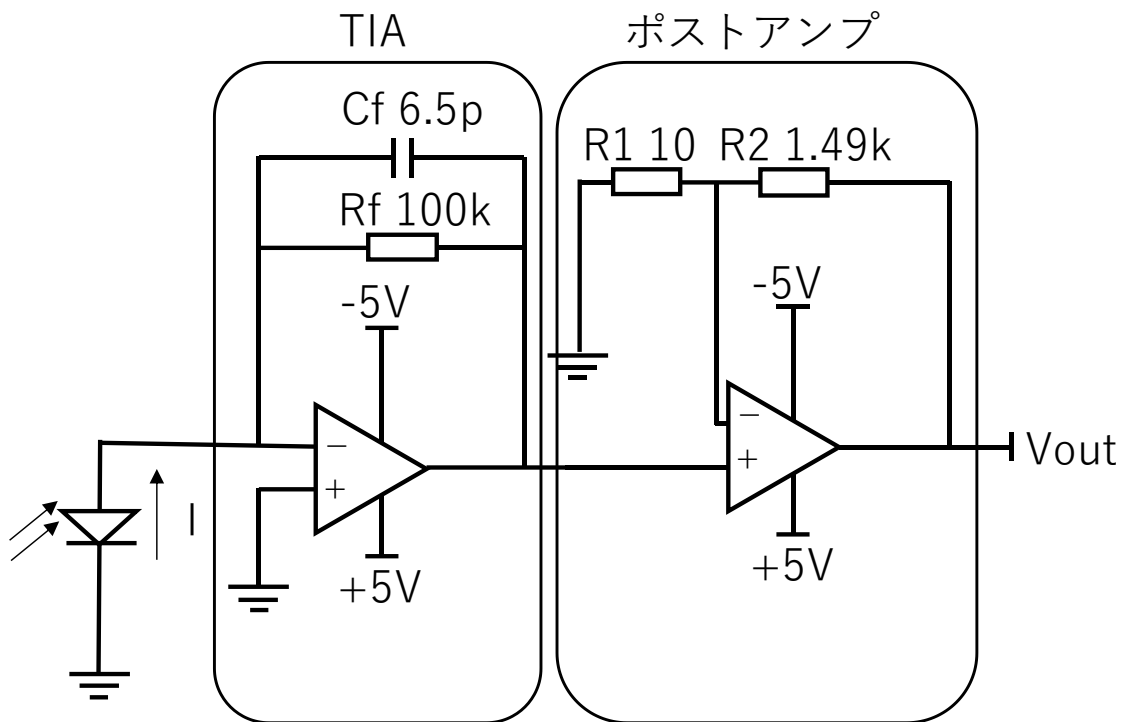


図 ノイズの測定を行うために作成した回路図

フォトダイオードに光が入射しないように箱で回路全体を覆った上で実験を行った。

## 6.2 実験結果

ポストアンプで増幅した後、スペクトラムアナライザを用いて測定した。グラフは横軸周

波数[Hz],縦軸電圧[ $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ ]となっている。図にノイズの測定結果を示す。



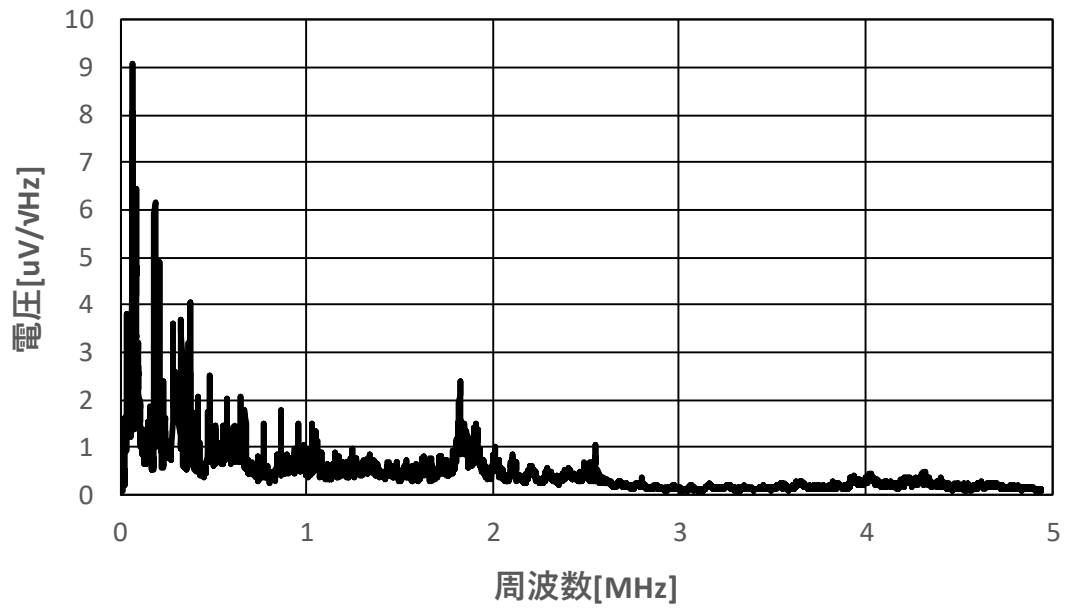


図 ノイズの測定結果

測定結果を見ると 6.2kHz 時のノイズが最も大きく  $9[\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}]$  となっている。

ノイズは低い周波数帯で大きくなっていることがわかる。

図のグラフはポストアンプで増幅後の値なので TIA のノイズを計算した。

ポストアンプの倍率は 150 倍なので

$$9 * 10^{-6}[\text{V}] * \frac{1}{150} = 0.6 * 10^{-7}[\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}]$$

60[nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ]になる。

## 7 まとめ

シミュレーションソフト TINA を用いて、帯域幅を保ちつつノイズを抑えることのできる補償用コンデンサの値を式より求めた。

TIA（トランスインピーダンス回路）を作成し、TIA の動作と TIA のノイズについて実験装置で測定を行った。

TIA の動作を確認し、光チョッパーに設定した周波数と同じ周波数で電圧が出力されていることから電流電圧変換ができていることが確認できた。しかし、作成した TIA では波形の-3.8[V]より下は飽和してしまい、歪んだ波形になってしまっている。

TIA のノイズ測定では、6.2kHz 時のノイズが最も大きく  $9\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$  となっていることがわかった。

今回作成した TIA はまだノイズを減らす余地があり線材を減らす、無駄なはんだ付けをなくすことが必要である。