

トピックス

ニュースバルの到達点

安東愛之輔*, 服部 正, 細野和彦, 神田一浩, 木下博雄
松井真二, 銘苅春隆, 新部正人, 内海裕一, 渡邊健夫

姫路工業大学高度産業科学技術研究所*

Present Status of NewSUBARU

Ainosuke ANDO, Tadashi HATTORI, Kazuhiko HOSONO, Kazuhiro KANDA, Hiroo KINOSHITA,
Shinji MATSUI, Harutaka MEKARU, Masahito NIIBE, Yuichi UTSUMI and Takeo WATANABE
Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, Himeji Institute of Technology

Abstract

The 1.5-GeV synchrotron radiation facility, NewSUBARU, has been open for common use from January 2000. In this June the storage ring achieved the designed goal. We have been producing significant results by synchrotron light in these years and some topics of our achievement are summarized in this report.

1. はじめに

光源開発と産業利用を主目的とする、姫路工業大学高度産業科学技術研究所附置の中型放射光施設「ニュースバル」¹⁾は SPring-8 の全面的な協力の下、1998年2月に据付を開始し、同9月よりビーム・コミッションングを始めた。挿入光源部真空系の根本的な改善などを行い、2000年1月より共用開始した。その後も真空排気系の増強を行い、放射光による真空焼き出しを継続し、2002年6月9日、光源としては設計値を達成した。コミッションング開始から4年近く要したことになるが、主原因は、電磁石を出来るだけ小さくしたため真空チャンバー内径が非常に小さいこと、放射線遮蔽が薄く十分な電子を一気に入射

来なかったことによる。

この間にも放射光利用は前進し多くの成果を積み上げている。今後は利用しやすい体制の整備が急がれている。

Fig. 1 に施設の平面図を示す。

2. 蓄積リング

ニュースバル蓄積リングの主要パラメータを Table 1 に、性能を Table 2 に示す。現在、1 GeV 利用時は約10秒毎に電子ビームを入射し、300 mA に近い値で運転されている。

2.1 寿命と COD

Figure 2 に蓄積電流とそのときの減衰時間を示す。電

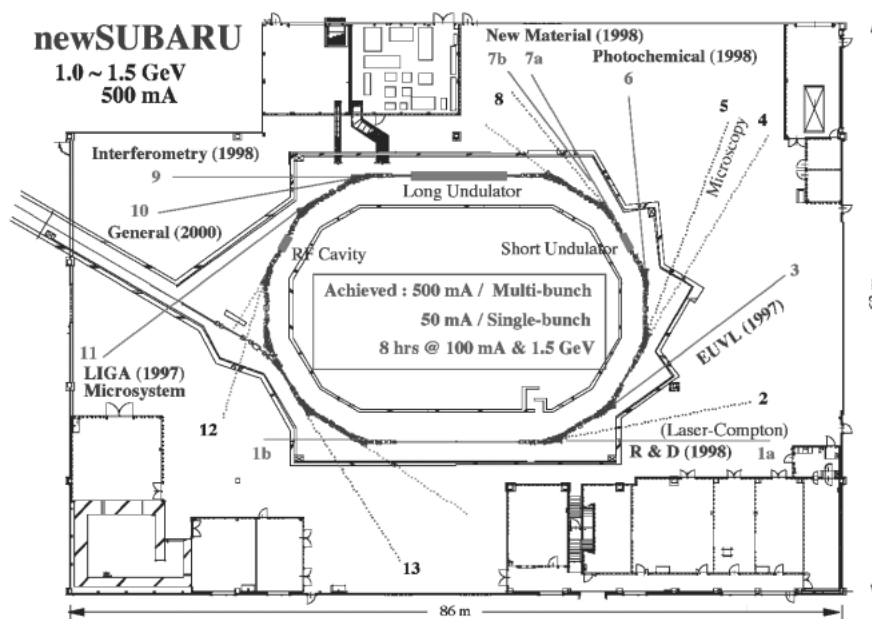


Figure 1. Plane view of the NewSUBARU facility.

* 姫路工業大学高度産業科学技術研究所ニュースバル 〒678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都 1-1-2
TEL: 0791-58-2503 FAX: 0791-58-2504 E-mail: ando@lasti.himeji-tech.ac.jp

Table 1. Main parameters of the NewSUBARU storage ring

入射エネルギー	10 GeV
最大エネルギー	1.5 GeV
周長	118.73 m
RF 周波数	499.951 MHz
ハーモニク数	198
臨界光子エネルギー	2.33 keV@1.5 GeV 0.69 keV@1.0 GeV

Table 2. Characteristic of the storage ring

寿命 (100 mA)	8 hrs@1.5 GeV
1 GeV での性能	
最大蓄積電流	50 mA (単バンチ) 500 mA (160バンチ)
水平エミッタンス	38 nm
カップリング係数	1%
モーメント・コンパクション・ファクター	1.8×10^{-3}
自然エネルギー広がり	0.047%
利用時ビーム強度	~300 mA @every 10-sec injection

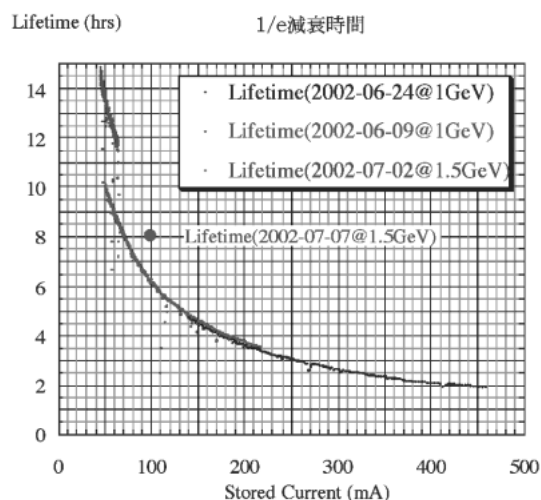


Figure 2. Beam lifetime v.s. stored current.

