

誘電体温度計を用いたメガピクセルマイクロカロリメータの開発

菊地 貴大 (ISAS/JAXA)

2012年9月1日

我々は次世代の X 線天文衛星への搭載を目指し、マイクロカロリメータを開発している。これは極低温 (~ 100 mK) で X 線光子 1 つずつのエネルギーを優れた分解能で測る検出器である。例えば、抵抗温度計を用いたカロリメータでは $E/\Delta E \sim 2000$ を達成している。しかし従来、このような分解能を保ち、キロピクセル以上増やすことは困難だと考えられる。将来的には X 線 CCD 並の撮像能力を得るために、メガピクセルを可能にする信号多重化の実現へ向けて技術革新が必要である。我々はそれを可能にすると考えられる誘電体カロリメータの開発を進めている。これは誘電体温度計をキャパシタとして用いた LC 共振器を素子とし、共振周波数の変化から X 線エネルギーを測定するものである。GHz 帯を用いて 1 本の配線に共振周波数の異なる共振器を並列接続することで、1000 以上の素子を並べ、信号多重化が可能と考えられている。これまで我々は極低温で温度変化のある誘電体を探索し、チタン酸ストロンチウム (STO) がその有力候補であることを示した。私はその STO を用いた LC 共振器のデザインを確立させるために、電磁界シュミレータによる設計、製作、GHz 帯回路測定器による評価を行っている。本講演では誘電体カロリメータの原理と開発現状を発表する。

1 導入

1.1 X 線マイクロカロリメータと温度計

図 1 に示すように X 線マイクロカロリメータは、素子 (吸収体と温度計)、熱リンク、熱浴から構成される。素子の熱容量を C_{th} とする。

吸収体に X 線光子が入射すると光電効果によって吸収され、そのエネルギーが熱に変わることで素子の温度が上昇する。入射 X 線エネルギー E に対する素子の温度上昇 ΔT_{up} は

$$\Delta T_{up} = \frac{E}{C_{th}} \quad (1)$$

と表ゆされる。この変化量を正確に測定することで X 線のエネルギー E を測定することができる。しかし、 E は keV オーダーであるため、 ΔT_{up} はどうしても微小になってしまう。高いエネルギー分解能を達成するためには、熱容量 C_{th} が小さな素子を極低温 (~ 100 mK) で動作させ、かつ高感度の温度計を用いる必要がある。

主に高感度の温度計として用いられるのは半導体や金属の物性値の温度依存性である。温度依存する物性値を P とし、これを温度計として用いるとき、その感度を α を、

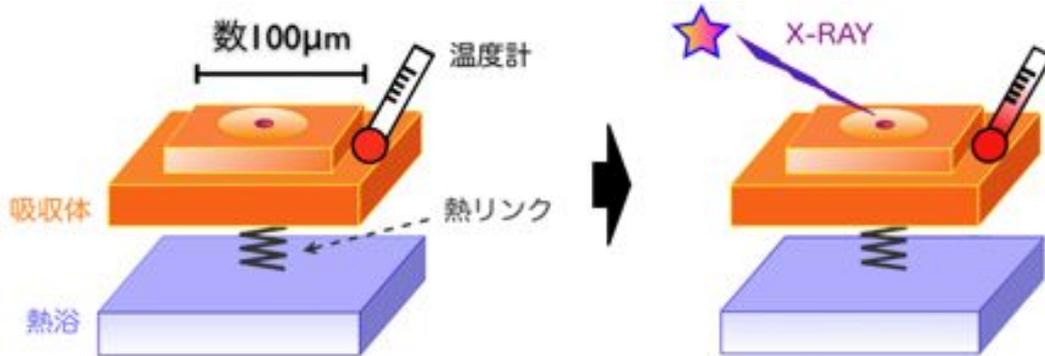


図1 X線マイクロカロリメータの原理図

$$\alpha \equiv \frac{d \log P}{d \log T} \quad (2)$$

と定義する。ただし、 T は温度計素子の温度である。一方、誘電体マイクロカロリメータは前述のように TES 型が持っている熱雑音、自己発熱、多素子のアレイ化の問題を解消できると期待されているが、超伝導遷移端のような急激な温度変化を示すものではなく、誘電率の温度変化を利用する。

