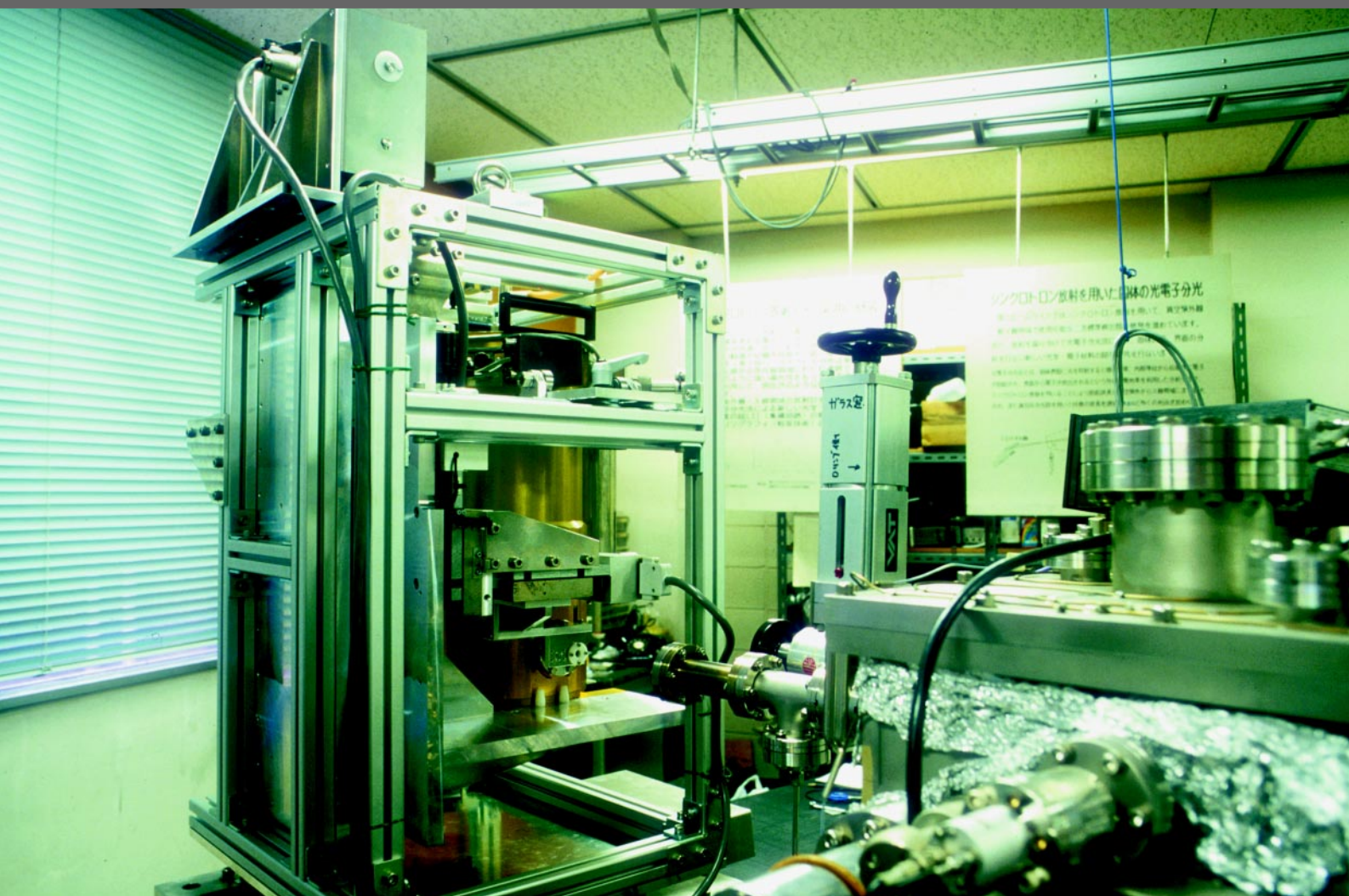


ETL NEWS

ISSN 0011-846X



電総研ニュース

レーザーパルスタイミング揺らぎ評価技術を確立

極低温放射光顕微鏡

技術交流

その他

1999.11 vol.598

レーザーパルスタイミング揺らぎ評価技術を確立

— タイムインターバル解析法と時間領域復調法 —

Establishment of an Evaluation Technique for Laser Pulse Timing Fluctuations

光技術部 土田 英実

Optoelectronics Division Hidemi Tsuchida

e-mail:tsuchida@etl.go.jp

A new technique has been proposed and demonstrated for measuring the pulse timing fluctuations of mode-locked lasers at low Fourier frequencies. The time interval between the laser pulses is precisely measured by using zero-dead-time counters on referencing to a stable atomic oscillator. By combining this method with the time-domain demodulation technique, the phase noise power spectral density of a mode-locked Cr:LiSAF laser has been estimated for 1 mHz – 1 MHz Fourier frequency with 240 dB dynamic range.

1. はじめに

モード同期制御技術の進歩、および励起用半導体レーザーの性能向上により、モード同期レーザーの性能、信頼性が着実に向上している。特に固体レーザーでは、調整が不要で、かつ持続時間（パルス幅）がフェムト秒（1fsは 10^{-15} s）領域の光パルスを発生できるレーザー装置が実用化され、テラビット情報伝送、半導体デバイス評価、微細加工、医療など産業用ツールとしての応用が検討され始めている。

可飽和吸収体などの非線形性を利用して光パルスを形成する受動モード同期レーザーでは、パルスがレーザー共振器内を往復する時間により繰り返し周波数が決定される。このため、共振器が熱的、機械的な外乱により伸縮した場合、繰り返し周波数が変動し、出力パルスのタイミング揺らぎとして現れる。最も信頼性の高い固体レーザーにおいても、パルス幅の100倍以上のタイミングジッターが容易に発生し、情報伝送における符号誤りや、計測における感度・分解

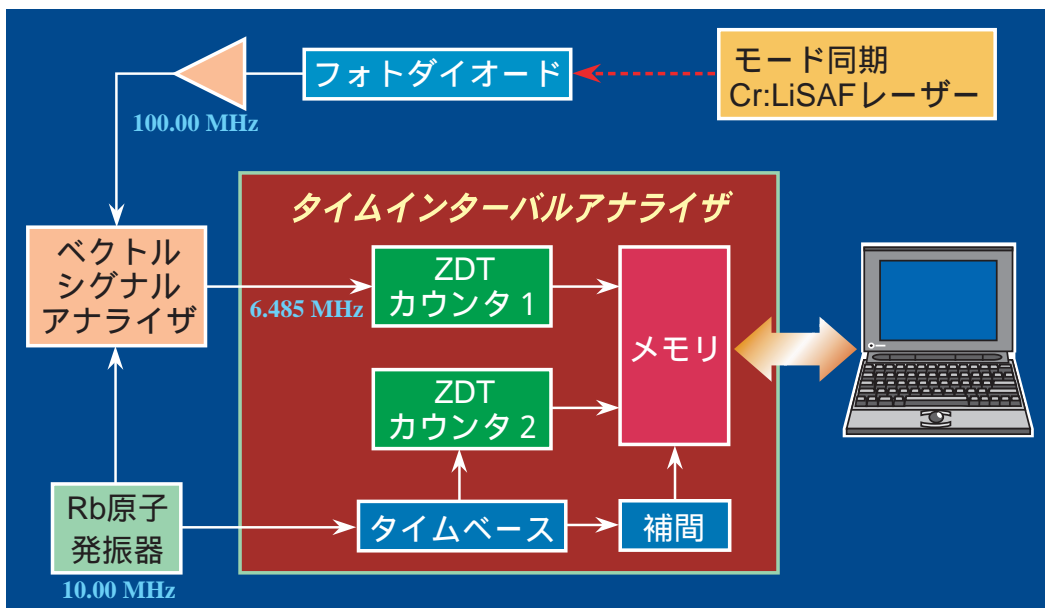


図1 タイムインターバル解析法によるタイミング揺らぎ測定

能低下の要因となることが指摘されている。したがって、レーザーの産業応用を促進するためには、タイミング揺らぎを高精度に計測する技術、およびタイミングを制御してジッターの少ない安定なパルスを発生する技術の開発が必須である。

