

2020年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	東北大学・多元物質科学研究所
職位または役職	講師
氏名	吉松 公平

1. 研究題目

ステッピングモータにより生成した交流磁場を用いた安価な二交流ホール効果装置の開発

2. 研究目的

本研究ではステッピングモータによるネオジム永久磁石の高速回転を利用し、磁場と電流を共に交流とした二交流ホール効果測定法を提案・装置開発を行う。従来の直流ホール効果測定で問題となるノイズ電圧を一切排除した純粋なホール電圧成分の観測が可能となる。超伝導電磁石の1/100のコストで同等以上のS/N比を達成し、材料のキャリア密度を安価で簡便に決定する手法を確立する。

3. 研究内容及び成果

A. 二交流ホール効果装置の開発

図 1 に本研究で開発した二交流ホール効果測定装置の写真を示す。装置は試料部、エレクトロニクス部、モータ制御部に大別される。試料部にはステッピングモータと磁石を設置し、交流磁場を測定試料に印加する。エレクトロニクス部には交流電流を印加する電流ソースと交流ホール電圧を測定するロックインアンプを備える。モータ制御部にはステッピングモータのドライバを内蔵し、PC および I/O でのモータ制御を可能とする。当初は試料部にある上下2つのモータを同期回転させ交流磁場を印加する設計であった。しかし、磁場を大きくするために磁石を近づけると、磁石の引力・斥力でモータ回転が乱れ、理想的な交流磁場生成が困難との問題が発生した。そのため、以下の成果では上下一方の磁石のみ用いて測定を行なった。

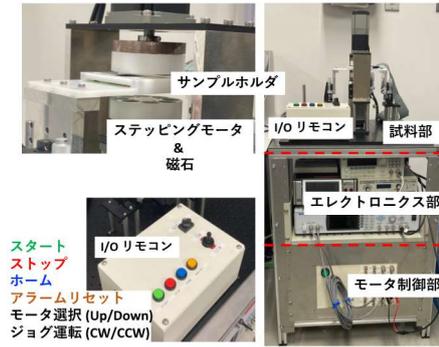


図 1. 本研究で開発した二交流ホール効果装置の写真。

B. 二交流ホール効果の検証

1. モータ回転による交流磁場の生成

図 1 の装置を用い、ステッピングモータの回転による交流磁場の生成を明らかにした。磁場の検出に市販のホール素子 (HG-166A-2U, 旭化成マイクロデバイス) を用いた。図 2 にステッピングモータのパルス位置に対するホール電圧の実部と虚部を示す。パルス位置でホール電圧の実部虚部が系統的に変化しており、~75 パルスで最大、~200 パルスで最小の電圧出力を得られている。データは正弦波で良くフィッティングでき、周波数が 244 パルスとの結果が得られた。設計から期待される理想周波数は 250 パルスで、設計通りの交流シグナルが得られていることがわかる。

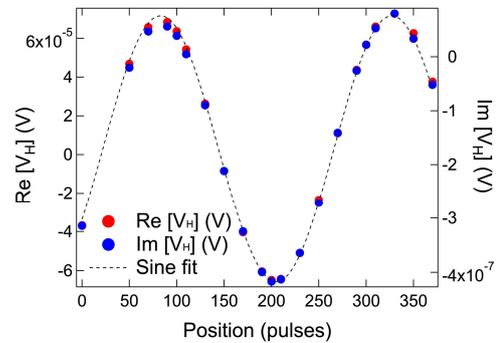


図 2. ホール電圧の実部(赤)と虚部(青)のステッピングモータのパルス位置依存性。点線は正弦波のフィッティング曲線。

2. 二交流ホール効果測定の実証

磁場と電流を別々の周波数とした二交流ホール効果測定において、ホール電圧 (V_H) は

$$V_H = \frac{R_H}{t} \times I_x \sin(2\pi f_I t) \times B_z \sin(2\pi f_B t) = \frac{R_H I_x B_z}{t} \times \frac{1}{2} \{ \cos 2\pi(f_I + f_B)t + \cos 2\pi(f_I - f_B)t \} \quad (\text{式 1})$$

の式で記述される。ここで、 R_H はホール係数、 t は試料の厚さ、 B_z は印加磁場、 I_x は印加電流、 f_I と f_B は電流と磁場の周波数である。式 1 から二交流ホール効果測定では、和差周波数 $f_I + f_B$ と $f_I - f_B$ で同一のホール電圧シグナルが得られる。そこで、ホール素子に印加する磁場周波数を固定し、様々な電流周波数を印加した。和差周波数をロックインアンプで測定することで、二交流ホール効果測定を実証した。結果を図 3 に示す。 f_I と f_B が近い場合、理想通りに和差周波数で同一の ~250 μV のホール電圧が得られていることがわかる。一方、電流周波数が 20 Hz を超えるとシグナルが理想からずれて、小さくなった。これは、 $f_I + f_B$ と $f_I - f_B$ の周波数が近くなり、個別のロックイン検出が困難になるためと考えられる。他の磁場周波数で同様の測定を行い、 $10^{-2} < f_I/f_B < 10^2$ の範囲で理想的な測定が可能と明らかになった。