1.2 誘電体カロリメータの原理

誘電体温度計を素子として入射 X 線による温度上昇を測定する。誘電体温度計の読み出しには LC 共振回路を用いる。図 2 に透過回路図を示す。ここで C_c は伝送線路との結合容量を表し、 C_{di} と L_i で構成される部分が温度計素子の部分の透過回路図であり、 C_{di} は STO を極板間物質として用いたコンデンサーである。各 LC 共振器の共振周波数を $f_1, f_2, f_3, \dots, f_i, \dots$ とする。X 線の測定には入射電力と透過電力の比を用いる。入射電力の周波数が $f_1, f_2, f_3, \dots, f_i, \dots$ のとき、ほとんどの電力が GND へ落ち透過電力が低下する共振現象が起きる (図 2)。温度計素子に X 線入射があると、誘電体が X 線を受け止め光電効果により素子の温度が上がり、誘電率の変化が起こり、キャパシタンスの変化が起こり、共振周波数の変化 Δf_i が起こる (図 2)。この共振周波数の変化はコンデンサーの極板に理想的なものを用いた場合、以下の値をとる。

$$2\pi\Delta f_i \sim 4.7 \times 10^{-3} \times \left(\frac{\alpha}{f_i}\right) \quad (3)$$

1 本の伝送線路に沿って 100 素子並べると考え、1 GHz の帯域で共振周波数を 100 kHz 間隔で並べたとすると、 $1[\text{GHz}]/1[\text{kHz}/\text{素子}] = 100\text{M}$ 素子の信号多重化が可能になる。

1.3 誘電体温度計チタン酸ストロンチウム

われわれはこれまでの研究によりチタン酸ストロンチウム (以下 STO) が極低温で温度感度があると示してきた [1]。その温度計感度 α は 0.001 程度である。

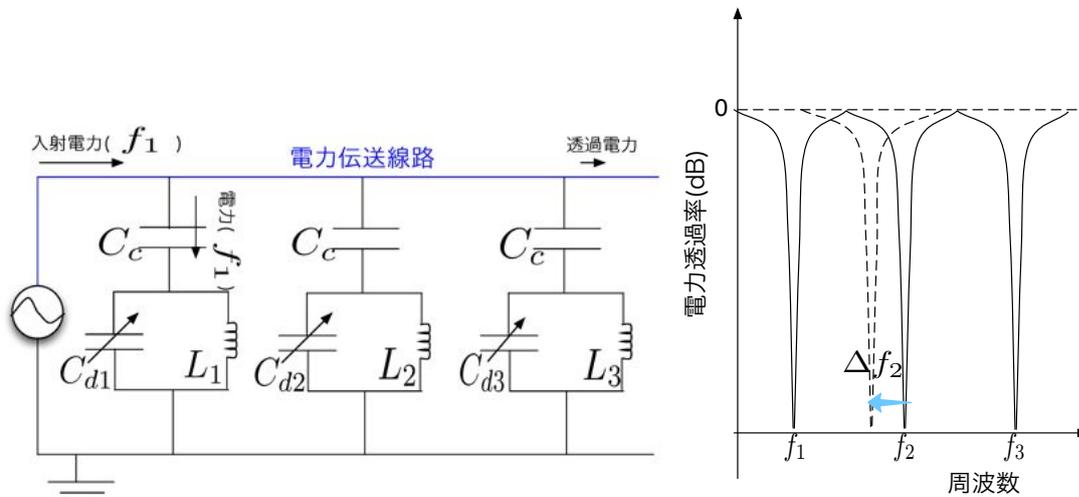


図2 共振時の電力透過の現象と電力透過の周波数特性

1.4 誘電体マイクロカロリメータ開発での現在の位置づけ

誘電体マイクロカロリメータは最終的にメガピクセルかつ $E/\Delta E \sim 1000$ という性能をめざしており、そこに至までの過程はおおよそ以下の通りだと考えられる。