タイミング揺らぎの計測には、1986年に von der Lindeにより提案されたSSB位相雑音測定法が標準的な手法として用いられてきた。これは非常に簡便な測定法であるが、近似関係を利用して揺らぎの大きさを推定するため、ダイナミックレンジや解析周波数範囲に著しい制限があり、正確な評価は困難であった。このような問題点を克服するため、当所では時間領域復調法と呼ばれる独自の計測法を提案・開発し、周波数50mHz~1MHzの範囲で、ダイナミックレンジ140dB以上の位相雑音パワースペクトル測定を可能にした〔電総研ニュース574号〕この測定法では信号を時間領域で復調して瞬時位相を検出するため、被測定信号の位相変化に測定装置を追従させる必要がある。このため、変動の大きいフリーランニング状態のレーザーに対しては、100mHz以下の低周波領域で信頼性あるデータを取得することが難しく、また繰り返しの遅いレーザーに適用することは困難であった。これらの問題は周波数カウンタを用いることによりある程度対応可能であるが、カウンタを用いた場合、測定の空き時間が発生して連続測定ができず、パワースペクトルなどの統計的尺度を正確に計算できない。

上記問題点を解決し、パルスタイミング揺らぎ評価技術を確立することを目的として、当所ではタイムインターバル解析法と呼ばれる新たな計測手法を開発した。基本的な測定原理は周波数カウンタと同様であるが、測定の空き時間なしに連続的計数ができるという特徴を持っている。また、被測定信号に装置を追従させる必要がないため、低周波領域の測定や低繰り返しレーザーへの適用が可能になる。この測定法は時間領域復調法と相補的な関係にあり、両者を組み合わせて用いることにより、周波数1mHz~1MHzの範囲で、ダイナミックレンジ240dBの位相雑音パワースペクトル測定が可能になった。

2. 測定原理

レーザーパルス光強度をフォトダイオードにより検出すると、その出力には繰り返し周波数に対応する基本波とその高調波が現れる。タイミング揺らぎの計測は、基本波、または一つの高調波成分を取り出

して解析することにより行われる。ここでは簡単のため、次式で示される基本波成分を考える。

$$V(t) = V_0[1 + \varepsilon(t)] \sin[2\pi f_r t + \phi(t)], \quad (1)$$

ここで、 V_0 、 f_r は振幅、周波数の公称値、 $\varepsilon(t)$ 、 $\phi(t)$ は振幅、位相揺らぎを表す。タイミング揺らぎに関する情報は位相揺らぎ $\phi(t)$ に含まれている。揺らぎを定量的に評価する上で最も基本的な尺度は、位相雑音パワースペクトル $S_\phi(f)$ である。従来のSSB位相雑音測定法では、 $V(t)$ そのもののパワースペクトルを周波数領域で測定し、近似関係を利用して間接的に $S_\phi(f)$ を求めていた。このため、周波数範囲やダイナミックレンジに著しい制限があり、また振幅揺らぎ $\varepsilon(t)$ の影響も受けるという問題を抱えていた。

一方、当所で開発した時間領域復調法では、最新のデジタル信号処理技術を駆使して、瞬時位相 $\phi(t)$ を時間領域で検出してからパワースペクトル $S_\phi(f)$ を計算するため、従来方式では実現できないタイミング揺らぎの高精度評価を可能にした。ところが、位相復調の過程で装置を信号に追従させる必要があるため、低周波揺らぎや低繰り返しレーザーの測定には不向きであった。

本研究で提案するタイムインターバル解析法は、ハードディスクや光ディスクなど記憶装置のデータ信号解析に用いられている手法を応用したもので、引き続きパルス間の時間間隔をカウンタにより連続的に計数するものである。これは(1)式で表される正弦波信号の周期

$$T = \left[\frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} \right]^{-1} \quad (2)$$

の測定に相当し、周期から瞬時位相を逆算することによりパワースペクトル $S_\phi(f)$ を計算できる。周波数カウンタと異なり、この測定法では空き時間を生じないため、正確な評価が可能になる。

図1に測定に用いるタイムインターバルアナライザの内部構成を示す。アナライザの基本機能は周波数カウンタであるが、この図に示すように、空き時間なしで連続的に計数できる2台のZDT (Zero Dead Time) カウンタと、基準となるタイムベース発振器を内蔵している。2台のカウンタには入力信号(レーザーパルス)とタイムベース出力信号がそれぞれ入力される。

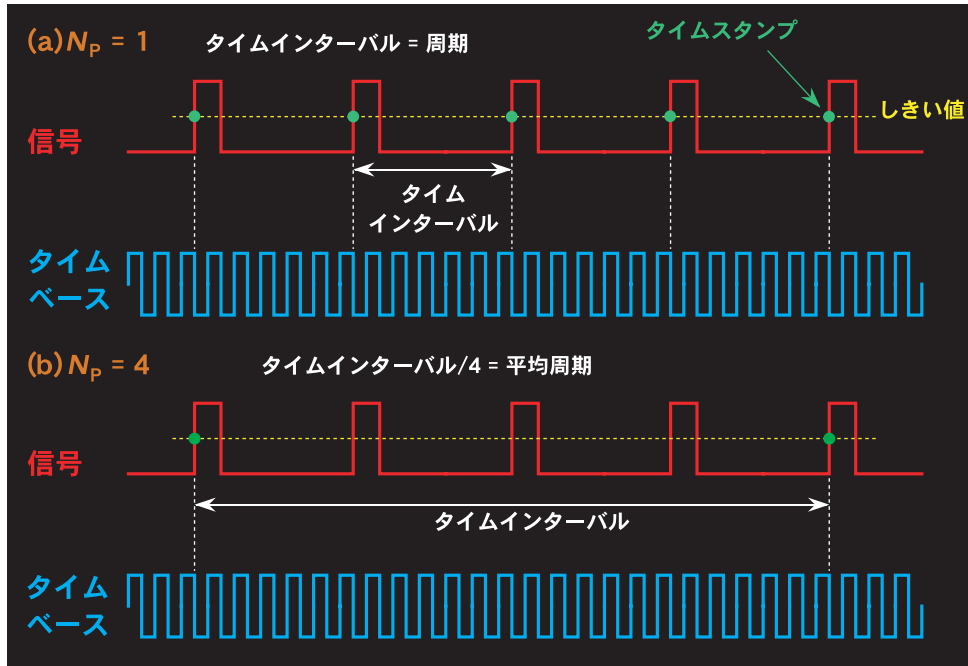


図2 時間間隔測定における信号、タイムベース波形

図2 (a)は最も基本的な測定における入力信号、およびタイムベース波形を示したものである。アナライザ内のカウンタ2はタイムベースのクロック数を連続的に計数し、カウンタ1は入力信号におけるクロックエッジ(立ち上がり)の発生を検出する。クロックエッジは図中の \bullet で示され、タイムスタンプと呼ばれる。パルス間の時間間隔は、二つの引き続くタイムスタンプ間のクロック数を連続的に計数することにより測定される。補間法を用いることにより、タイムベースの周期以下の分解能で時間間隔を測定できるが、ピコ秒以下の分解能を実現することは困難である。分解能の不足は、図2 (b)に示すような多周期に渡る測定で補うことができる。すなわち、すべてのクロックエッジを検出する代わりに、 N_p 周期ごとにタイムスタンプを検出して平均周期を算出すれば、時間分解能は N_p 倍向上する。パラメータ N_p はペーシングと呼ばれる。すべてのクロックエッジを捉えることはできなくなるが、 N_p を十分に大きく取れば、ピコ秒以下の分解能を容易に実現できる。したがって、この方法は速い変化の測定には不向きであるが、低周波揺らぎの測定に有効である。また、装置を信号に追従させる必要がなく、クロックエッジの検出のみを行えばよいので、低繰り返しレーザーの評価に適している。

