

3 県有ビームライン I (BL09)

田中徹¹、小川博司¹、鎌田雅夫¹、西尾光弘²、増田正孝³、郭其新²、近藤祐治⁴、林田和樹⁵、
本岡輝昭³、吉村大介⁶、瀬戸山寛之⁶、岡島敏浩⁶

¹佐賀大学シンクロトロン光応用研究センター、²佐賀大学理工学部電気電子工学科、

³九州大学大学院工学研究院、⁴秋田県高度技術研究所、⁵佐賀大学 VBL、

⁶九州シンクロトロン光研究センター

1. ビームラインのレイアウト

図1に本ビームラインの全体図を示す。本ビームラインは上流部にミラーを設置することにより、偏向電磁石からのシンクロトロン光を2つに分岐し、下流の2本のビームラインに光を導いている。1本は、分光された極紫外 (EUV) 光を取り出すことができるビームライン (EUV 分光ライン) で、もう1本は、偏向電磁石からの白色光を取り出すことができるビームライン (白色光ライン) である。

EUV 分光ラインでは、多くの反応ガス分子が高い光吸収を有するエネルギー領域 (10-50eV) の極紫外分光光の照射が可能であり、半導体などの材料加工 (超薄膜形成や微細な形状のエッチングなど) を目的としている。

一方、白色光ラインでは、X 線から赤外領域までの全ての光を含む白色光の照射が可能であり、有機

ポリマーの表面改質、シンクロトロン光励起プロセス (エッチング、成長など) の開発、X 線のエネルギー領域を活用した深刻リソグラフィによるマイクロマシン開発などに軸足を置いたものである。このビームラインは、材料加工の原理の発現やマイクロマシン技術を利用した新産業創出を期待したものであり、比較的シンプルな構成にすることによりシンクロトロン光の利用経験のない方でも容易に活用できるようにしている。

以降に本ビームラインの光学設計の詳細と期待される性能を示す。

2. EUV 分光ライン BL09A の光学設計と性能

図2に EUV 分光ラインの光学配置を示す。全長は約 12m である。本ビームラインの主な目的は照射利用であることから、分光器には高スループットが期

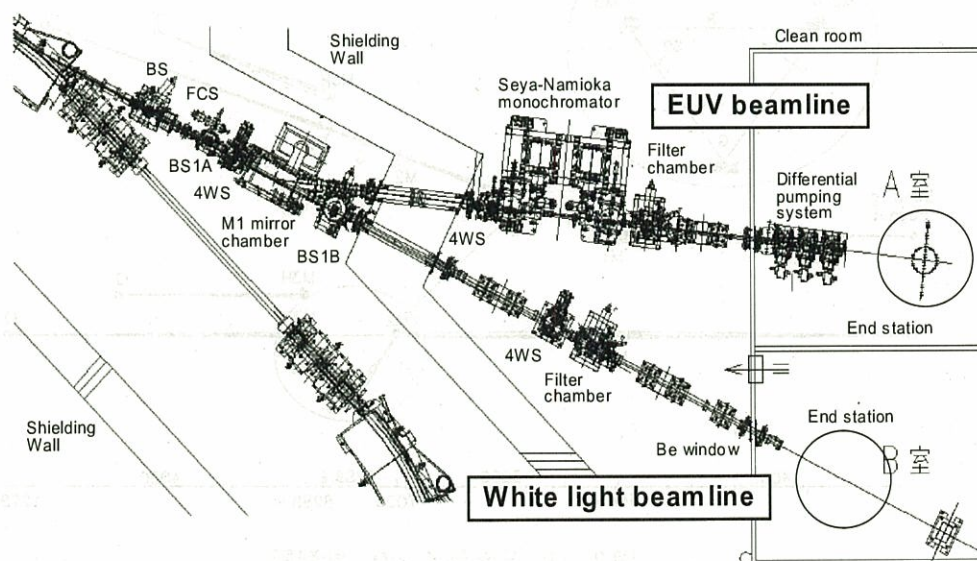


図1 ビームライン BL9 の全体図

表1 EUV 分光ラインのミラーおよび回折格子のパラメータ

Optical element	Shape	R (mm)	ρ (mm)	Incidence Angle ($^{\circ}$)	Dimension L $\times$ w $\times$ t (mm)	Coating
M1	Toroidal	31074.5	937.0	80	320 $\times$ 50 $\times$ 30	SiC
M2	Cylindrical	1383.3	∞	62.625	30 $\times$ 50 $\times$ 30	SiC
G	Spherical	1000	1000	35.25	60 $\times$ 40 $\times$ 10	SiC/ML