流減少と共に減衰時間が長くなるので、本図の示す減衰時間は実効的に半減寿命と一致している。1.5 GeV への加速は約15分の時間をかけている。

閉軌道の歪み (COD) は 1 GeV では最大ピーク値で 25 μm まで補正し利用に供しているが、1.5 GeV では補正電磁石電源の電流容量から、水平方向では最大値で 200 μm である。2002年の夏期運転停止中の電磁石巻き線増強により本問題は解決され、最大値 25 μm 以下が達せられる。

2.2 Twiss parameter 及び運動量分散

電子ビームの粒子光学を表す Twiss parameter の所謂 β 関数は、四極電磁石の励磁を微小変化させたときのベータ

トロン振動数の変化から計算し、設計値と 10% 以内での一致を確認している。

ニュースバル蓄積リングは他の通例のリングと同様、挿入光源が設置される直線部は運動量分散がないように設計されている。高周波加速周波数を変えた時の、電子ビームの軌道の変化を解析したところ、直線部以外の運動量分散は設計通りであるが、momentum compaction factor α_p は 1.8×10^{-3} であることが判明した。これは運動量分散を制御する 4 極電磁石の設定に -0.35% の誤差があり、直線部に有意の運動量分散が生じていることによる。完全にゼロにできることは確認してあるが、利用運転においては実用上問題がないのでこのままにしている。この解析には六極磁場と測定から得られた捩れ四極磁場²⁾を取り込んである。

2.3 1 GeV でのビーム・サイズと自然エミッタンス

電子蓄積リングでは Microwave Instability によりバンチ当たりの蓄積電流と共に運動量広がりはず必ず増大する。即ち運動量分散が有意なところでは、水平 (x) 方向のビーム・サイズも増大する。SR 可視光の CCD カメラでの測定結果³⁾から蓄積電流の影響が無視できる微弱電流では、Natural Emittance : 38 nm を得ている。また 1 mA 以下の単バンチ電子ビームを入射バンプ電磁石で削り、精度は若干劣るが、その生存率からビーム・サイズを求めエミッタンスを評価すると、36 nm という値を得た。以上から自然エミッタンスは 38 nm と結論できる。

垂直 (y) 方向ビーム・サイズは上記測定の精度以下であるので、捻れ 4 極磁場によるカップリングを評価した。一つは、y 方向の軌道に局所的な瘤を作り x 方向の軌道シフトから捻れ 4 極磁場の分布を求めた。もう一つは、2 台の補正用捻れ 4 極電磁石で y 方向・ビームサイズが最小になる設定を求めた。得られた分布による、カップリング共鳴の励起力を、補正電磁石によるものとを比較したところ、位相は 180° ずれているが、強さ (λ) はほとんど同一という結果を得た。即ち $\lambda = 5.3 \times 10^{-3}$ 。通常の動作点は、 $\Delta = \nu_x - \nu_y = 0.07$ 、であるので、無補正時のカップリング係数は 1.1% である²⁾。

3. 極端紫外線リソグラフィの研究 (BL-3)

情報機器に用いられている中央演算素子や記憶素子の高集積化は、1970年代より 3 年に 4 倍のペース開発が進められてきた。2007年には最小線幅 70 nm をもつ 64 Gbit 級の半導体メモリーや演算速度 10 GHz の MPU の生産が計画されている。このためのキー技術がリソグラフィ技術であり、微細な線幅をもつ各種パターンをシリコン基板上に高精度に形成する加工技術である。現在用いられている露光装置は、波長 248 nm の KrF エキシマレーザ光を光源とし、4 倍体のパターンを原画として用い、これをウェハ上に縮小投影光学系により露光する方式である。縮小露光装置の解像力は用いる光の波長に比例し、波長が短いほど微細なパターンを形成できる。KrF エキシマレーザを用い

る露光装置の次の世代として、波長193 nmのArFエキシマレーザを用いる露光装置が次世代半導体開発に準備されており、更にはF2レーザ(154 nm)も検討されている。

しかしながら、屈折光学系を用いた更なる短波長化には材料面での限界があり、その先は波長を13 nmまで短くした極端紫外線を用いることが検討されている。この波長域での光はすべての物質で強く吸収されるとともに、屈折率が1に近いため、原理的に屈折によるレンズ作用を利用することができない。そこで反射鏡を使用した縮小光学系が開発された。13 nm用の反射膜としてはMo/Siの多層膜が用いられており、直入射で65%以上の反射率が得られている。次々世代のリソグラフィ技術である極端外線露光ではこのMo/Si多層膜を光学系やマスク基板に形成し、反射型の縮小光学系を構成する事により、ウェハ上で70 nm以下のパターンを形成しようとするものであり、Fig. 3に姫路工業大学が開発した極端紫外線露光装置の概要を示す。この装置は3枚の非球面からなる縮小光学系、マスクとウェハの同期駆動ステージ、マスクとウェハの位置合せ光学系、ウェハの焦点検出光学系、8インチウェハのロードロック機構とからなる。露光光学系の露光領域は1ショットで30 mm×1 mmとし、半導体のチップサイズ例えば30 mm×40 mmを露光するには、マスクとウェハを倍率を考慮して同期走査駆動させることにより行なえる。Table 3に装置の仕様を示す。