図3の”室温での共振現象の確認”に現在取り組んでいる。

2 室温における電力透過特性の測定

2.1 測定のためのセットアップ

常温での電力伝送のために銅製の CoPlaner Waveguide(以下、CPW)を用いた(図4)。誘電体温度計には STO にアルミを成膜した共振器を用いた(図5)。

電力伝送線路の溝(0.39 mm)にそろえて共振器を置くことで、共振器と電力伝送線路が極板となって結合容量 C_c が生じる(図6参照)。共振器と STO で C_{di} と L_i を担う。測定にはネットワークアナライザを用いた。

2.2 温度計素子の構造と共振周波数

温度計素子には、図5のように STO にアルミが成膜している。このアルミの一端は GND に落としてあり、4分の1波長器を形成している。アルミの長さは共振器の担う L_i , C_i の並列部分のインピーダンス Z_{cli} がインダクタンス的 ($Im(Z_{cli}) \leq 0$) に働くために必要な長さであり、今回の実験では最大長にしており(図4)、1 GHz の信号に対して 5.3 mm である。

温度計素子の Z_{cli} と結合容量の C_c によって LC 直列回路が並列に形成され、共振は

$$\text{Im}(j\omega C + 1/Z_{cli}) = 0 \quad (4)$$



図3 誘電体マイクロカロリメータ開発までの流れ

となる周波数で起こる。電磁界シュミレータでは、図5のように共振器を置いて電力透過特性を調べており、共振現象がみられた。

2.3 電力透過特性の測定 1

共振器を図5のように溝にそって置き、室温で電力透過特性を測定した。図5は図6のようにCPWの上に置いている。

図??の 0 dB が電力透過率 100 % を示す。この測定では電力透過率の減少である共振は確認できなかった。シミュレータで共振現象は確認できて、本測定で共振が確認できなかった原因は分かっていない。

