

技術情報

実用化近い弊社の最先端 X 線検出器

超伝導直列接合 X 線検出器 ——当社オリジナルの新技術——

X 線分析では試料からの蛍光 X 線を直接検出器で受けスペクトルを得る、いわゆるエネルギー分散型蛍光 X 線分析法が近年大幅に活用されている。それに利用されている検出器の1つが Si を用いた半導体検出器である。しかしながらそのエネルギー分解能が 130eV 程度であり、従来の波長分散型蛍光 X 線分析装置に比べて低いエネルギー分解能である。このために、早くから半導体検出器より優れたエネルギー分解能を持つ新規な X 線検出器の開発が進められてきた。従来から開発が行われ、現在有効な検出器としてなお開発途上にある検出器として、**超伝導遷移端センサー (TES)** と **超伝導トンネル接合検出器** がある。

TES 放射線が入射したことによる温度変化の大きさから放射線のエネルギーを測定する (カロリメータ)。エネルギー分解能は半導体検出器の 10 倍以上も優れている。しかし、TES はエネルギー分解能に優れているものの、半導体検出器と比べて検出効率が数百分の 1 以下、可能な計数率も数百分の 1 以下と低いために、高検出効率と高計数率を必要とする多くの分析分野での実用化は困難であり、実際、半導体検出器のエネルギー分解能より 10 倍以上も優れたエネルギー超高分解能は 16 年も前に実現されたにもかかわらず、分析分野では殆ど実用化出来ていない。

超伝導トンネル接合検出器 は、超伝導トンネル接合で直接に X 線を吸収させて X 線を検出する超伝導単接合検出器 (図 1) である。超伝導単接合検出器では、半導体検出器に近い高計数率が可能であり、且つ半導体検出器より優れたエネルギー分解能 (例えば、29eV@5.9keV (Nb 系接合)) が得られているが、下記のような欠点がある。

1. 面積が小さくて検出効率が低い (半導体検出器の 1/250 以下)。
2. 6keV の X 線の吸収効率は 10% 程度に過ぎない (半導体検出器の 1/10 程度)。
3. エネルギーの範囲 (ダイナミックレンジ) が狭い。
4. 例えば、5.9keV の X 線に対する (ピーク/バックグラウンド) 比 (P/B) は 100 程度と小さい。
5. X 線は接合の上から照射されるが、エネルギーが大きいと上部電極を通り抜けて下部電極で吸収されることもある。下部電極と上部電極では厚さなどの特性が異なるため、発生する信号の大きさが異なり、エネルギースペクトル上では 1 つのエネルギーに対して 2 つのピークが現れ、分析を複雑にする。

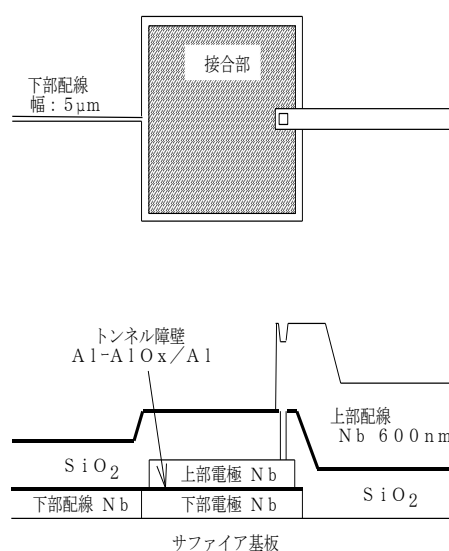


図 1. 超伝導トンネル接合 (単接合) の構造例

超伝導単接合検出器では、上記2～5の理由によって測定対象の X 線としてはエネルギーが1～2 keV 程度以下に限られてきており、しかもそれらの低エネルギー X 線に対しても、上記1の理由によって、検出効率は半導体検出器の数百分の1以下と小さい。これらのことより、半導体検出器のエネルギー分解能より数倍も優れたエネルギー分解能は20年以上も前に実現されたにもかかわらず、X線を利用する分析分野では実用化出来ていない。

検出効率や計数率が優れていることが求められることの多い分析分野では、検出効率と計数率が半導体検出器と同程度であって且つエネルギー高分解能の検出器こそが求められている。弊社が開発している超伝導直列接合検出器（図2参照）は**株式会社テクノエックスのオリジナル**の技術であり、その研究開発を行なっているのも世界で弊社だけである。

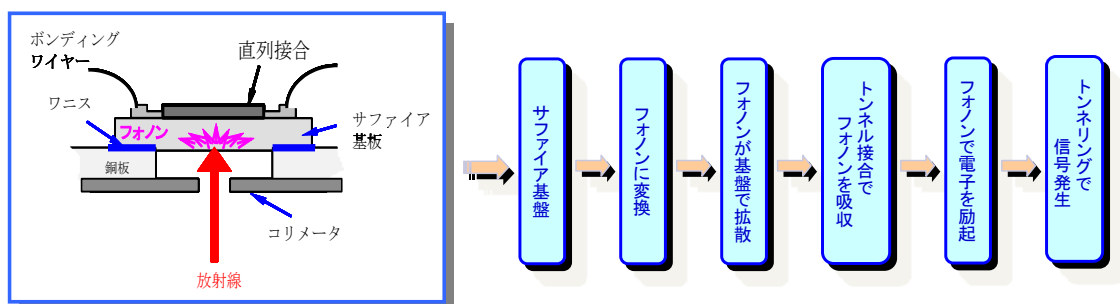


図2. 超伝導直列接合検出器の構造例

検出器に入射した X 線はサファイア基板で吸収されて、そのエネルギーをフォノンに変換し、そのフォノンがサファイア基板上に拡散して、超伝導トンネル接合で吸収され、トンネル接合内で電子を励起する。この時のエネルギーギャップが 1.5meV 程度であり、Si 半導体のエネルギーギャップ（約 1eV）に対して約 1000/1 と小さく、同じエネルギーの X 線が入射してもそれにより発生される電子の数が約 1000 倍多くなるので、エネルギー分解能が向上すると期待できる。

