

「SACLA 利用装置提案課題」

報告書 2 (研究内容)

1. はじめに

XFEL の超短パルスという性質を活かすためには、時間分解研究を行うための光学系の開発が不可欠である。時間分解研究の手法として、まずパルスレーザーを試料に照射し、その事による変化を、遅延時間を制御した第二のパルスレーザーにより検出するというポンプ・プローブ実験がある。XFEL をポンプ・プローブ実験に適用する際、外部のパルスレーザーと同期させる手法と、XFEL パルス自体をポンプ光とプローブ光とに分割する手法の、大きく分けて二つがある。前者は様々な波長の光による反応を検出できる反面、フェムト秒オーダーになるとパルス間のジッター等により、遅延時間を制御することが難しいという問題点がある。我々はジッターフリーなポンプ・プローブ実験を実現するため、後者の手法にあたる光学系であるオートコリレータの開発を目指している。本装置の共用化によって、利用者はフェムト秒オーダーの遅延時間を有するパルス光を用いた実験が可能となる。

本課題では、窓型ビームスプリッタとチャンネルカット光学素子をキーオプティクスとするオートコリレータを開発する (図 1)。XFEL パルスを上流側のビームスプリッタにより反射光と透過光とに分割し、反射光側は光路長可変用の 2 枚の反射光学素子を、透過光側は 2 組のチャンネルカット光学素子を、それぞれ経由して下流側のビームスプリッタで重ね合わされる。上記キーオプティクスは両者共形状が複雑で従来加工技術では高精度な加工が困難であるが、大阪大学独自の超精密加工技術を駆使し、無歪かつ高精度な表面形状を実現する。本研究期間においては主としてビームスプリッタについての検討を行い、その加工工程を確立した。

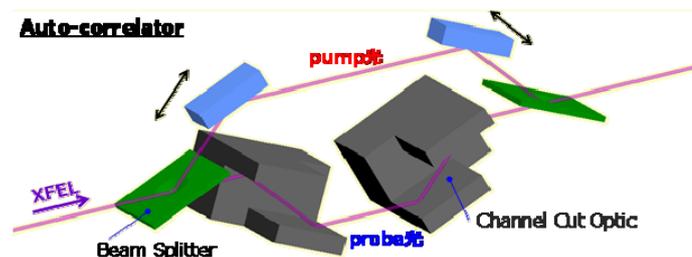


図 1 開発するオートコリレータの概略図

2. 研究内容

ビームスプリッタには、高品質かつ十分な強度の反射光を得るために完全な結晶性が、そして十分な透過光強度を得るために極めて薄い厚さが要求される。例えば、10keV 程度の単一波長の X 線において、反射光と透過光の強度比を 1:1 にするためには $10\mu\text{m}$ 以下という極めて薄い Si 単結晶が必要となる。このような極薄の結晶を結晶格子面をたわませることなく安定に保持することは極めて困難であることから、我々は図 2 (a) に示すような、極薄部の周辺に厚い枠を設けた窓型ビームスプリッタを考案した。このような形状を無歪かつ高精度に形成するため、加工法として PCVM (plasma chemical vaporization machining) を採用した。PCVM は大気圧プラズマ中でのプラズマエッチングを用いた高能率化学的加工法である。大気圧という高い圧力では気体分子の平均自由行程が極めて小さいため、プラズマ中のイオンエネルギーが小さく被加工物表面の結晶性を保つことが可能であるだけでなく、プラズマの局在化が可能であるため高い空間分解能を有する形状加工が可能である。図 2 (b)~(f) に、機械加工と PCVM を組み合わせた、窓型ビームスプリッタ加工工程の概要を示す。

