

アバランシェフォトダイオードディテクタを用いた 高計数率磁気回折測定システム

細米 信好^a, 石地 耕太郎^a, 早崎 有一^a, 橋爪 弘雄^a, 大河内 拓雄^b, 表 和彦^c, 栗林 勝^c

^a奈良先端科学技術大学院大学・物質科学教育研究センター, ^b京都大学・化学研究所,

^c理学電機・X線研究所

背景: 円偏光硬 X 線を用いた共鳴 X 線磁気回折は、金属多層膜の元素選択的な磁気構造を原子層の深さ分解能で決定することができる。希土類金属の L 吸収端の場合、磁気散乱強度（電荷-磁気干渉散乱強度と純電荷散乱強度の比）は数%あり、磁気散乱を電荷散乱から分離することは比較的容易である¹⁾。しかし、3d 遷移金属の K 吸収端の場合、磁気散乱強度は 0.1%程度である。磁気散乱を電荷散乱から分離するには、電荷散乱を少なくとも 10^6 カウント以上計数しなければならない。直線偏光である放射光から磁気散乱実験に必要な±ヘリシティの円偏光硬 X 線を得るのにダイヤモンド移相子が使われる。この方法で得られた±円偏光の強度は 3-6%程度異なっている。ディテクタが持つ不感時間のため、この強度差は反射率の差 $I^+(2\theta)-I(2\theta)$ に人為的なピークを生じる。X 線計数に通常使われている NaI シンチレーションディテクタを磁気散乱測定に用いた場合、人為ピークの影響を避けるために計数率は 10^4 cps 以下にする必要がある。このため、3d 金属 K 吸収端の磁気散乱測定は長時間を要する。共鳴 X 線磁気散乱法をナノ磁性材料として重要な 3d 強磁性金属に適用するには、高計数率の測定装置が不可欠である。我々は、不感時間が短いアバランシェフォトダイオードをディテクタとして用いた計数装置を開発し、測定時間を画期的に短くすることに成功した。

実験: 図 1 に実験に使用した計数装置の概念図を示す。試料から散乱された X 線をアバランシェフォトダイオードディテクタ (APD)

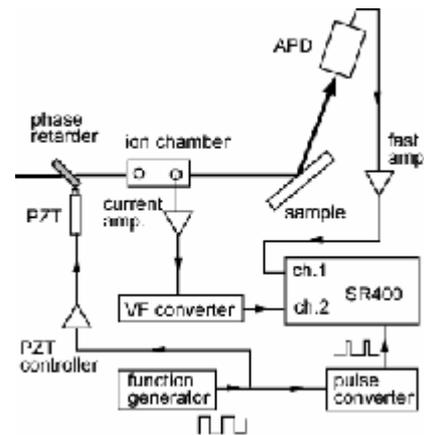


図 1 APD を用いた高計数率磁気散乱測定装置

で検出し、SR400 高速カウンタの ch.1 で計数する (I^{\pm})。入射 X 線強度はイオンチェンバで測定し、VF コンバータを通した後、SR400 の ch.2 で計数する (I_m^{\pm})。ダイヤモンド移相子を 0.1-10 Hz の矩形波で振動させて X 線ヘリシティを周期的に切り替えると同時に、この矩形波を計数開始のトリガとして用いることにより I^{\pm} と I_m^{\pm} を X 線ヘリシティと同期して測定する。ファンクションジェネレータの信号と移相子の応答には若干のずれがあるため、10 ms の遅延時間を設定して、ずれを補償する。所定の時間測定後、SR400 のメモリに保存された一連の I^{\pm} および I_m^{\pm} データから平均値 $\langle I^{\pm}/I_m^{\pm} \rangle$ および $\langle I/I_m \rangle$ を計算し、その差を取ることで磁気散乱差ピークを得る。測定には Co/Cu 多層膜の 1 次反射を用い、X 線エネルギーは Co K 吸収端近傍 (7720 eV) を選んだ。また、APD の前に Al フォイルを置き、その厚さを調整することにより磁気回折差ピークの計数率依存性を調べた。

