

F 6

P I N フォトダイオードを用いたフォトンカウンティング

Photon counting by using PIN photodiode

秋葉 誠

Makoto Akiba

郵政省 通信総合研究所

Communications Research Laboratory

Abstract

I am developing photo counting system with PIN photodiode. This system has some merits compared with APD and photomultiplier. We expect no dead time, high quantum efficiency, and low dark counts in the system. But time resolution is very low (~ 2 msec).

はじめに

現在使われているフォトンカウンターとしてはアバランシェ フォトダイオードやフォトマルチプライヤーなどがある。これらのフォトンカウンターは時間分解能は高いものの、不感時間の存在や比較的大きなダークカウントあるいはパルスカウンターといった大きな回路構成が必要であるなどの欠点もある。従って時間分解能が特に必要とされないような場合には必ずしも使いやすいものではない。一方PIN フォトダイオードを使ったフォトンカウンティングはこれらと相補的な関係にある。つまり時間分解能ははるかに悪いが、不感時間がなくダークカウントも小さい。量子効率も高い。また回路構成も簡単であり費用も安くすむ。そこで私は、最もノイズが小さいと考えられる電荷蓄積型検出回路 (charge integrating amplifier、以下C I Aと略す) を使ってどこまでフォトンカウンティングができるかを考察し実験を行った。

回路構成及びその動作

今回の実験に用いた回路を図に載せた。この初段の回路はいわゆる積分回路であり、通常のC I Aで用いる入力F E Tのゲートを浮かしたものと異なった回路を使用している。これはF E Tのゲート電圧を一定に保つことによってF E Tの動作点を常に最良の位置に固定できるだけでなく、フォトダイオードにかかる電圧も一定にでき電圧変化によるダークカレントや容量の変動を抑えることができる。この結果として感度や回路の直線性、更にはダイナミックレンジ等が増大する。またフィードバック容量を小さくし初段でゲインで稼ぐことによって後の回路でノイズが付け加わるようなことを防ぐことができる。

次にこれまでのC I Aにはない特徴は、微分回路を付け加えたことである。この微分回路は、計測時間より遅い時間変動のノイズを落とすことで多少なりともノイズを減らす効果もある。しかし最も重要な役割は、これを付け加えることに依ってS / Nが積分時間tの3/2乗に比例するようになるということである。このことはフォトンカウンティングとは実は直接関係がない。フォトンカウンティングということだけを考えるとS / Nはやはりtの1/2乗でしか良くならない。しかしフォトンカウンティングとまではいかなくとも高い感度が必要な場合には威力を発揮する。この動作原理を簡単に説明する。

もしフォトンが一定の割合で来るとすると、入力容量にたまる電荷量は計測時間tに比例する。この計測時間は微分回路の時定数で決まるから、結局入力容量に貯る電荷量つまり出力電圧は、微分回路の時定数に比例する。一方後段の積分回路の時定数を微分回路の時定数に合わせれば、ノイズは時定数の $-1/2$ 乗に比例して減少する。従ってS / Nとしてはtの3/2乗で改善されるのである。

また従来のC I Aでは計測のために電圧をサンプリングして差を取るといいう操作もしなければならず、たいへんやっかいであったが、この方式ではフォトカレントを直接電圧として読み出すことがことができるのでそうした回路も必要なくたいへん簡単になる。

検出限界

この回路方式で検出限界を決めるのは、入力容量、入力F E Tのノイズ及びフォトダイオードとF E Tの暗電流である。現在手にはいるP I Nフォトダイオードの容量は無論面積や材質にもよるが1 p F程度である。しかし入力容量としてはこれに読みだしF E Tのゲート・ドレイン及びゲート・ソース間の容量、更にリセットF E Tのゲート・ドレイン間の容量等も付け加わることになる。図のようなJ 2 3 0を使ったソースフォロワ回路における実効的な容量はそれぞれ1 p F, 0. 5 p F, 0. 5 p F程度である。従って全体としての入力容量が3 p F程度になるのは避けられない。この時、電子一個によって発生する電圧は5 0 n Vである。

