

論文内容の要旨

論文題目 Ir 超伝導転移端センサを用いた高分解能 X 線マイクロカロリメータの開発

氏名 國枝 雄一

研究背景・研究目的

X 線天体観測分野や X 線分析を利用した生体計測、材料分析分野等への適用を目指して超伝導転移端センサ(Transition Edge Sensor:TES)型マイクロカロリメータの開発が行われている。TES マイクロカロリメータでは一般に X 線センサとして μm オーダーサイズの超伝導体を利用し、動作温度は 100mK 程度の極低温にする。この検出器では X 線入射による微小な温度上昇を急峻な超伝導転移端で抵抗変化に変換し、X 線エネルギーを測定する。特長は既存の半導体検出器に比べて 1 桁以上高い精度で測定することが可能な点あり、現在までに 6keV に対して 2.8eV のエネルギー分解能が報告されている。もう 1 つの特長は超伝導転移端における急峻な抵抗変化を利用した電熱フィードバック(ElectroThermal Feedback:ETF)方式によってマイクロカロリメータのこれまでの欠点とされていた長い応答時定数を他の温度センサを使用する場合よりも 2 桁程度短くすることが可能な点である。世界各地の研究機関で TES マイクロカロリメータの研究が行われているが、各グループでは現在、超伝導物質ごとで性質の異なる発生原因の不明な余剰ノイズ(Excess Noise)の解明と X 線天体観測分野で要求されている 1000 ピクセル程度のアレイ化構造の開発の 2 点が盛んに行われている。本研究では TES マイクロカロリメータの X 線センサに適している Ir(イリジウム)を利用し、高エネルギー分解能を目的とした Ir と Au(金)で構成されるバイレイヤ型デバイスとピクセルアレイ化を目指した 20 ピクセル型デバイスの TES マイクロカロリメータを試作し、50mK まで冷却可能な希釈冷凍機を用いてそれら 2 種類のデバイスの性能評価を行った。

Irを用いたTESマイクロカロリメータの開発

Ir を TES として利用する際のメリットとして、白金系で化学的に安定な物質であるため製膜の経年変化が起こり難い点と動作抵抗が高いためセンサ周辺回路による制約を受けずに安定かつ高速な動作が可能な点が挙げられる。Ir は基板との付着性の悪さからこれまで他のグループであまり研究が進められてこなかったが、本研究では加熱スパッタとフォトリソグラフィーを組み合わせた製膜プロセスを確立し、現在では再現性のある Ir 製膜が可能となっている。

研究当初、単一レイヤの Ir-TES マイクロカロリメータの試作を行っていたが、有感面内の場所ごとで応答が大きく異なってしまう、それがエネルギー分解能の大きな制限要因となっていた。自己発熱を考慮した TES 内部の温度差を見積もると 20mK と計算され、超伝

導転移領域($\sim 1\text{mK}$)を大きく超える値になる。このことから Ir-TES の場合には TES 内部で大きな温度勾配が生じているため常伝導状態と超伝導状態に相分離が起こり、それが応答信号の揺らぎを引き起こしていると予想された。このように TES 内部で大きな温度勾配が生じる原因として Ir の小さい熱伝導率に起因したセンサ内における自己発熱の影響が挙げられ、センサ内の熱コンダクタンスを向上させれば応答の均一化によりエネルギー分解能が改善できると考えられる。

Ir/Au-TESの試作・性能評価

Irを用いたTESでは低い熱伝導率が分解能の制限要因になっていると思われる。よって、Irの上に熱伝導率の大きなAu(金)を堆積させたIr/Auバイレイヤ型TESの開発を行いセンサ内部の熱伝達の向上とエネルギー分解能の改善を試みた。常伝導金属の中でAuを選択した理由は熱伝導率が大きい点と化学的に安定である点からである。デバイスの製作は300の加熱スパッタによってIrとAuを連続で堆積させる我々独自の方法で行っており、再現性のある製膜が可能になった。センササイズが $200\times 200\mu\text{m}^2$ でIr:100nm厚の上にAu:25nm厚を堆積させている。さらに温度感度を大きくするため175nmの厚いAuのバンクをセンサ両端に取り付けた。試作したデバイスの抵抗温度特性を調べた結果、常伝導抵抗は $150\text{m}\Omega$ で転移温度 T_c は 110mK であった。TESの感度を示す温度感度 α はバンクの効果により300とバイレイヤの中では高い値が得られた。