3. 実験装置

図1に示すように、実験には半導体レーザーで直接励起する方式のモード同期Cr:LiSAFレーザーを用いた。半導体可飽和吸収ミラー(SESAM)を用いた受動モード同期により、持続時間80fs、繰り返し100MHzのパルスが発生する。

タイムインターバルアナライザはZDTカウンタ、タイムベース、メモリ、補間装置により構成され、メモリに蓄積したデータを計算機に転送して解析を行う。ペーシング $N_p=1$ の場合の時間分解能は48.8ピコ秒である。入力信号の周波数範囲は10Hz~150MHzであり、上限はカウンタの応答速度、下限はカウンタ2のオーバーフローにより制限されている。したがって、再生増幅器の出力など低繰り返しパルスの評価にも十分適用できる。

パルス光強度はPINフォトダイオードで電気信号に変換し、100MHzの基本波成分をベクトルシグナルアナライザにより6.485MHzの信号に変換した。周波数を下げることにより、周期が増大してタイムスタンプ間のタイムベースクロック数が増加し、時間分解能が相対的に向上する。また、すべての測定器に対する共通の時間標準として、周波数10MHzのRb原子発振器を採用した。この発振器の安定度は積分時間1、10、100秒において、 5.0×10^{-11} 、 1.7×10^{-11} 、 5.0×10^{-12} である。

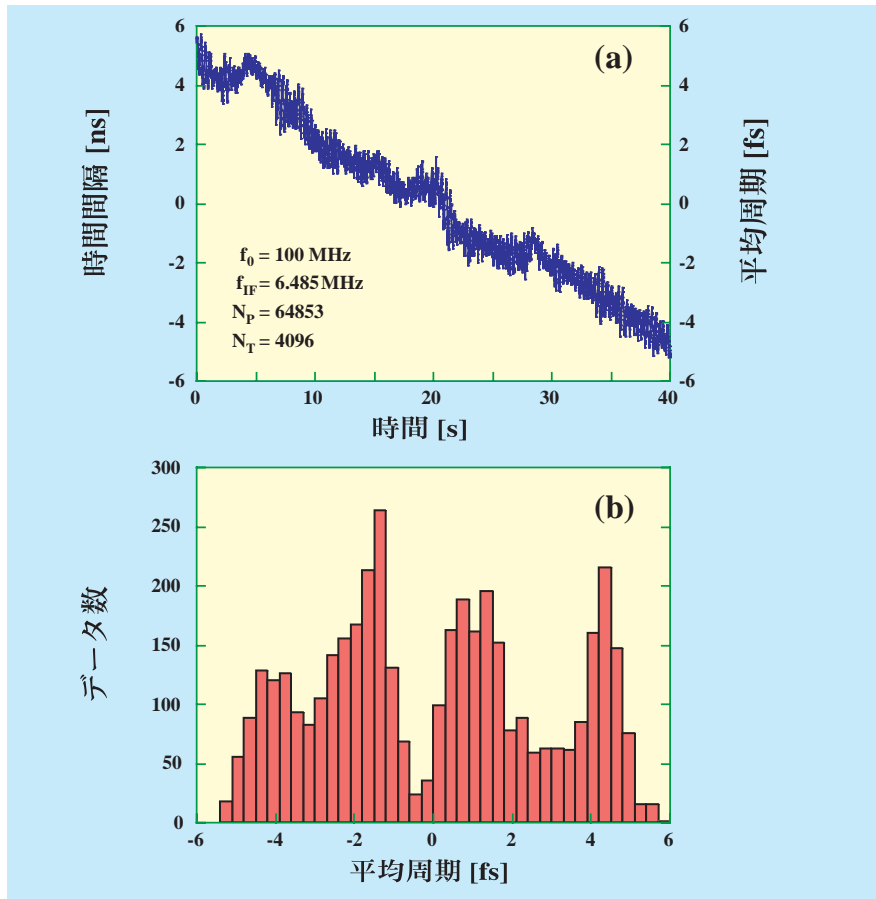


図3 (a)パルス周期の時間変化
(b)周期変化のヒストグラム

4. 実験結果

図3にパルス周期変動の典型的な測定結果を示す。(a)はペーシング $N_P=64853$ の条件で測定した周期10nsからの変化分を表し、パルスタイミング揺らぎと解釈できる。縦軸の左側は実際に測定された時間間隔、右側は平均周期を表している。周波数変換と平均化により分解能は0.048fsにまで向上している。この図からわかるように、40秒間で10fs程度のタイミング揺らぎが生じている。周波数3Hzの周期的変動は、レーザー共振器に用いられている機構部品の機械的な共振が原因である。また、温度変化による共振器の伸縮により、1秒当たり0.4fsのドリフトを生じている。図3(b)は周期変化をヒストグラム表示したもので、ドリフトの様相が明確に現れている。これらの観測結果は、時間領域復調法により測定された結果と定性的に一致している。

測定された周期変動に関するデータを位相変化に換算し、FFTにより位相雑音パワースペクトル $S_\phi(f)$ を計算した。図4に周波数1mHz~1MHzにおける測定

結果を示す。Aはタイムインターバル解析法により得られた周波数1.8mHz~10Hzにおけるパワースペクトルである。 $S_\phi(f)$ の値は f^{-4} にほぼ比例して低周波側で増加する傾向にあるが、これは先に述べたタイミングのドリフトが原因である。発振器の雑音モデルによれば、 f^{-4} の依存性はランダムウォーク揺らぎの特徴である。また、機械的振動に起因する周波数3Hzのピークも現れている。

図4 Bは時間領域復調法により得られた周波数50mHz~1MHzにおけるパワースペクトルであり、ベクトルシグナルアナライザにパルス光強度の2次高調波を入力して解析を行った。低周波側で雑音が増加する傾向にあり、周波数3Hzのピークも明瞭に現れている。タイムインターバル解析法の結果と比較すると、両者は周波数0.5~5Hzの範囲でよく一致していることがわかる。時間領域復調法の周波数分解能の制限により、Bにおいて周波数0.2Hz以下の増加が鈍くなっている。また、周波数3Hzのピークは時間領域復調法の結果のほうが明瞭に現れているが、これは

