

湾曲結晶チャネリングによる電子ビーム偏向

高林雄一

九州シンクロtron光研究センター

湾曲結晶チャネリングによるビーム偏向法は、1976年に理論的に予言されて以来[1]、偏向角度に相当する磁場が超伝導電磁石の発生する磁場よりも強いことや、電磁石では実現が難しいビームスプリッターへの応用可能性などが注目され、主に CERN, Tevatron, RHIC などの高エネルギー加速器施設において、陽子などのイオンビームを用いて研究が進められてきた。一方、2014年頃から、ドイツの MAMI で 855 MeV[2]、アメリカの SLAC で 3.35–20.35 GeV[3]の電子ビームを用いた研究も行われるようになってきた。より低エネルギー領域では研究が進んでこなかったが、多重散乱の効果や量子論的効果が顕著になることが予想され、今後の研究の方向性として興味深いと考えられる。そこで、本研究では、SAGA-LS リニアックからの 255 MeV 電子ビームを用いて研究を開始した。

すでに、曲率半径 10 mm で湾曲させた厚さ 40 μm の湾曲 Si 結晶を用いて、入射電子の約 10% を 1.4 mrad 偏向させることに成功している[4]。ただし、実験の結果、多重散乱によるビームの角度ひろがりに比べ、チャネリングによるビームの偏向角度が小さく、偏向された成分と偏向されなかった成分の角度分布が重なり、明確に分離することができなかった。両成分を分離させるためには、より薄く、より曲率半径の小さい結晶を用いる必要がある。そこで、まず、ホルダーの湾曲面に沿って Si 結晶（厚さ 15 μm ）を取り付ける曲率半径固定タイプの湾曲結晶の開発を進め、曲率半径を 3 mm まで小さくすることに成功した。曲率半径 3 mm は世界最小級である。次に、同じく厚さ 15 μm の Si 結晶を用い、連続的に曲率半径を変えられる曲率半径可変タイプの湾曲結晶の開発にも成功した（図 1 参照）。曲率半径固定タイプと比べ、曲率半径を任意の値に設定できるのがメリットである。今後、これらの湾曲結晶を用いて実験を継続する予定である。

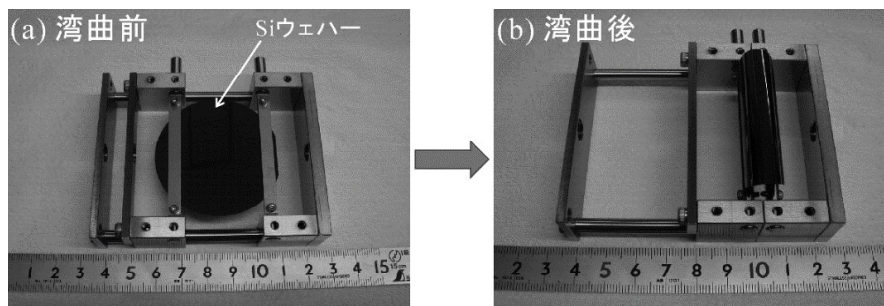


図 1：曲率半径可変タイプの湾曲 Si 結晶。Si ウエハーの直径は 2 インチ、厚さは 15 μm 。

[1] E. N. Tsyganov, Preprint TM-682, TM-684, Fermilab, Batavia, 1976.

[2] A. Mazzolari *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 135503 (2014).

[3] U. Wienands *et al.*, Phys. Rev. Lett. **114**, 074801 (2015).

[4] Y. Takabayashi, Yu. L. Pivovarov, and T. A. Tikhfatullin, Phys. Lett. A **382**, 153 (2018).