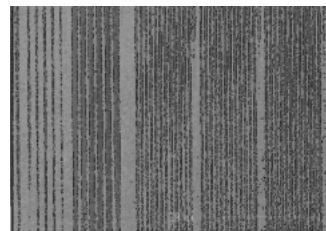
これまでに、上記の露光装置を用いて解像度評価のための露光実験を進めている。レジストには化学増幅系の各種レジストならびに非化学増幅系レジストを用いている。Figure 4(a)に10 mm×1 mmの露光領域での0.1 μmのL&Sを示す。化学増幅系のネガ、ポジ、非化学増幅系ともに十分解像されており、とくに非化学増幅系の場合にはエッジもシャープである。

Figure 4(b)に80 nmのパターン特性を示す。ポジ型の化学増幅系でも十分な解像特性が得られているが更なるエッジラフネスの低減が必要となる。Figure 4(c)には40 nm, 80 nmのL&Sパターンを示す。レジストにはZEP520を用いており、レジスト膜は0.1 μmである。40 nmの孤立パ

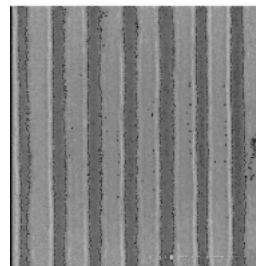
タン形成も可能である。Figure 5はマスクとウェハのステージ走査によって大面積10 mm×10 mmの露光領域を

Table 3. Specification of EUVL exposure tool

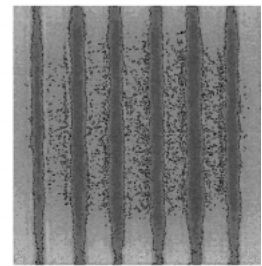
露光波長λ	13.5 nm
開口数NA	0.1
露光フィールド	
1フィールド	30 mm×1 mm
走査時	30 mm×28 mm
解像度	70 nm
焦点深度	1 μm (70 nm)
ウェハ	8インチまで
マスク	8インチ, もしくは6025基板



(a)



(b)



(c)

Figure 4. Replicated resist pattern. (a) 0.1 μm line and space pattern, (b) 80 nm line and space pattern, (c) 40 nm line and 80 nm space pattern.

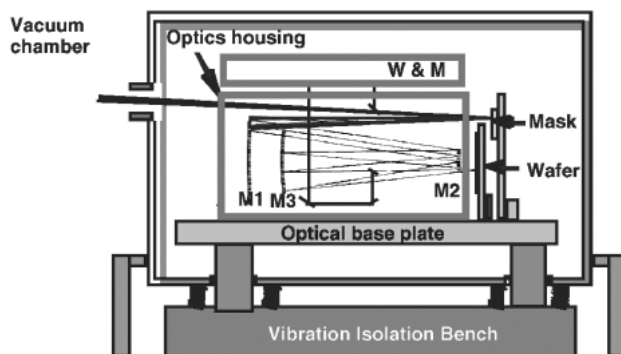


Figure 3. Exposure tool (ETS-1) at HIT.

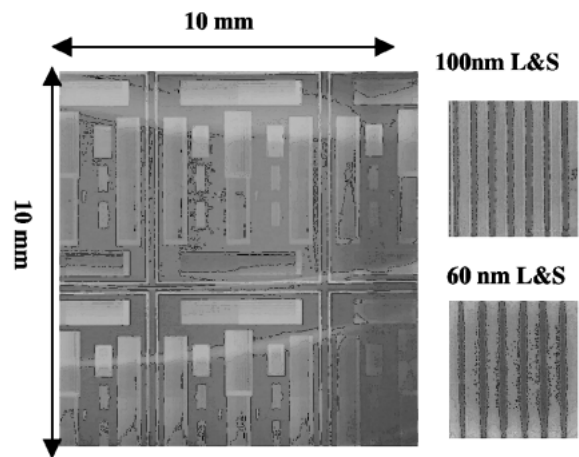


Figure 5. Large field exposure pattern.

得たものである。垂直方向は60 nm までクリアに転写できているが、走査方向に垂直なパターンは同期精度の誤差で十分分解像していない。このように大面積化ではステージの性能の向上が重要である。

詳しくは文献4)~16)を参照されたい。

4. 新素材開発ビームライン (BL-6, BL-7)

新素材開発分野では放射光とナノテクノロジーを融合した放射光ナノテクノロジーによる新物質創製および評価を研究目的とし、光励起反応用のビームライン (BL-6) と新物質創製用のビームライン (BL-7) を有している。BL-6は、偏向電磁石を光源とし、BL-7はアンジュレータを光源として、多層膜鏡分光器を備えた高輝度ビームライン (7A) と回折格子分光器を備えた高エネルギー分解能ビームライン (7B) の2つのブランチラインで構成され、50-800 eVのアンジュレータ光を時分割利用することができる¹⁷⁾。この3種のラインの有機的な結合により、新物質探索の強力な装置システムを形成している。50-800 eVは化学試料として重要である第2周期の元素 (C, N, O) の1s軌道のエネルギー、もしくは半導体として重要なSiの2pのエネルギーに相当し、新物質創製研究に非常に重要なエネルギー領域であるが、適した窓材がないことや高輝度の光源がないためにこれまでの研究例が少なく、今後の

研究展開が待たれている領域である。Figure 6にBL-6のサンプル位置における光フラックスの計算値を、また、Figure 7にBL-7の光源であるアンジュレータスペクトルを示した。BL-7Bは物性評価用のラインとして吸収端近傍X線吸収微細構造スペクトル (NEXAFS) を測定できるほか、半径150 mmの半球型エネルギー分析器を用いた光電子分光スペクトル (PES) の測定が可能である。Figure 8に金のフェルミ端近傍の光電子分光スペクトルを示す。分解能 $E/\Delta E \sim 2700$ が得られており、ほぼ計算値に近い性能が達成されている。

