

## 新博士紹介

1. 氏名 今井康彦 (JASRI・SPring-8)
2. 論文提出大学 東京大学
3. 学位種類 博士 (工学)
4. 取得年月日 2001年 3月
5. 題目 ブラッグ角90°における X 線動力的回折の研究とその応用
6. 使用施設 KEK-PF BL15C, PF-AR NE3 SPring-8 BL09XU

### 7. 要旨

#### [序]

第3世代の放射光 X 線を用いることにより、硬 X 線領域での Fabry-Perot 型干渉計 (FP 干渉計) の実現が期待されている。硬 X 線領域における FP 干渉計が利用できるようになると、高分解能の分光や高精度の格子定数測定、各種の干渉実験などが可能となる。X 線領域において FP 干渉計を構成するには、可視光の場合に用いられるミラーの代わりに、結晶などによるブラッグ角90°の回折を用いる必要がある。ブラッグ角が90°となる回折は、回折における特異点にもあたり、完全に近い結晶による動力的回折では、次の特徴が知られている。

- 回折の角度幅が数100 arcsec と通常の回折の1000倍程度に広がる。
- 回折に関わる X 線のエネルギーバンド幅が数 meV と非常に狭くなる。

この特徴的な現象は1972年に Kohra, Matsushita らにより初めて理論的な説明がなされ<sup>1)</sup>、その後、主に理論の面から研究がなされてきた。しかし高輝度放射光が利用できるようになり、実験の面からも研究の対象として注目されつつある。

硬 X 線領域での FP 干渉計は1979年に A. Steyerl らによって提案されている<sup>2)</sup> が、未だ実現には至っていない。干渉計の開発が困難で、干渉が観測できていない原因はいくつか考えられている。本研究ではこれらを明らかにするとともに、硬 X 線領域における FP 干渉計実現のための第1歩として、ブラッグ角90°における X 線動力的回折の特徴を理論および実験の両面から詳しく調べ、応用の可能性を探ることを目的としている。

#### [理論]

完全性の高い結晶による X 線の回折は、多重散乱を考慮した動力的回折理論を用いて説明される。動力的回折理論には幾つかの流儀があり、Laue 流と Darwin 流の理論の2つに大別される。Darwin 流の理論では、まず結晶を周期的な原子層の堆積とみなし、1原子層による X 線電場の振幅透過率と振幅反射率を基に、原子層間における電場振幅の関係を漸化式として求める。次に、この漸化式をある境界条件の下で解くことにより、透過波と回折波を導き出すという方法をとる。Darwin 流の理論は Laue

流の理論に比べ、物理的な猫像が単純で直観的にも分かりやすく、ブラッグ角が90°近傍という条件下でも特別な取扱を必要としない。更に、結晶表面と平行でない格子面による回折 (非対称反射) や、回折に関わる格子面が2つあり、回折波が全て同一平面内にある coplaner な3波の多波回折を扱うことができるように拡張された理論も示されている<sup>3)</sup>。本研究における理論計算には、数値計算との相性のよい Darwin 流の理論を用いている。

#### [実験方法]

ブラッグ角90°の回折波を精度よく測定するには、さまざまな条件と高度な実験技術が必要となる。第1に、ブラッグ角が90°と決まっているため、格子面間隔もしくは波長のいずれか一方を決めると、他方が一意に決まってしまう。第2に、ブラッグ角90°における回折の透過波を観測するためには、高分解能の前置モノクロメータが必要となる。何故なら、ブラッグ角90°の回折に関わる X 線のエネルギー幅  $\Delta E$  は非常に狭いため、これ以上に分光した X 線を用いなければ、回折に関わらない透過 X 線がバックグラウンドとなり、信号がバックグラウンドに埋もれてしまうためである。第3に、対称性のよい結晶によるブラッグ角90°の回折では、低次の格子面による回折を除けば、複数の格子面が回折条件を満たしてしまい、同時反射が避けられない。同時反射面が多くなると、ブラッグ角90°の回折の強度が小さくなり、また解析も複雑になるため、なるべく同時反射面が少ない格子面を選択することが望ましい。以上のことから、現在もっとも広く用いられている <sup>57</sup>Fe からの核共鳴散乱線 ( $\lambda=0.86 \text{ \AA}$ ) 用の高分解能モノクロメータを利用し、回折格子面には、FZ シリコン単結晶の(991)および、水晶(0 6  $\bar{6}$  10)を用いることにした。Si(991)によるブラッグ角90°の回折は、同時反射面が4つと同時反射面の数が少ない格子面の1つである。水晶(0 6  $\bar{6}$  10)は、結晶の温度を80°C程度に上げることにより、<sup>57</sup>Fe からの核共鳴散乱線を用いてブラッグ角90°の回折をおこすことができる。

