

「マイクロカンチレバーを用いたサイクロトロン共鳴力顕微鏡 (CRFM) の試作」
 神戸大学大学院理学研究科 大道 英二

1 研究の背景と目的

研究の背景: マイクロカンチレバーと呼ばれる微小な片持ち梁 (図1) を用いた走査型プローブ顕微鏡 (SPM) が近年ナノテクノロジーの分野で急速に普及している。カンチレバーと試料表面での相互作用をカンチレバーの変位に変換し、ナノメートルレベルの空間分解能で様々な物理量 (凹凸、磁気、電荷) の空間分布をえることができる。特に、磁気共鳴力顕微鏡 (MRFM) と呼ばれる手法では電子スピン共鳴、核磁気共鳴信号を空間マッピングできることから、ナノ磁気共鳴イメージング (nano-MRI) として注目を集めている。

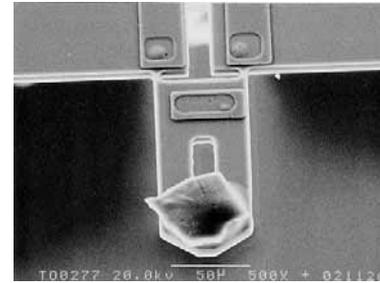


図1: 試料を載せたマイクロカンチレバーの電子顕微鏡写真

研究の目的: 本研究では新しい SPM としてサイクロトロン共鳴 (CR) 信号を用いた実験的手法を提案する。サイクロトロン共鳴とは磁場中の電子のサイクロトロン運動と電磁場との相互作用に基づく共鳴現象の一種である。実験結果から得られる電子の有効質量は、バンド構造を決めるもっとも基本的な物理量である。また、有効質量は半導体の伝導特性における移動度を定める重要な物理量の一つでもある。本研究ではカンチレバー上に乗せた試料のサイクロトロン共鳴信号をカンチレバーにはたらく力として検出し、サイクロトロン共鳴力顕微鏡 (Cyclotron resonance force microscopy: CRFM) を提案する。また、その実験的実証のために必要な測定系の開発を行う。

磁場中に置かれた電子は印加磁場に垂直な平面で円運動を行う (サイクロトロン運動)。サイクロトロン運動は電子のエネルギーに対応した半径で周回運動をおこなうが、ここに電磁波を印加すると異なる軌道状態間で遷移する。この現象をサイクロトロン共鳴と呼ぶ。サイクロトロン共鳴は一般的には電磁波強度の減衰として検出される。しかし、電子の軌道半径が変化することを考慮すると系の軌道反磁性も同時に変化することがわかる。従って、磁気共鳴の際の磁化変化を測定する MRFM 測定と同様の原理で反磁性成分の変化としてサイクロトロン共鳴を検出することができると考えられる。しかし、これまでサイクロトロン共鳴をカンチレバーにより検出した例は報告されていない。

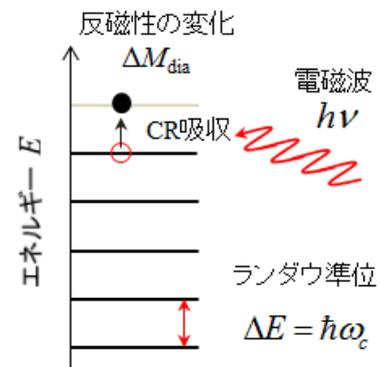


図2: カンチレバーを用いたサイクロトロン共鳴の検出原理

その理由として、有効質量が小さい半導体試料などではサイクロトロン共鳴に必要な電磁波領域がミリ波、テラヘルツ波領域に到達するため既存の装置とは相いれない点が挙げられる。すなわち、高周波の電磁波は同軸ケーブルなどで伝送することができず、自由空間を伝搬させる必要がある。また、この領域では高出力の光源が存在しないため、測定に必要な電磁波強度を得ることは容易ではない。また、反磁性成分の大きさは一般的に小さく、従来の MRFM などにも比べても測定感度の面から不利である。そこで本研究では微小なサイクロトロン共鳴力顕微鏡の作製にむけた測定系を新たに構築し、サイクロトロン共鳴信号の検出を目指す。具体的にはカンチレバーの変位検出法として現行のピエゾ抵抗検