本稿では研究成果の例としてSOG (スピノングラス) の微細加工を紹介する¹⁸⁾。現在、半導体デバイスの開発において配線幅は小さくなり、多層膜配線が進行しているが、一方で、RC (resistance-capacitance) カップリングによるクロストークノイズや配線遅延等の影響が多くなっており、これを防ぐために層間絶縁膜の誘電率を下げる方向に開発が進んでいる。最近の低誘電率 (Low-k) 材料の傾向としては、SiLKTM やFLARETM などの有機系やフッ素系などのLow-k材料が用いられてきているが、スピノングラス (Spin On Glass: SOG, 主成分 SiO_2) 系にポーラス状の空孔を入れることにより、誘電率を1.5まで下げることが可能になっている。また、Low-k材料の性能を

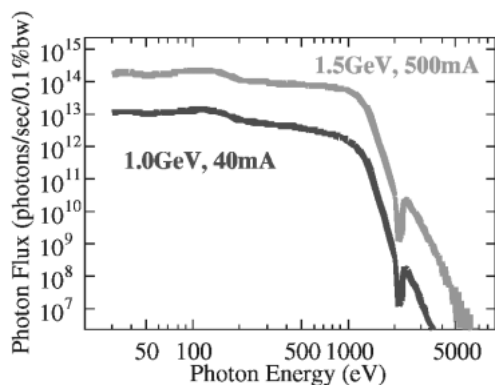


Figure 6. Brightness of BL-6.

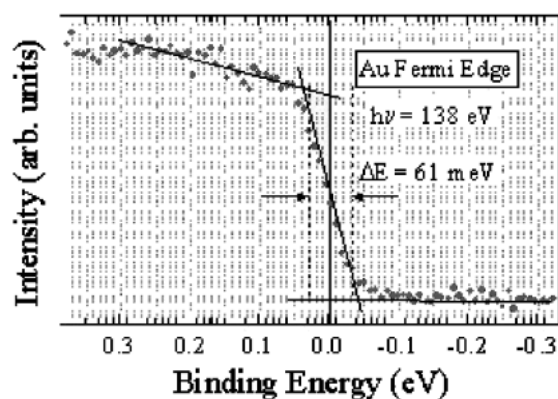


Figure 8. Photo-electron spectrum near Fermi edge of Au.

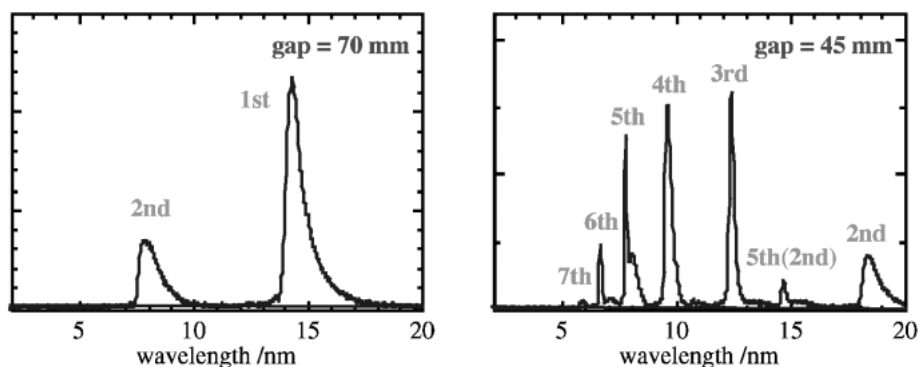


Figure 7. Measured spectra of short undulator at 1 GeV the ordinates are linear in arbitrary unit.

上げるためにプラズマ処理をしたり、ポーラスの Low-k 材料にプラズマ酸化を行ったり、Low-k 材料を電子ビームによりキュアを行って吸湿を防いだりする研究が行われている。しかし、Low-k 材料に放射光を照射して改質をこころみた研究はまだない。そこで、本研究では代表的な層間絶縁膜材料である SOG に放射光を照射したときの特性を調べた。

試料の SOG は Honeywell 社製の Accuglass512B と USG-50 を用いた。Accuglass512B は、Fig. 9 (a) に示すような構造をもち ($R = \text{CH}_3$)、主成分はシロキサン (siloxane) で 14% の炭素分を含む。USG-50 は同図 (b) に示すような構造をもち、主成分はシリケート (silicate) で炭素分は含まない。これらの SOG サンプルは、1 cm 角の Si 基板上に 3000 rpm で回転塗布し、300°C で 1 h キュアを行った。キュア後の膜厚は Accuglass512B では 500 nm で、USG-50 では 300 nm であった。

放射光照射実験は BL-6 にて、試料基板温度：室温であり、照射中のチェンバー真空度は： $\sim 1 \times 10^{-5}$ Pa で行った。金メッシュをマスクとして Accuglass512B にドーズ量 150 mA・h の放射光を照射した結果を Fig. 10 に示す。同図 (a) の光学顕微鏡写真では、金メッシュで放射光が遮断された部分が白くなっている。また、(a) の矢印の断面を Dektak で測定した結果を (b) に示す。この結果から SOG 材料は室温で放射光照射により加工できることが分かった。加工深さの Dose 量依存性を Fig. 11 に示す。USG-50 に比べて炭素分の含有率の大きい Accuglass512B では加工深さも大きい。炭素分が SOG の加工を促進していると考えられる。

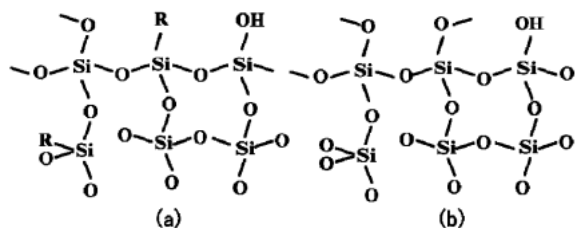


Figure 9. (a) Accuglass512B, main component: siloxane, $R = \text{CH}_3$. (b) USG-50, main component: silicate.