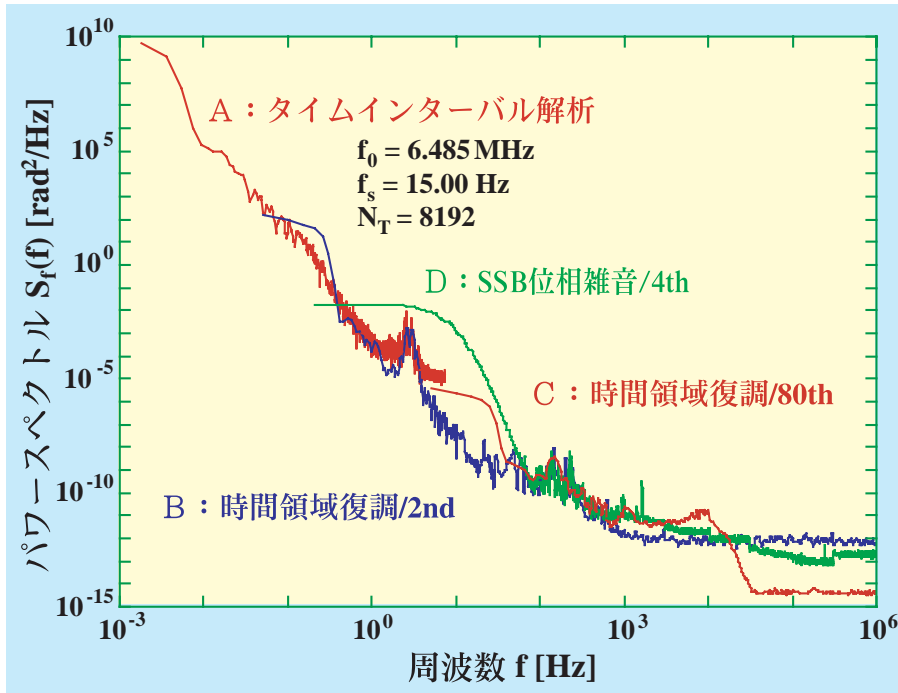


図4 位相雑音パワースペクトル密度

タイムインターバル解析法の時間分解能の制限に起因する。以上の比較より、タイムインターバル解析法は低周波域の測定に適していることがわかり、1Hz付近を境界にして時間領域復調法と使い分けことが有効である。

図4 Cはパルス光強度の80次高調波に、時間領域復調法を適用して得られた結果である。次数の大きい高調波を解析することにより、1kHz以上の高周波域における検出感度を増大できる。周波数8GHzの80次高調波をRFスペクトラムアナライザにより21.4MHz中間周波に変換し、ベクトルシグナルアナライザにより解析を行った。2次高調波に対する測定結果Bと比較すると、周波数3kHz以上で大きな違いを生じていることがわかる。周波数50kHz以上ではアナライザの雑音レベルにほぼ等しくなっているが、周波数12kHz付近にカットオフが現れている。これはレーザー媒質であるCr:LiSAF結晶の蛍光寿命に対応しており、雑音の原因は励起半導体レーザーの強度変動であると推定できる。

タイムインターバル解析法と時間領域復調法は、パルスタイミング揺らぎの評価法として相補的であり、両者を組み合わせることにより、広い周波数範囲で詳細な評価が可能になる。図4 A、B、Cを組み合わせると、周波数1mHz~1MHzの範囲でダイナミックレンジ240dB以上のパワースペクトル測定が可能に

なったことがわかる。図4 Dは従来のSSB位相雑音測定法により得られた結果であるが、周波数100Hz以下では正しい結果が得られていないことがわかる。これは解析周波数、およびダイナミックレンジが著しい制限を受けるためである。

発振器の性能を特徴づける様々な統計的尺度が存在するが、一例として、時間領域の尺度であるAllan分散の平方根 $\sigma_y(\tau)$ を測定した。ここで、 y は規格化周波数オフセットで、次式で表される。

$$y = \frac{1}{2\pi f_r} \frac{d\phi(t)}{dt} \tag{3}$$

この尺度はマイクロ波、光波帯における周波数標準の安定度を評価するために広く採用されている。 $\sigma_y(\tau)$ のような規格化された尺度を用いることにより、異なる周波数の発振器間の性能を容易に相互比較することができる。図5は $\sigma_y(\tau)$ の測定結果で、積分時間1ms~10s、および0.1~1000sに対して独立に測定を行った。タイミングのドリフトに対応して、積分時間1s以上で $\sigma_y(\tau)$ の値はとともに増加する傾向にある。 $\sigma_y(\tau)$ の値は、連続動作(CW)の気体、固体レーザーにおける光周波数の安定度と同レベルである。モード同期レーザーの繰り返し周波数安定度は、主として共振器長の安定性により決まるが、連続動作レー

レーザーの光周波数安定度についても同様である。動作モードは異なるが、両者の共振器の寸法や構成に大きな違いはないため、同レベルの安定度が得られたものと考えられる。

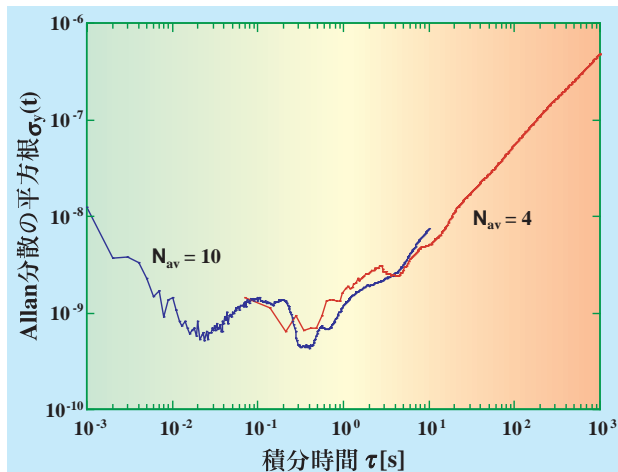


図5 Allan 分散の平方根

5. まとめ

タイムインターバル解析法を提案・開発し、モード同期レーザーのパルスタイミング揺らぎの評価を行った。この測定法を当所で開発した時間領域復調法と組み合わせることにより、周波数1mHz~1MHzの範囲でダイナミックレンジ240dB以上のパワースペクトル測定が可能になった。二つの測定法により、繰り返し周波数が10Hz~2GHzの範囲で動作する固体レーザーに対して、タイミング揺らぎを高精度評価する技術を確立することができた。今後はこれらの手法を基に、光ファイバ通信の高繰り返し半導体レーザーに対する評価技術の開発を行う予定である。

研究課題

産業科学技術開発

石油及びエネルギー需給構造高度化技術開発評価

超短パルス光エレクトロニクス技術の評価

用語説明

モード同期レーザー (mode-locked laser)

レーザー発振している各モードの位相を同期させることをモード同期とよび、これを利用してピコ秒からフェムト秒領域の超短光パルスを発生するレーザーをモード同期レーザーとよぶ。多数のモードで発振するレーザーでは、各モードの位相関係は一般的には不規則であり、出力光は時間的に不規則な変動を伴うが、位相を同期させることにより鋭いパルスとなる。レーザー共振器内に変調器を配置して、外部信号により同期を行う能動モード同期と、可飽和吸収体などの非線形性を利用する受動モード同期がある。モード同期は固体、半導体、色素などを利得媒質としたレーザーで実現されている。

SSB 位相雑音測定法 (SSB phase noise measurement)

マイクロ波やミリ波領域の発振器の位相雑音を評価する標準的な方法で、位相雑音に比べて振幅雑音小さい場合に有効である。信号のパワースペクトルを測定し、キャリアに対するサイドバンド雑音の比(単位はdBc/Hz)から、位相雑音を間接的に推定する。1986年にvon der Lindeにより、レーザーパルスのタイミング揺らぎにも適用できることが示唆されたが、間接的測定であるため、解析周波数範囲やダイナミックレンジが制限される。

時間領域復調法 (time-domain demodulation technique)

レーザーパルスのタイミング揺らぎを評価するために、1998年に当所において開発された測定法で、信号の瞬時位相を時間領域で復調してタイミング揺らぎを評価する。信号をAD変換によりデジタル化した後、その実数部と虚数部を分離して検出し、復調により位相変化のみを抽出する。時間領域で測定を行うため、従来のSSB位相雑音測定法に比べて、解析周波数範囲やダイナミックレンジが著しく改善される。また、振幅雑音と位相雑音を分離して検出できるため、両者の間の相互相関などより高精度な評価も可能である。このような復調方式はデジタル移動体通信における変調信号の解析にも利用されている。

極低温放射光顕微鏡

— 放射光を利用した超伝導光子検出技術開発 —

Low Temperature Scanning Synchrotron Microscope

—Synchrotron radiation for superconducting photon detection technology—

量子放射部 極低温放射エレクトロニクスラボ

<http://www.etl.go.jp/etl/divisions/~5636/CREL/CRELhome.html>

ハラルド プレスラー、小池 正記、座間 達也、浮辺 雅宏、小林 直人、大久保 雅隆*

Quantum Radiation Division, Cryogenic Radioelectronics Lab.

