

平成21年6月30日現在

研究種目： 基礎研究(c)
 研究期間： 2007～2008
 課題番号： 19540344
 研究課題名（和文） 新型結晶 X 線ウエーブガイドの開発
 研究課題名（英文） Development of Crystal X-ray Waveguide
 研究代表者 深町 共榮 (FUKAMACHI TOMOE)
 埼玉工業大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：20092314

研究成果の概要：当研究は、動力学回折効果によって結晶の実質的な吸収係数を平均の吸収係数より著しく小さくなる現象を用い、薄い平行平板結晶を X 線ウエーブガイドとして機能させることにある。Ge 及び Si の 220 反射を用い、これら結晶がウエーブガイドとして機能することを確認した。また、この出力ビームにおいて得られる干渉縞を観測し、この干渉縞の生じる原因を追究してウエーブガイド内を伝播する屈折波の経路を明らかにすることができ、このウエーブガイドが多重ブラッグ・ラウエ (BB^mL) 型干渉計として活用できることを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I ・ X 線・粒子線

キーワード：X 線導波管、干渉縞、閉じ込め効果、動力学回折、異常透過、ボルマン効果、屈気楼効果、X 線干渉計

1. 研究開始当初の背景

当研究代表者は、2004 年に約 50 μm 程度の薄い平行平板型の Ge の結晶を用い、動力学効果で結晶の実質的な吸収係数消える入射角で 220 反射の X 線回折実験を行い、X 線を結晶内を長距離伝播させ、結晶の側面で回折した X 線を取り出し、この結晶が結晶 X 線ウエーブガイドとして機能することを確認した (crystal X-ray waveguide, CXW と略す)。しかし、その出力ビームに干渉縞が観測され、この干渉縞がなぜ生じるのかその説明には

困難を極めたが、干渉縞の縞間隔は、X 線の入射点から側面までの距離に比例し、結晶の厚さには反比例すること及び出力ビームの発散角は非常に狭くなることを実験で確認した。

2. 研究の目的

当研究の目的は、この新型の結晶 X 線ウエーブガイドの機能を実験及び理論的に調べ、その利用分野を開拓することである。

3. 研究の方法

結晶 X 線ウェーブガイド内を伝播する X 線を想定した様子を図 1 に示す。すでに述べたように、動力学回折効果で結晶の実質的な吸収係数がほとんど消える入射角で X 線を回折させると、入射 X 線は、入射点で一部は回折して反射波となり、残りは屈折波となって結晶に侵入する。この屈折波は底面で一部は透過波となり残りは反射して結晶内を伝播し、側面に到達すると、そこで回折して、反射方向と透過方向に分かれて X 線が結晶の外に出てくる。このような回折を、Bragg-(Bragg)^m-Laue 型回折と呼ぶことにする。ここで、m は結晶内での屈折波の反射の回数を意味する。

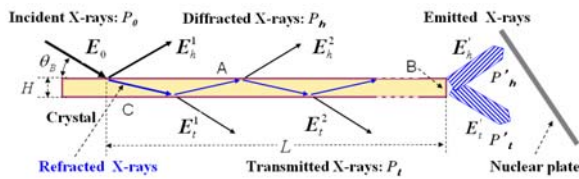


図 1. 結晶 X 線ウェーブガイドにおける X 線の伝播。

しかし、実際に X 線がこのように伝播するか明らかにされた訳でもなく、このようなモデルの解を調べた研究は私達の研究を除いて皆無であった。そこで、 $m=0$ の Bragg-Laue 型回折実験を行い、側面回折が最大になる時の屈折波の方向を観測したところ、屈折波は回折格子面にほぼ平行で僅か透過方向に向いていることが分かり、またそれは理論的にも解明された。しかもこの Laue 型回折の角度幅は非常に狭くなる理由も解明できた。この理論に従うと、屈折波の方向は、入射角を 0.3 秒程度変えるだけで、格子面に平行な方向から透過ビームの方向まで変化することが明らかになった。すなわち、入射 X 線の発散角を $\Delta\alpha$ とし、それに対する屈折波の変化する角度の幅を $\Delta\gamma$ とするならば、 $\Delta\gamma$ はほぼブラッグ角 θ_B に等しいため、 $\Delta\gamma/\Delta\alpha$ は 10^5 になり、驚異的な角度の増幅効果があることが分かった。

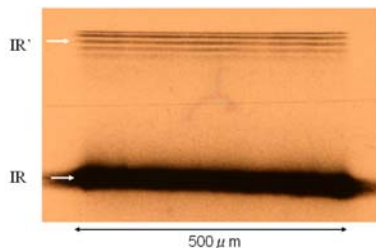


図 2. CXW からの 1 次回折波 IR と側面からの回折波 IR'。(試料結晶 Ge, 反射指数 220)

当実験では、通常入射ビームの発散角は 5 秒程度であり、また、特別に 0.25 秒にしても、CXW の出力ビームにおいては干渉縞が観測されたが、その理由が、この角度増幅作用で理解できることとなった。(図 2.には、干渉縞の測定結果の一例を示す。) すなわち、入射ビームの発散角が 0.3 秒程度の球面波とみなすならば、図 3.に示すように入射点から結晶の側面に到達する BL モードの屈折波と底面で一回反射して側面に到達する BBL モードの屈折波とが側面で干渉する。このようにして、側面における干渉縞が生じるものとして計算したところ、実験結果と一致した。

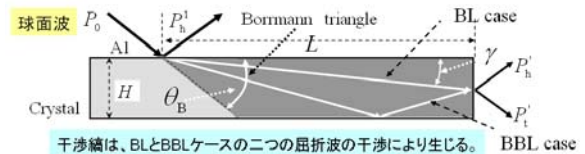


図 3. CXW の側面回折における干渉縞の説明。

以上の結果から、CXW を伝播する屈折波は、m がいくつかのタイプのもが混在しており、特に、干渉縞の解析から、 $m=0$ と 1 が主体であることが分かった。また、m が増えるほど吸収係数が大きくなるため、m が大きなモードの屈折波は伝播が困難となる

4. 研究成果

当研究により新しく開発した CXW 内を伝播する X 線のメカニズムが解明され、その結果、Ge ばかりではなく、Si も同様に CXW として機能した。Si の場合は、Ge より吸収係数が小さく出来、結晶内を約 7mm とかなり長距離 X 線を伝播させることができた。当 CXW は、次の用途が考えられる。

- ① BB^mL 型干渉計
- ② 高角度分解能 X 線モノクロメータ
- ③ X 線スプリッター
- ④ X 線屈折計、高角度倍率による結晶レンズ、X 線顕微鏡への応用

また、CXW の屈折波の方向が非常に僅かな歪に敏感に変わることに着目し、歪の影響による干渉縞の変化を観測して、CXW が歪解析に有効であることを確認した(論文投稿中)。さらに歪が一様に変化する場合は、屈折波の軌跡が放物線になるため、屈折波が再び入射面に戻り(屋気楼効果)、その一部は回折して屋気楼 X 線(二次回折線)となる。残りは再び反射して屈折波となり結晶内を伝播する。この屋気楼効果を CXW で確認し、その上で、一次と二次の回折線を重ねることにより、CXW から強力な X 線が得られることを実験的に確認した。よって、CXW は、X 線を増幅する機能があることを発見した(論文投稿中)。

以上、当研究では、新型 CXW を開発し、その働きを理論的に解明した。CXW の特性改善には、結晶を僅か曲げて蜃気楼効果を利用するのも得策である。この蜃気楼効果で、一次と二次の回折線の合成に成功し、X線レーザ用光学素子の開発に新しい一歩を切り開いた。

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) (全て査読付き)

- ① T. Fukamachi, Ken. Hirano, M. Yoshizawa, R. Negishi, D. Ju, M. Tohyama, Y. Kanematsu, Kei Hirano, and T. Kawamura, “Amplification of reflected X-ray beams by the mirage effect”, J. Phys. Soc. Jpn. (2009), 投稿中.
- ② T. Fukamachi, M. Tohyama, Ken. Hirano, M. Yoshizawa, R. Negishi, D. Ju, Kei Hirano, and T. Kawamura, “Variation of interference fringes with strain observed in diffraction from lateral surface”, Acta Cryst. A. (2009), 投稿中.
- ③ Ken. Hirano, T. Fukamachi, M. Yoshizawa, R. Negishi, Kei. Hirano, and T. Kawamura, “Bragg-(Bragg)^m-Laue diffraction and its interference fringe”, Phys. Status Solidi A (2009), 1-5/DOI 10.1002/pssa.200881583.
- ④ Ken. Hirano, T. Fukamachi, M. Yoshizawa, R. Negishi, Kei. Hirano and T. Kawamura, “Formation of interference fringes of the Bragg-(Bragg)^m-Laue mode”, Acta Cryst. A **65**, (2009). 253-258.
- ⑤ Ken. HIRANO, T. FUKAMACHI, M. YOSHIZAWA, R. NEGISHI, Kei. HIRANO, Z. XU, and T. KAWAMURA, “X-ray Interference Fringe of Bragg-(Bragg)^m-Laue Case”, J. Phys. Soc. Jpn., **77**, (2008), 103707(3).
- ⑥ M. Yoshizawa, T. Fukamachi, Ken. Hirano, T. Oba, R. Negishi, Kei, Hirano and T. Kawamura, “Measurement of X-ray rocking curve in the Bragg-Laue case”, Acta Cryst. A **64**, (2008), 515-518.
- ⑦ R. NEGISHI, T. FUKAMACHI, M. YOSHIZAWA, Ken. HIRANO, Kei. HIRANO, and T. KAWAMURA, “In-phase and Anti-phase Interface Fringe in Rocking Curves of Resonant X-ray Dynamical Diffraction”, J. Phys. Soc. Jpn., **77**, (2008), 023709(3).
- ⑧ M. Yoshizawa, S. M. Zhou, R. Negishi, T. Fukamachi and T. Kawamura, “Precise determination of anomalous scattering factor of Ge by using X-ray resonant scattering”, Acta Cryst. A **64**, (2007), 321-325.

- ⑨ R. Negishi, T. Fukamachi, M. Yoshizawa, K. Hirano and T. Kawamura, “Observation of interference fringe due to lattice distortion by resonant scattering X-ray topography”, phys. stat. sol. (a) **204**, (2007), 2694-2699.
- ⑩ Z. Xu, Y. Zhang, R. L. Headrick, H. Zhou, L. Zhou, and T. Fukamachi, “Self-organized growth of microsized Ge wires on Si (111) surface”, Phys. Rev. B **75**, (2007), 233310.

[学会発表] (計 18 件)

- ① 深町共榮、遠山将彦、平野健二、吉沢正美、根岸利一郎、平野馨一、依田芳卓、今井康彦、川村隆明、“結晶X線導波管のレンズ作用”、日本物理学会第 64 回年次大会、3 月、立教大学、28aRE-1(概要集第 64 巻第 1 号第 4 分冊p945)(2009).
- ② 根岸利一郎、深町共榮、吉沢正美、平野健二、平野馨一、川村隆明、“動力学回折に伴う位相観測”、日本物理学会第 64 回年次大会 3 月、立教大学、28aRE-2(概要集第 64 巻第 1 号第 4 分冊p946)(2009).
- ③ 平野健二、深町共榮、根岸利一郎、吉沢正美、平野馨一、川村隆明、“Bragg-(Bragg)^m-Laue型回折における干渉縞の間隔”、日本物理学会第 64 回年次大会、3 月、立教大学、28aRE-3(概要集第 64 巻第 1 号第 4 分冊p946)(2009).
- ④ 根岸利一郎、深町共榮、吉沢正美、平野健二、平野馨一、川村隆明、“ラウエの場合における同位相とが逆位相の干渉縞”、第 22 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、1 月、東京大学本郷キャンパス、11P071、(2009).
- ⑤ 深町共榮、遠山将彦、平野健二、吉沢正美、根岸利一郎、平野馨一、依田芳卓、今井康彦、川村隆明、“Si結晶X線導波管における干渉縞とレンズ作用の観測”、第 22 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、1 月、東京大学本郷キャンパス、11P072、(2009).
- ⑥ 平野健二、遠山将彦、吉沢正美、深町共榮、根岸利一郎、平野馨一、川村隆明、“Siにおけるブラッグ-(ブラッグ)^m-ラウエ型干渉縞の観測”、日本物理学会 2008 年秋季大会、9 月、岩手大学上田キャンパス、21aWA-4(概要集第 63 巻第 2 号第 4 分冊p872)(2008).
- ⑦ 深町共榮、平野健二、遠山将彦、吉沢正美、根岸利一郎、平野馨一、川村隆明、“ブラッグケースにおける異常に大きな発散角をもつ屈折X線の観測とその干渉性”、日本物理学会 2008 年秋季大会、9 月、岩手大学

- 上田キャンパス、21aWA-5(概要集第 63 巻第 2 号第 4 分冊p872)(2008).
- ⑧ R. Negishi, T. Fukamachi, M. Yoshizawa, Ken Hirano, Kei Hirano, and T. Kawamura, "IN-PHASE AND ANTI-PHASE INTERFERENCE FRINGES IN LAUE CASE", XTOP 2008, P156, Linz, Austria (2008).
- ⑨ Ken Hirano, T. Fukamachi, M. Yoshizawa, R. Negishi, Kei Hirano, and T. Kawamura, "BRAGG-(BRAGG)^m-LAUE DIFFRACTION AND ITS INTERFERENCE FRINGE", XTOP 2008, P159. Linz, Austria (2008).
- ⑩ Masami Yoshizawa, Kenji Hirano, Riichirou Negishi, Tomoe Fukamachi, Keiichi Hirano and Takaaki Kawamura, "Observation of rocking curves in Bragg-Laue case", IUCr XXI Congress, (Acta cryst.,A64,C577-578), OSAKA (2008).
- ⑪ Kenji Hirano, Tomoe Fukamachi, Riichirou Negishi, Masami Yoshizawa, Keiichi Hirano, and Takaaki Kawamura, "Interference fringe in Bragg-(Bragg)^m Laue case", IUCr XXI Congress, (Acta cryst.,A64,C578), OSAKA (2008).
- ⑫ Riichirou Negishi, Tomoe Fukamachi, Masami Yoshizawa, Kenji Hirano, Keiichi Hirano and Takaaki Kawamura, "Observation of in-phase interference fringes", IUCr XXI Congress, (Acta cryst.,A64,C578), OSAKA (2008).
- ⑬ Tomoe Fukamachi, Kenji Hirano, Masami Yoshizawa, Riichirou Negishi, Keiichi Hirano and Takaaki Kawamura, "Anomalous large dispersion angle of refracted wave in Bragg case", IUCr XXI Congress, (Acta cryst.,A64,C578-579), OSAKA (2008).
- ⑭ 平野健二、深町共榮, 根岸利一郎, 吉沢正美, 平野馨一, 川村隆明, "Bragg-(Bragg)^m-Laue型の側面回折強度", 日本物理学会 2008 年年次大会, 3 月、近畿大学本部キャンパス、24aWG-1(概要集第 63 巻第 1 号第 4 分冊p921)(2008).
- ⑮ 根岸利一郎, 深町共榮, 吉沢正美, 平野健二, 平野馨一, 川村隆明, "GaAs200 回折における同位相干渉縞の解析", 日本物理学会 2008 年年次大会, 3 月、近畿大学本部キャンパス、24aWG-2(概要集第 63 巻第 1 号第 4 分冊p921)(2008).
- ⑯ 根岸利一郎, 深町共榮, 吉沢正美, 平野健二, 平野馨一, 川村隆明, "X線動力学回折における原子散乱因子の虚数部だけによる干渉縞", 日本物理学会 2007 年第 62 回年次大会, 9 月、北海道大学札幌キャンパス、21pTC-1(概要集第 62 巻第 2 号第 4 分冊p974)(2007).

- ⑰ 吉沢正美, 大場剛, 平野健二, 根岸利一郎, 深町共榮, 平野馨一, 川村隆明, "ブラッグ-ラウエ型回折の特長とその応用", 日本物理学会 2007 年第 62 回年次大会, 9 月、北海道大学札幌キャンパス、21pTC-2(概要集第 62 巻第 2 号第 4 分冊p974)(2007).
- ⑱ 平野健二、大場剛、深町共榮, 根岸利一郎, 吉沢正美, 平野馨一, 川村隆明, "Bragg-(Bragg)^m-Laue型干渉縞の考察 II", 日本物理学会 2007 年第 62 回年次大会, 9 月、北海道大学札幌キャンパス、21pTC-3(概要集第 62 巻第 2 号第 4 分冊p974)(2007).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

深町 共榮 (FUKAMACHI TOMOE)

埼玉工業大学 大学院工学研究科・教授

研究者番号：20092314

(2) 研究分担者

根岸 利一郎 (NEGISHI RIICHIROU)

埼玉工業大学 付置研究所・教授

研究者番号：70237808

吉沢 正美 (YOSHIZAWA MASAMI)

埼玉工業大学 人間社会学部・准教授

研究者番号：70166932