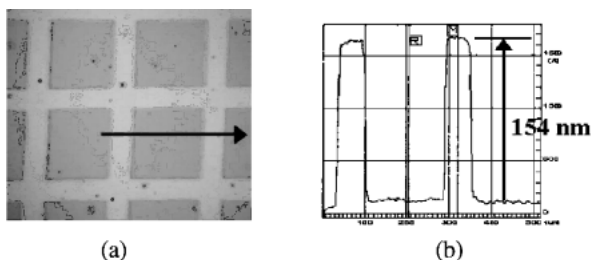


Figure 10. Surface modification of Accuglass512B. (a) picture of optical microscope, (b) cross section of (a).

SOG 材料の放射光照射前後の様子を X 線光電子分光 (X-ray photoelectron spectroscopy: XPS) により調べた。X 線源は Mg-K α である。その結果を Fig. 12 に示す。USG-50 は炭素分を含まないにも関わらず、C1s のピークが放射光照射前後で確認された。この C1s ピークは SOG 表面上の炭素汚染分であると考えられる。放射光照射後の USG-50 はこの炭素汚染分による C1s のピークの増加がみられ、Si2s, Si2p, O1s のピークが照射前に比べて 33% 減少している。しかし、これらの相対的割合が変化していないことから USG-50 の化学組成は変化していないと考えられる。USG-50 では放射光照射前後で化学組成比が変化していないことから、加工は酸素および SiO の脱離によって進行したものと考えられる。一方、Accuglass512B の方は Si2s, Si2p, C1s のピーク強度は放射光の照射前後ではほぼ一定であるが、O1s のピーク強度は照射後で 26% 減少している。これは化学組成比に変化が生じ酸素が少なくなっていることを示している。このことから Accuglass512B の加工は酸素と SiO の脱離によって進行するが、酸素の脱離の影響がより大きいと考えられる。Accuglass512B は $R = \text{CH}_3$ のアルキル基が添加されており、これによって SOG の束縛エネルギーが弱くなり加工速度が速くなると考えられる。

以上のように USG-50 の加工は化学組成を変えずに酸素や SiO の脱離により進行するが、Accuglass512B ではア

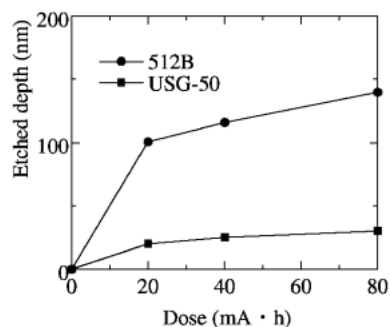


Figure 11. Etched depth of SOG vs. radiation dose.

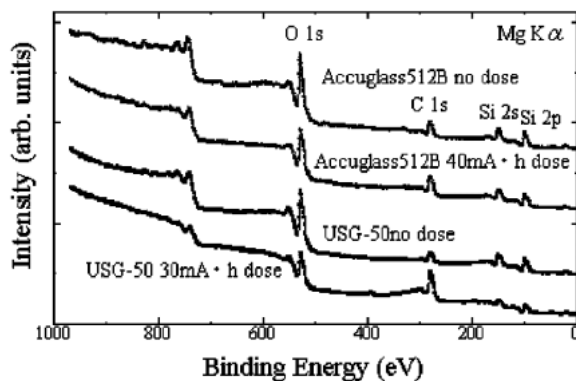


Figure 12. Photo-electron spectra of PTFE.

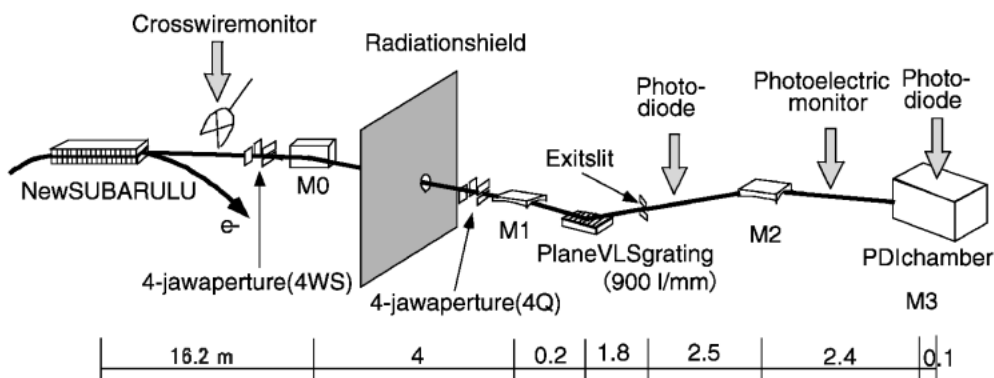


Figure 13. Schematic diagram of beam line (BL9) at the NewSUBARU long undulator.

ルキル基の影響で酸素の脱離速度が上がり、加工速度が上昇する。アルキル基を SOG 材料に含有させることで、放射光照射による加工速度と酸素の脱離の増速を生じさせることがわかった。

新素材ビームラインではこの他に放射光照射による PTFE の表面改質研究^{19,20})や放射光誘起屈折率変化を利用した光導波路研究²¹)など放射光を利用した機能性表面の開発研究に成果を上げている。今後、内殻電子励起による選択的反応を用いた新物質創製研究や蛍光 X 線分光装置を利用したより詳細な物性探索研究を行っていく予定である。

5. 長尺アンジュレータと点回折干渉波面計測 (BL-9)

