

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540383

研究課題名(和文) X線多波回折を用いたX線検光子の開発

研究課題名(英文) Development and application of x-ray analyzers using multiple Bragg diffraction

研究代表者

平野 馨一 (Hirano, Keiichi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・准教授

研究者番号：40218798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：放射光X線を用いた物性研究において、X線検光子は強相関物性の研究や磁性研究等に大いに有用である。しかし、これまで主に用いられてきたX線検光子には、1) 使用可能な波長領域が限られている、2) 円偏光に対する感度が無い、という問題点があった。そこでこの問題を解決するために、X線多波回折を利用した検光子(MBD検光子)の開発・改良を行った。さらに、その基本原理を応用して偏光制御斜入射X線トポグラフィを開発し、エピタキシャル4H-SiC結晶表面近傍の欠陥や歪み場の観察を行った。

研究成果の概要(英文)：In materials research using synchrotron x-rays, x-ray polarization analyzer is quite useful for the investigations of strongly correlated systems and magnetism. However, the conventional x-ray analyzer has two disadvantages: 1) the available wavelength is limited and 2) it is insensitive to the helicity of the photons. In order to solve these problems, we have developed and improved the x-ray MBD analyzer which makes use of x-ray-multiple-diffraction by a crystal. Further, we have developed polarization-controlled glancing-angle x-ray topography and observed defects and strain fields located in the surface layer of an epitaxial 4H-SiC wafer.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性

キーワード：X線光学 X線多波回折 X線検光子 X線トポグラフィ

1. 研究開始当初の背景

放射光X線を用いた物性研究において、X線検光子はd軌道が関わる強相関物性の研究や磁性研究等に大いに有用である。しかし、これまで主に用いられてきたX線検光子には、1) 使用可能な波長領域が限られている、2) 円偏光に対する感度が無い、という問題点があった。これらの欠点を解決するために、Q.Shenらは1992年にX線多波回折(Multiple Bragg Diffraction、略称MBD)を利用した検光子(MBD検光子)を開発し、蓄積リングの斜め上下方向に放射された楕円偏光放射光の偏光を測定した。しかし、一般的に、蓄積リングの斜め上下方向に放射される楕円偏光放射光の円偏光度は低く、さらにこの方法では偏光を自由に変えて測定できないという問題があった。そのため、MBD検光子の詳細な性能評価は困難であり、応用研究もほとんど行われてこなかった。

2. 研究の目的

(1) 本研究の第一の目的は、MBD検光子の詳細な性能評価を行うことである。そのために、蓄積リングの斜め上下方向に放射される楕円偏光放射光を使用する代わりに、X線移相子を用いて直線偏光の放射光を円偏光等に変換することにした。これにより偏光を精密に制御しながらMBD検光子の性能を評価した。

さらに、二結晶分光器の下流にコリメーター結晶を置いてX線ビームの単色性と平行性を向上させることにより、検光子の性能を精度良く調べた。

(2) 本研究の第二の目的は、MBD検光子の最適化を行うことである。そのために、Q.Shenらとは異なる結晶、反射面、波長等を用いて評価実験を行い、性能の比較を行った。

(3) 本研究の第三の目的は、MBD検光子を物性研究に応用することである。本研究では、斜入射X線トポグラフィによるSiC結晶の評価実験を行った。

3. 研究の方法

(1) まず、X線多波回折の計算シミュレーションを行うために、C++言語を用いて各種の計算プログラムを作成した。

(2) 次に、高エネルギー加速器研究機構・放射光科学研究施設 Photon Factory (PF) のビームライン BL-14Bで、GaAs結晶を用いたMBD検光子の性能評価を行い、得られた結果を理論計算と比較した。