H. Pressler, M. Koike, T. Zama, M. Ukibe, N. Kobayashi, and M. Ohkubo

*e-mail: ohkubo@etl.go.jp

The ETL synchrotron radiation facility TERAS has been employed for superconducting photon detection technology. The new equipment called Low Temperature Scanning Synchrotron Microscope (LTSSM) is installed for characterizing superconducting X-ray photon detectors, which are kept at 0.4K. The LTSSM is beginning to provide important information for improving the performance of the superconducting detectors.

1. はじめに

液体ヘリウム温度(4.2K=-269°C)以下で動作する極低温放射線検出デバイスというとX線天文衛星⁽¹⁾や電波望遠鏡のような特殊な用途しかなく、産業分野には関係ないと思われるかもしれませんが、近年、極低温検出器の応用範囲が身近な計測分野へも広がり始めています。極低温放射線検出器の主なものは、超伝導現象を利用した検出器です。その検出対象は、純粋科学分野では、暗黒物質、ニュートリノ、身近な分野では光子(赤外線、可視光、X線、 γ 線の領域での単一光子の分光)、生体分子(飛行時間質量分析)です。今回、超伝導光子検出技術開発で今後中心的役割を果たすであろう分析装置、“極低温放射光顕微鏡”を完成させました。

光子は超伝導検出器の検出対象として最も重要と考えられます。光子は、電磁波のエネルギーの最小単位であり、光子のエネルギー E は、真空中の波長 λ 、光速 c 、プランク定数 h と、 $E=hc/\lambda$ の関係にあります。電磁波は、波長が長い方から短くなるにしたがって、電波(長波、短波、UHF、VHF、マイクロ波等)、赤外線、可視光、紫外線、X線、 γ 線と呼ばれます。波長1pmの γ 線の光子1個(単一光子)のエネルギーは、1.2MeVであり、これは、1 μ gの重りを20 μ m持ち上げる仕事に相当します。このような大きな? エネル

ギー領域では、単一光子として検出することはできませんが、波長が短すぎて波として検出するのは容易ではありません。反対に、電子レンジでお馴染みの2.45GHz(波長0.12m)のマイクロ波は、波としての検出は容易ですが、光子のエネルギーは10 μ eVと非常に小さくなり、光子としての検出はできません。

波としての検出は、電波の領域ではその周波数を測定することにより容易に実現できます。波長1nm以下のX線の領域になると、分光結晶の格子定数をスケールとして用いて、回折角からその波長を測定することができます。これは、波長分散分光と呼ばれています。波長分散分光では、 $\lambda/\Delta\lambda(=\Delta E/E)=10^{-3}-10^{-6}$ といった高精度での波長(光子エネルギー)の測定が可能です。しかしながら、測定したい光子エネルギー範囲で光子数分布(スペクトル)を測定するには、分光結晶等を機械的に動かす必要があります。また、測定時間を実用的な範囲に納めるためには、光源が光子数にすると $\sim 10^{20}$ 光子/s(この光源に触ると指が壊死する程度の線量)といった強力なものである必要があります。このため、波長分散分光では光学系等の工夫により検出効率を上げる努力が成されています。

一方、光子単位での検出は、市販品の光電子増倍管によって近赤外域0.7eV($\lambda=1.7\mu$ m)以上で光子計数が可能です。しかし、近赤外での量子効率⁽²⁾は、最大で

も2%程度と大きくはありません。また、光子計数では光子の数は分かりますが、光子エネルギーを知ることができません。単一光子のエネルギー測定は、X線領域で可能になり、SiやGeのような半導体のバンドギャップをスケールとして使います。バンドギャップ以上のエネルギーの光子が吸収されたときに生成される電荷数を測定することにより、入射光子のエネルギーを知ることができます。このとき、統計的要因などのために収集される電荷が揺らぎ、光子エネルギーの決定精度（エネルギー分解能）は、 $140\text{eV}@6\text{keV}(\Delta E/E=0.02)$ 程度です。このような固体検出器で実現されている分光法は、エネルギー分散分光と呼ばれます。2つの分光法を比較すると、波長分散分光は、エネルギー分解能には優れるが明るい光源しか見えず、また測定に時間が掛かります。一方、エネルギー分散分光は、エネルギー分解能は劣るが、可動部分のない小さな固体素子により敏速に極微弱光を測定することができます。究極の光子検出器とは、赤外線から γ 線までの広い波長範囲に対応可能であり、光子の到来時間、光子エネルギー、CCDカメラのようなイメージングの測定ができるエネルギー分散型固体検出器です。超伝導を使うことによって、この究極の光子検出器に近づくことが可能です。

超伝導検出器の特徴の1つは、数keVのX線領域

では、モザイク分光結晶とスリットを組み合わせた波長分散分光装置($\Delta E/E \approx 10^{-3}$)と同等のエネルギー分解能(数eV@6keV)をエネルギー分散分光で達成可能ということです。また、X線より波長が長い紫外、可視、赤外域では、単一光子のエネルギーが測定できるエネルギー分散分光検出器は、超伝導検出器のみといっても過言ではありません。可視、赤外の領域で分光できるということは、原理的には赤外線から γ 線まで100%の量子効率も可能になるということで、現在一般的に行われている光子計数法の感度を広い波長領域で飛躍的に良くすることもできます。

光子検出以外には、超伝導検出器は生体分子の飛行時間質量分析に応用され、従来検出が不可能であった大質量数分子まで分析可能になっています。この分析法は、ゲノムプロジェクトのために開発されています。超伝導検出器を利用すれば、半導体産業、生命工学、医療などの分野において、従来の検出器では見ることができなかった情報を得られるようになることが期待されます。

2. 極低温走査型放射光顕微鏡(LTSSM)

今回、超伝導検出器を開発する上で重要となる検出器の評価ツール、極低温走査型放射光顕微鏡(LTSSM)、を完成させました。超伝導検出器のサイズは、単一の素子としては数 $10\mu\text{m}$ から数 $100\mu\text{m}$ です。