5.1 長尺アンジュレータとビームライン

Figure 1 に示すように、長直線部に長さ約11 m の長尺アンジュレータ (LU ; planar 型, 周期54 mm, 周期数200) が設置されている。ビームライン模式図を Fig. 13 に示す。分光器は Hettrick-Underwood 型マウントの定偏角不等間隔刻線平面回折格子 (900 l/mm) 分光器である。この分光器は輻射光を有効利用するため入射スリットなしであり、いわば光源を入射スリットとしている²²)。M0~M2 は球面ミラーであり、トロイダルミラー : M3 は PDI 実験チャンバーの中に設置されている。分光器の出射スリットを通った光は M2, M3 により、PDI 装置の入射ピンホール位置に集光する。Figure 14 は、Kr ガスの $3d_{5/2, 3/2} \rightarrow np$ 遷移による光イオン化スペクトルの測定結果を示す。BESSY の SX700/II 高分解能分光器で測定報告された同スペクトル²³)も実線で示した。本分光器では出射スリット : 50 μm の時、SX700/II とほとんど遜色のない分解能が得られる。詳しい解析は十分ではないが、半値幅等から評価した分解能は、 $\lambda/\Delta\lambda$ として少なくとも1000以上あるものと見積られる。(設計時の理論分解能は、この時2500程度である。)

本分光器を用いて測定した蓄積電子エネルギー1.0 GeV における LU の輻射スペクトルを Fig. 15 に示す。この測

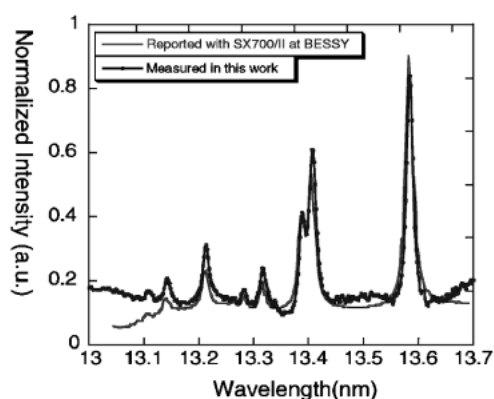


Figure 14. Photo ionization spectrum of the gas-phase Kr $3d_{5/2, 3/2} \rightarrow np$ transition. The dotted line represents the data of the present measurement, and the solid line represents the data from previous reports by SX700/II in BESSY.

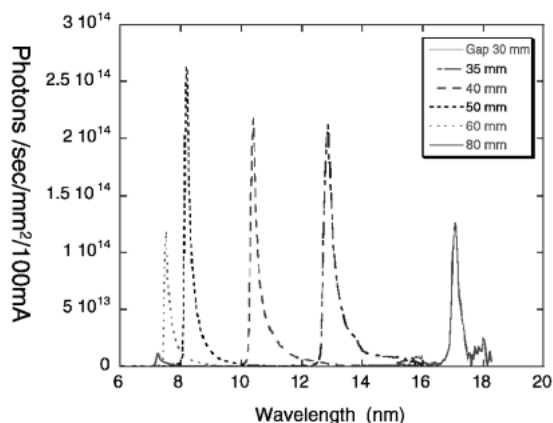


Figure 15. Radiation spectra (photon flux density at 4WS slit) of the LU at various undulator gaps.

定の検出器には、M2 ミラー下流にある感度校正した Si フォトダイオード (PD) を用いた。縦軸は 4 WS 位置における光子フラックス密度 (Photon/sec/mm²/100 mA) である。プリリアンスは 10^{17} (photons/sec/mm²/mrad²/

100 mA)のオーダーであり、理論計算値とはほぼ一致する。光子輸送効率の評価には、アンジュレータギャップを最大に開いた時に得られる偏向電磁石 (BM) からのエッジ放射強度測定を用いた。LU 光は整ったアンジュレータスペクトルを示しており、線幅は波長13 nm の1次光において、ギャップ長35 mm に対して $\lambda/\Delta\lambda \sim 41$ 程度となった。

5.2 At-wavelength 波面計測

結像光学系において回折限界に近い結像性能を得るためには、その光学系の使用波長 (at-wavelength) における波面収差を知ることが、きわめて重要である。次世代の超LSI 製造技術の候補のひとつである極紫外光リソグラフィ (EUVL) 技術においては、回折限界に近い結像性能が求められている。EUVL 法では、光学系は0.5 nm 以下の波面収差になるように基板を加工したり、アライメントしたりする必要がある。従来、光学系の波面をこのような高精度に計測すること自体が困難であったが、'96年ころより Lawrence Berkeley National Laboratory で、極紫外光を用いて点回折干渉 (PDI) 法で波面計測する方法が提案され²⁴⁾、その技術開発が進められてきた。本研究では、LU Uを用いて、at-wavelength PDI 法を学ぶとともに、その測定精度や問題点を明らかにすることを目的として、エンドステーションに PDI 実験装置を設置した。本研究は、通産省プロジェクト「超先端電子技術促進事業」の一環として、NEDO の委託を受け、研究組合超先端電子技術開発機構 (ASET) との共同研究として行った^{25,26)}。

PDI 法は光が微小なピンホールを通るとき、回折で理想的な球面波を生じ、これを基準波面に利用する干渉波面計測法である。Figure 16 に PDI 法の原理をあらわす模式図を示す。PDI 実験光学系は図のようにふたつのピンホール (入射および PDI ピンホール) を持ち、間にテスト光学系 (本研究の場合2枚の球面反射鏡よりなる Schwarzschild 縮小光学系) が入る。0.65 μm 径の入射ピンホールから出た球面波はビームスプリッタとして働く透過型回折格子により複数の回折光に分けられ、テスト光学系を経て、PDI マスク上に集光する。集光光のうち、例

えば0次の回折光はPDI マスク上の0.1 μm 径のピンホールを透過し、このピンホールにより基準球面波が生成される。一方、1次回折光はPDI マスク上の比較的大きな窓 (2.7 μm 径) を、テスト光学系の波面収差情報を保存したまま透過する (テスト波面)。両者の波面を干渉させて生じた干渉縞を CCD カメラで撮影する。また、透過型回折格子を動かすことにより、お互いの球面波で位相差の異なる5パケットの干渉縞を撮影し、それらから波面収差を解析する (位相シフト法)。

