

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月24日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2012

課題番号：21340086

研究課題名（和文） 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

研究課題名（英文） Observation of anomalous shift of x-ray wave packet by deformed crystal set near the Bragg reflection condition and its application to x-ray wave guides

研究代表者

香村 芳樹 (KOHMURA YOSHIKI)

独立行政法人理化学研究所・放射光イメージング利用システム開発ユニット・ユニットリーダー

研究者番号：30270599

研究成果の概要（和文）：

我々は、歪んだ単結晶にブラッグ角近くの入射角でX線をあて、理論予言されていた巨大横滑り現象を観察する事に成功した。横すべり量は、結晶中の格子配列の歪み量に比例し、波長が短いほど顕著となる。我々は、湾曲させ歪ませたシリコン単結晶に、X線を当て、5mmの横滑り現象を世界で初めて実証した。

次にX線精密制御に展開するため、ヘテロエピタキシャル結晶界面付近の原子レベル歪みを利用する事にした。界面付近の格子歪みにより、照射X線が2方向へ分岐し、横すべりを繰り返して伝播する現象が初めて観測された。

研究成果の概要（英文）：

We experimentally demonstrated an enhanced translation of an x-ray beam nearly parallel to the diffracting planes with mm order distance in a deformed silicon crystal. The combination of a nearby Bragg reflection and a strain field in the crystal allows a shift in the x-ray beam that scales as square of wavelength.

For further precise control of x-ray beams, the atomic strain near the interface of hetero-epitaxial crystal was used. By illuminating x-rays onto the interface having thousands of quantum dots on the top, the x-rays were observed to be split into two directions both of which were repeatedly translated under hundreds of quantum dots.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2010年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2011年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2012年度	2,300,000	690,000	2,990,000
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性I

キーワード：(1)X線動的回折理論の新しい描像、(2)全反射を伴わないX線導波管、(3)歪み結晶、(4)極低発散角の出射光、(5)ダイヤモンド単結晶、(6)ヘテロエピタキシャル結晶、(7)ベリ一位相項の観察、(8)分散面のギャップ

1. 研究開始当初の背景

X線領域の電磁波では、物体との相互作用の大きさが波長の2乗に比例します。従って、波長が0.1nmレベルと短いX線では、相互作用が非常に小さく、屈折をはじめとした光学現象を実験的に見いだすことが困難です。一方、2006年には、研究グループの澤田らは、「X線の横ずれ現象が波長の2乗に反比例して引き起こされる」という理論的な予言を提唱しました(K. Sawada, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 154802. 2006)。この理論は、結晶の原子の周期的な配列が歪んでおり、ブラッグ条件近くでX線が回折する場合、照射したX線が巨大な横すべりを起こす、というものです。その横すべり量は、結晶の歪み量を100万倍程度拡大した巨大な量となり、100nmレベルの結晶の歪みが有れば、mmレベルのX線の横ずれが生じる計算になります。

2. 研究の目的

物質中にX線を透過させる際、屈折で光路を曲げようとする、変位量は、nmレベル程度が限度でした。しかし、ひずんだ結晶に対し、ブラッグ角近くの入射角でX線をあてると、この約100万倍のmmレベルまでX線位置を横にずらすことができるとするX線巨大横すべり現象が理論予言されました。本研究課題では、この理論予言を実証し、X線光学素子開発の新しい方向性を示す事を一つ目の目標としました。

X線の軌道を制御するには高精度な光学素子が必要で、可視光の軌道制御に比べて困難です。X線の軌道制御に有望な技術として、結晶材料に存在する格子ひずみによってX線の軌道が大きく曲がる「X線の横すべり現象」を利用し制御する方法を開発する事を二つ目の目標としました。

3. 研究の方法

歪んだシリコンの単結晶へ、入射角をブラッグ角(約18度)近傍の角度にセットし、SPring-8のアンジュレータービームラインから、波長0.08nm、エネルギー15キロ電子ボルト(keV)、ビーム幅0.2mmのX線を照射して、透過したX線を観察しました。