次にF E Tのノイズは数百H zのところでは常温で3 n V / $\sqrt{H z}$ 程であるが、絶対温度で百数十ケルビンまでに冷却することによって雑音を半分程度までに落とすことができる。F E Tを入力で2個使うことと後段のO Pアンプの入力換算ノイズが付け加わることを考慮しても全体として3 n V / $\sqrt{H z}$ に抑えることは可能である。計測時間をtとすると、そのノイズバンド幅 Δf は1/2tであるから、これからS / N = 1のときのtを求めると約2 m s e cになる。

一方暗電流は常温では 3×10^{-13} Aでありこの時のノイズは数 μ Vとなって圧倒的に大きくなってしまふ。しかしF E Tとフォトダイオードを冷却することによって暗電流は極端に小さくなり実際にはF E Tのノイズで決まる程度までに減少する。ここで常温の場合に暗電流によるショットノイズを計算してみると1 0 0 μ V / $\sqrt{H z}$ となる。実際のノイズがこれよりはるかに小さいのは、電子が中性化しようとして電流を均す効果が現われているものと思われる。

また暗電流を抑える際に一つ注意しておかなければならないことがある。暗電流はおもに入力F E Tのゲート・ドレイン間を流れてくる。ゲート・ドレイン間は当然P N接合の逆バイアスになっているわけであるが、ここにあまり電圧をかけるとアバランシェ降伏が起り暗電流が急激に増大する。この降伏電圧は低温で下がると思われる。従って常温において比較的暗電流が小さい電圧であっても低温では降伏電圧を越えてしまいかえって暗電流が増えるという事態を招く可能性がある。こうした心配をなくすためにもそして暗電流をできるだけ減らすためにもドレイン電圧は下げておいた方がよい。暗電流は、ゲート・ソース間にも起こるので、ゲート・ソース間の電圧も小さい方がよいのはいうまでもない。

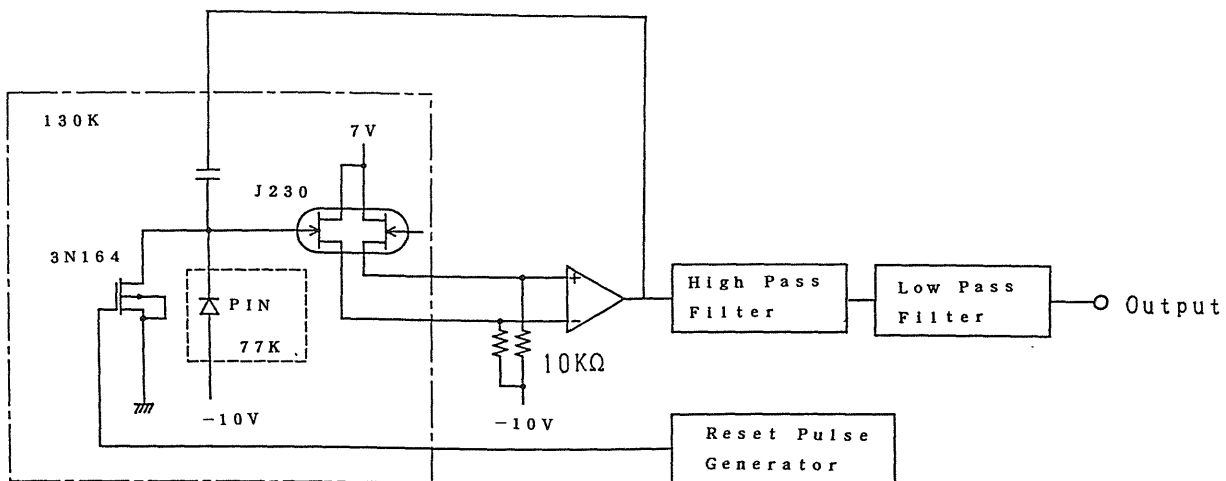


Figure Circuit