#### [実験と考察]

はじめに、薄いシリコン結晶の平板 Si(991)を用い、ブラッグ角90°における回折の反射率と透過率のエネルギー依存性、角度依存性を調べる実験を行った。これまでは、厚い結晶からの反射波を使った実験のみで、透過波を使った実験は報告されていない。FP 干渉計への応用には、透過方向の回折波の特性についても調べる必要であると考えた。実験は KEK PF BL15C にて行った。226  $\mu\text{m}$  の厚さの試料について測定した結果を Fig. 1 に示す。回折の角度幅と、反射率、透過率の絶対値とも理論とよく一致することが確認された<sup>4)</sup>。反射率の測定結果の中心に見られる急なディップは同時反射の影響であると考えられる。

次に、X 線干渉計による位相変化に敏感な測定システムを用いて、ブラッグ角90°における透過方向の回折波の位相変化を測定した。この測定システムでは、LLL 型 X

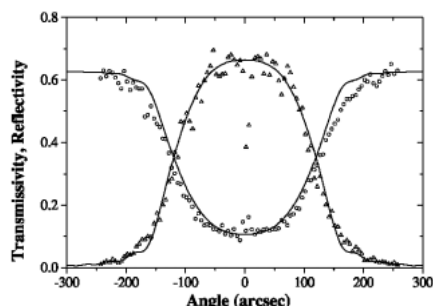


Figure 1. Transmissivity and reflectivity curves from a silicon crystal plate for the 991 reflection at a Bragg angle near  $90^\circ$ . Observed curves and calculated curves are showed by marks and solid lines, respectively. A rotation angle is represented as the deviation angle from  $90^\circ$ .

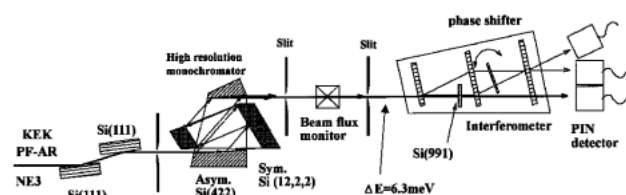


Figure 2. Experimental arrangement for observing the phase shift of forward diffraction from a silicon crystal plate for the 991 reflection at a Bragg angle near  $90^\circ$  using a LLL type X-ray interferometer.

線干渉計の片方のパスに回折を起こす試料を配置することにより、回折透過波の位相変化を直接測定することができる。光学系を **Fig. 2** に示す。FP 干渉計への応用を考えた場合、干渉に大きく関わるのは位相であるため、回折波の位相変化特性を調べることは大きな意味がある。実験は Si(991) 単平板を試料として、KEK PF-AR NE3 および SPring-8 BL09XU において行った。透過波の位相変化について、測定結果と 2 波近似による理論計算結果を **Fig.**

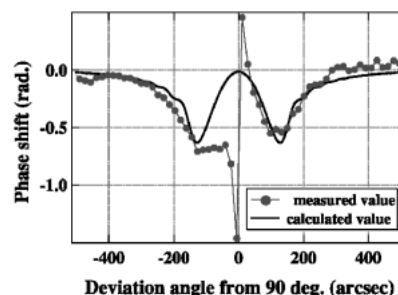


Figure 3. The phase shift of forward diffraction from a silicon crystal plate for the 991 reflection at a Bragg angle near  $90^\circ$ .

3 に示す。ブラッグ角  $90^\circ$  からのずれが  $\sim 50$  arcsec 以下の領域では同時反射の影響のため理論から外れているが、それ以外の領域では理論とほぼ一致するという結果が得られた。ブラッグ角が  $90^\circ - \sim 50$  arcsec の領域での位相変化を厳密に説明するには、同時反射と偏光を考慮した多波での取り扱いが必要である。

#### [まとめと将来の展望]

本研究は、これらの実験を通してブラッグ角  $90^\circ$  の回折に関する実験技術を構築し、実験結果へ理論的考察を加え、将来の FP 干渉計実現へ向けた下地を築いたといえる。将来の展望としては、結晶表面への積層技術を用いたサンドイッチ構造の一体型 FP 干渉計や、可干渉距離の長い核共鳴散乱線を用いた一体型の Michelson 干渉計などが考えられる。更に、超高精度の角度制御技術を用いた、分離型の FP 干渉計も考えられる。

#### 参考文献

- 1) K. Kohra and T. Matsushita: *Z. Naturf.* **27a**, 484 (1972).
- 2) A. Steyerl and K.-A. Steinhauser: *Z. Physik* **B34**, 221 (1979).
- 3) T. Takahashi and S. Nakatani: *Surf. Sci.* **326**, 347 (1995).
- 4) S. Kikuta et al.: *J. Synchrotron Rad.* **5**, 670 (1998).

(受付番号01070)