

S Q U I D を用いた 光 検 出 シ ス テ ム

new photodetection system by using SQUID

秋葉 誠、 西方 敦博

Makoto Akiba, Atsuhiro Nishikata

郵政省通信総合研究所

Communications Research Laboratory

Abstract

We propose a new photodetection system by using SQUID. The system consists of SQUID, superconducting coil and photodiode. Photocurrent generated in a photodiode is transformed into voltage through a superconducting coil and SQUID. The estimated input noise of the system is $70 \text{ pV}/\sqrt{\text{Hz}}$. The system will make it possible to count photons with sampling rate $1 \mu \text{ sec}$.

1. はじめに

現在、光及び赤外領域で主に使われている光検出器としては、光電子増倍管とフォトダイオードがある。光電子増倍管は高速・高感度であるが、可視域でも量子効率が低く、赤外領域では更に小さくなりほとんど使えない。一方フォトダイオードは、量子効率が高く赤外領域でも使えるものの、高速では著しく感度が落ちる。フォトダイオードのこうした欠点を補うため、アバランシェ・フォトダイオード (APD) がある。しかし APD はその特有のノイズによって全体としてのノイズはかえって増えてしまう。

フォトダイオードの感度は、フォトダイオードそれ自身と言うよりは、抵抗あるいは容量で光電流を電圧に変換しそれを FET もしくはトランジスタで読み出すという方式によっている。しかし容量、ノイズとも現在の素子では限界にきている。そこで我々は、SQUID を使って光電流-電圧変換を行うというこれまでとは全く異なるシステムを考案した。

2. SQUID 検出システムの動作と利点

このシステムの原理は単純である。光電流を超伝導コイルを通じて磁束に変換し、これを SQUID で読み出すというものである。実際の回路構成を図 1 に示した。SQUID そのものはいわゆる dc SQUID 方式である。ただ我々の方式では、SQUID に一定の磁束をかけるという点で従来の dc SQUID とは異なる。従来の方式は SQUID に対して変調磁束

をかけて最良の動作点に来るようにしていたが、我々の目標はフォトンカウントなので磁束そのものの変化は決まっており予め一定の磁束を与えておけば良い。

従来の方式では、容量が光電流を電圧に変える場合に最も感度が良くなる。しかし電流-電圧変

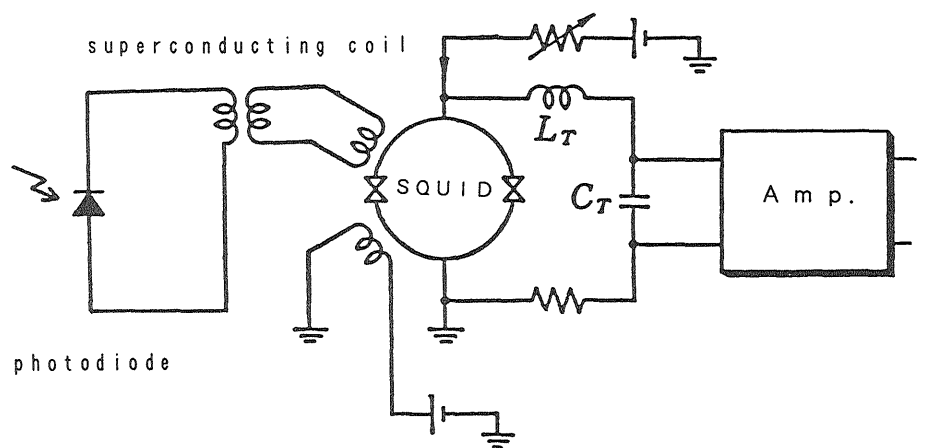


Fig. 1 Electric circuit

換器として S Q U I D を用いると、容量の両端にかかる電圧を更に増幅することができる。また S Q U I D では、従来にない低出力インピーダンス ($\sim 10 \Omega$) が実現できる。