一つ目の目標を達成するため、結晶試料として厚み0.1mm、大きさ14mm×11mmのシリコ

ン単結晶をゆるやかに反らせて、5mmあたり200nmの歪みを与えました。

二つ目の目標を達成するため、シリコン結晶上にゲルマニウムを蒸着させ「ヘテロエピタキシャル結晶」を作製し、表面に量子ドットが生成された試料に対してX線を照射しました。

4. 研究成果

一つ目の実験では、X線横すべり現象を実証するために、結晶試料としてシリコン単結晶をゆるやかに反らせて、5mmあたり200nmの歪みを与えました。この状態は、薄いシリコン単結晶の対角の二点をワックスでホルダーに固定し、湾曲させて実現しました。

結晶に対するX線の入射角をブラッグ角近くに合わせた所、横滑りを起こしたX線が結晶の縁まで到達し、入射方向とほぼ平行に出射する現象が見られました。厚み0.1mmの薄い結晶中を、X線入射位置から縁まで距離5mmも結晶面に沿って伝わった事になります。可視光の光ファイバーと同様に、X線を大きく曲げ好みの位置まで伝搬させる導波管の実現に向け、大きな一歩となりました。X線は、ブラッグ角(18度程度)で入射し、見かけ上約18度曲がって結晶面に沿って伝わり、結晶表面と直交する結晶縁から、入射方向とほぼ平行に出射しました。ここで観察されたX線の進行方向の変化は通常の屈折現象では説明できず、2006年の澤田らの理論では矛盾なく説明されます。同時に、入射X線の位置から縁まで伝播した距離5mmは、200nmの歪みから予想されるX線横すべり量、10mmよりは小さ目ですが、縁から先には、結晶が存在せず横すべり現象が続かない事を考えると、小さめに出てもおかしくは有りません。オーダーが一致する事は、澤田らの理論をサポートする結果と言えます。

結晶の縁に達した横すべりX線は、極めて細い幅で平行性が高いビームとなり出射しました。過去のX線導波管では、集光後のX線ビームは広がって、奥行き方向の試料位置合わせも精密に行わなければならない、使い勝手が悪い傾向がありました。しかし今回、横ずれ現象を用いて、ビーム幅が細いまま伝わる優れた特徴を持ったX線導波管を、世界で初めて実現しました。試料を任意の位置に設置し、細いX線ビームを試料に照射する事が出来る光学系が実現できると考えられます。

通常、X線領域の研究では、照射された物質側の情報を採る結晶構造解析などの研究

が進んでいますが、物質を通過する際の X 線側の様子を見るという逆の発想で研究を実施したため、従来、見過ごされてきた現象を見いだすことができました。

上で述べた湾曲の方法では結晶歪みをコントロールする精度を上げる事が難しく、再現性の良い実験を行う事が困難です。X 線ビームを自由自在に制御する X 線光学素子を実現するには、再現性良く結晶歪みを生成する方法の開発が不可欠です。そこで、次の展開として、我々は、「ヘテロエピタキシャル結晶」、つまり、二つの異なる原子が作る結晶が接する界面付近で生じる結晶歪みに着目しました。東京大学大学院総合文化研究科の深津晋教授に資料提供をお願いし、シリコン基板結晶上にゲルマニウムを数層蒸着させた試料を入手しました。ゲルマニウム結晶の方がシリコン結晶よりも格子間距離が大きく、ゲルマニウムが 4 層を越すと、ゲルマニウムの結晶は平坦な結晶面を保つ事が出来ず、表面に島状構造(量子ドット)を生じます。ちょうど 4 層程度のゲルマニウムが蒸着された試料を提供して頂きました。原子間力顕微鏡で観察した結果、この試料表面に存在する量子ドットの間隔は、1 ミクロン以下という事が分かりました。