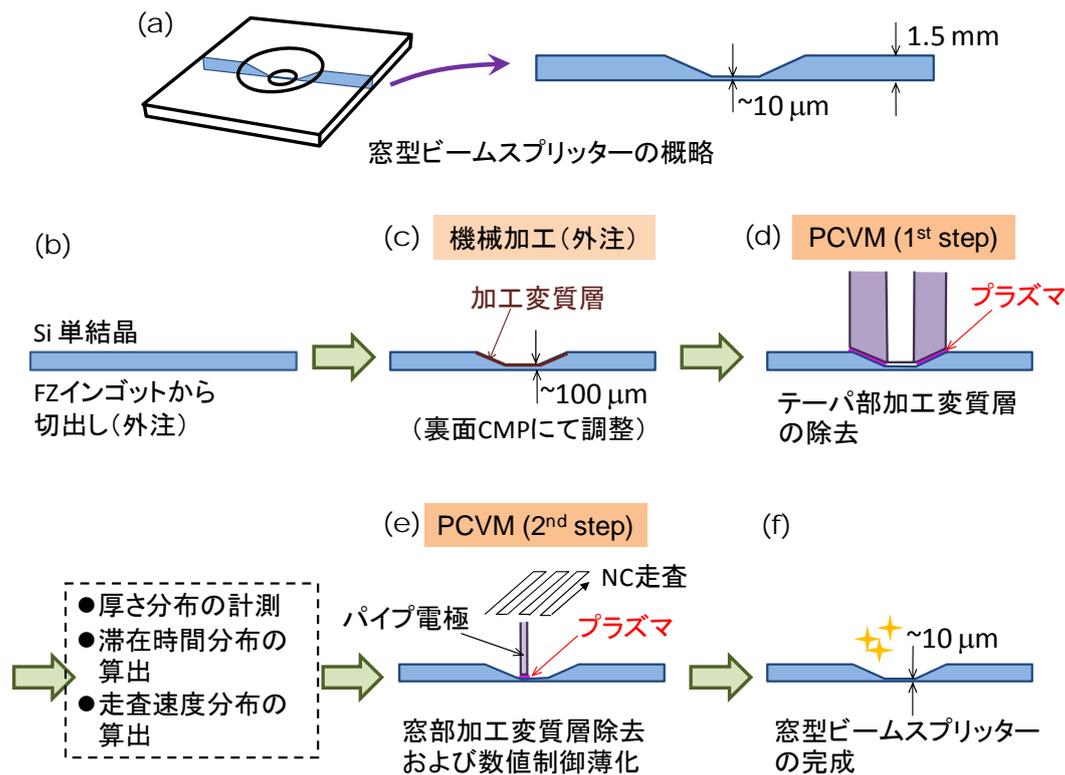


図2 窓型ビームスプリッタ加工工程の概要

まず、Si 単結晶母材 (FZ インゴット) より必要とする面方位を持った板を切り出して両面を CMP にて仕上げ (図 2 (b))、窓部およびテーパ部を研削・研磨によって大まかな形状に整えた後、窓部の厚さが概ね $100\ \mu\text{m}$ となるまで裏面より CMP で薄化する (図 2 (c))。その後、テーパ部に残留している加工変質層を除去するため、テーパ部のみにプラズマを発生させることのできる電極を用いて PCVM 加工を行う (図 2 (d))。そして、窓部の厚さ分布を計測し、計測結果に基づいて算出した走査速度分布にてパイプ電極による数値制御 PCVM 加工を行い (図 2 (e))、所定の窓部厚さを有する無歪の窓型ビームスプリッタが完成する (図 2 (f))。

昨年度までの基礎検討結果として、窓部の厚さが約 $20\ \mu\text{m}$ のものを試作した結果、良好な反射光トポ像ならびにロッキングカーブが得られていたため、当初は加工精度さえ向上させれば $10\ \mu\text{m}$ 程度のものも問題無く製作することが出来ると考えていた。しかしながら、実際に窓部の厚さが $10\ \mu\text{m}$ 以下のものを数点試作して反射光トポを観察すると、いずれも図 3 のような像が得られた。窓部の格子面は大きく歪んでおり、とても実用できるものでは無かった。原因究明のために色々と考察し、試行錯誤を行った結果、この格子面の乱れは図 2 (c) の工程における裏面 CMP 加工によって裏面にもたらされた僅かな加工歪によるものと断定できた。図 3 のサンプルの裏面に対して、僅かに PCVM 加工を行って裏面加工歪層を除去することで、乱れた反射光トポ像は一切見られなくなった。すなわち、窓部の厚さが薄くなることで曲げ剛性が小さくなり、僅