知方式から光学的検出方式へと改良を行う。また、顕微鏡としての動作をする際に試料スキャンなど位置制御に必要となる高精度 XY ステージの作製を行う。

2 研究方法・研究内容

本研究では、まず、測定系の構築を行う。申請者はこれまでにカンチレバーを用いて 0.37 THz の電子スピン共鳴 (ESR) 測定に成功している。この方法では試料を張り付けたカンチレバーに対し電磁波を照射しながら磁場を掃印し、ESR 共鳴条件を満たす磁場でカンチレバーにはたらく磁気的な力の変化を検出する方法である。この方法では、電磁波をライトパイプで試料空間まで導入しているため電磁波の波長に対する制限がなく、広い範囲の周波数を用いた測定が行える。また、 piezo 抵抗型カンチレバーを用いており、カンチレバーの根元に作りこまれた piezo 抵抗の変化として、カンチレバーの微小な変位を検出できる。そのためコンパクトかつ簡便な測定系を構築することができる。

サイクロトロン共鳴は異なる軌道状態間の遷移であり反磁性成分の変化を伴う。そのため、これまで申請者が開発してきた ESR 装置と同様のセットアップで測定を行うことが可能である。ただし、共鳴条件より有効質量が $0.1 m_0$ の場合、 $B=5 \text{ T}$ の印加磁場のもとでは電磁波の共鳴周波数が 1.4 THz になる。そのため、後進行波管 (BWO) や遠赤外線レーザーと呼ばれる高周波光源が新たに必要になる。この光源は発振周波数を変えることが可能であり、分光的な測定を行うことが可能である。また、10 mW 程度の比較的強い電磁波強度が得られることからサイクロトロン共鳴分光に適した光源である。

これまでの測定では piezo 抵抗型カンチレバーと呼ばれる市販のカンチレバーを用いていた。このカンチレバーは入手が容易である反面、カンチレバーに選択肢が少なく、また、感度的には十分でないことが予想される。また、テラヘルツ領域では強力な光源が存在せず、電磁波強度がミリ波帯に比べ大きく減少する。そのため、信号強度の減少が避けられない。そのため、本研究では新たに光学的手法によるカンチレバー変位検出法を開発した。本研究では低温、強磁場下での測定を念頭に置き、Fabry-Perot 干渉計による方式を採用した。この方法ではカンチレバー背面と光ファイバー端面で共振器を構成し、その光路差の変化に伴う干渉強度の変化をフォトディテクターで検出する方法である。装置全体の小型化が可能であり、高感度の測定が実現可能な方法である。

また、SPM においては試料走査機構が必要になるが、一般に低温、強磁場で動作するステージは高価である。そのため、本研究では将来的にサイクロトロン共鳴力顕微鏡としての動作を念頭に置き、低温、強磁場下でも駆動する微小変位駆動ステージを作製した。低温下においてもナノメートルオーダーでの位置精度が要求されるため、piezo 素子を駆動機構に用いたステージが適している。本研究では試料空間の要請から内径 35 mm 程度の狭い試料空間に収まるようにする必要がある。

3 研究成果

カンチレバーの先端の微小変位を高感度に検出するため、ファイバー光学系をもちいた Fabry-Perot 干渉計を作製した (図 4)。この干渉計はカンチレバー背面とファイバー端面で構成される干渉計である。カンチレバーの変位に伴い光