5.3 PDI 実験

現在入射ピンホール位置でのビームスポットサイズは約80 W \times 120 H (μm^2) であり、ピンホールサイズに比べて4桁ほど大きい。下流に K-B 光学系を用いた集光系を検討しており²⁷⁾、これが実現すれば、2桁程度の集光性能向上を期待できる。

透過型回折格子をビームスプリッタに用いることにより、広い波長範囲にわたり位相差と光路長差の比が一定となり、高い単色性は必要でないことがわかった²⁶⁾ので、LU 光は分光せずに、分光器の0次光をそのまま使って PDI 実験を行っている。アンジュレータの高次光等は多層膜の反射を使って除去することができ²⁷⁾、線幅 $\lambda/\Delta\lambda = 40$ 程度であっても CCD の全領域にわたって、高いコントラストの干渉縞を得ることができた^{26,28)}。現在、1枚の干渉縞の撮像時間は5~20秒である。

回折限界性能を調べるための65 nm 径のピンホールを用いた場合には、0次光透過量が少なすぎて十分なコントラストが得られなかったが、ピンホールを大きめの、170 nm 径のもので干渉実験を行い、Fig. 17 (a) に示すような極紫外光による PDI 干渉縞が得られた。またその解析から (b) に示すような光学系の光路差 (OPD) マップを得ることができた。ピンホールは空間周波数フィルターとして働くため、大きな径のピンホールを用いた場合には低空間周波数の波面収差はピンホールを透過してしまう。今回用いた170 nm 径のピンホールでは、約2.5 cycles/NA より低い周波数の収差は透過しており、これ以下の低周波の成分は正確に測定できていないものと考えられる。

6. LIGA ビームライン (BL-11)

6.1 概要

LIGA (Lithographite <リソグラフィ>, Galvanofornung <電鋳>, Abformung <転写成型>) プロセスは1980年にドイツのカールスルーエ研究所 (FzK) によって提唱された²⁹⁾。このプロセスは、半導体回路パターン向けの X 線等倍リソグラフィ (1.5~2.5 KeV) より高いエネルギー領域 (4.0 KeV 以上) の軟 X 線の透過能を利用し、高アスペクト比 (数十以上) の μm レベルのパターンを作製するものである。このプロセスの特長として電鋳マスターを用いた成形プロセスにより、一回の放射光露光で大量のパターン複製が可能なが挙げられる。最近では、UV 露光

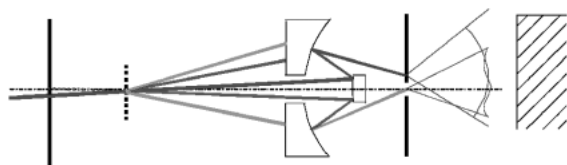
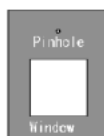
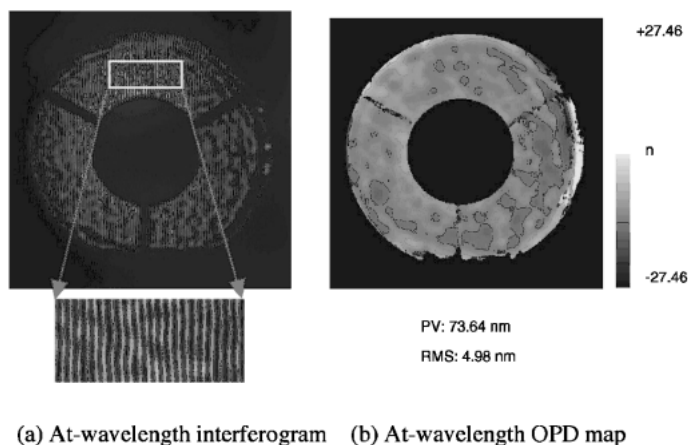


Figure 16. Schematic drawing of at-wavelength PS-PDI experiment using Schwarzschild optics.





(a) At-wavelength interferogram (b) At-wavelength OPD map

Figure 17. At-wavelength interferogram and an OPD map.

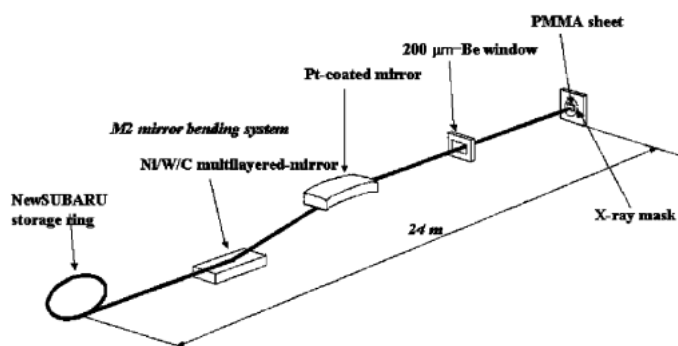


Figure 18. The outline of BL11.