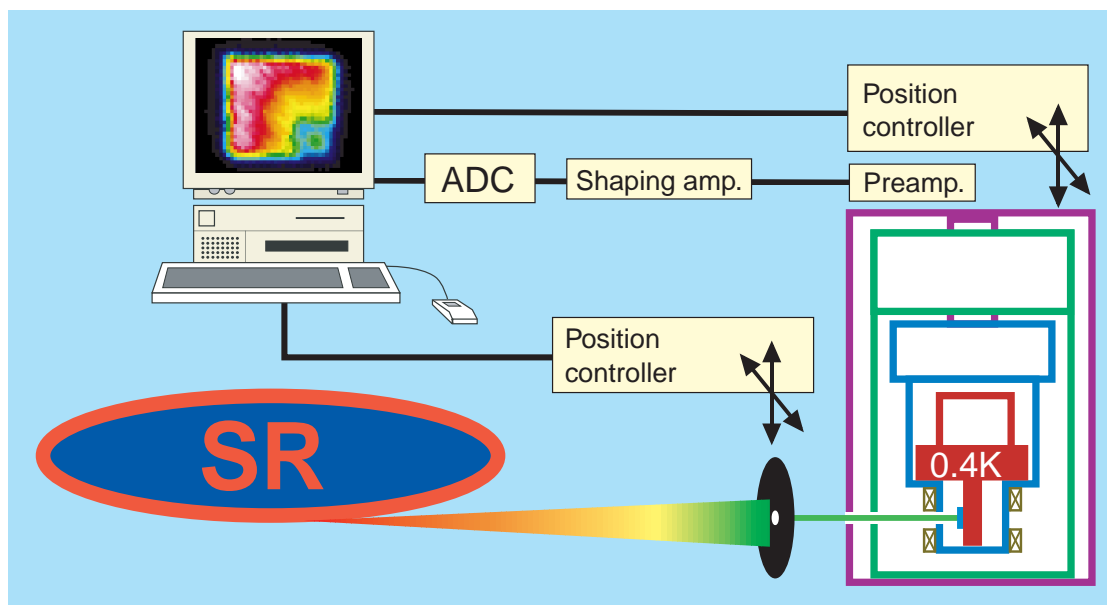


図1 極低温放射光顕微鏡(LTSSM)の構成図。超伝導検出器は ^3He クライオスタットにより、 $0.4\text{K}(-273^\circ\text{C})$ に冷却されます。放射光は、ピンホールにより絞られて、X線窓を透して超伝導検出器上をミクロンの精度で走査します。

超伝導検出器では出力の光子吸収位置依存性のため、十分な性能が得られていません。そこで、検出器応答の空間分解測定をマイクロスケールで行うことが重要となります。同じような走査型の顕微鏡として、我々のグループではチュービンゲン大学の低温走査型電子顕微鏡(LTSEM)を使った共同研究を実施してきました。LTSEMはたいへん強力なツールで、検出器出力の空間分布、検出器の性能を左右するキャリア寿命(超伝導体の場合には以下に述べる準粒子寿命)などの測定を行うことができます。LTSEMでは操作性の良い電子線を使うため、空間分解能は電子線の飛程程度の数100nmと、今回試作したLTSSMの最小空間分解能5 μm に比べて桁違いに良いのですが、検出器へのエネルギー付与分布が測定対象である光子とは全く違うという問題がありました。

LTSSMで用いるプローブは、電総研の放射光施設TERASからの放射光(2-6keVのX線)です。このX線をマイクロサイズに絞り、クライオスタット⁽³⁾内で0.4Kに冷却された超伝導検出器の表面を走査することにより、2次元のマッピングを可能としました。図1にLTSSMの構成図を示します。X線領域ではマイクロサイズのビームの走査を光学系によって行うのは容易ではないため、クライオスタットと放射光の間に設置したピンホールを走査する方法を採用しています。現在、ピンホールを交換することにより、5から50 μm の範囲でX線ビームの直径を変えることができます。このように小さいピンホールを用いても、X線の波長が1nm以下と短いためピンホールで起こる回折は無視できる程度です。従来、⁵⁵Fe放射性同位元素X線源⁽⁴⁾と超伝導検出器の間に、固定されたピンホールを置いた実験は成されています。しかし、⁵⁵Fe線源はX線輝度が低いために検出器上を走査しての測定は事実上不可能でした。そこで、高輝度X線が得られる放射光の登場となるわけです。放射光を使って超伝導検出器上を自由に走査できるものは本装置が初めてです。放射光の利点は、高輝度であるためマイクロサイズのピンホールでも十分な光子束が得られることと、光源から試料の距離を長くできるため(約17m)ピンホールと試料間の距離が長くても(約20cm)X線ビームが広がらないことです。X線管などではこのような配置は不可能です。現在は、X線フィルターを使った擬似単色光を使っていますが、将来的には、アンジュレーターとモノクロメーターによりX線のエネルギーを自由に選べるようになれば、検出器の性能として重要であるエネルギー

直線性、応答関数のエネルギー依存性、検出効率の評価などが可能となります。原理的には、単純なLTSSMですが、次に述べるような面白い現象が見え始めています。

3. 超伝導トンネル接合検出器の測定

図2は、超伝導検出器の1つである超伝導トンネル接合を使った光子検出の様子を描いたものです。超伝導トンネル接合は、いわゆるジョセフソン接合であり電総研で作製しています。構造は、1nm程度の AlO_x のトンネル障壁の両側を数100nmの超伝導電極で挟んだもので、Nb超伝導電極がX線の吸収体として働きます。超伝導体中では、電子2個がペア(クーパー対)を作っています。このペアを壊して2個の独立した電子(準粒子、詳しくは電子状準粒子)にするには、大まかには、少なくとも超伝導エネルギーギャップ($2\Delta=3.1\text{meV}$)のエネルギーが必要です。この 2Δ を光子エネルギー測定のスケールとして使います。即ち、エネルギー E の光子が吸収されると E/Δ 個の準粒子が作られ、準粒子の数は入射光子のエネルギーに比例します。一般的に用いられている半導体検出器のSiやGeでは、バンドギャップは数eVです。従って、半導体に比べて、超伝導体では励起される準粒子の数は3桁程度多くなります。検出器のエネルギー分解能は、励起される準粒子数の平方根に比例しますから、超伝導では半導体に比べて30倍程度の飛躍的なエネルギー分解能向上が期待されます。つまり、現在理論限界に達している半導体検出器の分解能140eV@6keVを数eVまで向上させることが可能です。光子検出器の1つである人間の目に例えれば、虹の7色の30倍の210色を識別可能になります。人間の目では、光子一個では色として認識されませんが、超伝導ではこれが可能です。さらに、エネルギーギャップが数meVですから、電波であるマイクロ波も波としてではなく粒子(光子)として準粒子を励起できます。可視から赤外域では、光電子増倍管やアバランシェ型フォトダイオードの光子計数法では不可能な、単一光子のエネルギー測定が可能になります。ただし、熱的に励起される準粒子の数を抑えるために、1K以下の極低温が必要になります。

トンネル接合検出器では、X線の領域において通常3種類の信号が検出されます(図2)。2種類は、上下の超伝導電極で光子が吸収された場合で、吸収直後赤で示すホットスポットと呼ばれる高励起領域ができ、その後準粒子が生成され黄色の領域に広がり

