

Title	大気圧プラズマを用いたチャンネルカット X 線結晶光学素子の無歪み仕上げ加工法の開発とその応用
Author(s)	平野, 嵩
Citation	大阪大学, 2019, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/72369
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について <a>〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏 名 (平 野 嵩)

論文題名 大気圧プラズマを用いたチャンネルカット X 線結晶光学素子の無歪み仕上げ加工法の開発とその応用

論文内容の要旨

本論文は、X線自由電子レーザー(XFEL)等の高輝度X線光源の性能を最大限発揮するための基盤技術として、狭幅溝(チャンネル)の内壁面に対する高精度無歪み仕上げ加工法の確立による、高輝度X線光源へ適用可能な高品質チャンネルカット結晶光学素子の開発、及び実用性の高い結晶光学系の構築を目的とした。結晶内壁面の無歪み仕上げ加工として、ダメージフリーな加工技術であるプラズマ化学的気化加工法(PCVM)をベースとした新規加工系を考案した。高い汎用性を重視したものから、用途は限定されるが意義の大きい用途のものまで、様々な結晶デザインに対応可能な加工系を構築し、その有効性を評価した。また、チャンネルカット結晶の利用により高安定化が実現する、複数の結晶素子から成る光学系(複結晶光学系)を構築し、先端的X線分析実験の高度化へと寄与した。

第1章では、本研究の歴史的背景に触れ、高輝度X線光源における複結晶光学系の需要の高まりから、チャンネルカット結晶の有用性を示した。また、高輝度光源へ適用時に要求される結晶学的・幾何学的に高品質な反射面特性を既存技術で達成するのは困難であり、新たな内壁反射面に対する無歪み仕上げ加工法の確立が急務であることを述べた。

第2章では、PCVMの基本概念を紹介した上で、考案した回転電極(直径10 mm)に基づくチャンネルカット結晶内壁用の装置系による加工特性を示した。網羅的な依存性調査によって実験条件を最適化することで、優れた表面平坦性・平滑性を維持したまま表面近傍のダメージ層除去に十分な加工深さを得ることに成功した。また、実際にチャンネルカット結晶素子(チャンネル幅30 mm)の無歪み仕上げ加工を実施し、平面波X線を用いて評価したところ、加工前の反射プロファイルには結晶ダメージ由来の強度変動が見られたものの、加工後の結晶では均一な強度分布を有する反射プロファイルが得られ、結晶学的・幾何学的に要求精度を満足する内壁反射面の創成を達成したことが確認された。

第3章において、溝幅の狭い(<8 mm)標準モノクロメータ用チャンネルカット結晶を加工目標として、電極デザインの最適化による本加工系の適用範囲の拡張を試みた。狭幅チャンネルに対応可能な加工系として、小型回転電極(直径4 mm)、及び直角ノズル電極(奥行き2 mm)の採用を新たに考案した。前者は高い加工能率を有する一方、後者はより適用範囲が広い。加工特性はいずれの電極においても第2章で得られた結果と同様の傾向を示し、ダメージ層除去に十分な加工深さにおいて優れた表面平坦性・平滑性が得られることが確認された。また、本加工系を用いた内壁無歪み仕上げ加工によって、ほぼ理想的なX線回折特性を有するXFEL用の標準モノクロメータの作製を実現した。

第4章において、XFEL光源の高輝度化を実現するキーデバイスであるマイクロチャンネルカット結晶(チャンネル幅0.1 mm)の内壁無歪み仕上げ加工に関して検討した。鋭利な先端形状を有するニードル電極を用いることでチャンネル高さが1 mm以下の内壁面にアクセス可能とした。また、空間的制限の厳しい内壁面の重複部については、電源側のニードル電極に対して重複部を挟むように接地電極を対向配置し、電極間でプラズマを生成することによる処理手法を考案した。既存手法により作製したマイクロチャンネルカット結晶に対して本手法による仕上げ加工を施すことで、重複部を含めた内壁反射面の回折特性を改善することに成功した。

