

一般講演



# 白色 X 線照射ビームライン

石地耕太郎

九州シンクロトロン光研究センター

SAGA-LS では 2006 年に照射ビームラインとして BL09A が建設された。光源から実験ステーションまでの距離は 23 m で、図 1 に示すエネルギー分布の白色 X 線が BL09A に供給される。このようなエネルギー分布の白色 X 線は高分子材料に対する吸収が大きいため分子鎖の切断・分解を引き起こすのに効果的であり、その性質を利用して X 線リソグラフィーが行われる。実験ステーションでのビームサイズは縦 15 × 横 100 mm<sup>2</sup> 程度で、これは 4 インチ径ウェハー程度の面積の試料への照射にも対応できる大きさ(試料ステージ駆動時)である。

X 線リソグラフィーでは光源から発生した光をそのまま利用するため、照射量と掘深さの関係は放射光源の性能に依存する。そこで、BL09A の照射量と掘深さの関係を調べた。代表的なレジスト材料の PMMA を用い、10~120 mA・hour 間の 6 点について実験を行った(図 2)。掘深さは X 線の吸収量と関係するので、指数的に振る舞うとしてフィッティング計算した。約 7 mA・hour にしきい値(critical dose)を持ち、およそ 0.5 mm で漸近する。このような振る舞いは参考資料と一致する[1]。図 1 のデータが BL09A での PMMA を用いた X 線リソグラフィーを行う際のリファレンスとなる。

その他、BL09A で植物への照射(突然変異誘発実験)の利用が最近行われる。電離放射線を用いて生体材料内の DNA に損傷を与えて突然変異を人為的に誘発させる試みであるが、通常イオン粒子線が主流で、放射光を用いた例はほとんど無い。本講演では、放射光を照射した場合の突然変異誘発実験の概要を紹介する他、結晶材料内の欠陥構造イメージング手法である X 線トポグラフィーについても紹介する。

[1] L. JIAN, Cheiron2007 講義資料”LIGA process”; <http://cheiron2007.spring8.or.jp/pdf/JIAN.pdf> 参照

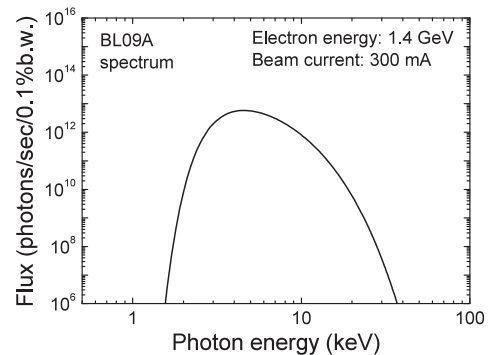


図 1 BL09A のエネルギースペクトル分布。プログラム”SPECTRA”で計算。

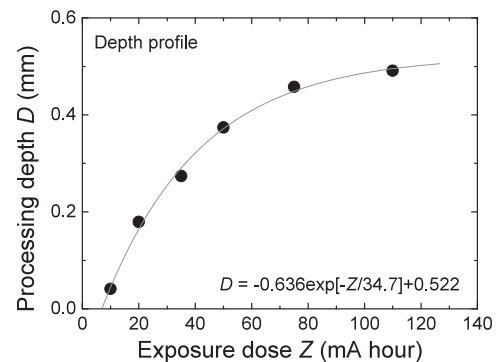


図 2 延長後の照射量 Z(mA・hour)と掘深さ D(mm)の関係。照射量は蓄積リング電流値(mA)と時間(hour)の積。黒丸が実測、実線が計算曲線。

# 白色X線照射ビームライン

石地耕太郎  
九州シンクロトロン光研究センター

## ビームラインBL09A

微細加工・薄膜作成プロセス開発目的に白色X線照射ビームラインBL09Aを建設。



図1 BL09A実験ステーション外観。クリーンルーム仕様(クラス10,000)。

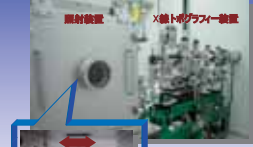


図2 実験ステーション中の様子。X線トポグラフィ装置と照射装置がタンデムに並列。

BL09A利用実験: X線リソグラフィ, 植物照射(突然変異誘発実験), X線トポグラフィ

## ビームの性質

偏向電磁石で発生した白色X線が実験ステーションまで供給される。

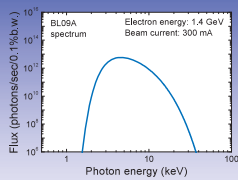


図3 白色X線のエネルギースペクトル分布。プログラム“SPECTRA”で計算。

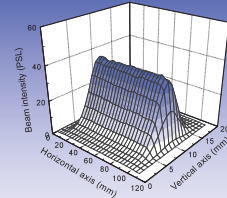


図4 ビーム強度分布。イメージングプレートで撮影。

- 光源から実験ステーションまで23 m、ビーム発散角: 縦0.36 mrad, 横2.5 mrad。
- 高分子材料の分子鎖切断・分解に効果的なエネルギー分布。