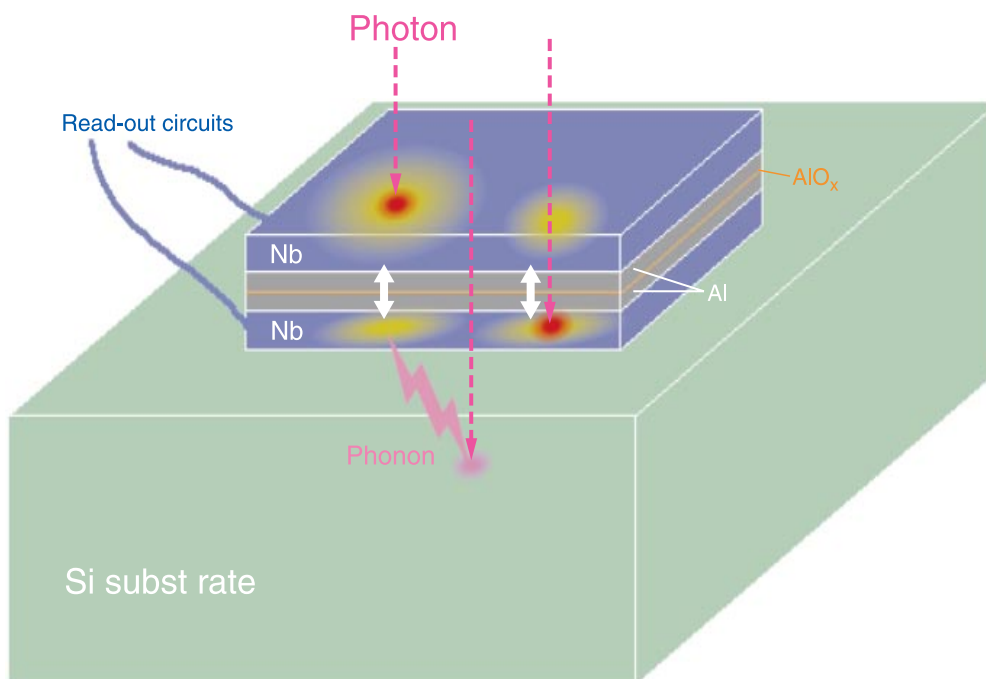


図2 超伝導トンネル接合検出器によるX線光子検出。接合のサイズは、例えば $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ 、層構造は、nm単位で Nb(200)/Al(30)/AlO_x/Al(30)/Nb(200)/Si 基板です。実際には、検出器の表面は配線の絶縁のため SiO₂ で覆われています。

ます。ただし、広がりスケールは正確ではありません。この準粒子が障壁をトンネル効果によってトンネルすると信号として読み出されます。もう1種類は、接合が乗っている基板中で光子が吸収されて生成されたフォノンが超伝導電極に到達してクーパ対を壊すことにより、信号が生成されるものです。障壁とNb電極の間には、Al層がありますが、これは超伝導ギャップエンジニアリングと呼ばれる超伝導ギャップを障壁付近で小さくする技術です。これにより、電界を印加することが不可能な超伝導体中で、準粒子を障壁付近に集める(準粒子トラッピング)ことができ、トンネル確率を高めています。また、この構造により、準粒子は2つの電極間を複数回トンネル(多重トンネリング)することが可能であり、1種の増幅効果を検出器自身に持たせることができます。トンネル接合検出器には本質的な問題点があります。

半導体検出器では、キャリア寿命 \sim msに対して電界によるキャリア収集時間は数nsであるため、99.9999%のキャリアが信号として寄与することができます。これに対して、接合検出器ではキャリア寿命にあたる準粒子寿命は数 μ s、キャリア収集時間に相当するトンネル時間が数100nsであるため、100%のキャリアを瞬時に集めることは困難です。

このため、接合検出器では、準粒子の損失過程の影響が顕著に現れます。例えば、国際超伝導産業技術研究所(ISTEC)との共同研究で明らかにしたように(<http://www.etl.go.jp/etl/divisions/~5636/CREL/publications/fluxoid.pdf>)、環境磁場のため接合に補足された磁束量子があると検出器のパフォーマンスが大きく低下するような現象が観察されます。したがって、接合検出器開発では、準粒子損失過程の解明が重要になってきます。

トンネル接合検出器のLTSSMによる測定例を図3に示します。中央は、測定した $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ の接合の光学写真です。右の二重の四角は、上部電極とNb配線のコンタクト部分です。下部電極のNb配線も写真上部に見えます。直径 $10 \mu\text{m}$ のX線ビームを接合の中央 ($x=y=17$) に照射したときのX線スペクトルを右下に示します。横軸は電荷出力、縦軸は光子数です。横軸320付近のピークは上部電極での吸収イベント、250付近のピークは下部電極でのイベントに対応しています。横軸50以下のイベントは測定しないように、カットしています。50から70の信号は、ノイズではなく、基板で光子が吸収されて生成されたフォノンを接合が検出したものです。光子数にその電荷出力を掛けた値の合計を、座標上に色スケールで表示

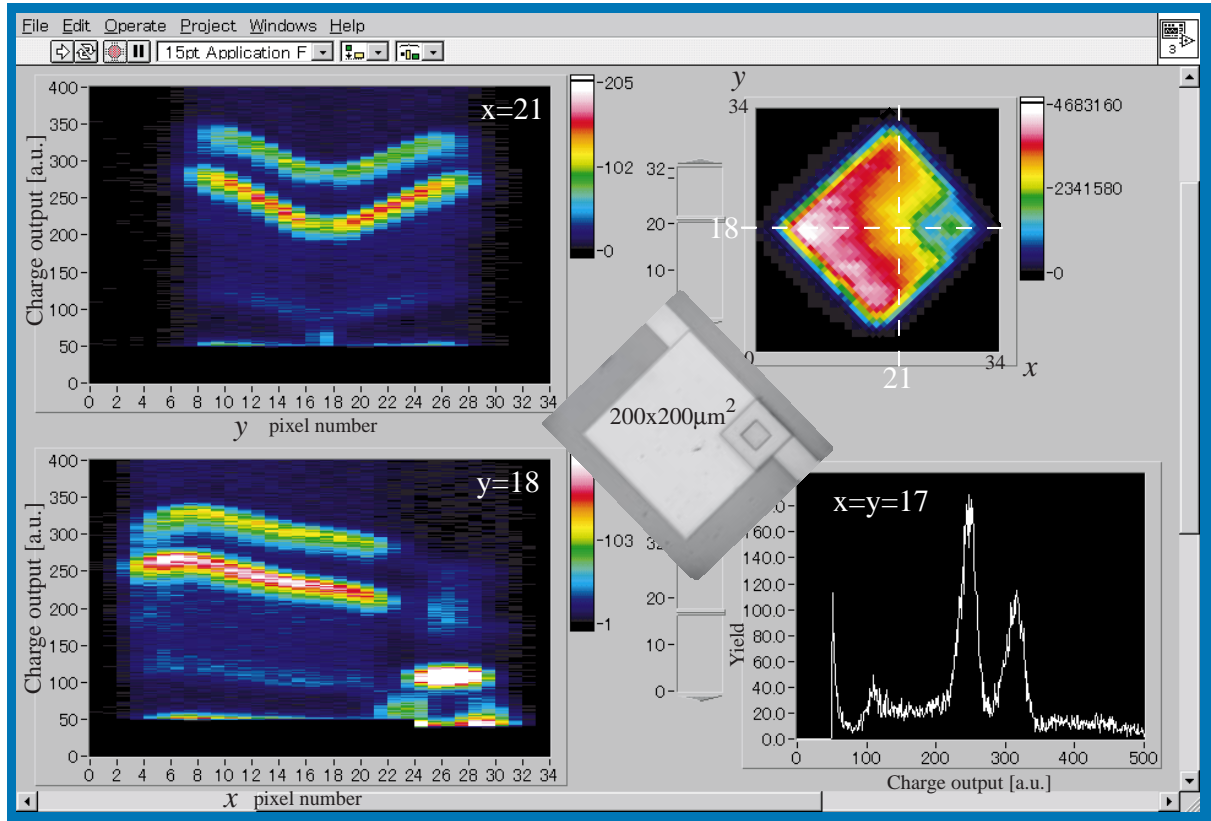


図3 極低温放射光顕微鏡(LTSSM)によるトンネル接合検出器の測定例。直径 $10\mu\text{m}$ のX線ビームにより、 34×34 ピクセルの位置でX線スペクトルを測定しました(右下の例は $x=y=17$)。左の2つのグラフは、 $x=21$ と $y=18$ における点線方向のラインスキャンであり、光子数を黒から白の色で示してあります。右上は、検出された全電荷のマッピングです。