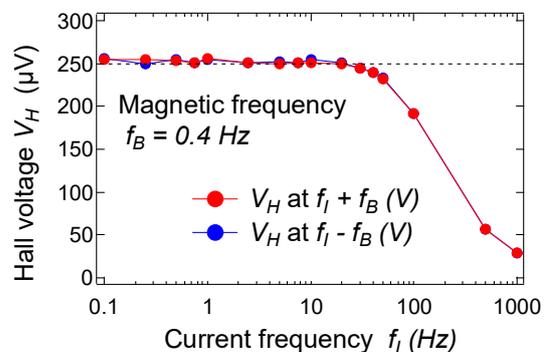


図 3. 磁場周波数を 0.4 Hz に固定し、様々な電流周波数で測定した二交流ホール電圧シグナル。

4. 今後の研究の見通し

3. 研究内容および成果、からステッピングモータを用いた二交流ホール効果装置がハードウェアとして一通り完成した。今後は、様々な測定条件(印加電流の大きさや周波数、ステッピングモータの回転速度、ロックインアンプの測定パラメータ)でホール素子の二交流ホール電圧計測を行ない、測定法の確立を進める。さらに、試料への電流・磁場の印加と電圧計測の自動化を進めて行くことを計画している。LabVIEWを用い、電流ソース、ロックインアンプ、ステッピングモータをシリアルとRS485通信を利用し、USB経由での制御を行う。また、ソフトウェアの開発と同時に実試料の測定も行なう。「必要は発明の母」のことわざの通り、装置開発は試料測定のためである。そこで初年度に開発した装置を用い、報告者が専門とする薄膜試料の二交流ホール効果測定を行なう。詳細を以下に示す。

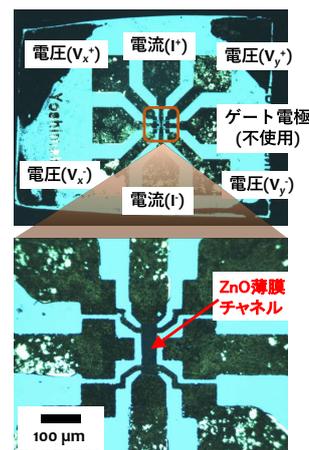


図 4. ZnO 薄膜の微細加工で形成したホールバーの顕微鏡写真。

二交流ホール効果測定による酸化薄膜材料のキャリア密度の決定

ホール効果測定は、試料のキャリア密度と移動度を決定できるほとんど唯一の手法である。電子材料において、キャリア密度と移動度は最重要なパラメータである。そこで今後の研究では、報告者が専門とする酸化薄膜材料に対して、設計開発している「ステッピングモータにより生成した交流磁場を用いた二交流ホール効果測定」を適用する。

機能性酸化材料として、化合物半導体や発光素子として期待される酸化亜鉛 (ZnO)、透明導電膜として応用されているスズドープ酸化インジウム (Sn:ITO)、報告者が精力的に研究し、光触媒に應用される酸化チタン (TiO₂) 薄膜を対象とする。これら酸化薄膜を微細加工することでホールバーパターンを作製する。実際に作製した ZnO 薄膜ホールバーの顕微鏡写真を図 4 に示す。チャンネル幅 50 x 150 μm の微細なパターンが形成できていることがわかる。このホールバーを用いて測定した「直流ホール効果測定」の結果を図 5 に示す。磁場の正負の反転によりホール電圧の値が異なっているものの、Sample #2 では電極のミスアライメントに起因する大きな抵抗電圧 (ΔV) がデータに加わり、正負の磁場で共に負の電圧シグナルが得られている。このような試料でも二交流ホール効果測定により大きな抵抗電圧を排除でき、正確なホール電圧シグナルが得られると期待される。

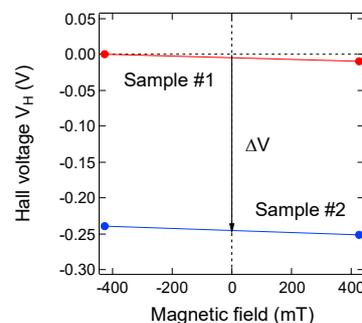


図 5. 図 4 の ZnO 薄膜のホールバーを用いて測定した直流ホール効果測定結果。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

1. R. Wakabayashi, **K. Yoshimatsu**, M. Hattori, J. -S. Lee, O. Sakata, and A. Ohtomo, "Epitaxial stabilization of complete solid-solution β -(Al_xGa_{1-x})₂O₃ (100) films by pulsed-laser deposition" Cryst. Growth Des. 21, 2844 (2021). 学術論文 (査読付)
2. **K. Yoshimatsu**, N. Hasegawa, Y. Nambu, Y. Ishii, Y. Wakabayashi, and H. Kumigashira, "Metallic ground states in undoped Ti₂O₃ films induced by elongated *c*-axis lattice constant" Scientific Reports 10, 22109 (2020). 学術論文 (査読付)
3. **K. Yoshimatsu**, "Metal-Insulator Transition of Corundum-Type Ti₂O₃ Films" CONMAT2021 Virtual presentation (2021). 国際学会 (査読付)
4. 吉松 公平、長谷川 直人、南部 雄亮、石井 祐太、若林 裕助、組頭 広志 "金属伝導を示す Ti₂O₃ 薄膜"第 68 回応用物理学会春季学術講演会 16p-Z33-4 (2021). 国内学会 (査読付)
5. Outstanding Reviewer Awards for Journal of Physics: Condensed Matter for 2020 from IOP publishing (2021). 受賞
6. 吉松 公平、"λ-Ti₃O₅膜形成基板および λ-Ti₃O₅膜形成基板の製造方法" 特願 2021-144696 特許