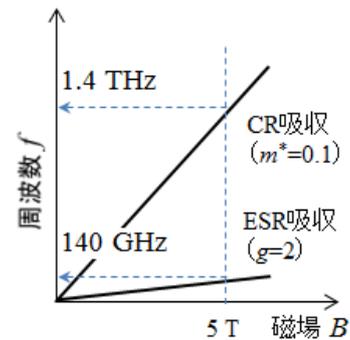


図 3 : サイクロトロン共鳴測定周波数と共鳴磁場の関係

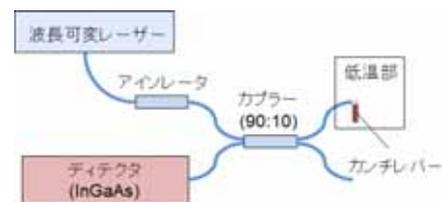


図 4 : Fabry-Perot 干渉計を用いたカンチレバーの変位検出システム

路差が変化するため干渉強度が変化する。本研究では1.5 ミクロン通信波長帯の豊富な光学素子を用いて光学系を構築した。レーザーからの光はカプラにより分岐されたのち、一方が Fabry-Perot 干渉計に導入される。アイソレータは干渉計からの戻り光を低減する目的で用いている。干渉計からの干渉光は再びカプラに戻り、レーザーとは反対側へと分岐し、フォトディテクタで検出される。本研究では高感度の変位測定を可能にするために様々な工夫を行っている。具体的には、主なものとしてファイバー端面の後方反射を低減するための APC コネクタやファイバーの振動に伴うノイズ低減のための bend-insensitive ファイバーが挙げられる。

Fabry-Perot 干渉計では測定に最適な共振器長が存在しているため通常ではピエゾ素子などを用いて共振器長を調整する必要がある。本研究では駆動部品をなくし、コンパクトな測定系を構築するために新たに波長可変レーザーを導入した。これにより波長を調整することで常に最適な共振器長を実現することが可能になった。共振器長を固定した状態でフォトディテクターのノイズ電圧を測定し、電圧のばらつきを統計的に処理することで測定系の感度を評価することができる。その結果、室温でのリアルタイムの位置検出感度としては ± 15 pm という値が得られた(図5)。この値はカンチレバーの熱振動限界を大きく上回る感度である。実際、Fabry-Perot 干渉計のノイズ電圧をスペクトルアナライザーで解析すると、カンチレバーの熱振動に起因する明瞭なピークが 5.7 kHz 付近に検出された(図6)。以上の結果から、本研究で開発した変位検出システムはピエゾ抵抗素子を用いたものに比べて高い感度でカンチレバーの変位を検出できることがわかった。

ピエゾ駆動ステージについては stick and slip 機構に基づく動作原理を採用した。これはピエゾ素子からなるレール上にステンレス製のステージが乗っている構造をしており、静止摩擦力と動摩擦力の差を利用して駆動する。具体的には 50-150 V 程度の三角波をピエゾ素子に印加すると、ゆっくり電圧が変化するときにはピエゾ素子と一緒にステージが移動し、急激に変化するときには慣性によりステージが置き去りにされることで繰り返しステージを移動させることができる方法である。この方法では数 nm 程度の微小送りをしながら、数 mm というストロークを実現できるという利点がある。市販のピエゾ素子とサファイアロッドを貼り合わせてレール部を作製し、ステンレス製のステージと組み合わせて XY ステージを作製した。試作機では縦横が 17 mm 角、高さ 9 mm にまでコンパクトにすることに成功した(図7)。

一般にピエゾ素子は印加電圧と伸びが単純な直線関係にならずヒステレシスを示す。そのため、位置の絶対値を決めるためには別の読み取り機構が必要になる。本研究では回折格子を利用した位置エンコーダ(セイコーNPC社 SMD-01)をステージに組み込んだ。このエンコーダでは 20 μm の移動量に対し sin 波が一周期出力される。このため、出力電圧