第5章では、作製したチャンネルカット結晶を用いて、1つの入射X線パルスに対して時空間的に分離された2つのX線パルスを生成する複数結晶光学系である分割・遅延光学系を構築し、性能評価及び実証実験を実施した結果を報告した。分割パルスは優れた時空間制御性を有しており、高い実用性を有することが確認された。また、実証実験としてX線干渉法によるXFELパルスの時間コヒーレンス特性の評価を行った。分割パルスの時空間重複によって明瞭な干渉縞が得られたことから、作製されたチャンネルカット結晶の高品質な内壁反射面によって、XFELの高い空間可干渉性が維持され、高度に規定された波面の供給が達成されたことが示された。得られた時間コヒーレンス特性から算出されるスペクトル特性は、他手法による測定結果と良い一致を示し、本光学系の高い時空間制御精度、実用性が保証された。

最後に第6章において、本研究で得られた成果を総括した。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (平野 嵩)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	山内 和人
	副 査	教授	山村 和也
	副 査	准教授	佐野 泰久
	副 査	教授	安武 潔
	副 査	教授	荻 博次
	副 査	教授	桑原 裕司
	副 査	教授	遠藤 勝義

論文審査の結果の要旨

チャンネルカット結晶は、単結晶中に形成された溝の内壁側面で X 線を 2 回反射させることで入射光と常に平行な単色 X 線が得られる結晶光学素子であり、特に XFEL に代表される高輝度 X 線光源において有用である。一方、入り組んだ溝内部の側面に対する高精度研磨の困難さ故に、高輝度 X 線光源への適用時に要求される結晶学的・幾何学的に高度に規定された反射面の形成が既存技術では難しく、反射波面の乱れや反射強度の低下が問題となっている。

本論文は、高輝度 X 線用チャンネルカット結晶内壁側面の無歪み仕上げ加工法として、ダメージフリーなエッチング技術であるプラズマ化学的気化加工法 (PCVM) に基づく新規加工系を提案している。綿密な加工特性調査による大気圧プラズマの特性理解、条件最適化を通して、いずれの加工系においても、要求される表面幾何特性 (平坦性 $1 \mu\text{m PV}$ 以下、粗さ 1 nm rms 以下) を満足しつつ、表面近傍のダメージ層除去に十分な除去深さが得られている。コヒーレント X 線を用いたチャンネルカット結晶反射面の結晶性評価では、PCVM 処理による結晶ダメージの完全除去の達成が確認され、高輝度 X 線に適用可能なチャンネルカット結晶の開発に世界で初めて成功している。

また、利用する電極形状の最適化によって加工系の適用範囲を拡張することで、溝幅 8 mm のチャンネルカット結晶や、溝幅 0.1 mm の超小型チャンネルカット結晶への適用を行っている。前者は波長範囲の広い汎用モノクロメータとして利用され、サンプル上での実効輝度の向上に寄与する。後者はセルフシード用モノクロメータとして利用され、XFEL 光源自体の輝度向上に寄与する。いずれの結晶においても、改良した加工系を用いた PCVM 処理を適用することで、優れた X 線回折特性を示す内壁反射面を獲得している。

更に、PCVM 処理を施した高品質チャンネルカット結晶によって構築可能となった実用的な高度光学システムとして、X 線分割・遅延光学系の開発も行っている。本光学系によって時間遅延を有する 2 つの X パルスの生成が可能となり、それぞれをポンプ・プローブ、もしくは両方をプローブとした、X 線領域における超高速ダイナミクス研究の実現が期待される。実証実験として実施した X 線干渉法による XFEL パルスの時間特性評価において妥当な結果が示されており、PCVM 処理後結晶による波面保存の達成を確認するとともに、高い実用性を有する X 線分割・遅延光学系を世界で初めて実現している。

以上のように、本論文はチャンネルカット結晶内壁面の高精度無歪仕上げ加工法を確立し、高輝度 X 線光源へ適用可能な様々な高品質チャンネルカット結晶の開発を行ったものである。開発した標準モノクロメータや反射型セルフシード用モノクロメータによって XFEL の基盤性能の向上に寄与したことに加え、構築した X 線分割・遅延光学系によって X 線高速科学分野において新たな可能性を提示しており、本論文は精密科学の発展に寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。