待できる瀬谷波岡型分光器を採用した。偏向電磁石からのシンクロトン光は、分岐横振り集光鏡 M1、分岐縦振り集光鏡 M2 にて反射され、入射スリット S1 上で垂直方向に集光される。M1 ミラーにおける水平、垂直方向の取り込み角は、それぞれ 13mrad、7.5mrad である。S1 を通過した光は球面回折格子 G (刻線密度 1200 l/mm) にて分光され、出射スリット S2 を通過した後、縦振り集光鏡 M3 によりサンプル位置 Q 上に集光される。M3 ミラーが設置される真空槽内には曲率半径の異なるミラー (M3H) を配置しており、これを使用することにより、Q 点の上流 1500mm の位置 (Q' 点) において、より小さなスポットサイズを得ることができ、高い光束密度を必要とする実験に利用できる。このようにサンプル位置に

分光光を導くモードを EUV 分光ラインの“分光モード”と呼んでいる。

表1に、本ビームラインで使用されるミラー及び回折格子のパラメータを示す。40~50eV の光に対する反射率を増加させるため、回折格子には Y_2O_3/Mg 多層膜 (ML) をコーティングしている¹⁾。

本ビームラインの分光モードでの性能を評価するため、分解能と光束密度を光線追跡法により求めた。図3に、出射スリット上のエネルギー分散から計算したエネルギー分解能と光子エネルギーの関係を示す。光子エネルギー10eV、スリット幅0.1mm 以下の場合、約1000以上の分解能が得られることが分かる。