(3) さらに、MBD検光子の最適化及びさらなる性能向上を目指して、GaAs以外の結晶(SiやInSB等)を用いてPFのBL-14Bで性能評価を行った。

(4) MBD検光子の応用として、PFのBL-3Cで斜入射X線トポグラフィでX線の侵入長を変えながらSiC結晶の観察を行った。

4. 研究成果

(1) X線多波回折の計算プログラムにより、多波回折の条件(図1)及びMBD検光子の性能(表1)を算出することができるようになった。

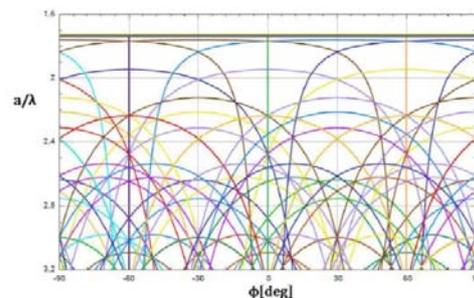


図1 X線多波回折の条件を示すマップ

ϕ [deg]	L(面指数)	A_{m1}/T	A_{m2}/T	A_{m3}/T	A_{m4}/T	$\sigma_p \cdot L \cdot \lambda/a$	ϕ_{02} [deg]
-88.13	(1 1 3)	553.6	142.5	401.7	499.1	-0.631	-80.14
-46.89	(5 1 1)	236.5	-277.7	-33.56	548.0	-0.838	80.73
-40.95	(1 1 3)	573.5	20.30	-355.4	767.7	0.677	81.99
-31.87	(1 1 5)	553.6	401.7	142.5	499.1	0.631	-80.14
-28.13	(5 1 1)	553.6	-401.7	-142.5	499.1	-0.631	-80.14
-8.67	(5 1 1)	236.5	-277.7	-33.56	548.0	-0.838	80.73

表1 GaAs結晶のMBD検光子の性能の計算例

(2) 移相子でX線の偏光を変えながら、GaAs結晶のMBD検光子で偏光を測定したところ(図2)、偏光状態の完全決定を行うことができた(図3)。特に、円偏光のヘリシティの識別に成功した。

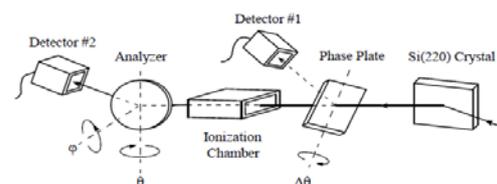


図2 実験で使用した光学系の例

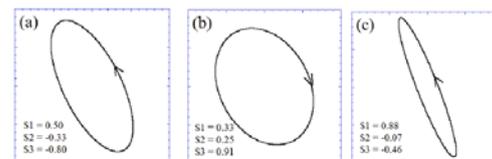


図3 移相子の角度の各点で得られた偏光楕円の例(図中の値はストークス・パラメーター)

(3) InSb 結晶を用いた MBD 検光子の性能評価では、InSb 検光子は GaAs 検光子よりも低エネルギー領域で有効であることが示された。現在、解析継続中である。

(4) MBD 検光子の原理を応用することにより、斜入射 X 線トポグラフィーにおいて X 線の侵入長を入射 X 線の偏光によって制御することが可能になる。図 4 は σ 偏光と π 偏光が SiC 結晶に斜入射配置で入射してブラッグ反射を生じる時の侵入長の計算例である。

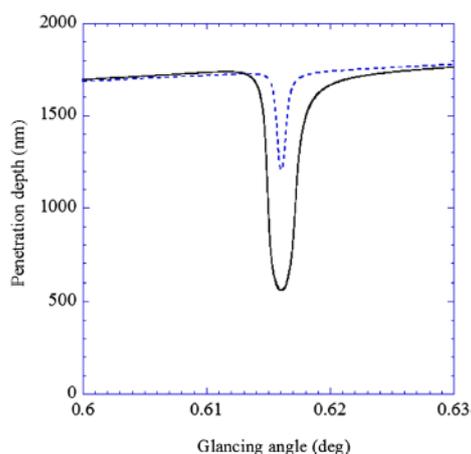


図 4 X 線が SiC 結晶で斜入射回折する時の侵入長の計算例。実線は σ 偏光、点線は π 偏光の場合。

次に、この手法をイオン注入を施したエピタキシャル 4H-SiC ウェハの観察に応用した。移相子で入射 X 線の偏光を制御しながら (図 5)、ウェハによる X 線の回折像を原子核乾板及び X 線 CCD カメラで観察した (図 6)。 σ 偏光の場合、イオン注入によって生じた表面近傍の欠陥や歪み場が π 偏光の場合よりも鮮明に捉えられている。この結果から、この手法の有効性が実証された。