有効面積が 1mm^2 、厚さが $400\ \mu\text{m}$ (Si) の超伝導直列接合検出器（基板表面に下部電極の面積が $45\ \mu\text{m}$ 角の超伝導トンネル接合を約 2000 個配置）で、半導体検出器より約 2 倍優れたエネルギー分解能（ $63.5\text{eV}@5.9\text{keV}$ ）と 8000 という大きなピーク対バックグラウンド比が得られ（図3参照）、また約 2 万個/秒の計数率に相当する信号収集時間 $2\ \mu\text{s}$ が得られている。

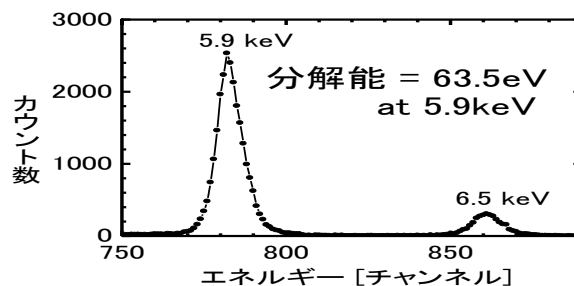


図3. Fe-55の線源から得られたMn-KaとKbスペクトル

エネルギー高分解能が良くなる理由は以下による。

X線のエネルギーは一定でも、検出器中で生成される信号電荷量は統計的に変動する。例えば、あるエネルギーのX線が半導体検出器中で励起する電子の数が平均で100個だとすると、X線が入射する毎に得られる信号電子の数は $100 \pm 100^{1/2} = 100 \pm 10$ 個程度の値となる。その場合のエネルギー分解能は10%程度となる。*すなわち、電子を1個励起するのに必要な平均エネルギーを ε とすると、エネルギー分解能は $\varepsilon^{1/2}$ に比例し、 ε が小さいほど優れた値になる。図4にエネルギー分解能の比較を示す。

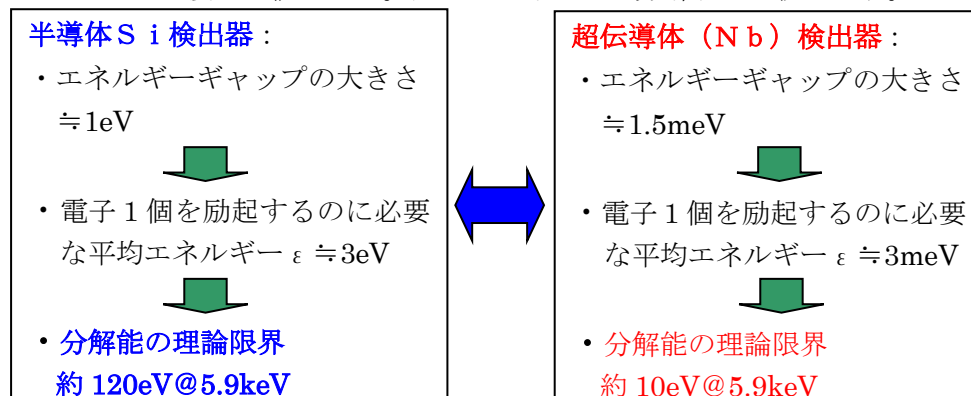


図4 エネルギー分解能の比較

超伝導直列接合検出器には次のような特徴がある。

1. 超伝導トンネル接合を直列に接続することによって、接合の総面積を増加させたときの静電容量の増加の影響を抑制する。それによって従来の TES や超伝導単接合検出器と比べて**大面積化**が可能になる (現状有効面積 : 1mm²)。
2. 超伝導トンネル接合を形成した単結晶基板の裏側にX線を吸収させるため、基板が吸収体となり、吸収体の厚さは数 100 μ m 以上となる。このために、従来最良分解能の半導体検出器 (SDD) と同等の**高い吸収効率**になる。
3. X線を厚い単結晶基板で吸収してそのエネルギーをフォノンに変換し、そのフォノンを基板の表面に設けた数千個の超伝導トンネル接合に吸収させて電子を励起させるため、超伝導電極中での励起電子の密度は低く、単接合検出器に比べると少なくとも数 100 倍は高いエネルギーまで信号波高の直線性は良いと予想される。(実際、5.5MeV の α 粒子も測定できている。) X線では 44keV まで直線性を確認済みであり、**ダイナミックレンジが広く**、SDDなどの従来の Si 検出器を利用してきた分析への応用が可能である。
4. 厚い単結晶基板でX線を吸収するため、X線は基板の深くで吸収される確率が高くなり、励起された電子の一部が膜の表面から飛び出してしまう確率は小さくなる。その確率は半導体検出器と殆ど同じになると予想され、エネルギー分解能が良い分だけピーク対バックグラウンド比 (P/B) は半導体検出器より良くなると考えられ、**微量成分元素の検出**に有利。
5. X線は常に基板で吸収され、発生したフォノンは必ず下部電極に吸収されるため、**2重ピークは発生しない**。
6. **量子型検出器**であり、**大面積化**しても検出器の**応答速度には殆ど影響が無い**。
7. 光子の入射位置情報が得られるので、イメージング検出器としても活用できる。