

学位論文題名

電子線型加速器によるパラメトリックX線の発生と利用

学位論文内容の要旨

パラメトリックX線(PXR)は、新しいタイプの電磁放射現象であり、近年、物理的研究および工学的利用の対象として注目されている。本論文では、PXRの発生機構の理論的検討とその特性の実験的な評価を行い、さらにその特長を生かした工学的利用研究について述べている。

相対論的速度をもつ電子が結晶に入射すると、X線回折におけるブラッグ条件を満たす角度方向にフォトンが放出される。この現象をPXRと呼ぶ。これは、入射電子の作る電磁場によって原子が分極し、その分極が消滅する際にフォトンが生成される分極放射の一種とみなすことができる。PXRは(1)単色性がきわめて良い、(2)入射電子ビームに対する結晶面の角度を変えることで発生するX線のエネルギーを連続的に変えることができる、(3)高い指向性を持つ、(4)コヒーレントである、(5)発生するX線のエネルギーは入射電子のエネルギーに依存しない、等の特長がある。

PXRの存在は、1972年 Ter-Mikaelian によって、その存在が予言されて以来、古典論および量子論に基づく理論解析がいくつかの研究グループにより進められ、1985年、旧ソ連・トムスクのグループによってその存在が実験的に実証された。その後、シンクロトロンなどを用いた実験結果がいくつか報告され、今日に至っている。

PXRが単一エネルギーで、体系の配位を変えることによりそのエネルギーを変化できることが実証され、物質の構造解析など多方面への応用が考えられている。さらに、シンクロトロンのような大型の装置を用いず、小型の加速器による手軽で安価な独自のエネルギー領域の単色硬X線源として期待されている。本研究ではこの点に着目し45MeV電子線加速器を用いてPXR線源を整備し、可変エネルギーX線源として達成しうる性能を理論的、実験的に明らかにし、さらに工学的利用への有効性を示すことを目指した。本論文は以下のように構成されている。

第1章は緒言である。研究の歴史、特色、目的および本論文の構成について述べた。

第2章は、PXRの発生機構の理論について述べた。相対論的な電子の作る電磁場を種々の周波数を持つ光子の集合と見なす Pseudo-Photon 法による解析は、Ter-Mikaelian による解析結果にほぼ一致し、本解析法の有効性を示した。しかし、Pseudo-Photon 法を用いた半古典論による解析では、絶対強度を求めることが出来なかったので量子論的解析を行った。本研究で展開した手法は、従来用いられている手法と比較し、容易にPXR特性の表現を得ることができ、また、異なる分極放射を一般的に記述できることを明らかにした。この結果を用いると1電子あたり放射強度は入射電子エネルギーとともに増加し、1GeVあたりでその強度は飽和する。その飽和値は $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 個程度となることを示した。

第3章および第4章は、パラメトリックX線の実験装置および特性測定の結果についてまとめた。実験は、北海道大学45MeV電子線型加速器を用いて行った。標的には(100)面鏡面研磨されたシリコン等の単結晶を用い、X線検出器として AMPTEK 社製 XR-100T Si-PIN フォトダイオード検出器を用いた。良質なパラメトリックX線場の作成を目的に、PXRの発生条件をPXRの強度およびエネルギー特性を指標として求め

た。これらの特性に関係する要因として、入射電子に関して電子エネルギー、ビーム電流、パルス幅等を、標的試料に関して、結晶の種類および厚さ等を検証した。

PXRと同時に発生する制動X線は電子線軸方向に強く放射され、PXR計測に対しバックグラウンドとなることが大きな問題となった。制動X線の影響を軽減しPXRの計数を増加させるために、(1)加速器の運転条件(電子エネルギー、ビーム電流、パルス幅)の最適化、(2)検出器設置角度(以下検出角)の最適化、(3)遮蔽やコリメータの強化を行った。測定の結果は、電子エネルギーの増加に伴いPXR強度は増加すること、および発生PXRのエネルギーは電子エネルギーには依存しないことを示し、解析結果と一致した。PXRと同時に発生する制動放射の増大によるPXR信号の計数落ちを考慮すると、加速器条件を電子エネルギー45MeV、ビーム電流4~8nA、パルス幅0.2 μ sとすると、PXRを高計数率で測定可能であることがわかった。また、検出器設置角度を大きくとることで制動X線の影響が受けにくくなり、遮蔽およびコリメータの強化によりバックグラウンドを低減した。最適条件下で得られるPXRは検出角14~22°の範囲において、15~30keVのエネルギーおよび計数率数cpsであることを明らかにした。

第5章は、パラメトリックX線の工学的利用について述べた。PXRの特長を考慮し、以下の2つの利用法について実験的研究を行った。1つは発生したPXRをエネルギー連続可変型単色硬X線源として利用する研究であり、物質の質量減衰係数測定への応用である。もう1つは発生したPXRそのものの特性から、標的試料として用いた結晶の特性を評価することである。その例として、標的試料の結晶面のオフ角を測定する方法を開発した。また、Si、InPおよびGaAsの測定結果を比較することで、標的物質の識別・品質等を評価する可能性について検討した。

エネルギー連続可変型単色X線源としての利用では、硬X線領域である18~20keV付近にK吸収端を持つNb、ZrおよびMoを対象にした。検出器の前に試料を置き、PXRエネルギーをK吸収端の近傍で変化させ、PXR計数の減衰した量から質量減衰係数を算出した。その結果、K吸収端付近で透過後の計数が急激に減少する結果が示され、吸収端エネルギーおよび質量減衰係数は理論計算値に相当する測定値を得た。