## X線リソグラフィの原理

X線リソグラフィの原理と特徴。

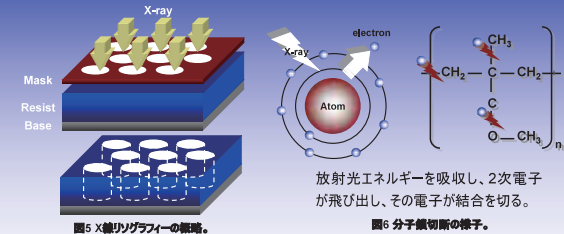


図5 X線リソグラフィの概略。

図6 分子鎖切断の様子。

### [X線リソグラフィの特徴]

- 等倍転写でマスク形状を高精度で反映。
- 数百ミクロンの深掘りが可能。
- 光電子の飛行が大きく、ナノオーダーの加工が困難。

## X線リソグラフィデモ実験

BL09Aの照射量に対する掘深さの基本情報を収集。

PMMAをレジストとし、400 mesh/パターンのステンレス網目をマスクとした。

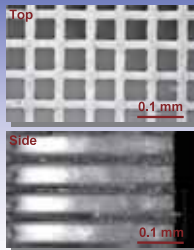


図7 X線リソグラフィ転写パターン線。顕微鏡撮影後、顕微鏡観察。

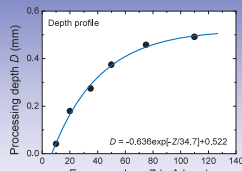


図8 照射量D(mA·hour)と掘深さZ(mm)の関係。

7 mA·hourのしきい値を持ち、掘深さ0.5 mmで漸近。なお、150 mA·hour以上で気泡が発生。

## 突然変異誘発実験

植物に白色X線を照射し、突然変異を誘発。

### [突然変異]

電離放射線により損傷を受けた染色体は修復しようとする能力がある。その際に誤った修復が行われることがある。放射線由来の変異は無く、生物的影響の大きな粒子線が主流。

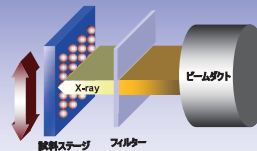


図9 生存率曲線の表記の一例

通常、吸収線量(Gy)が使われるが、放射光での実績が無いため、試料に照射される放射光エネルギー(J)を用いている。

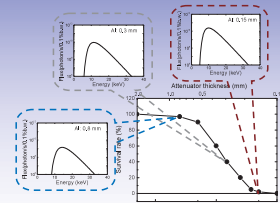
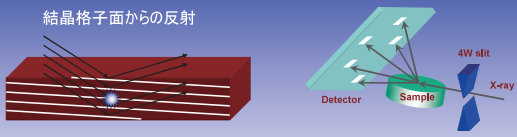


図10 生存率曲線の表記の一例

## X線トポグラフィー

単結晶の格子欠陥・歪みなどのイメージング手法。

結晶格子面からの反射



回折位置:  $2d \sin \theta = \lambda$

回折強度:  $I = |F|^2 p \left( \frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin 2\theta \cdot \cos \theta} \right)$

$d$ : 面間隔,  $\lambda$ : 波長,  $I$ : 強度,  $F$ : 構造因子,  $p$ : 多重因子

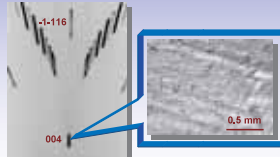


図11 X線トポグラフィー実験設置例(上)とデータ例(下)。

## まとめ

BL09Aで実験を行うにあたり、以下を留意して計画を立てる。

X線リゾグラフィー	突然変異誘発実験	X線トポグラフィー
<ul style="list-style-type: none"> <li>放射光源の性質(エネルギースペクトル分布、ビームサイズの把握)。</li> <li>適切な照射量。</li> <li>高度なマスク作製技術と後処理(現像、金属めっき)技術。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>放射光源の性質(エネルギースペクトル分布、ビームサイズの把握)。</li> <li>事前に個々の種の照射量への計算が必要。</li> <li>照射後、適切な育成管理が必要。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>結晶性の良い試料。</li> <li>回折斑点の同定(フリーソフト"LauePt")。</li> <li>IP, X線フィルム, 2次元デジタル検出器を装備。必要に応じて使い分け。</li> <li>X線フィルムの場合、現像処理と顕微鏡観察が必要。</li> </ul>