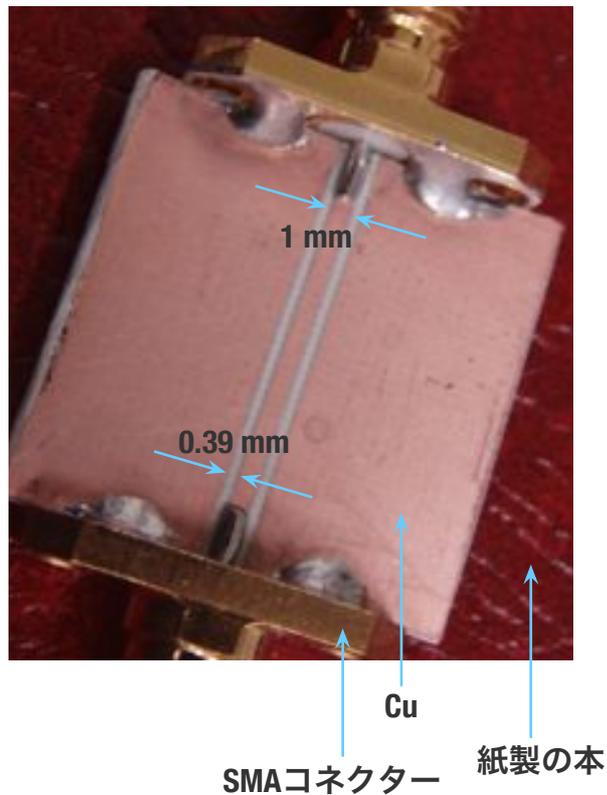


図4 左:紙製の本(赤色)の上のCPW、右:左図の寸法

2.4 電力透過特性の測定 2

次に共振器を図のように置いて常温で測定した。図8の置き方は電力伝送線路と共振器を極板とする平行平板のコンデンサーの容量 C_c を、アルミテープで共振器を支えることで大きくしている。どの程度近づけたかは測定していないが、近づけることによって電力透過率はより減少するので [1]、2.3 で出なかった電力透過率の減少が見られると考えた。その測定結果 (図9) をみると電力透過率の減少が見られ $Q \sim 10$ であった。また、置き方の違いを比べると、より伝送線路に近づけた方が電力透過率は小さくなっており、期待していた結果が得られた。しかし $Q \sim 10$ では信号多重化はできない。動インダクタンス検出器 (KIDs) では $Q \sim 10^5$ を達成している [2]。

3 まとめと今後の課題

誘電体マイクロカロリメータ (DMC) は GHz 帯域に LC 共振器の共振周波数を並べ、X 線入射による共振周波数の変化で X 線を検出する。DMC の開発においては低温で共振現象を確認することが近々の課題であり、そのために私は常温で共振現象を確認する実験を行い、共振現象を確認した。しかし、当初の設計 (図6)

STO実装外観写真

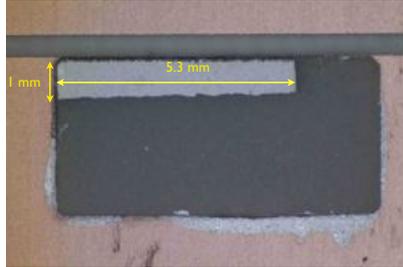


図5 STOにアルミを成膜した温度計素子

とは異なった設計（図8）で共振現象を確認しており、共振現象が確認できなかった原因は分かっていない。共振が確認できた測定では、電力伝送線路と共振器の距離を近づけるほど電力透過率は低下した。今後は原因究明のためアルミを超伝導にすることで電力透過率は現象するので、0.5 K 程度で共振現象が確認できるかを調べる。これにより共振していれば、常温で抵抗成分が原因の1つで共振が見れなかったことが分かる。誘電体の表面の凹凸 ($\pm 1 \mu\text{m}$) を考えると、共振器の厚さ $1 \mu\text{m}$ は薄すぎて影響を受けてしまっているため、さらに厚くした共振器を製作して電力透過率を測定する。

参考文献

- [1] Sekiya et al. 2012, Journal of Low Temperature Physics(2012), Volume167:435-441
- [2] Barends, R., 2009, Ph.D.thesis, Delft University of Technology