また、標的結晶の特性評価の一例として、結晶面のオフ角の測定を行った。〈110〉方向に2.0° \pm 0.5°の公称傾斜角を持つGaAs結晶を用いて、オフ角の測定を行った。オフ角は、入射電子方向を軸にして結晶を反転させ、角度分布データを比較することで決定した。その結果公称値より1桁高い精度でオフ角を決定することができた。また、Siの他に、InPおよびGaAsの結晶から発生するPXRのエネルギースペクトルの測定、比較を行った。測定スペクトルからPXRピークの半値幅および強度を求め、エネルギー拡がりは340eVのSiが小さく、最も大きいGaAsと比較すると90eV程度の差があった。強度はSiがInPより若干大きく、GaAsの強度はSiの5分の1程度であった。標的試料中でのPXRの吸収が強度の違いの要因であると考えられる。

第6章は結言である。本研究はパラメトリックX線の発生機構について理論的解析を行い、本研究に用いたSiを標的結晶とするときのPXR発生収量を評価した。更に、PXRが物質の吸収端エネルギーおよび減衰係数の測定、市販結晶のオフ角の高精度な測定に応用できることを示し、電子線加速器を用いたPXR発生システムが、簡便な硬X線源として工学利用に有効であることを実証した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 澤 村 晃 子
副 査 教 授 榎 戸 武 揚
副 査 教 授 鬼 柳 善 明
副 査 助 教 授 金 子 純 一

学位論文題名

電子線型加速器によるパラメトリック X 線の発生と利用

近年、加速器ビームおよび二次放射線の理学・工学の諸分野への応用が目覚しく、それに伴い、二次放射線として様々なタイプの放射線の発生研究が行われている。パラメトリック X 線 (PXR) は相対論的速度をもつ電子が結晶に入射するとき、ブラッグ条件を満たす角度方向に光子が放出される現象で、分極放射の一種である。PXR は (1) 単色性が良い、(2) 電子ビームに対する結晶面角度変化により発生エネルギーが連続的に変化、(3) 指向性が高い、(4) コヒーレントである、(5) 発生エネルギーは入射電子のエネルギーに依存しない、等の特長を有し、小型の加速器による単色硬 X 線源として期待されている。本研究ではこれらの点に着目し、北海道大学 45MeV 電子線加速器を用いた PXR 線源を整備して、可変エネルギー単色 X 線源としての性能を明らかにし、さらに理学・工学的利用への有効性を示すことを目指している。本論文は以下のように構成され、2 章以下に研究の成果が述べられている。

第 1 章では研究の歴史、特色、目的および本論文の構成について述べている。第 2 章では、PXR の発生機構に関する理論について述べている。本研究で展開した量子論的解析手法は、従来用いられている手法と比較し、容易に PXR 特性の表現を得ることができ、また、異なる種類の分極放射を一般的に記述できることを明らかにした。

第 3 章および第 4 章は、PXR の実験装置および特性測定の結果についてまとめられている。実験は、北海道大学 45MeV 電子線型加速器施設で行われ、標的にはシリコン等の単結晶、X 線検出器として Si-PIN フォトダイオード検出器が用いられている。

電子線型加速器を相対論的電子ビーム源として用いる際、同時に発生する制動放射線と共に PXR を測定しなければならない。制動放射線はビーム取り出し口近傍における電子の散乱点および標的結晶から放出され、そのエネルギー領域および放出方向の一部は PXR と重なる。また、PXR 測定システムにおいて、PXR 計数値が制動放射線による計数の影響を受ける等、制動放射線に対する対策なしには、PXR の正しい評価は行えない。そこで、制動放射線の軽減と PXR 測定に及ぼす影響に配慮し、本研究で用いた測定系で正確な測定が可能な範囲内で、最も良質なパラメトリック X 線場を作成した。そのために、(1) 加速器の運転条件 (電子エネルギー、ビーム電流、パルス幅) の最適化、(2) 検出器設置角度 (以下、検出角) の最適条件の決定、(3) 遮蔽やコリメータの強化等を行い、制動放射線の影響を大幅に低減することにより、測定の高精度化が達成できることを明らかにした。この条件下で、Si 単結晶を標的とした測定を行い、(1) PXR 発生収率・エネルギーと電子エネルギー・電子入射角・結

晶面・検出角の関係は解析結果と一致する、(2)最適条件下でのPXRは検出角 14~22° で、このときのPXRエネルギーは15~30keVであること等を示した。InP および GaAs についても測定を行い、結晶の種類および厚さとPXRの強度およびエネルギー特性との関係を明らかにした。

第5章では、PXRのエネルギー・発生量と標的結晶回転角との関係が高精度で決定できるという特徴に基づくPXRの応用が述べられている。本研究では標的試料の結晶面のオフ角(幾何学的面と結晶面との角度)を測定する方法が開発されている。オフ角はPXR発生量の結晶回転角依存性から導出される結晶面と幾何学的面の差として求められ、GaAs結晶に対し、公称傾斜角より1桁高い精度でオフ角決定が可能であることを明らかにした。PXRでは標的結晶回転角の変化により、微細な発生エネルギー変化が可能である。18~20keV付近にK吸収端を持つNb、Zr および Mo の吸収端エネルギーと質量減衰係数を測定し、共に理論計算値に相当する測定値が得られ、エネルギー連続可変型単色X線源としての有用性が示されている。また、Si、InP および GaAs の測定結果を比較することで、標的物質の識別・品質等を評価する可能性について検討されている。第6章は2~5章までの成果を総括している。

これを要するに、著者は、北海道大学45MEV電子線加速器によって達成されるPXR場の特徴とその応用を示すことにより、小型電子線加速器を用いたPXR発生システムの理学・工学利用への現実的手順を確立し、実施設におけるPXR利用の道を拓いたものであり、原子力工学特に放射線物理学・加速器応用工学等へ貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。