結果と考察： 磁気回折差ピークの測定例を図 2a-c に示す。移相子の振動数は 1 Hz、各点の計数時間は約 10 s である。●は印加磁場が X 線進行方向と平行、○は反平行の場合の磁気回折差ピークである。本来これらのピークは、カウントゼロに対して正負対称になる。電荷散乱ピークが 1.5×10^6 cps 程度の低計数率では確かに磁気回折差ピークは対称的である。しかし、より計数率が高くなるとピーク形状は非対称になり、 1.0×10^7 cps では±磁場に対する差ピークはいずれも正である。しかし図 3a で示すように±磁場に対する磁気回折差ピークの差を取ると 3.2×10^7 cps の場合を除いてほぼ一定の形状となる。このことは、各データとも磁気散乱シグナルは正しく測定されているが、他の効果が対称なピーク形状を歪ませていることを示唆している。データ測定時の貯蓄リングの運転モードは 203-7×4 バンチであり、平均バンチ間隔は 27.3 ns に相当する。APD の不感時間は 3.5 ns 程度で 1 桁短い。このような状況では数え落とし補正は、

$$I_{\text{corr}} = [-\ln(1-q)]/q \times I_{\text{obs}} \text{ (cps)}, \quad (1)$$

ただし $q = I_{\text{obs}}(\text{cps})/f_{\text{ring}}$ と与えられる。 f_{ring} は単位時間あたりのバンチ数で $3.65 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ である。(1)式を用いて補正を行なうと、図 2d-f

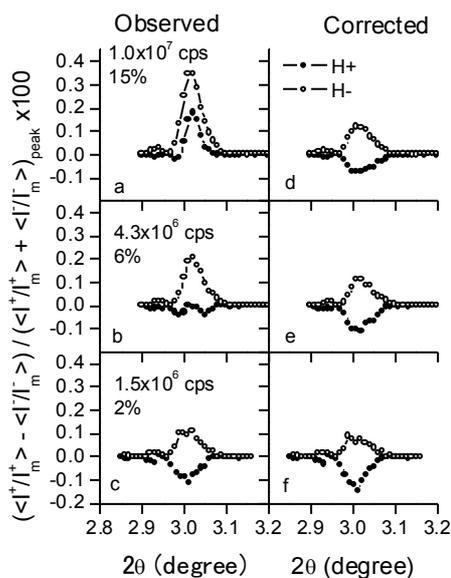


図 2 磁気回折差ピーク形状の計数率依存性。測定結果(左)と数え落とし補正後(右)

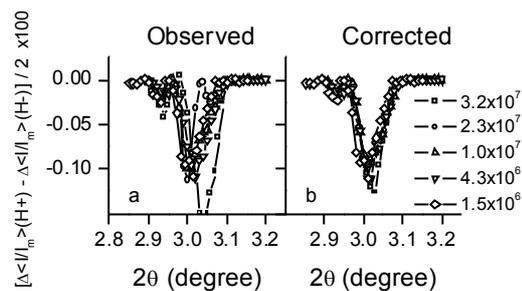


図 3 様々な X 線強度での磁気回折差ピークの差

のように計数率にかかわらず対称なピーク形状が得られる。これは非対称形状の原因が X 線の数え落としであり、(1) 式を用いて正しく補正できることを示す。数え落とし率(%)を図 2 に示した。また、図 3b で示すように差ピークの差も計数率に依存せず同じになる。つまり、APD と SR400 を用いた計数装置を用いれば、 10^7 cps 程度の高計数率で共鳴 X 線磁気回折が測定できることが分かる。

今後の展望： 本実験に先立ち、我々は APS/ANL で Co/Cu 多層膜の 1 次ピークの磁気回折実験を Co K 吸収端で行い、約 10 時間かけて磁気回折ピークの検出に成功した。今回開発した計数装置を用いれば同様の測定が 1 時間以内に行なえる。これにより、3d 磁性元素を含むナノ磁性薄膜・多層膜の磁気構造を系統的に調べることが可能になった。また、Co/Cu 多層膜中の Cu 層誘起磁気分極のような微小磁気分極も研究対象とすることができる。今後、このような方向へ研究を発展させる予定である。

参考文献

- 1) N. Ishimatsu, H. Hashizume, S. Hamada, N. Hosoito, C.S. Nelson, C.T. Venkataraman, G. Srajer and J.C. Lang, Phys. Rev. B60(1999) 9596.

発表論文

- [1] 早崎有一, 石地耕太郎, 細糸信好, 橋爪弘雄, 栗林勝, 表和彦, 日本物理学会 2003 年秋季大会 (発表予定)