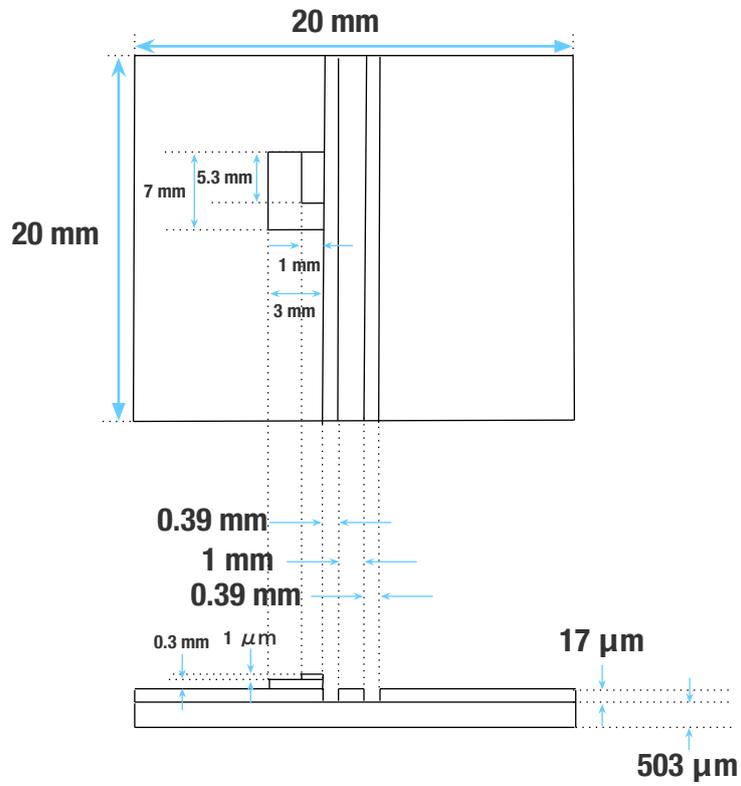


図6 共振器の配置と寸法

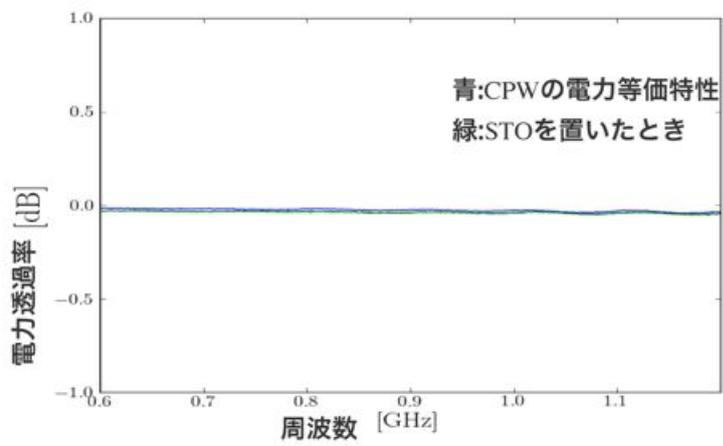


図7 図5の電力透過率の周波数依存性

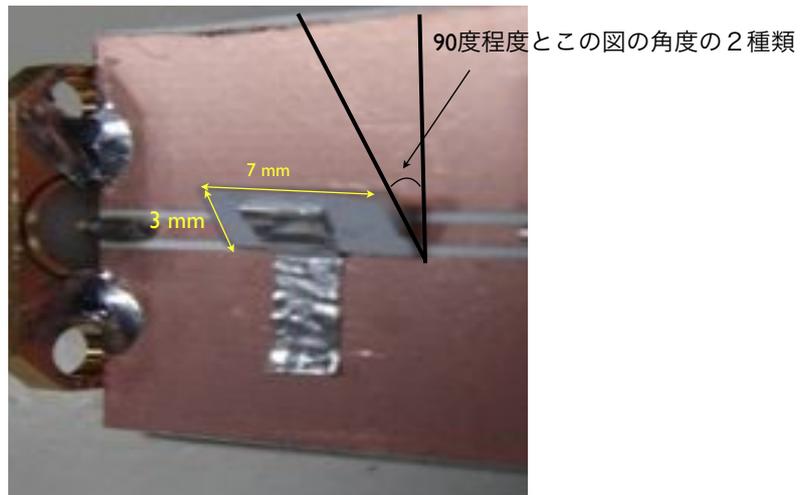


図8 アルミテープでSTOを斜めに固定して置いた図

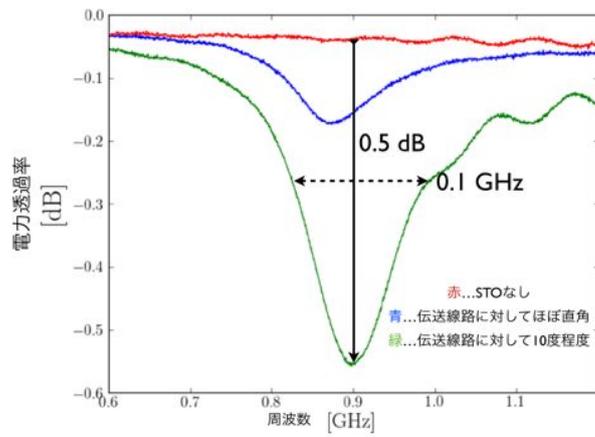


図9 図8での電力透過特性