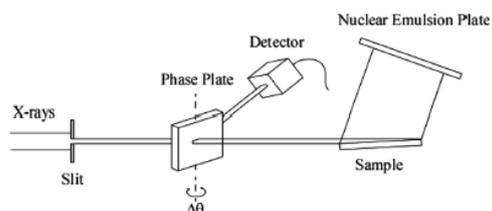


図 5 偏光制御斜入射 X 線トポグラフィーの実験配置図

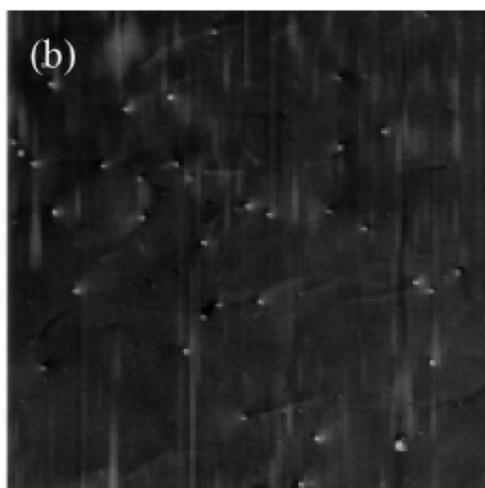
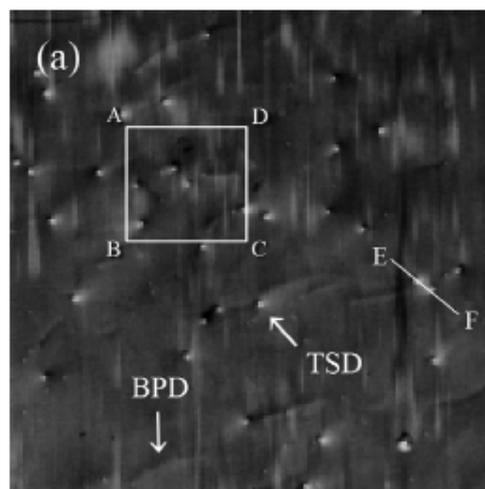


図 6 イオン注入を施したエピタキシャル SiC ウェハによる X 線のトポグラフ像。(a) σ 偏光、(b) π 偏光の場合。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① K. Hirano, Y. Takahashi and H. Sugiyama
 “Application of variable-magnification X-ray Bragg magnifier to analyzer-based phase-contrast computed tomography”
 Jpn. J. Appl. Phys. **53** (2014) 040302.
 (査読有)
 DOI: 10.7567/JJAP.53.040302
- ② K. Hirano, Y. Takahashi and H. Sugiyama
 “Development and application of variable-magnification x-ray Bragg magnifiers”

- Nucl. Instrum and Methods in Phys. Res. A **741** (2014) 78-83.
(査読有)
DOI: 10.1016/j.nima.2013.12.038
- ③ K. Hirano, Y. Ito, Y. Shinohara and Y. Amemiya
“Characterization of an x-ray diamond phase plate by a polarization analyzer using multiple diffraction”
J. Phys. : Conference Series **425** (2013) 052030.
(査読有)
DOI: 10.1088/1742-6596/425/5/052030
- ④ K. Hirano and Y. Takahashi
“Applications of x-ray magnifier and demagnifier to angle-resolved x-ray computed tomography”
J. Phys. : Conference Series **425** (2013) 192004.
(査読有)
DOI: 10.1088/1742-6596/425/19/192004
- ⑤ S. Jongsukswat, T. Fukamachi, D. Ju, R. Negishi, K. Hirano and T. Kawamura
“Strain distribution in an Si single crystal measured by interference fringes of X-ray mirage diffraction”
J. Appl. Cryst. **46** (2013) 1261-1265.
(査読有)
DOI: 10.1107/S0021889813019067
- ⑥ K. Hirano, Y. Takahashi and S. Nagamachi
“Application of x-ray phase plate to grazing incidence x-ray topography for the control of penetration depth”
Nucl. Instrum and Methods in Phys. Res. A **729** (2013) 537-540.
(査読有)
DOI: 10.1016/j.nima.2013.07.085
- ⑦ R. Negishi, T. Fukamachi, S. Jongsukswat, K. Hirano, K. Hirano and T. Kawamura
“Phase determination of the crystal structure factor by measuring rocking curves from a polar crystal”
J. Appl. Cryst. **46** (2013) 1216.
(査読有)
DOI: 10.1107/S0021889813011564
- ⑧ S. Jongsukswat, T. Fukamachi, K. Hirano, D. Ju, R. Negishi, M. Shimojo, K. Hirano and T. Kawamura
“Determination of Constant Strain Gradients of Elastically Bent Crystal Using X-ray Mirage Fringes”
Jpn. J. Appl. Phys. **51** (2012) 076702.
(査読有)
DOI: 10.1143/JJAP.51.076702
- ⑨ S. Jongsukswat, T. Fukamachi, K. Hirano, D. Ju, R. Negishi, M. Shimojo, K. Hirano and T. Kawamura
“ X-ray Interference Fringes in Transmitted Beam of Bragg Mode from Very Weakly Bent Crystal”
J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 094804.
(査読有)
DOI: 10.1143/JPSJ.81.094804
- ⑩ K. Hirano, T. Fukamachi, Y. Kanematsu, S. Jongsukswat, R. Negishi, D. Ju, K. Hirano and T. Kawamura
“ Moire pattern from a multiple Bragg-Laue interferometer”
J. Synchrotron Rad. **19** (2012) 101-105.
(査読有)
DOI: 10.1107/S0909049511047078
- [学会発表] (計 8 件)
- ① 高橋由美子、平野馨一、吉村順一、長町信治、古室昌徳
「Al イオン注入 SiC 基板の X 線侵入長を制御した斜入射トポグラフィーによる歪分布測定」
第 61 回応用物理学会春季学術講演会(青山学院大学、2014 年 3 月)
- ② 杉山弘、平野馨一
「Photon Factory BL-20B の改造」
第 27 回日本放射光学会年会 (広島国際会議場、2014 年 1 月)
- ③ 山口博隆、志村考功、水野薫、岡本博之、加藤有香子、平野馨一、杉山弘
「PF BL-20B X線トポグラフィービームラインの現状」
第 27 回日本放射光学会年会 (広島国際会議場、2014 年 1 月)
- ④ 高橋由美子、平野馨一、吉村順一、長町信治、古室昌徳
「イオン注入 SiC 基板の X 線侵入長を制御した斜入射トポグラフィー」
第 27 回日本放射光学会年会 (広島国際会議場、2014 年 1 月)
- ⑤ 平野馨一、高橋由美子、長町信治
「X 線移相子の斜入射トポグラフィーへの応用」
日本物理学会・2013 年秋季大会 (高知大学、2013 年 9 月)
- ⑥ 平野馨一、高橋由美子
「偏光制御による表面・界面選択 X 線トポグラフィー」
第 26 回日本放射光学会年会 (名古屋大学、2013 年 1 月)
- ⑦ 杉山弘、平野馨一、伊藤健二、藤森直治
「大型 CVD ダイヤモンド単結晶板の X 線トポグラフィ②」
第 25 回日本放射光学会年会 (鳥栖市民文化会館・中央公民館、2012 年 1 月)
- ⑧ K. Hirano, Y. Ito, Y. Shinohara and Y. Amemiya
“Characterization of an X-ray diamond phase-plate by a polarization analyzer using multiple-diffraction”
SRI2012 (Lyon, France, 2012)

[図書] (計 1 件)

- ① 大橋治彦・平野馨一編、日本放射光学会、
増補版・放射光ビームライン光学技術入
門、2013、434

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平野 馨一 (HIRANO, Keiichi)
高エネルギー加速器研究機構・物質構造科
学研究所・准教授
研究者番号： 40218798

(2) 研究分担者

杉山 弘 (SUGIYAMA, Hiroshi)
高エネルギー加速器研究機構・物質構造科
学研究所・助教
研究者番号： 80222058