した2次元マッピングを右上に示してあります。この図は、単位時間当たりの検出器の総電荷出力のマッピングに対応します。この走査では 34×34 の計1156ピクセルの測定を約2時間で行っています。検出器の応答は、検出器構造をよく現していることが分かります。同じ測定を ^{55}Fe 線源で行うと、40年程度掛かることになり事実上不可能な実験です。この実験が、今回可能になったわけです。

右上の2次元マッピングでは、接合右端のコンタクトホールが識別できます。また、コンタクトホール近傍で出力が低下しているのが分かります。すなわち、コンタクトホールが準粒子損失の原因になっています。この低下の様子は、左の2つの図でより詳しく見ることができます。左上は、 $x=21$ の点線の方向に沿って、横軸yピクセル、縦軸電荷出力で、光子数を色スケールで示したものです。左下は、同様に $y=18$ の図です。2本の帯は、上下2つの電極での光子吸収イベントに対応しています。左上の図では中央が凹んでおり、コンタクトホール近傍での電荷出力低下

が明瞭に認められます。左下の図で、 $x=22$ から32の信号は、コンタクトホール部分での吸収イベントであり、この部分では電荷出力が電極でのイベントに比べて小さいことが分かります。この主な理由は、Nb配線の厚みがNb上下電極の4倍と厚いために、準粒子トンネル時間が長いからです。幾つかの研究機関で、超伝導ギャップエンジニアリングによる検出器が作製されましたが、逆にエネルギー分解能は、準粒子トラッピングを用いないものより悪化するという結果が得られています。これは、空間不均一性が顕著になるためであることが図3より明らかになりました。しかしながら、準粒子の効果的な収集方法は超伝導ギャップエンジニアリングしかなく、今後、準粒子トラッピングと空間均一性を両立させる検出器設計が重要となります。

4. おわりに

今回完成させたLTSSMでは、放射光(2-6keVのX線)をミクロンサイズに絞り(最小 $5\mu\text{m}$)、クライオ

スタット内で0.4Kに冷却された超伝導検出器の表面を走査することにより、2次元のマッピング測定を可能としました。LTSSMでは、従来時間が掛かるため不可能であった測定を2時間で行うことができるようになりました。

超伝導デバイスというと液体ヘリウムのような寒剤が必要で、使いづらいというのが一般的な印象ではないかと思います。液体ヘリウムは必要ですが、現在我々が使用している³Heクライオスタット(到達温度0.35K)の寸法は、直径25cm、高さ60cmと非常にコンパクトです。アメリカの標準研究所(NIST)ではほぼ同様のクライオスタットに断熱消磁冷凍機を搭載して、到達温度0.1K以下を実現しており、トンネル接合とは異なる原理に基づく超伝導検出器であるカロリメーター⁽⁵⁾を、EDAX⁽⁶⁾の代わりに電子顕微鏡に搭載しています。このカロリメーターは、すでに $\Delta E/E=10^{-3}$ のエネルギー分解能を実現しています。半導体チップ上の汚染物質同定により、高集積化する半導体産業の救世主になるのではと期待されています。LTSSMはこのような検出器の評価にも対応できます。また、超伝導検出器では光子イメージングと分光を同時に行う検出器も考案されており、この検出器の評価にはLTSSMが最適です。

近年、極低温冷凍機技術が進歩しており、液体ヘリウムの供給を必要とせず到達温度0.1K以下を得るのは技術的に可能なレベルに達しつつあります。スイッチを入れるだけで、コンパクトな冷凍機により、超伝導検出器が動作する極低温環境が得られる日も遠くないと考えられます。今後、超伝導検出器は、科学分野の計測機器としてだけでなく、核磁気共鳴イメージング(MRI)のように、日常生活に必要不可欠な超伝導機器となることが期待されます。

LTSSMの開発においては、電総研の試作設計の方々のご協力を得ました。トンネル接合の作製に関しては超伝導エレクトロニクス関連の方々、放射光実験に際しては、量子放射部の方々のご協力が不可欠でした。関係諸氏に感謝致します。

研究課題名：

[原子力特別研究] 放射線励起による量子作用の高効率検出技術に関する研究

用語解説

(1) X線天文衛星

2000年の初めに65mKで動作するX線カロリメーター他を搭載した宇宙科学研究所のX線天文衛星(Astro-E)が打ち上げ予定。

(<http://www.astro.isas.ac.jp/xray/mission/astroe/astroe.html>)

(2) 量子効率

検出された光子数を検出器に入射した光子数で割った値。

(3) クライオスタット

液体ヘリウム(沸点4.2K=-269°C)等の寒剤を使って試料を極低温に冷却するための実験器具。

(4) ⁵⁵FeX線源

鉄の放射性同位元素。MnのK α (5.89keV, 88%)とK β (6.49keV, 12%)の2本の特性X線が放出される。X線検出器の性能評価の際に標準線源として用いられる。

(5) カロリメーター

光子一個の吸収による吸収体の温度上昇から光子のエネルギーを測定する検出器。近年、その温度計として超伝導転移端を利用するタイプのものが注目されている。

(6) EDAX

走査型電子顕微鏡用のエネルギー分散型X線分析装置を開発した会社名であるが、現在ではX線分析装置の名称としてEDAXが用いられる場合もある。電子線励起で発生する特性X線から元素分析を行う装置。検出器としては、現在半導体が用いられる。

'99 北陸技術交流・テクノフェア 1999年10月15日～16日

10月15日と16日に、'99北陸技術交流・テクノフェアが福井市で開催され、電総研は、排熱を電力として回収する熱電発電のシステムを実験段階で制作した装置、システムの原理模型、説明パネルと当所紹介パネル、出版物の展示及びビデオなどを出展しました。このフェアには産・学・官の技術交流の場として154の民間、大学、国立研究機関などが出展し、盛況でした。

今回は、近未来の省エネルギー技術システムの紹介なので、一般来訪者が足を止め、熱心に説明を受けたり、質問をする光景が多く見受けられました。



国際新技術フェア'99 1999年10月27日～29日

10月27日～29日、国際新技術フェア'99（日刊工業新聞社主催）が、産学官による技術交流及び国際的視野に立った技術移転の推進、主に中小企業やベンチャー企業の研究開発力の強化、新規産業の創出と企業家の育成を目的に、東京国際展示場で開催され、電総研として以下のものを展示しました。

代替エネルギーのひとつとして考えられている、電力貯蔵用レドックスフロー電池、ハイブリッド車用レドックス・スーパーキャパシタのパネル及びパンフ、レドックス電池の原理説明用教材を使用したデモ等による紹介、もうひとつは2台以上のロボットが協力し、仲間の行動を見て素早く手助けするロボットシステム（群協調ロボット）の実物展示や、ビデオ等で紹介しました。



人事異動

氏名 (新) (旧)
平成11年10月25日付

座間 達也 BERTHOUBE, Luc Felix Rene	企画室企画班に併任 情報科学部	量子放射部主任研究官 知能システム部
---------------------------------------	--------------------	-----------------------

平成11年11月1日付

馬渡 康德	企画室開発班の併任解除 工業技術院総務部研究開発官（超電導担当） 付の併任解除	極限技術部主任研究官
佐藤 弘	企画室開発班に併任 工業技術院総務部研究開発官（超電導担当） 付に併任	電子デバイス部主任研究官

2000年1月24日より、電話番号の局番が54局から61局に変更されます。

編集 〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-4 工業技術院 電子技術総合研究所 0298(54)5059

表紙写真：極低温走査型放射光顕微鏡

URL <http://www.etl.go.jp/> e-mail: info@etl.go.jp
印刷・製本 ニッセイエプロ株式会社