

BL13XU

表面・界面構造解析ビームライン

1. 概要

表面界面構造解析ビームラインBL13XUは、X線の回折・散乱現象を利用して、固体表面や埋もれた界面の構造、そこに生成する低次元物質・ナノ物質の構造を原子レベルで評価・解析できるSPring-8標準アンジュレータを光源とする共用ビームラインである。主軸計測装置として第1実験ハッチに設置された多軸回折計、第3実験ハッチに設置された超高真空表面回折装置と局所構造観察のためのマイクロ回折装置がある。

物質表面のわずかに数原子層の構造と、その物性との関連を議論する表面界面の構造研究では、回折・散乱に与る関心領域のボリュームが圧倒的に小さいため（反射率にして1億分の1から1千億分の1程度）、依然として、ビーム強度（フラックス）の向上が求められている。そこで、表面回折に適した光学系の再考を行い、現状光源での計測基盤の底上げを常に追求している。2012年度に行われた装置整備・開発の詳細について、以下に示す。

2. 高フラックス光学系の実現：表面回折の迅速・高効率計測の推進

2012年度は、表面回折に適した高フラックス分光結晶としてSi(111)非対称分光結晶を導入し、利用ビームの大強度化を実現した。Si(111)面に対して表面をオフセットさせて加工すると、動力的回折効果によって、分光結晶に対する入射ビームと出射ビームの回折幅（受け入れ角度幅）が変化する^[1]。Si111対称反射の回折幅に比べ、アンジュレータ光の鉛直方向の角度発散は十分小さいとみなせるため、非対称反射によって受け入れ角度幅を広げると、より広いエネルギーの光を同結晶で一度に分光することができる（ワイドバンド分光）。図1(a)に示すように、第一結晶を反射する光は、反射面で拡がりサイズが大きくなるが、第二結晶の表面のオフセット方向を逆にすることによって、元のビームサイズに戻すことができる。以上の原理で、非対称結晶により高フラックス化を実現できる。

実際には、対称面および非対称面（4°と6°の二種のオフセット面）が利用できる三面一体型のSi(111)分光結晶を設計・作製した（図1(b)）。結晶のみに加工を施し、結晶ホルダを含む液体窒素冷却分光器には、何ら変更を必要としないデザインとしている。これにより、対称面を利用した従来と同性能の分光結晶としても利用可能である。

非対称反射では、1) 結晶上でのビームのフットプリントが大きくなり、結晶への熱負荷が分散される、2) オフ

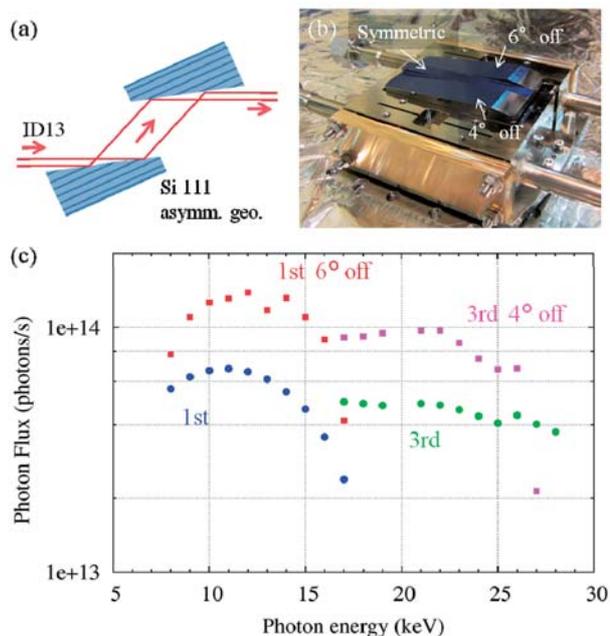


図1 (a) Si(111)非対称二結晶配置。(b) 結晶ホルダにマウントされた対称・非対称一体型分光結晶の概観。(c) 従来の光学系と非対称結晶による高フラックス光学系のフラックスの比較（実測結果）。

セット角によって、広いエネルギー範囲で強度利得をデザインできる、という二つの大きな利点がある。さらに、分離型でなく一体型形状をとることで、3) 標準分光結晶である一面のみのシリコン結晶と同様の耐熱負荷性能が期待でき、4) 対称面・非対称面ともに全く同一の格子面を利用するため、対称面と非対称面の切り替え・調整も容易である。

