パルス磁場中で瞬時に金属の電気抵抗を測る方法を開発

附属国際超強磁場科学研究施設 三田村 裕幸 横浜国立大学大学院工学研究院 綿貫 竜太 広島大学大学院先進理工系科学研究科 鬼丸 孝博

とを突き止めました[1]。これにより、機械的振動を抑制でき れば、純良金属の磁気抵抗を測定する場合でもデータの積算 時間は従来考えられていたものに比べれば短くても良いこ とが導かれます。むしろ磁場発生時間が短くなることで抵 抗測定中に試料に電流を流す時間も短くなるため、出力信 号を大きくするために電流値を大きくしても試料の発熱量 が抑えられるという利点が生まれます。また、電磁石自体 もコンパクトになると機械的振動の抑制も容易になります。

一方、磁場発生時間を短くすることに伴い、これに見合 う高速測定が必要となります。もし究極的にノイズやバッ クグラウンドが無視できるならば簡便な直流4端子法で問 題ないのですが、現実には諸々の対策を施してもこれらは 除去しきれずに残ってしまいます。直流法ではノイズや バックグラウンドの周波数帯域より早い時間応答はできな いので高速測定には不向きです。そのため、磁気抵抗測定 の高速化には交流4端子法が必須となります。



図1 (左側)整数(n=1,2,...,5)周期で検波したときの通過利得。(右側)1周期と2周期で検波した時の通過利得に重み をつけて足し合わせたもの。重みを変えることで望みの周波数成分を消去できる(それぞれ上段が実部で下段が虚部)。

【研究の背景】

パルス磁場中で純良金属の磁気抵抗を測る技術を獲得す ることは、我々強磁場業界の長年の懸案でした。一般的に ある程度以上の強い磁場を生成するには、瞬間的な大電流 を電磁石に流す方法がとられます。強い磁場中での純良金 属の磁気抵抗測定では、信号が小さいためノイズを平滑化 するのに長時間のデータの積算が必要であり、パルス磁場 下での測定は難しいと考えられてきました。そのため、パ ルス磁場中での磁気抵抗測定は、微細加工によって信号を 大きくした試料か、あるいは半導体や半金属などの電気抵 抗が元々高い物質に限られていました。

【実験結果】

本研究グループでは、パルス磁場中での有線測定に特有 な主たるノイズが、不均一な磁場を持つ電磁石やプローブ 等の機械的振動によって引き起こされた電磁誘導であるこ



図 2 横浜国立大学で作成された LaB₄の磁気抵抗の測定結果。純良単結晶でしか観測できない量子振動が観測されている。1 周期(左図)で検波した結果と2 周期(中図)で検波した結果を足して2 で割ると、低周波ノイズに起因する細かな振動が除去され、本質的な量子振動だけが残る(右図)。この操作は、図1右側のa=0.50 のケースに相当する。右図の横軸の分解能は中図と同じにも関わらず、劇的にノイズが除去されている。

一般的に交流信号を精度よく復調するには位相検波法 が用いられます。これは元の信号が、

$$f(t) = A\cos\omega_0 t + B\sin\omega_0 t \qquad (\vec{x}\,1)$$

で表されるときに、両辺に $2\cos\omega_0$ および $2\sin\omega_0$ を掛け 合わせると三角関数の倍角の公式によりそれぞれ

 $f(t) \times 2\cos\omega_0 t = A (1 + \cos 2\omega_0 t) + B\sin 2\omega_0 t \quad (\vec{x} 2)$

 $f(t) \times 2 \sin \omega_0 t = A \sin 2\omega_0 t + B (1 - \cos 2\omega_0 t)$ (式3) が成り立ちます。一般的なアナログ的位相検波法では2倍 波をローパスフィルタによって除去して定数部分A, Bを抽 出しますが、これには非常に長い時間(多くの振動回数)が 必要となります。他方、数値位相検波法では、変調周期 $2\pi/\omega_0$ のちょうど整数倍の周期で積分することで2倍波を 除去することができます。後者では、原理的に変調周期の 1 倍や2 倍の非常に短い時間で復調を完了することが可能 です。ただそれと引き換えに、変調周波数以外の周波数成 分を除去する性能は劣化します。

本研究グループは、復調に用いる積算周期数の違いに よって、変調周波数以外の周波数成分が通過する割合が異 なることを初めて見出し、この性質をうまく使うことで、 短い積分時間内で従来の数値位相検波では除去しきれな かった周波数のノイズを除去できることを理論(図 1)と実験 (図 2)で実証しました[2, 3]。この方法は複数試料の同時測定 に伴う干渉効果の除去にも強力な方法になります(図 3)。

一般に、交流4端子法で時間分解能を向上させるために 変調周波数を上げてゆくと、電圧端子間から得られる出力 信号が入力電流に対し'位相が回転'してゆく現象が昔か らよく知られていましたが、その理由はよくわかっていま せんでした。本研究グループは、'位相が回転'している



図3 2つの試料を異なる周波数(20 kHz と 31.25 kHz)で同時に測定した場合の一方の試料(銀線、31.25 kHz で変調)の測定結果。左上 図は1周期、左下図は2周期で検波した場合の解析結果を示す。どちらも相手の試料から来る干渉信号(31.25 kHz - 20 kHz = 11.25 kHz) が重畳している。右下図は1周期と2周期の結果を適切な重み付けで足し合わせたもの。干渉効果による振動が首尾よく消えている。 赤線が試料本来の磁気抵抗を表す実部で青線が配線の相互インダクタンスにより現れる虚部をそれぞれ示す。右上図は干渉効果の除去 に必要な積算時間の幅を表している。従来の OFDM 法(紫色の枠)に比べて本研究で新たに示された方法(橙色の枠)の方が格段に短い時 間で干渉信号を分離できることがわかる。