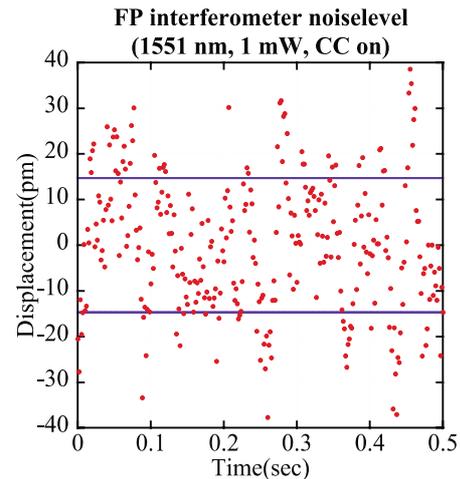


図5: Fabry-Perot 干渉計のノイズ電圧

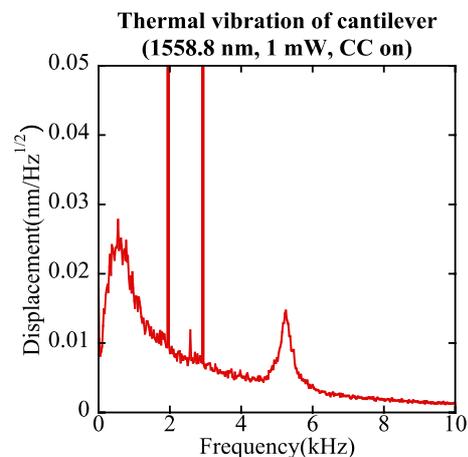


図6: カンチレバーの熱振動スペクトル

をモニターすることで移動量を求めることができる。図8はその一例である。 piezo素子に幅 0.1 ms 程度のパルス幅の三角波(上)を印加すると、それに対応してエンコーダ出力(下)が階段的に変化している。このことからステージはパルスごとに移動していることがわかる。また、この図では piezo 電圧のパルス一発あたり約 100 nm 程度変位していることがわかる。一発あたりの移動量は三角波のピーク電圧をかえることにより調整可能である。また、低温下での動作を確認するために作製したステージを液体窒素中に入れて駆動した。その結果、室温に比べて移動速度は低下したものの、低温下でも動作することが確認できた。



図7：作製した piezo 駆動ステージ

以上のことから、本研究では Fabry-Perot 干渉計を用いた高感度カンチレバー変位検出システムと piezo 駆動 XY ステージの作製に成功した。これらの技術は低温下での微弱な信号の検出や、精密な試料走査が必要となるサイクロトロン共鳴力顕微鏡の実現に必要不可欠な技術である。今後は実際にサイクロトロン共鳴信号をするために分子性導体や半導体試料などを用いた測定を行う予定である。



図8： piezo 素子への印加電圧(上)とエンコーダ出力(下)

4 生活や産業への貢献および波及効果

本研究で開発した変位検出技術や精密位置制御技術は、近年、急速の発展しているナノ計測における必須技術である。本研究の目的とするサイクロトロン共鳴力顕微鏡への応用はもとより、今後のナノ計測への応用が可能である。ナノ計測は今後、基礎研究から医療、環境、IT などへの応用が進むことが期待されている。すでに我々のグループではこれらの技術を用いて、ナノマシンにおけるカシミール力の制御やカンチレバーの光冷却などの研究にも着手している。

また、サイクロトロン共鳴測定から電子状態の最も基本的な情報である有効質量に関する知見が得られる。サイクロトロン共鳴力顕微鏡により有効質量の空間分布が明らかになれば新規電子デバイスの電子状態を詳細に調べることができる。例えば、量子ドット発光素子では個別のドットの特性評価が可能になる。また、新奇デバイス材料として着目されている有機半導体、有機伝導体などは大きな試料を作製することが困難であり、通常のサイクロトロン共鳴測定を行うことが困難である。カンチレバーを用いた方法で有効質量を明らかにできれば、新たな物質合成に向けた指針となる。