

Ver. | 2/3 |

超伝導検出器多重読み出し用  
フロントエンド回路の開発

総合研究大学院大  
高エネルギー加速器科学研究所  
素粒子原子核専攻

学籍番号: 20111451  
石塚 光

平成 27 年 1 月 9 日

# 第2章 超伝導検出器MKIDとその読み出し

本章では、MKIDの動作原理の概要とその読み出し方法について述べる。MKIDの利点のひとつである周波数多重読み出しについて述べたあとに、市販のアナログ基板を用いた読み出し系の概要とその不満点を挙げる。本論文の主旨は、この不満を解消するものである。

## 2.1 動作原理

Microwave Kinetic Inductance Detectors (MKID) は、2003 年に発明された超伝導検出器である。MKID は電波を受信するアンテナと超伝導共振器、それに C-coupled したフィードラインから構成される（図 2.1）。各共振器はそれぞれ固有の共振周波数  $\omega = 1/\sqrt{LC}$  をもつ。ここで、 $L$  は共振器のインダクタンス、 $C$  は共振器とフィードラインのカップリングキャパシタンスを表す。

*Ver.12/30のこのページ上部のコメント入れる。*

## 2.2 周波数多重読み出し

## 2.3 読み出し系

読み出し系は MKID の共振ピークの振幅と位相の変化を測定する。MKID の読み出し方法には、DDC ( Direct Down-Conversion ) 方式と FFT ( Fast Fourier Transform ) 方式の二種類が存在し、本論文では共振周波数をより高い精度で設定できる DDC 方式による読み出しについて述べる。

### 2.3.1 読み出し系の構成と大まかな流れ

読み出し系の構成を図 2.3.1 に示す。読み出し系は大きく 4 つの要素に分けられる：

冷却回路：MKID と LNA ( Low Noise Amplifier ) を含めたクライオスタット内にある読み出し部分。

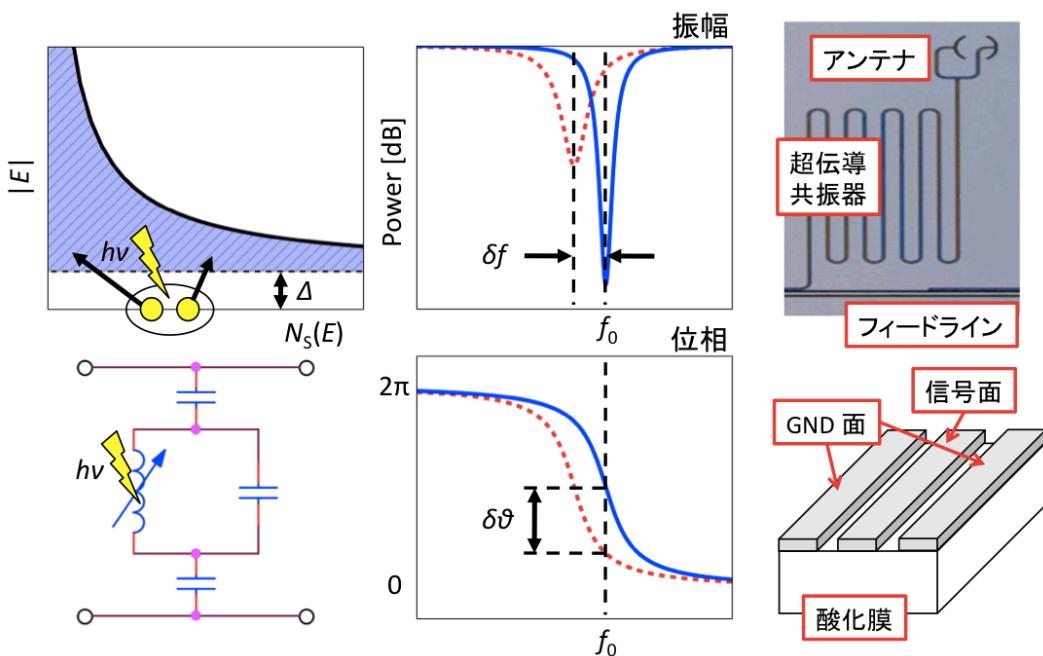


図 2.1: MKID の検出原理。

~~読み出し用の変調信号~~

MHz/GHz コンバーター : MKID に入力する ~~読み出し信号~~ を高周波 (4–8 GHz) に変換 (アップ・コンバード) または ~~MKID から出力される読み出し信号~~ を低周波 (< 100 MHz) に変換 (ダウン・コンバート) する部分。  
← 入力した

アナログ基板 : デジタル変調信号をアナログ信号に変換して送信し、アナログ信号を受信してデジタル信号に変換する部分。

デジタル基板 : アナログ基板に渡すデジタル信号を生成し、またデジタル信号を受け取り情報を処理する部分。

本論文では、アナログ基板とデジタル基板をまとめてフロントエンド回路と呼ぶ。

読み出しの大まかな流れは次のようになる:

1. デジタル基板でデジタル信号を生成し、アナログ基板の DAC (Digital to Analog Converter) から複数の周波数 (< 100 MHz) を重ね合わせた読み出し信号を ~~出力する~~。  
← アナログ変換して出力する。これは複数の変調信号とは異なっている。
2. 局所発振器 (LO) で出力した信号 (数 GHz) と DAC から出力した信号を IQ ミキサーでアップ・コンバートする。  
← 基準 運算 比較 ノイズ アナログ変換
3. アップ・コンバードした読み出し信号を MKID に入力する。このとき、MKID の応答 (振幅と位相の変化) により読み出し信号が変調する。  
← MKIDの共振路の共振によってフィードバックが変化する。  
アンテナ入力信号を共振状態(共振と位相)の変化として計測する。

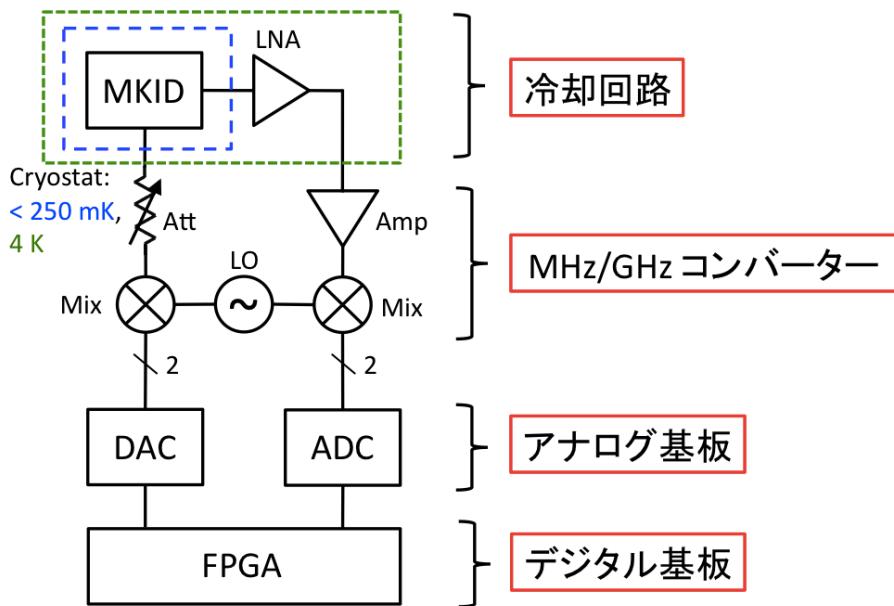


図 2.2: MKID の読み出し系

の共振情報を含むデータ

4. MKID により変調された信号を LNA で増幅する。  
2. の基準信号
5. 増幅した信号と 2. と同じ周波数の信号を LO から出力し、IQ ミキサーでダウン・コンバードする。
6. アナログ基板の ADC ( Analog to Digital Converter ) で MKID により変調された信号をデジタル変換し、デジタル基板でそれぞれの MKID の共振ピークの振幅と位相の変化を測定する。 復元し、

### 2.3.2 読み出し原理

## 2.4 既存の読み出し系

### 2.4.1 解決すべき課題

FMC150 は ADC や DAC の性能は読み出し系として満足する。しかし、読み出し系には不必要的機能が実装されているために、その性能を十分に活かせていない。また、性能以外にもユーザーの利便性を阻害する仕様が解決すべき課題として存在する。