TES内部の温度差を求めた結果、 1.4mK となり単一レイヤのIr-TESに比べて自己発熱の影響は大幅に低減されたと考えられる。このデバイスを用いてX線検出実験を行った。その時のバイアス点は定常ノイズが最も小さかった抵抗値 $82\text{m}\Omega$ である。その結果、半導体検出器に比べて $\text{Mn-K}\alpha$ 線、 $\text{K}\beta$ 線の明確なピークの分離を確認し、 $\text{Mn-K}\alpha$ 線についてさらに詳細を調べたところ、 $\text{K}\alpha_1$ 、 $\text{K}\alpha_2$ の2本のピークに由来するスペクトル幅の広がりが確認された。各ピークについて重みをかけてフィッティングしたところ 5899eV に対して 9.4eV (FWHM)のエネルギー分解能が得られた。この時のX線未入射時のノイズ(ベースラインノイズ)は 5.6eV であった。また、定常ノイズ評価を行った結果、観測されるExcess Noiseの多くがセンサ内部の有限な熱伝導性に起因したTFN(Thermal Fluctuation Noise)で説明可能であることが分かった。

放射光を利用したX線検出実験

デバイスの性能をより詳細に調べるために高エネルギー加速器研究機構の放射光を利用した。ステンレスサンプルを用いて蛍光X線検出実験を行った結果、既存の半導体検出器に比べて1桁程度優れたエネルギー分解能が得られ、高い分光特性を実証することができた。また、 $10\mu\text{m}$ のコリメータを用いてセンサの局所的応答測定を行った結果、有感面内で0.1%程度の応答のばらつきを確認した(図1参照)。この原因はセンサ内部の熱コンダクタンスが未だ不十分なためであると考えられる。また、Auバンクの応答が有感面の応答に

比べて最大で 10eV も小さくなり、エネルギー分解能を制限している要因になっていることが分かった。このような分解能の劣化要因を除外するために有感面内で応答が均一な領域のみで解析を行った結果、エネルギー分解能は 6.9eV まで改善された。

20 ピクセルIr-TESの設計・性能評価

Ir 単一レイヤでは前述したように有感面内の各位置で応答が異なる。そこで有感面内をスリットで分割させれば各ピクセル内での応答の均一化、ピクセル間同士の応答の弁別が可能と考えられる。本研究では位置解像度の向上のため 20 ピクセル Ir-TES の開発を行った。

製作方法はフォトリソグラフィー用のフォトマスクパターンを変更するのみでそれ以外は単一素子と同様である。各ピクセルサイズは $45 \times 45 \mu\text{m}^2$ で厚さは 50nm である。4 端子法により抵抗温度特性を調べた結果、常伝導抵抗 100m Ω 、転移温度 140mK となった。温度感度 α は 200 であった。

次にこのデバイスで⁵⁵Fe線源によるX線検出測定を行った。その結果、5.9keVに相当する応答波形を対象とし、立ち上がり時間、立ち下がり時間、波高値をパラメータとした分布をとると17個の各ピクセルに対応していると思われるイベントグループを確認できた(図2参照)。この時のベースラインノイズは15eVであったが、各集団で解析を行うとエネルギー分解能は 104eV(FWHM)@5.9keVと十分な値が得られなかった。よって信号の揺らぎが分解能の主な制限要因になっており、その原因としてIrの熱伝導性の低さに起因したピクセル内における温度分布の不均一性、ピクセル間の熱的な相互干渉、熱浴温度のドリフトによる応答信号のベースラインの変動等が考えられる。また、定常ノイズ評価を行った結果、Excess NoiseがこのデバイスでもTFNによって説明可能であることが分かった。

