

小面積と大面積のフォトダイオード用の低ノイズ・アンプ

デザインノート399

Glen Brisebois

はじめに

フォトダイオードは2つに分類することができます。高い容量(30pF~3000pF)の大面積フォトダイオードと相対的に低い容量(10pF以下)のフォトダイオードです。最良の信号対雑音性能を得るため、フォトダイオードの電流を電圧に変換するのに、反転オペアンプと帰還抵抗で構成されるトランスインピーダンス・アンプが広く使われています。低ノイズ・アンプの設計では、大面積フォトダイオード用アンプの場合はオペアンプの入力電圧ノイズを下げることに多くの注意を払う必要があります。他方、小面積フォトダイオード用アンプの場合はオペアンプの入力電流ノイズと寄生容量に多くの注意を払う必要があります。

小面積フォトダイオード用アンプ

小面積フォトダイオードの容量は非常に低く、一般に10pF以下で、1pF以下のものさえあります。それらは容量が低いので、大面積フォトダイオードに比べて、高い周波数では近似的に電流ソースになります。小面積フォトダイオード用アンプの設計における困難な課題の1つは、電圧ノイズが問題にならずに電流ノイズが支配的になるように、入力容量を低く保つことです。

LTC6244を使った簡単な小面積フォトダイオード・アンプを図1に示します。

アンプの入力容量は、 C_{DM} (アンプの差動容量)と1つの C_{CM} (アンプのマイナス入力だけの同相容量)で構成され、

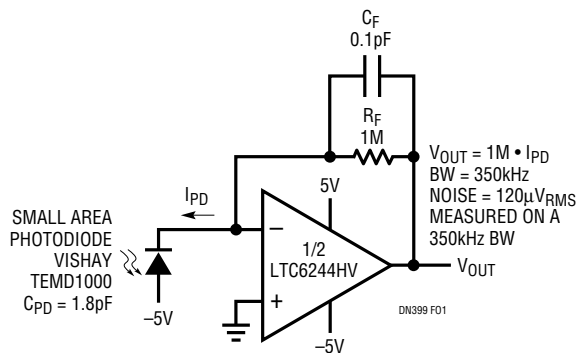


図1. 小面積フォトダイオード用トランスインピーダンス・アンプ

合計約6pFです。小さなフォトダイオードの容量は1.8pFなので、アンプの入力容量が支配的容量となります。小さな帰還容量は実際の部品(AVXのAccu-Fシリーズ)ですが、オペアンプのリード、抵抗および寄生容量と並列になるので、実際の合計帰還容量は約0.4pFになるでしょう。このことは重要です。なぜなら、帰還容量は回路の補償と(オペアンプの利得帯域幅とともに)回路の帯域幅を設定するからです。この特定のデザインの帯域幅は350kHzで、その帯域幅で測定した出力ノイズは120 μ V_{RMS}です。

大面積フォトダイオード用アンプ

簡単な大面積フォトダイオード用アンプを図2aに示します。このフォトダイオードの容量は3650pF(公称3000pF)で、これは回路のノイズ性能に大きな影響を与えます。たとえば、10kHzでのフォトダイオードの容量は4.36k Ω のインピーダンスに等しいので、帰還抵抗が1M Ω のオペアンプ回路のノイズ利得はその周波数で $NG=1+1M/4.36k=230$ です。したがって、LTC6244の入力電圧ノイズは $NG \cdot 7.8nV/\sqrt{Hz}=1800nV/\sqrt{Hz}$ として出力に現れ、これは回路の出力ノイズ・スペクトル(図2b)に明らかに見ることができます。オペアンプの電流ノイズ、つまり利得抵抗の130nV/ \sqrt{Hz} をまだ計算に入れていないことに注意してください。とはいえ、これらはオペアンプの電圧ノイズとノイズ利得に比べると明らかに取るに足りないものです。参考までに、この回路のDC出力オフセットは約100 μ V、帯域幅は52kHz、全ノイズの測定値は100kHzの測定帯域幅で1.7mV_{RMS}でした。

この回路を改良した回路を図3aに示します。この回路では大きなダイオード容量が1nV/ \sqrt{Hz} のJFETでブートストラップされています。このデプレッション型JFETのVGSは約-0.5Vなので、RBIASにより、このJFETはちょうど1mAを超えるドレイン電流で動作するよう強制されます。図示されているように接続すると、フォトダイオードにはVGSの逆バイアスが加わるので、その容量は前の場合よりわずかに低くなります(測定値は2640pF)、最も顕著な効果はブートストラップによるものです。