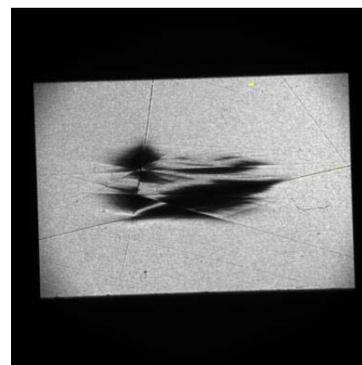


図3 $10\ \mu\text{m}$ 程度に薄化した窓部に当初見られた反射光トポ像

かな残留歪による応力によっても容易に格子面が歪むようになったため図3のようなトポ像が得られたと考えられる。この結果を踏まえ、図2の工程に対して、(d)の後に裏面に対してPCVM加工を行う新たな工程を挿入し、裏面の加工変質層が残らないように改良した。

改良した工程を用いて窓型ビームスプリッタの試作を行った。反射光トポ像ならびに反射・透過光のロッキングカーブを測定した結果を図4に示す。トポ像より、薄化部からの反射光は一様であることが、ロッキングカーブより、理論値通りの反射光・透過光強度が得られていることが分かった。さらに、メインピーク周辺に現れるペンデルビートの周期から薄化部の厚さは $4.4\mu\text{m}$ と算出でき、提案した加工工程を用いることで、少なくとも $4.4\mu\text{m}$ 以上の厚さをもつ窓型ビームスプリッタに対してその加工法が確立したと言える。

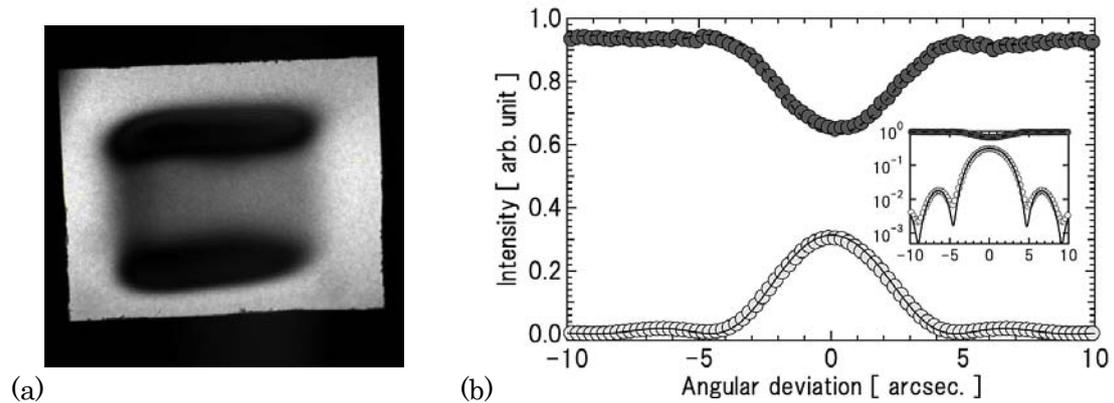


図4 薄化したSi(110)窓型ビームスプリッタの反射トポ像(a)および反射・透過特性(b)

3. おわりに

これまでに提案していた加工工程を改良し、窓部の厚さが $4.4\mu\text{m}$ 以上の窓型ビームスプリッタに対する製作法を確立した。今回の知見も踏まえ、今後チャンネルカット結晶の表面加工にとりかかり、オートコレレータの早期実現を目指したい。