のではなく電流ラインと電圧ラインの間の相互インダクタ ンスの効果が虚部に重畳しているためであることを突き止 めました。一般に相互インダクタンスの大きさは配線の幾 何学的形状に由来し試料の抵抗値とは無関係なので、試料 の抵抗値が小さいほどその影響は相対的に大きくなります。 また、この場合の入力電流に対する出力電圧の大きさは変 調周波数に比例します。これらのことは、低抵抗の測定ほ ど変調に用いることのできる周波数の上限値が低くなるこ とを意味します。配線の取り方を工夫することで相互イン ダクタンスの大きさはある程度は抑えることはできるもの の、雑感では1 m Ω以下の低抵抗の測定における変調周波 数は高々数+kHz程度が限界と考えられます。

本研究グループでは、位相の情報を含めた絶対値の正確 な測定を目指すために、ケーブルは同軸線の内外を使い、 初段のプリアンプは差動にし、前置フィルタ等を入れずに プリアンプで直接受ける方式を採用しました(図 4)。これ は、フィルタ等によって入力インピーダンスを下げずに済 むので、途中の配線での電圧降下を抑えることができます。 更に、プリアンプや後置フィルタ等がもたらす位相のズレ と利得を較正しておくことで、線間の浮遊容量が小さいという前提が成り立つ範囲で、実部と虚部を任意性なしに直交分離することができます(図 5)。

これらの工夫により、低抵抗の測定における変調周波数 の上限である数十 kHz に対し数 10~100 マイクロ秒程度 の時間分解能での測定が可能になりました。また、「交流 4 端子法では測定結果の絶対値に信頼がおけない」という これまでの常識が覆され、非常に精度の高い電気抵抗測定 が簡易に行えるようになりました。

【今後の展開】

これまで難しいとされた純良金属の磁気抵抗の測定が本 研究の成果により容易にできるようになったことは、材料 研究や物性物理学の基礎研究に非常に大きな進歩をもたら すものと考えられます。また、本研究で示されている新し い信号処理技術は、パルス磁場中での輸送測定に限らず、 他の研究分野のあらゆる交流測定技法において時間分解能 の向上に役立つ可能性があります。



図4 測定回路の模式図とデータ解析のフロー。市販の装置(PPMS,米国カンタムデザイン社製)でおよそ1時間かかる測定(下段右端グラフの緑線)を1/90秒程度(右端グラフの赤線)で実行できる。試料は白金線。

一般に、信号検出の時間分解能を上げるには変調に用い る周波数を上げるのが常道ですが、放送や電気通信のよう に法的に使用を許可された周波数帯域が限定されているな どの理由から安易に周波数を上げられない場合には、本研 究の新信号処理方式はとりわけ効力を発揮します。例えば、 この方式は放送・通信分野で現在使用されている直交周波数 分割多重方式 (orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM)よりも短い時間幅の情報で、さまざまな周波数成 分で構成される、いわゆるブロードバンド信号を復調でき ることが本研究で理論的に示されています。したがって、 ポスト 5G を含む放送・通信分野において、信号密度向上 による通信の高速化・耐障害性・耐干渉性の改善が期待で きます。また、医療分野では超音波診断装置、MRI など のイメージング装置において高速化・高解像度化が期待で きます。センサ分野では電子コンパス、加速度センサ、ミ リ波レーダー、超音波ソナーなどの自動運転技術に必要な デバイスにおける感度、時間応答および混線防止性能の向 上に資すると考えられます。



図 5 広島大学で作成された PrIr₂Zn₂₀の純良単結晶の磁気抵抗 の測定結果。実部(赤線)のみに試料由来の量子振動が観測さ れ、虚部(青線)には振動がほとんど見られない。この測定で は、アンプとフィルタによる位相の回転角と利得があらかじめ 較正されており、この結果は、任意性なしに実部と虚部の直交 分離が一意的に決定されていることを示している。

【謝辞】

本研究成果は、横浜国立大学大学院工学研究院、ドレス デン強磁場研究所、本研究所の榊原俊郎教授および国際超 強磁場科学研究施設との共同研究によるものです。本研究 における実験は横浜国立大学低温科学研究センター、ドレ スデン強磁場研究所および本研究所国際超強磁場科学研究 施設にて行われました。本研究の一部は、日本学術振興会 の「頭脳循環を加速する戦略的国際研究ネットワーク推進 プログラム」(課題番号;R2604/研究科題名;新奇量子 物質が生み出すトポロジカル現象の先導的研究ネットワー ク)および、科学研究費補助金基盤研究(C)(課題番号; 26400329、17K05534)、文部科学省科学研究費補助金新 学術領域研究(研究領域提案型)(課題番号;15H05886(J-Physics)/研究科題名;強相関多極子物質の開発)の補助 によるものです。

【参考文献】

- H. Mitamura, R. Watanuki, E. Kampert, T. Förster, A. Matsuo, T. Onimaru, N. Onozaki, Y. Amou, K. Wakiya, K. T. Matsumoto, I. Yamamoto, K. Suzuki, S. Zherlitsyn, J. Wosnitza, M. Tokunaga, K. Kindo, and T. Sakakibara, Rev. Sci. Instrum. 91, 125107 (2020).
- [2] H. Mitamura, PCT/JP2017/009539, 09 March 2017.
- [3] H. Mitamura, PCT/JP2019/015560, 10 April 2019.