新しい回路の出力ノイズを図3bに示します。10kHzでのノイズは今や $220\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ であり、1M帰還抵抗の $130\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ のサーマル・ノイズ・フロアは低い周波数では識別可能です。つまり、オペアンプの $7.8\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ が実効的にJFETの $1\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ によって置き換えられたのです。これは、「1M帰還抵抗はもはや大きなフォトダイオードの容量を「見返さない」ためです。代わりに、帰還抵抗はJFETのゲート容量、オペアンプの入力容量、および(合計約10pF)いくつかの寄生容量を見返します。大きなフォトダイオード容量は低ノイズJFETのゲート-ソース電圧に作用します。以前のように10kHzでサンプル計算すると、フォトダイオードの容量は $6\text{k}\Omega$ のように見えますので、JFETの $1\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ により $1\text{nV}/6\text{k}=167\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ の電流ノイズが生じます。この電流ノイズは必然的に1M帰還抵抗を通して流れますので、出力では

$167\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ として現れます。抵抗の $130\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (RMSとして)を加えると、全ノイズ密度の計算値は $210\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ となり、図3bのノイズの測定値と良く合致します。もう一つの顕著な改善点として、ブートストラップにより補償帰還容量を減らすことが可能となったので、帯域幅が今や350kHzを超えます。ブートストラップは、ゲート電流が数ピコアンペア増える以外、アンプのDC精度には影響を与えないことに注意してください。

フォトダイオード回路の詳細に関しては、LTC6244のデータシートをダウンロードしてください。アンプに対する特定の要求条件に関しては、弊社応用技術部までご相談ください。

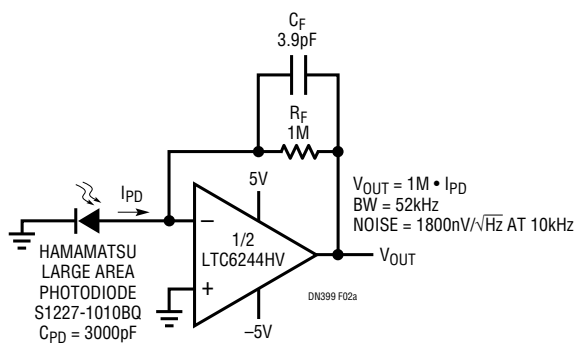


図2a. 大面積フォトダイオード用
トランスインピーダンス・アンプ

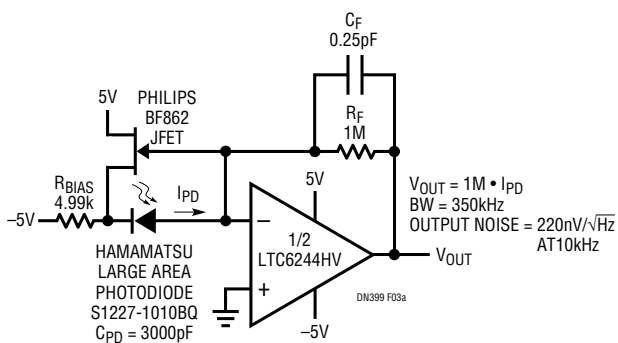


図3a. 大面積ダイオードのブートストラップ

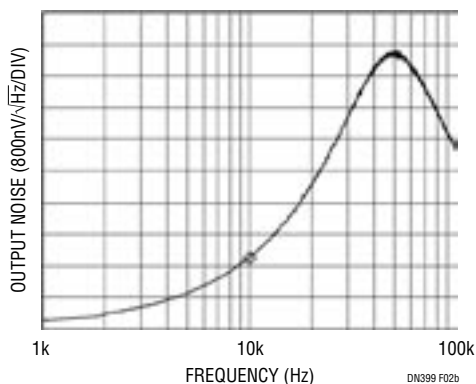


図2b. 図2aの回路の出力ノイズ・スペクトル密度。10kHzでは、 $1800\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ の出力ノイズのほとんど全部が、LTC6244の 7.8nV の電圧ノイズと、フォトダイオードの高容量を見込む1M帰還抵抗の高いノイズ利得に起因する。

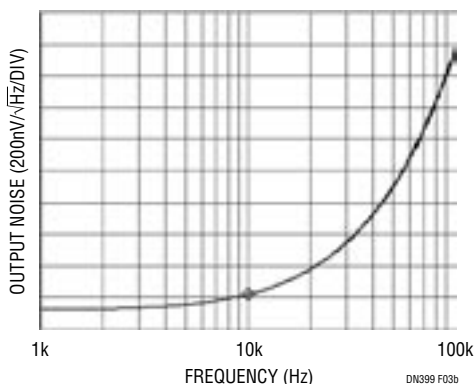


図3b. 図3aの出力ノイズ・スペクトル密度。この簡単なJFETブートストラップはノイズ(および帯域幅)を大幅に改善する。10kHzでのノイズ密度は $220\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ となり、約8.1分の1への減少である。これは主にJFETの $1\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ でオペアンプの $7.8\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ を置き換えたブートストラップ効果による。

データシートのダウンロード

<http://www.linear-tech.co.jp>

リニアテクノロジー株式会社

102-0094 東京都千代田区紀尾井町 3-6 秀和紀尾井町パークビル 8F
TEL(03)5226-7291 FAX(03)5226-0268
<http://www.linear-tech.co.jp>

dn399f 0906 41k • PRINTED IN JAPAN

 LINEAR TECHNOLOGY
© LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION 2006