この試料に対し、X 線をシリコン結晶のブラッグ角近傍の入射角で照射したところ、非常に興味深い結果が得られました。X 線ビームは入射 X 線方向を挟んで、上下の 2 方向に分岐して、X 線検出器面に二つのスポットを形成したのです。横すべり現象で説明するなら、それぞれ、結晶面に沿って、反対方向に、0.3mm 程度、横すべり現象が起きた事を意味します。この現象は、他のシリコン/ゲルマニウムのヘテロエピタキシャル結晶でも観察されており、一般性のある現象であると思われる。この成果は、次世代半導体技術や新しい X 線軌道制御方法、新たな光学素子の開発に役立つと期待されます。

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 2 件)

1. Y. Kohmura, K. Sawada, S. Fukatsu, T. Ishikawa, Physical Review Letters, **110**, 057402-1-057402-4 (2013), 査読有

2. Y. Kohmura, K. Sawada, T. Ishikawa, Physical Review Letters, **104**, 244801-1-244801-4 (2010), 査読有

[学会発表] (計 11 件)

1. 香村芳樹、澤田桂、石川哲也、“結晶歪みによる横すべり現象を用いた X 線光学素子開発”、日本放射光学会年会、名古屋、2013 年 01 月 12 日
2. Y. Kohmura, K. Sawada, T. Ishikawa, “Berry-phase translation of X-rays by deformed crystal”, XTOP2012, ロシア/セントペテルブルク, 2012 年 09 月 17 日
3. Y. Kohmura, K. Sawada, T. Ishikawa, “Berry-phase X-ray translation inside monotoneous bend and hetero-epitaxial crystal”, Coherence Workshop, 博多, 2012 年 06 月 20 日
4. 香村芳樹、澤田桂、石川哲也、“X 線ベリー位相効果を用いた新しい微小歪み評価法”、日本応用物理学会春季講演会シンポジウム招待講演、東京、2012 年 03 月 15 日
5. 香村芳樹、澤田桂、石川哲也、“Ge 量子ドットを成長させた Si 基板の歪みによる X 線横すべり現象”、日本放射光学会年会、鳥栖、2012 年 01 月 07 日
6. Y. Kohmura, K. Sawada, T. Ishikawa, “Gigantic translation effect occurring at the crystal interfaces”, 4th FEL Workshop, 豪州ケアンズ, 2011 年 08 月 31 日
7. 香村芳樹、“シリコンひずみ結晶による X 線の巨大横すべり現象”、PF 研究会、「X 線トポグラフィの現状と展望」、筑波、2011 年 01 月 11 日
8. 香村芳樹、澤田桂、石川哲也、“歪んだ結晶内の X 線の動的回折(ダイヤモンド結晶・エピタキシャル結晶を用いた実験)”、日本放射光学会年会、筑波、2011 年 01 月 09 日
9. Y. Kohmura, K. Sawada, T. Ishikawa, “Application of novel translation effect inside deformed crystal”, 3rd FEL Workshop, 北海道, 2010 年 10 月 06 日
10. 香村芳樹、澤田桂、石川哲也、“歪んだ結晶内の X 線の動的回折理論と 5 mm の導波管現象”、日本放射光学会年会、姫路、2010 年 01 月 08 日

11. 香村芳樹、澤田桂、石川哲也、“歪んだ結晶内の X 線の動的回折理論とそれに由来する 4 mm の導波管現象”、日本物理学会秋季年会、熊本、2009 年 09 月 28 日

〔図書〕(計 1 件)

香村芳樹、澤田桂、石川哲也、“シリコン歪み結晶による X 線の巨大横すべり現象”、「放射光」、日本放射光学会、**24**, 3, 152-157 (2011)

〔その他〕

ホームページ等

http://common.riken.go.jp/office/pr_office-sect/koho/tmp/r-world/research/lab/harima/srmsi/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

香村 芳樹 (KOHMURA YOSHIKI)

独立行政法人理化学研究所・放射光イメージング利用システム開発ユニット・ユニットリーダー

研究者番号：30270599

(2) 研究分担者

田中 義人 (TANAKA YOSHIHITO)

独立行政法人理化学研究所・物質系放射光利用システム開発ユニット・ユニットリーダー

研究者番号：80260222

(3) 連携研究者

なし