光束密度はサンプル位置での光子数をスポットサイズで割ることにより求められる。光子数は、偏向

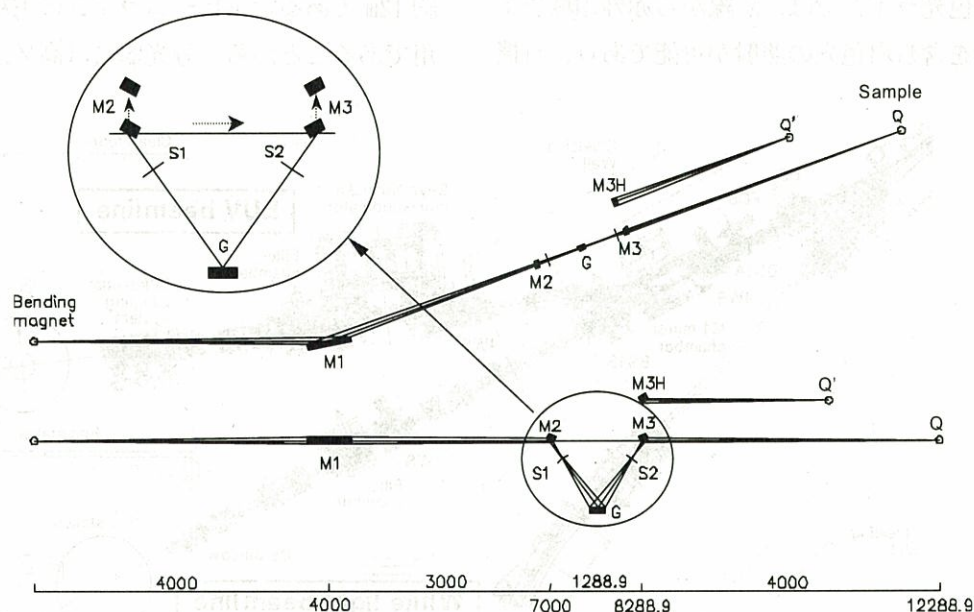


図2 EUV 分光ラインの光学配置

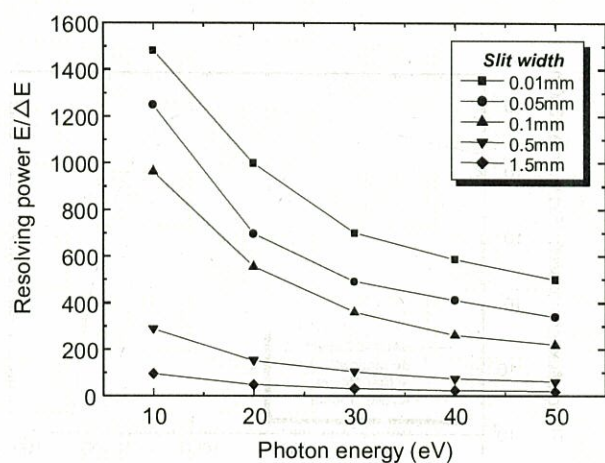


図3 EUV分光ラインのエネルギー分解能

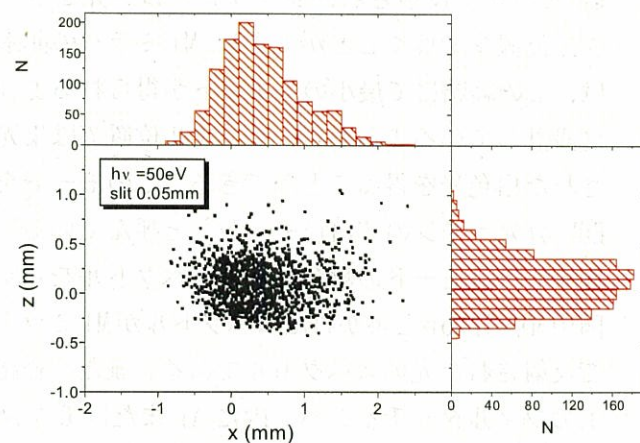


図4 スポットイメージとヒストグラム

電磁石からのシンクロトロン光の光子数に幾何学的スループット、光学素子の反射率、及び回折効率を掛けることにより求めた。ここで、回折効率は全てのエネルギーにおいて 10%一定と仮定した。サンプル位置におけるスポットサイズは、光線追跡によるスポットイメージのヒストグラムにおける標準偏差の 2 倍と定義した。図 4 に光子エネルギー 50eV、スリット幅 0.05mm におけるサンプル位置でのスポットイメージとヒストグラムを示す。スポットサイズはおよそ $1.1 \times 0.5 \text{ mm}^2$ である。

図 5 は光子エネルギーと光束密度の関係を示している。スリット幅 0.5mm 以上において、 $10^{15} \text{ photons/s/cm}^2/300\text{mA}$ に近い光束密度が得られることが分かる。半導体表面の原子密度は 10^{15} cm^{-2} 程度であることから、反応の量子効率にも依存するが、光励起プロセスの研究開発に十分使用できるレベルであると考えられる。また、前述のように M3 ミラーの代わりに M3H ミラーを使用することにより、光束密度は約 4 倍になると予想される。一方、M2 ミラー及び M3 ミラーは分光モードの光軸上から退避させることができ(図 2 挿入図)、