図1(c)に、従来の光学系と高フラックス光学系のフラックスを比較したグラフを示す。それぞれ、青丸（1次光）と緑丸（3次光）が平行面の、赤色の四角が6° off面（1次光）の、ピンク色の四角が4° off面（3次光）のフラックスの実測値である。非対称面を利用した場合、対称面に対して最大2.5倍の強度利得が得られた。フロントエンドスリットは最大開口サイズの鉛直方向0.8 mm、水平方向1.0 mmとした。対称面、非対称面それぞれに、標準アンジュレータからの放射光を照射し、分光されたX線ビームをPINフォトダイオード検出器（応用光研社製、S-2500）で計測した。いずれの場合もSi111反射を利用した。

これまで、非対称結晶を用いたワイドバンド分光は、高い耐熱負荷性能が要求される第三代放射光光源、とりわ

けアンジュレタ光源のX線分光ではほとんど報告がなかったが、今回、その有効性が確認された。本ワイドバンド分光結晶とミラー集光システムや屈折集光レンズを組み合わせれば、他の第三世代放射光施設の表面回折分野ビームラインの光学系に比して、利用ビームを1桁近く高フラックス化できると考えられる。これにより、強度不足のため研究が滞りがちであったコヒーレント光やナノ集光ビーム、ナノ秒ビームを表面回折分野で積極的に活用する基盤技術が整備できたことになる。

3. 高分解能マイクロX線回折装置の整備

本装置では、半導体材料・デバイスのサブミクロン領域における格子歪と格子面の傾きを分離し、且つ、高い空間・角度分解能で測定することができる。

2012年度は、同装置を用いた時間分解計測に向けて、高速アバランシェフォトダイオード (APD) 検出器 (浜松ホトニクス社製 C5658 (X) 窓無し仕様) を整備した。図2(a)に外観の写真を示す。受光面のサイズは0.5 mm φ、1 GHzまでの帯域をもつ小型の高速X線検出器である。蓄積リングのシングルバンチからのパルス放射光を、同APD検出器で受光した際の信号波形を図2(b)に示す。入射X線のエネルギーが8 keVの場合、波高は約40 mV、パルス幅は約1 nsであった。試料に外部電場を印可し、その時間変化を放射光によって測定するポンプ・プローブ実験用に電場と放射光とのタイミングを調整する回路も整備した。図2(c)に、放射光と同期させた外部電場による

LEDの応答を、APD検出器で観測した際の信号波形を示す。放射光に対する電場の位相を調整することで、1 ns程度の精度で放射光と外部電場のタイミングを調整することが可能となった。

[1] K. Kohra *et al.*: *Nucl. Instrum. Meth.* **152** (1978) 161.

利用研究促進部門
構造物性 I グループ

田尻 寛男

ナノテクノロジー利用研究推進グループ

今井 康彦

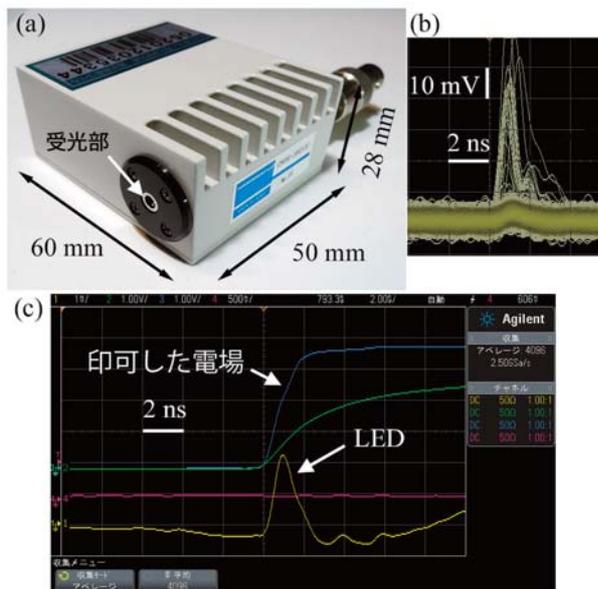


図2 (a) 高速APD検出器の写真。(b) パルス放射光をAPD検出器で受光した際の信号波形 (RF信号を分周した信号をトリガーにしている)。(c) 放射光と同期させた電場を印可したLEDの応答を、APD検出器で観測した際の信号波形。