しかし S Q U I D のこうした使い方には、これまでの S Q U I D では考える必要のなかった問題も発生する。フォトダイオードの容量 ($C_d = 5 \text{ pF}$) と超伝導コイルのインダクタンス (50 nH) は共振器を形成するので、S Q U I D の共振回路と結合して互いに影響し合うことになる。そのため発振を起こしてしまう可能性があり、S Q U I D 側の抵抗 ($R = 5 \Omega$) は発振を抑えるために入れてある。図 2 に電圧応答の様子を示した。これは一個の光電子が発生した場合の回路の応答を表している。S Q U I D のパラメータは現在実際に使われているものを使った。また $L_T = 53 \text{ nH}$ 、 $C_T = 5 \text{ pF}$ である。はっきりと見える振動がフォトダイオード側の共振周波数 (300 MHz) であり、更に周波数が高く図では黒く塗りつぶされたように見えるのが S Q U I D 自身が発生する振動 ($\sim 10 \text{ GHz}$) である。この時の電圧増幅率は 6 倍である。

3. ノイズ

S Q U I D のノイズは通常ジョセフソン結合の抵抗による熱雑音であるとされている。これによるノイズ電圧は、 $R = 4 \Omega$ 、 $T = 4.2 \text{ K}$ として $30 \text{ pV} / \sqrt{\text{Hz}}$ 程である。また発振を抑えるために入れた抵抗が共振器で増幅されて出て来る可能性がある。その場合ノイズは $440 \text{ pV} / \sqrt{\text{Hz}}$ にも達する。しかし実際には S Q U I D からの出力電圧を読み出す初段の増幅器の入力換算ノイズに支配されており、現在の所では S Q U I D の性能を出し切れてはいない。そこで我々は、S Q U I D を何段か接続して増幅器で電圧を読み出す前に予め更に増幅することも考えている。

我々の場合にはこうした S Q U I D のノイズ以外にもフォトダイオード系のノイズも考慮しなければならない。もしフォトダイオード系にも抵抗があるとするとそこで発生する熱雑音は、超伝導コイルとフォトダイオードの容量による共振器によって増幅されて S Q U I D に伝わることになる。従って通常のフォトダイオードの読み出し回路より熱雑音に対して敏感になる。図 1 の回路構成では 200 倍程度増幅されてしまう。コイルとしては超伝導コイルを使うので問題となるのはフォトダイオードの内部抵抗である。この内部抵抗はそれぞれの半導体によって異なるが、例えばシリコンの場合常温でも 1Ω 程度である。ヘリウム温度ではこれより何桁も下がるはずであり、S Q U I D の熱雑音と同程度以下になると考えられる。しかしこれについては実験で確かめてみなければ正確なことはいえない。

4. 結論

図 1 の回路構成でシュミレーションした結果、出力電圧としては 6 倍のゲインが得られ、抵抗の熱雑音でノイズが決まるとすれば、入力換算ノイズは $70 \text{ pV} / \sqrt{\text{Hz}}$ となることが分かった。この値は $S/N = 1$ で時間分解能 $1 \mu\text{sec}$ のフォトンカウントができることを示している。但しこれが実現されるためには、フォトダイオードの内部抵抗が $10^{-2} \Omega$ 程度以下でなければならない。また電圧を読み出す初段増幅器のノイズが S Q U I D のノイズよりはるかに大きいので、S Q U I D を何段か重ねて使うことも必要である。

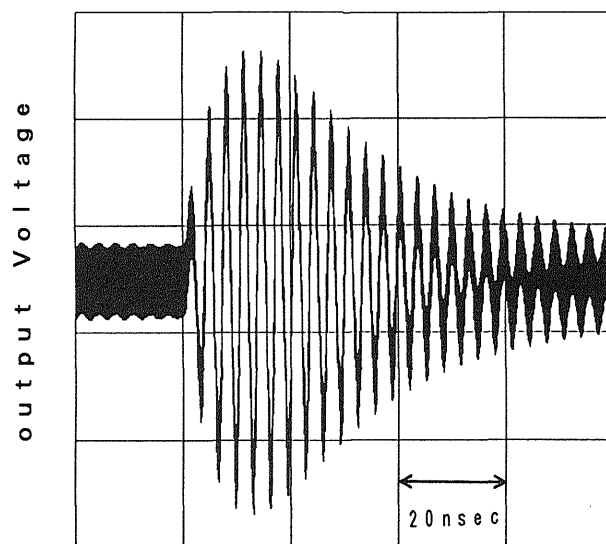


Fig. 2 Voltage response