湾曲結晶チャネリングによる電子ビーム偏向

高林 雄一

九州シンクロtron光研究センター

はじめに

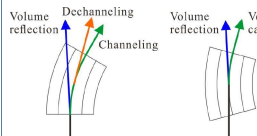
湾曲結晶チャネリングによるビーム偏向法は、1976年に理論的に予言されて以来[1]、偏向角度に相当する磁場が超伝導電磁石の発生する磁場よりも強いことや、電磁石では実現が難しいビームスプリッターへの応用可能性などが注目され、主にCERN、Tevatron、RHICなどの高エネルギー加速器施設において、陽子などのイオンビームを用いて研究が進められてきた。一方、2014年頃から、ドイツのMAMIで855 MeV[2]、アメリカのSLACで3.35–20.35 GeV[3]の電子ビームを用いた研究も行われるようになってきた。より低エネルギー領域では研究が進んでこなかったが、多重散乱の効果や量子論的效果が顕著になることが予想され、今後の研究の方向性として興味深いと考えられる。そこで、本研究では、SAGA-LSリニアックからの255 MeV電子ビームを用いて研究を開始した。

すでに、曲率半径10 mmで湾曲させた厚さ40 μmの湾曲Si結晶を用いて、入射電子の約10%を1.4 mrad偏向させることに成功している[4]。ただし、実験の結果、多重散乱によるビームの角度ひろがりには比べ、チャネリングによるビームの偏向角度が小さく、偏向された成分と偏向されなかった成分の角度分布が重なり、明確に分離することができなかった。両成分を分離させるためには、より薄く、より曲率半径の小さい結晶を用いる必要がある。そこで、まず、ホルダーの湾曲面に沿ってSi結晶(厚さ15 μm)を取り付ける曲率半径固定タイプの湾曲結晶の開発を進め、曲率半径を3 mmまで小さくすることに成功した。曲率半径3 mmは世界最小級である。次に、同じく厚さ15 μmのSi結晶を用い、連続的に曲率半径を変えられる曲率半径可変タイプの湾曲結晶の開発にも成功した。今後、これらの湾曲結晶を用いて実験を継続する予定である。

本研究の目的:より薄く、より曲率半径の小さい湾曲結晶の開発

- [1] E. N. Tsyanov, Preprint TM-682, TM-684, Fermilab, Batavia, 1976.
- [2] A. Mazzolari et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 135503 (2014).
- [3] U. Wienands et al., Phys. Rev. Lett. **114**, 074801 (2015).
- [4] Y. Takabayashi, Yu. L. Pivovarov, and T. A. Tukhfatullin, Phys. Lett. A **382**, 153 (2018).

湾曲結晶チャネリングによるビーム偏向

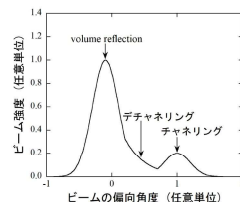


チャネリング:
湾曲した結晶面に沿ってチャネリングするため粒子は偏向される

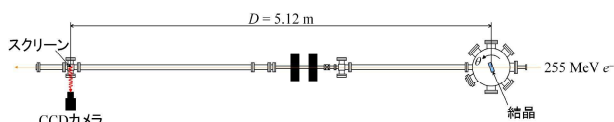
Volume reflection (VR):
チャネリングとは逆方向に偏向される(臨界角 θ_c 程度)

Volume capture (VC):
多重散乱の影響により結晶内部でチャネリング状態に入る

デチャネリング:
多重散乱の影響により途中でチャネリング状態から外れる



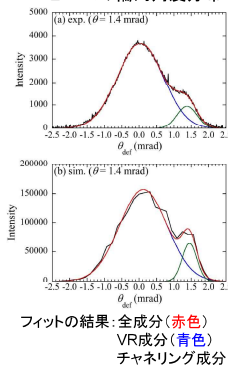
電子ビーム偏向実験



電子ビーム	エネルギー: 255 MeV, 平均電流: 7 nA, ビームの大きさ: $\phi 200 \mu\text{m}$ (コリメーターにより制限) ビームの角度ひろがり: $\sigma'_x \approx 0.10 \text{ mrad}$, $\sigma'_y \approx 0.05 \text{ mrad}$
標的	40 μm厚湾曲シリコン単結晶
スクリーンモニタ	100 μm厚アルミナ蛍光板 + CCDカメラ