この図の下にして、さらに図2.2との違いがわかるようになる。同じページにあると比較しやすい。

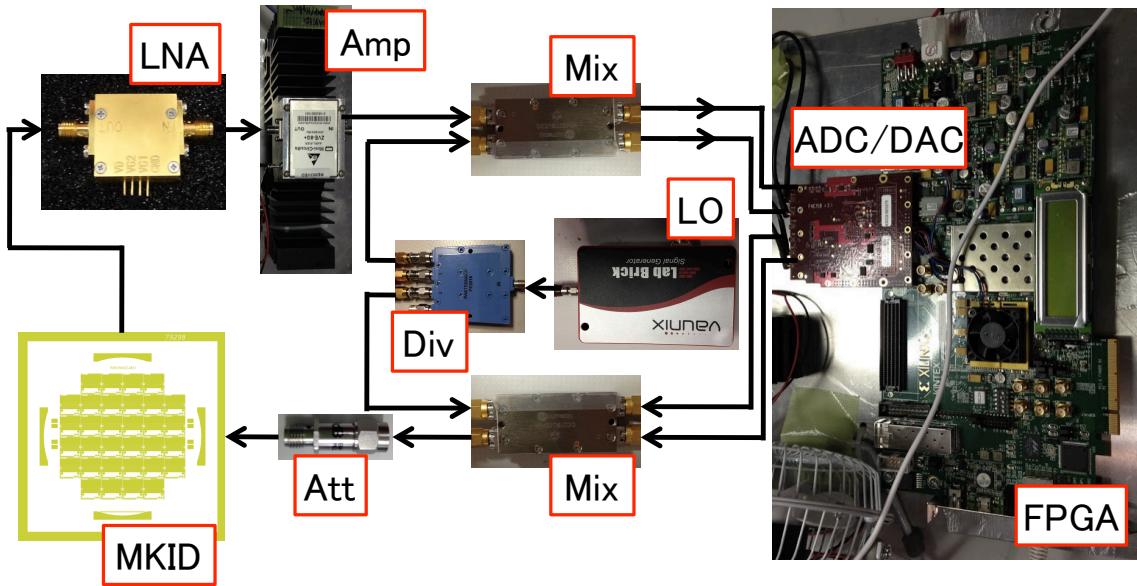


図 2.3: 既存の MKID の読み出し系

### ローパスフィルターによる帯域の制限

多重読み出しがためには、なるべく広い帯域を確保する必要がある。FMC150 は図 2.4 のようなローパスフィルターが実装されているため、82 MHz 以上の帯域を使用することができない。  
 読み出しの速度は帯域の広さに比例する。  
 MKID の利得を最大化するためには、帯域の広さは最も重要なポイントである。

### 消費電力の過大

消費電力の問題は、主に IC の発熱の問題として表れる。IC は動作温度以上に発熱すると、読み出し系が不安定になることが確認されている。また、図 2.4.1 のような排熱処理を怠ると基板を破損する場合もある。  
 基板上の IC が熱で破損する。(実際、破損した)  
 ユーザビリティの毀損

電力不足で  
オキレこそ多く  
こと!

FMC150 はクロックを分周して使うことを前提に設計されている。そのため、水晶発振器の周波数は 245.76 MHz のものが搭載されている。しかし、現在の用途はクロックを様々な周波数に分周して使うことではない。クロックの周波数は ADC と DAC のサンプリング・レートを決めるため、できるだけ高い周波数のものが好ましいが、周波数分解能の値も重要である。実際に MKID の測定を行う際は、まず帯域全体をスイープして、どの周波数にそれぞれの MKID の共振ピークがあるか測定する。次に、それぞれの MKID についてを定点観測を行う。このとき、ユーザーはあ

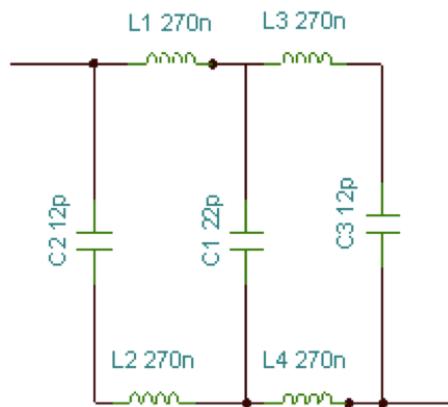


図 2.4: 第 5 次 チェビシェフ フィルター。コーナー周波数は 82 MHz に設計され、それより高い周波数は -124.9 dB/decade で減衰する。



図 2.5: FMC150 のエアフローを向上させるために取り付けた USB 扇風機。IC の排熱処理は必須で、~~回路図上では冷却ファンの存在も確認できる（未実装）~~

ううう。

Ver. 12/30

# 超伝導検出器多重読み出し用フロントエンド回路の開発

総合研究大学院大  
高エネルギー加速器科学研究所  
素粒子原子核専攻

学籍番号: 20111451  
石塚 光

平成 27 年 1 月 9 日

アンテナで受信した電波信号が共振器内のケーブル対をかいりし、インダクタンスが変化する。  
MKIDは、その変化を共振器の変化として検出する。  
共振周波数は4-6GHzあたりに設定されたことが多い。

## 第2章 超伝導検出器MKIDとその読み出し

Ver. 1.0のてんすくを反映

この章では、MKIDの動作原理の概要とその読み出し方法について述べる。MKIDの利点のひとつである周波数多重読み出しは、市販品ではうまく活かすことができない。その他にもこの市販品をMKIDの読み出しに使うには不満となる要素が存在する。章の最後で既存の読み出し系についてまとめ、その解決すべき課題について議論する。

### 2.1 動作原理

[図]参考文献へ→ミマくんにきけ

2003年に発明された

Microwave Kinetic Inductance Detectors (MKID) は、マイクロ波帯に感度をもつ超伝導検出器である。MKIDはマイクロ波を受信するアンテナと超伝導共振器、それに C-coupled したフィードラインから構成される(図 ??)。また、MKIDは各共振器に固有の共振周波数  $\omega = 1/\sqrt{LC}$  をもち、このインダクタンス  $L$  の変化を検出することで、入射する光子のエネルギーを測定する。

ここで、Lは共振器のインダクタンス、Cは共振器とフィードラインのカーボリンクチャバシタスをあらわす。

### 2.2 周波数多重読み出し

### 2.3 読み出し系

読み出し系はMKIDの共振ピークの振幅と位相の変化を測定する。MKIDの読み出し方法には、DDC(Direct Down-Conversion)方式とFFT(Fast Fourier Transform)方式の二種類が存在し、本論文では構成が比較的簡単な DDC 方式による MKID の読み出しについて述べる。

共振周波数をより高い精度で設定できる

#### 2.3.1 読み出し系の構成

読み出し系の構成を図 2.3.1 に示す。読み出し系は大きく 4 つの要素に分けられる: