

令和 5 年 5 月 12 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03824

研究課題名(和文) X線の空間位相制御による結晶試料中のエッジ状態や光学タム状態の生成

研究課題名(英文) Formation of edge state and optical Tamm state inside crystalline specimen using spatial phase modulation of X-ray beam

研究代表者

香村 芳樹 (Kohmura, Yoshiki)

国立研究開発法人理化学研究所・放射光科学研究センター・チームリーダー

研究者番号：30270599

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、X線領域で、バンド・トポロジーに関与する局在現象の観察を目指して計画された。X線波長程度の周期長を有する周期媒体は結晶であり、分散曲線にはギャップが生じ、その領域においてブラッグ反射が起きることが知られている。結晶中の周期的格子間距離から変調を起こした格子は、例えば、ダイヤモンド結晶(111)面の積層欠陥で具現化されている。トポグラフィ像で積層欠陥が観察されていた結晶面にX線を照射し、「ブラッグ回折による界面へのX線の局在モード」を感度良く観察するため、ブラッグ回折成分と非回折(結晶透過)成分をX線横滑り現象により空間的分離する手法が有用であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電磁波の反射に適した周期長を持つ周期媒体内で、これと外れた厚さを有する層では、電磁波の局在が生じる。この現象は、外の二つの周期媒体の反射鏡の中に挟まれているため生じると考えられ、この層を非常に体積の小さい共振器として利用し、レーザー発振を生じうる。すでに、可視光領域では、この現象を使ってトポロジカル・レーザー発振が近年実現されている。本研究はX線がブラッグ反射を起こす周期媒体として結晶を用い、格子間距離の変調が起きている積層欠陥でのブラッグ反射の挙動を理論的に明らかにし、同様のレーザー発振につながる基礎的な成果をもたらした。

研究成果の概要(英文)：X-ray localization could occur at a lattice with its spacing modulated from other area which equivalently broke the gap of the dispersion curve of perfect crystals, in a similar manner as in band topology of nano-photonics. We used the void- or inclusion-type of stacking faults on (111) diamond crystal plane where either one third of lattice spacing is reduced or enlarged compared to normal unit cell. It was important to spatially separate the weak effect of X-ray localization from X-ray transmission through crystal which was realized by X-ray translation effect, where deflection of X-ray trajectory occurred at deformed lattice planes. Our theoretical research showed the potential of X-ray localization in the proximity of interface. We, however, found that X-ray propagation was dominated by other propagation mode, which was visualized by two-wave interference fringes due to the allowed two wave vectors inside crystal after the termination of X-ray translation effect at interface

研究分野：X線光学

キーワード：X線 局在状態生成 トポロジー 横滑り現象

1. 研究開始当初の背景

電磁波の波長程度の周期長を有する周期媒体においては、一般的に分散曲線にギャップが生じ、電磁波のブラッグ反射が起きる。この例外として、周期長が外れた厚さのレイヤーが周期媒体内にあれば、このレイヤー付近に電磁波の局在が起きることが知られている。この電磁波の局在は、分散関係のバンド構造という、バンド・トポロジーの破れに起因する現象である。この局在は、同時に、厚さ変調を起こしたレイヤーが、外の二つの周期媒体の反射鏡の中に挟まれたため生じているという描像も描ける。この局在を利用し、レイヤー部分を非常に体積の小さい共振器として利用することにより、レーザー発振を生じうる。この原理を用いて、すでに、可視光領域では、トポロジカル・レーザー発振が近年実現されている。

2. 研究の目的

本研究課題は、X線領域で、研究開始当初の背景で述べた、バンド・トポロジーに關与する局在現象の観察を目指して計画された。X線波長程度の周期長を有する周期媒体は結晶であり、分散曲線にはギャップが生じ、その領域においてブラッグ反射が起きることが知られている。結晶中の周期的格子間距離から変調を起こした格子は、例えば、ダイヤモンド結晶(111)面の積層欠陥で具現化されている。この面に生じる積層欠陥には、結晶の格子面間隔が、通常のユニットセルよりも 1/3 分だけ増減した、空孔型、あるいは侵入型の二種の積層欠陥が存在する(図 1(a)(b)参照)。どちらの型かは不明であったがトポグラフィ像で積層欠陥が観察されていた結晶面に X 線を照射し、局在状態生成に關係した現象の観察可能性を検証した。

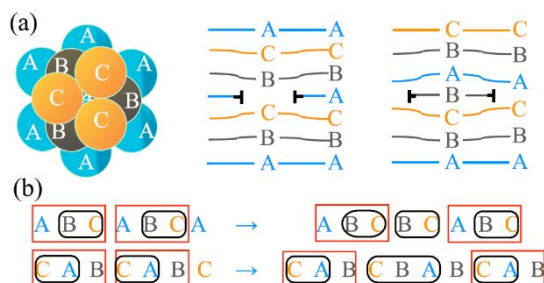


図 1 .(a)(b)ダイヤモンド結晶(111)面に生じる空孔型と侵入型の積層欠陥の模式図。それぞれ、結晶の格子面間隔が、通常のユニットセルよりも 1/3 減少、増大した格子間距離を有する格子を生じる。

3. 研究の方法

研究の目的で述べた局在状態の観察において、ダイヤモンドに入射する X 線の角度発散を非常に小さくし、ブラッグ回折に寄与しない成分、ダイヤモンド結晶を透過する成分を極力排除しないとしない。しかし、実験において、完全な排除は困難であった。そこで局在状態に關係した現象を高い S/N 比で観察する手段として、X 線の完全結晶に対する動力学的回折で生じる入射方向の回折波に注目した。この波動成分は、用いる結晶の格子面に歪みがあると、結晶内をマクロな距離だけ伝わる軌道偏向を受け、単なる透過波と全く異なる点から出射する X 線横滑り現象を起こす。この現象は、我々が世界で初めて理論予言し、SPring-8 の放射光 X 線を用いて世界で初めて実証した現象である。この現象の利用により、平成 20 年度-24 年度にかけての科研費基盤研究 C における課題「ブラッグ反射条件近傍に置いた結晶による X 線波束の異常シフトの観察と X 線導波管応用」で、新たな応用が示されたが、本研究課題では、X 線光学の基礎的な知見を得るための手段として利用する。

まずブラッグ反射波上に局在状態を生じた上で、上記の X 線横滑り現象によって、結晶の透過波と異なる出射位置に局在状態による効果を、空間的に分離して観察することができれば、状態観察の感度を大幅に上げることができ、好都合である。

ブラッグ反射条件近傍での X 線局在現象を観察するため、我々は以下の実験セットアップを構築した。まず、Si(111)分光器と、Si(1200)チャンネルカット結晶を図 2(a)の様な向きで設置することで、ダイヤモンド結晶に入射する X 線の角度発散を極力低減した。この光学系の下流で、赤の斜線で示した積層欠陥が入った C(555)面のブラッグ回折を生じ、この際、欠陥に由来する X 線局在状態の生成の有無を、実験で検証した。

C(555)反射面のブラッグ角近傍での反射条件に結晶をセットしたところ、以下の様に、特異な干渉縞が観察された。

簡単のため、結晶に照射する X 線ビームは、縦幅 10um のスリットを透過させることとし、

スリットに対し、相対的にダイヤモンド結晶位置を変化させたところ、スリット位置[図 2(d-g)の横長の紫の四角]よりもはるかに上方から、X線が射出し、黄色の点線の中に、干渉模様が観察された。(d)と(e)では、スリット位置が変化しているにもかかわらず、干渉模様の位置が変わっていない。これらの観測結果から、X線は横滑り現象を起こし、ブラッグ反射波に近い方向に伝搬し、積層欠陥界面に到達した後、一定の方向に伝搬し、何らかの干渉を起こした物と考えられる。

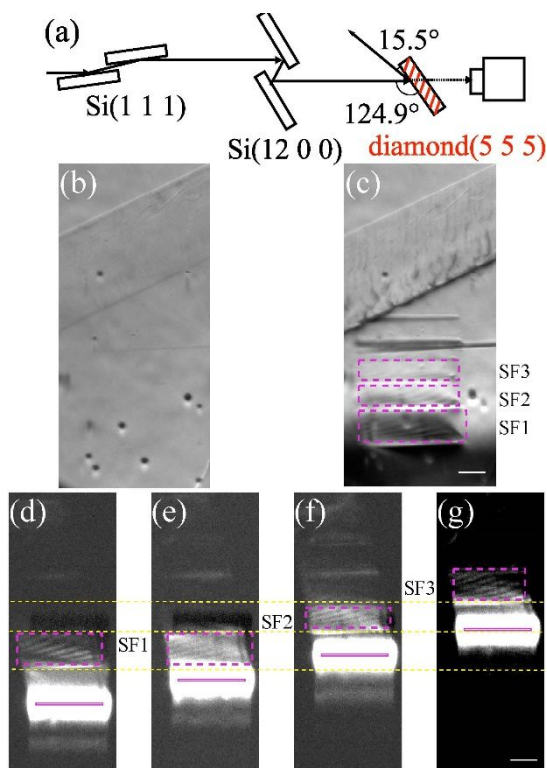


図 2 . 実験のセットアップ。Si(111)分光器と、Si(1200)チャンネルカット結晶を(a)の向きで設置することで、ダイヤモンド結晶に入射する X 線の角度発散を極力低減した。この下流で、赤の斜線で示した C(555)面のブラッグ回折を起こすが、この面には積層欠陥が生じている。(b)はブラッグ条件から外れた条件、(c)はブラッグ条件近傍での透過トポグラフィ像。入射 X 線を制限するため、縦幅 10um のスリットを透過させ、スリットに対し、相対的にダイヤモンド結晶位置を変化させた所、スリット位置(図 2(d-g)の横長の紫の四角)よりもはるかに上方から X 線が射出し、黄色の点線間に、干渉模様が観察された。

4 . 研究成果

上記実験結果は、以下のように解釈される。まず、空孔型、侵襲型の積層欠陥が存在すると、図 3 (b,c)の赤の矢印、つまり、ブラッグ反射波に近い方向へ、横滑り X 線が伝搬すると考えられる。ただし、図上の a 分岐、b 分岐は、それぞれ、ブラッグ角の低角側、高角側の回折に対応する分散面上のブランチに相当している。AreaA などでは、ブラッグ反射波に近い赤い矢印の方向への伝搬が起こり、X 線は積層欠陥界面に到達することができる。

界面では格子面間距離が急激に変化しているため、横滑り現象は停止してしまう。横滑り現象の理論によれば、停止後は、X 線の進行方向は、入射直後に、結晶に入った X 線の波数ベクトルに平行方向に伝搬が起きる。この結果、X 線は、界面から離れ(図 3(a)の AreaB 参照)、結晶の下流面から射出したと考えられる。結晶に入った X 線の波数ベクトルとして分散面では、二波が許容され、角度差および光路長の差に起因する、一般にペンデル縞として知られる明暗の干渉縞、楔形結晶での周期的干渉縞が観察されたと考えられる(図 3(a)検出器面における干渉縞を参照)。

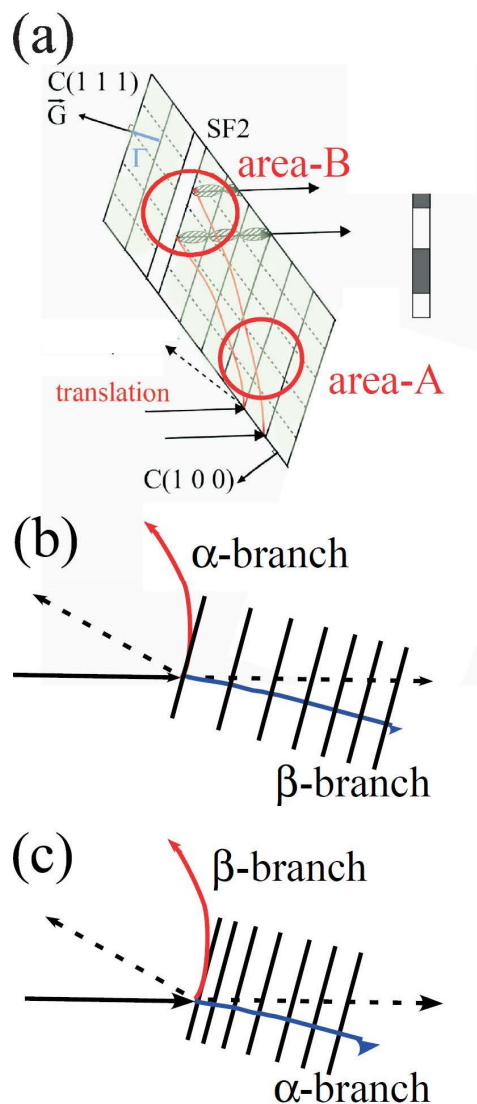


図3 . (a) 積層欠陥近傍の結晶格子の歪みによる、X線横滑り現象の誘起(AreaA)と、欠陥界面での停止(AreaB)と、停止後の伝搬方向、干渉縞の生成を示す概念図。(b)空孔型、(c)侵襲型の積層欠陥を挟んで実線と破線の様な格子面があった場合についての、赤の矢印は、ブラッグ反射波に近い方向、青の矢印は、入射波に近い方向への横滑りX線の伝搬方向を示す。ただし、a分岐、b分岐は、それぞれ、ブラッグ角の低角側、高角側の回折に対応する分散面上のブランチを示す。結晶内を伝わるX線の波数ベクトルとして許容される、入射方向の二波の干渉で、ペンデル縞と似た干渉縞が生じる。

本研究課題では、「ブラッグ回折による界面へのX線の局在モード」を感度良く観察するため、ブラッグ回折成分と非回折(結晶透過)成分をX線横滑り現象により空間的分離を用いる手法が有用であることを示した。X線領域でのバンド・トポロジーを用いた、未踏の分野を切り開く研究であり、今後、様々な展開が期待できるであろう。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Y. Kohmura, et al.	4. 巻 28, 16
2. 論文標題 X-ray microscope for imaging topological charge and orbital angular momentum distribution formed by chirality	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 24115-24122
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.392135	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kohmura Yoshiki, et al.	4. 巻 12
2. 論文標題 The new X-ray/visible microscopy MAXWELL technique for fast three-dimensional nanoimaging with isotropic resolution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 9668
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-13377-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kohmura Yoshiki, Ohwada Kenji, Kakiuchi Nobuki, Sawada Kei, Kaneko Tadaaki, Mizuki Jun'ichiro, Mizumaki Masaichiro, Watanuki Tetsu, Ishikawa Tetsuya	4. 巻 5
2. 論文標題 X-ray two-beam topography for quantitative derivation of phase shift by crystalline dislocations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 L012043
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.5.L012043	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 5件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 香村芳樹、澤田圭、大和田健二他
2. 発表標題 運動学的Bragg反射を用いたX線波面制御
3. 学会等名 日本放射光学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 香村芳樹、澤田圭、大和田健二他
2. 発表標題 SiC結晶中のらせん転位で生じるX線光渦の二光束X線トポグラフィーによる検出
3. 学会等名 日本応用物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 香村芳樹他
2. 発表標題 極薄ライトシートを使った X 線三次元イメージング
3. 学会等名 バイオイメージング学会学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Kohmura et al.
2. 発表標題 X-ray Three-dimensional Imaging Using Ultra-thin Laminar Light
3. 学会等名 15th International Conference on X-ray Microscopy, (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Kohmura et al.
2. 発表標題 X-ray three-dimensional imaging using ultra-thin laminar light
3. 学会等名 XOPT2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 香村芳樹他
2. 発表標題 極薄X線ライトシートを使った生体三次元観察
3. 学会等名 レーザー顕微鏡研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 香村芳樹
2. 発表標題 空間位相制御されたX線と元素選択性を用いた回折限界を凌駕する微細加工技術と 極薄X線ライトシートを使った三次元イメージング
3. 学会等名 光量子工学研究センターシンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 香村芳樹他
2. 発表標題 極薄X線ライトシートを使った三次元イメージング
3. 学会等名 日本放射光学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Kohmura
2. 発表標題 Maxwell and more
3. 学会等名 2022 SYNAPSE General Assembly Meeting and International Workshop on. High Performance Computing on Brain Imaging（招待講演） （国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 香村芳樹
2. 発表標題 X線の場の構造形成と利用
3. 学会等名 第61回SPring-8先端利用技術ワークショップ「物質科学におけるコヒーレントX線利用の最先端研究とその将来展望」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 香村芳樹
2. 発表標題 SiC結晶中のらせん転位で生じるX線光渦の二光束X線トポグラフィーによる検出
3. 学会等名 日本応用物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshiki Kohmura
2. 発表標題 Generation of X-ray vortices by Bragg reflection from crystals and microscopy to diagnose topological charge distribution,
3. 学会等名 JSST2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 香村芳樹
2. 発表標題 運動学的Bragg反射を用いたX線波面制御
3. 学会等名 日本放射光学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 香村芳樹
2. 発表標題 X線の場の構造形成と利用
3. 学会等名 第61回SPring-8先端利用技術ワークショップ「物質科学におけるコヒーレントX線利用の最先端研究とその将来展望」(招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 X線証明顕微鏡および発光物質像の撮影方法	発明者 香村芳樹、高野秀和、横田秀夫	権利者 国立研究開発法人理化学研究所
産業財産権の種類、番号 特許、09463-JP	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	澤田 桂 (Sawada Kei) (40462692)	国立研究開発法人理化学研究所・放射光科学研究センター・研究員 (82401)	
研究分担者	大和田 謙二 (Ohwada Kenji) (60343935)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究センター 放射光科学研究センター・グループリーダー (82502)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------