255 MeV電子がSi(111)面をチャネリングする場合の臨界角: $\theta_c = 0.45 \text{ mrad}$

ビームの偏向角度分布



- 255 MeVという比較的低エネルギー領域では、結晶内における多重散乱の影響が大きく、チャネリング成分とVR成分(非チャネリング成分)が大きく重なっていた。

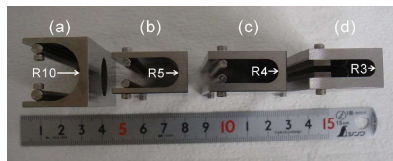
- シミュレーションには、ロシアのトムスク工科大学の理論グループがMathematicaを基に開発したBCMコードを使用。シミュレーション結果は、実験結果をほぼ再現。

- フィットの結果、デチャネリング成分は無視できるほど小さかった。チャネリング成分とVR成分(非チャネリング成分)が大きく重なっていることが原因として考えられる。

より薄く、より曲率半径の小さい湾曲結晶の開発が必要

湾曲シリコン結晶の開発

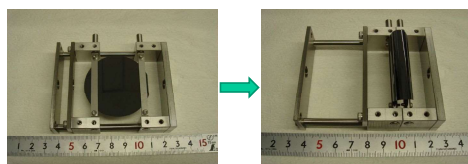
曲率半径固定タイプ



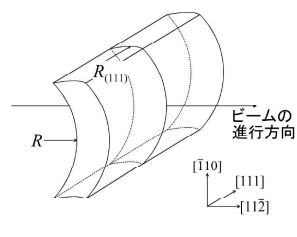
	(a)	(b)	(c)	(d)
結晶の厚さ: t	40 μm	15 μm	15 μm	15 μm
結晶の曲率半径: R	10 mm	5 mm	4 mm	3 mm
(111)面の曲率半径: $R_{(111)}$	35 mm	18 mm	14 mm	11 mm
(111)面の湾曲角度: θ_b	1.1 mrad	0.85 mrad	1.1 mrad	1.4 mrad

曲率半径 $R = 3 \text{ mm}$ は世界最小級

曲率半径可変タイプ



厚さ: 15 μm, 直径: 2インチ

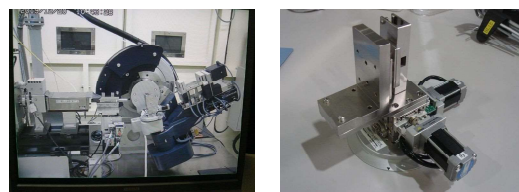


シリコン結晶を上記のように曲率半径 R で湾曲させると(111)面も湾曲する。準モザイク効果: $R_{(111)} = 3.54R$

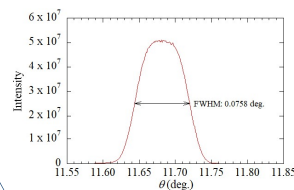
(111)面の湾曲角度: $\theta_b = t/R_{(111)}$
 t : 結晶の厚さ

X線回折による湾曲結晶の評価

SAGA-LSビームラインBL15



ロッキングカーブ
10 keV X線 → 40 μm厚湾曲Si結晶



ロッキングカーブのピーク幅
↓
回折面の湾曲角度の推定

まとめ

- 40 μm厚の湾曲シリコン結晶を利用し、255 MeV入射電子ビームの約10%を1.4 mrad偏向させることに成功。ただし、チャネリングにより偏向されたビームの角度分布と偏向されなかったビームの角度分布が大きく重なっていた。
- 上記の問題を解決するため、より薄く、より曲率半径の小さい湾曲結晶の開発を行った。
- 今後、これらの湾曲結晶を使って実験を継続する予定。

謝辞

チャネリングのシミュレーションは、ロシアのトムスク工科大学のT. A. Tukhfatullin准教授とYu. L. Pivovarov教授のグループによって行われました。

本研究はJSPS科研費JP17K05483の助成を受けたものです。