結論

化学的に安定であり製膜の長期安定性に優れる Ir 超伝導体を用いた TES マイクロカロリメータの開発を行った。主なエネルギー分解能の制限要因として Ir の低い熱伝導率に起因した応答信号の不均一性が挙げられ、センサ内の熱伝導性とエネルギー分解能の向上を目的に Ir/Au- TES を試作した。その結果、6keV の X 線に対して最高で 6.9eV のエネルギー分解能が得られた。エネルギー分解能のさらなる向上を実現するためには放射光を利用した局所的応答測定の結果から今後の方針として TES の上に Au 層をさらに厚くした Ir/Au- TES の開発、また、バンクによる応答を減らすためにバンクの幅を狭めることや TES 前面にコリメータを設置する等を行う必要があると考えられる。

また、Ir の低い熱伝導性を位置検出方法に適用した 20 ピクセル Ir- TES の開発も行った。その結果、17 個の各ピクセルに対応していると思われる応答分布を確認した。エネルギー分解能に関しては 5.9keV で 104eV と求められたが、Ir/Au と同様に信号の不均一性が分解能の支配成分になっていると考えられる。エネルギー分解能と位置分解能を改善するためには Ir/Au- TES と同様にセンサ内部の熱コンダクタンスの改善や各ピクセルの熱的な分離、

放射光を利用した局所的応答測定による各ピクセルの位置同定を行う必要がある。

さらに Ir を用いた TES マイクロカロリメータの Excess Noise はこれまで他のグループから報告がなかったが本研究によって TFN で説明可能なことを示すことができた。

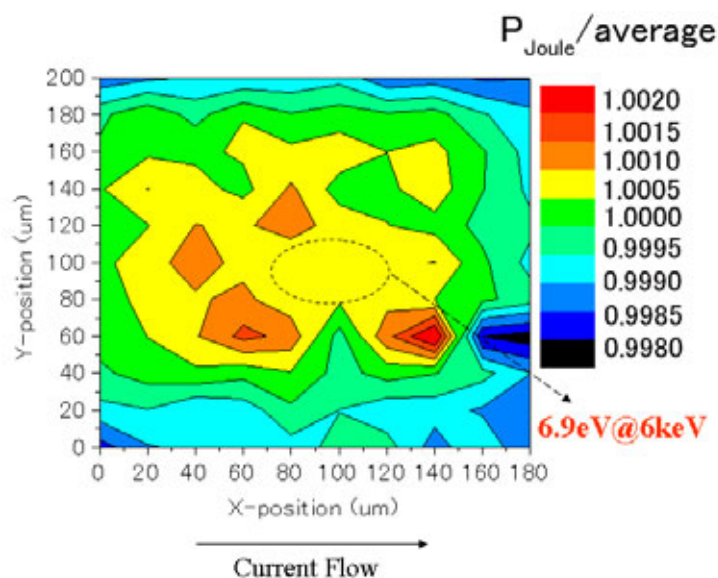


図 1: Ir/Au-TES の局所的応答測定結果

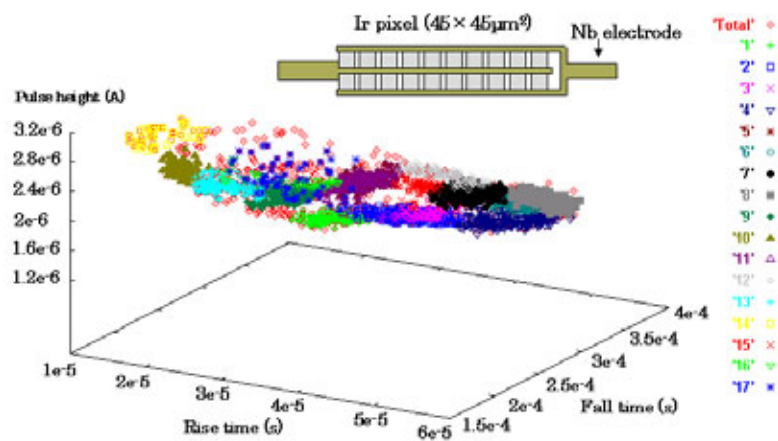


図 2: 20 ピクセル Ir-TES の位置応答特性