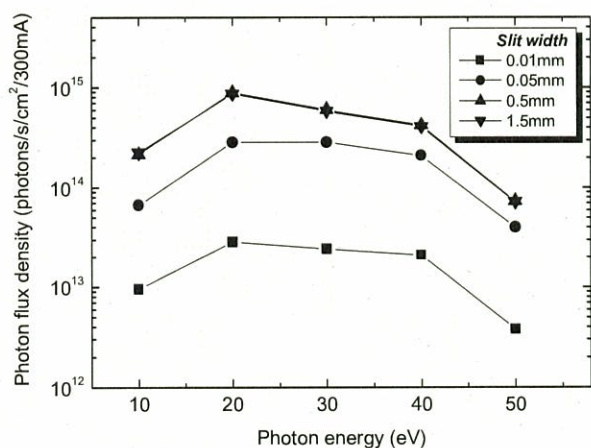


図5 光束密度と光子エネルギーの関係

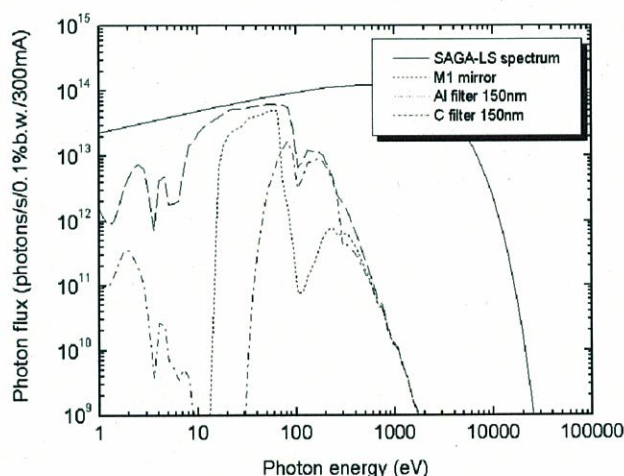


図6 EUV分光ビームラインの白色モード時の光束スペクトル

M1 ミラーで反射されたシンクロトロン光をサンプル位置まで導くことができる。M1 ミラーの曲率は、この経路にて最小のスポットが得られるように設計していることから、サンプル位置では集光された白色光を得ることができる。このモードを EUV 分光ラインの“白色モード”と呼んでいる。図6に白色モードの場合の光束スペクトルを示す。図中M1 mirrorと書かれたスペクトルがM1ミラーで反射された光のスペクトルである。また、経路上のフィルターチャンバー内に Al または C フィルターを挿入することにより、光子エネルギーを選択することができる。これらを挿入した場合のスペクトルも図6にまとめて示す。

3. 白色光ライン BL09B の概略とスペクトル

図1に示すように、白色光ビームラインでは、偏向電磁石からのシンクロトロン光をミラー等光学素子を介さずにエンドステーションまで導くことができる。図7に本ビームラインで得られるスペクトルを示す。経路上には、X線リソグラフィを念頭に2枚のBe窓、あるいは、光エネルギーを選択する目的でAlまたはAuフィルターを挿入することができる。これらを挿入した場合のスペクトルも図7に示す。本ビームラインの水平取り込み角は約5mradで、サンプル位置にて約50mm幅の光照射が可能である。

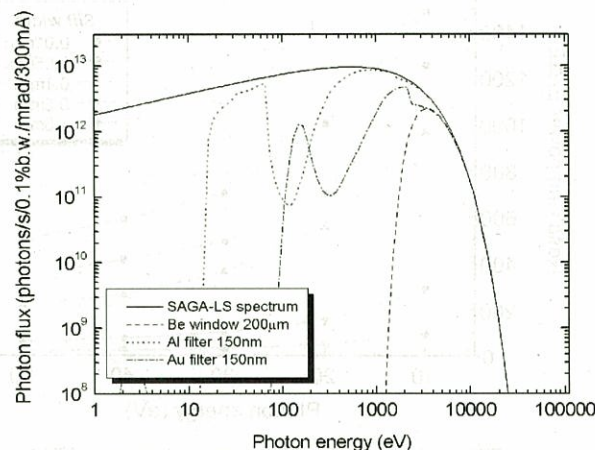


図7 白色光ラインの光束スペクトル

4. おわりに

本稿では、県有ビームライン BL09 の設計の概略と期待される性能について概説した。本ビームラインは間もなく運用開始の段階にあり、「ものの創り」に関する研究開発が進められるものと期待される。

参考文献

- 1) Y. Kondo, T. Ejima, K. Saito, T. Hatano, and M. Watanabe : "High-reflection multilayer for wavelength range of 200–30 nm", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Vol. A 467-468 (2001) pp.333.