によっても高さ数百 μm の高アスペクト構造体が形成可能なエポキシ系の厚膜レジストが開発されたため、LIGAプロセスは放射光によるものと、UVによるものに2分化して発達しているが、パタンの形成精度やプロセスの再現性の点で放射光LIGAには依然として大きな優位性がある。世界の放射光LIGAの研究開発対象は以下の3項目に絞られると言って良い。

- 1) 高エネルギー (1.5 GeV 以上) の蓄積リングによる X 線を用い、より深い (500 μm 以上) 高アスペクト比の構造体を作製するための研究。
- 2) 任意の3次元マイクロ立体構造を実現するための研究
- 3) リソグラフィー以降の、電鍍、成形プロセスの高度化と実用プロセスの開発。

我々は、特に進展が遅れている上記2), 3)の項目にターゲット絞った研究開発を進めている。また、X線によるパターンニング以降の、電鍍、樹脂成形工程を含めたトータル量産技術としてのプロセス開発を行い、各種IT、バイオ関連産業の各種マイクロデバイスの開発に適用したので一部を紹介する。

6.2 ビームライン (BL-11)³⁰⁾

Figure 18に BL-11の光学系配置図を示す。偏向磁石よ

り水平発散角 8 mrad で取り出した放射光を、Ni/W/C 多層膜ミラー、Pt 蒸着円筒ミラーを用い 6 keV 以上の高エネルギー成分を減衰した後、真空隔壁も兼ねた 200 μm 厚の Be 窓を用いて低エネルギー成分をカットし、1.5~6 KeV の軟 X 線を選択する光学系となっている。第2ミラー (Pt 蒸着の単結晶 Si 円筒形ミラー) には曲げ機構が付加されている。この機構は、主に放射光の分散角を抑え平行度を上げるために用いるが、放射光のスペクトルを変化させずに単位面積あたりの放射光強度を変化できるため、複数の感度の異なるレジストを使い分ける場合にも有効である。

Si 固体半導体検出器 (SSD) による本ビームラインの輝度スペクトルを Fig. 19に示す (実線; 理論値, “○”; 実測値, 左: リング蓄積エネルギー 1.0 GeV, 右: 1.5 GeV)。光子エネルギーは、Al フィルター (20 μm 厚) からの $K\alpha$ 線 (1.486 keV) で較正した。図より計算値と実測値で非常に良い一致が見られた。また、出力光輝度を Au 光電流モニター測定によって大まかに見積もった結果、理論値とオーダーが一致した結果が得られ、ほぼ設計仕様を満たすビームラインの性能が得られた事が確認された。

エンドステーションの露光チェンバーは He ガスで置換

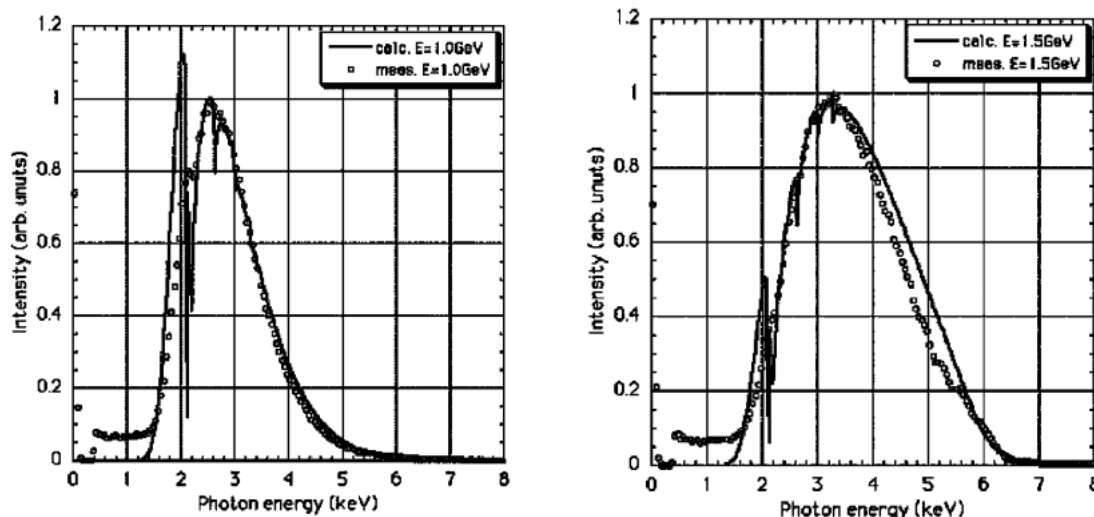


Figure 19. Measured spectra of BL-11. line: theoretical calculation, open circle: measured, left: 1.0 GeV and right: 1.5 GeV.

し、X線マスクとレジスト材を露光ステージ上に固定し、PC制御により垂直に走査する。最大走査範囲は50 mmである。実際の露光は、必要とされる露光ステージの走査距離や速度などを考慮して、制御プログラムに各種露光条件を打ち込めば自動露光されるシステムになっている。露光のスループットは現露光システムでは、PMMAシートに対して、電子ビームのエネルギー：1 GeV、蓄積電流：200 mAでは $\sim 10 \mu\text{m}/\text{分}$ であった。1.5 GeVではこの約30倍の加工速度があり、高エネルギーX線成分の影響が顕著なことを実験的に確認した。X線レジストの露光感度のエネルギー依存性については、現在分光X線を用いた測定を平行して行っているが、これは用いるX線エネルギーに整合したレジストを選択する上で重要なデータとなると考えている。以上のようにビームラインBL11では、スペクトル形状及び、強度において、十分な出力光特性が得られている。

6.3 3次元マイクロ立体構造形成の試み

立体的なマイクロ構造体を作製する方法はいくつか提案されているが、大まかに分けると以下の3つの方法がある。

- X線マスクを走査させながら露光を行い、走査スピードや露光時間を変化させたり、多重回数の露光を行うことでレジストパターン上に擬似的に蓄積露光量の3次元分布を形成する方法。
- ビームを絞り、露光ステージを立体的に走査・回転させながら直接描画的に露光するX線造形方法³¹⁾。
- 吸収体の厚みに2次元分布を持つX線マスクを用い、X線の吸収の違いを用いてレジストパターン上に蓄積露光量の3次元分布を形成する方法³²⁾。

現在最も広く用いられている方法はa)であるが、得られる立体形状に制限があり露光スループットも低い欠点があ

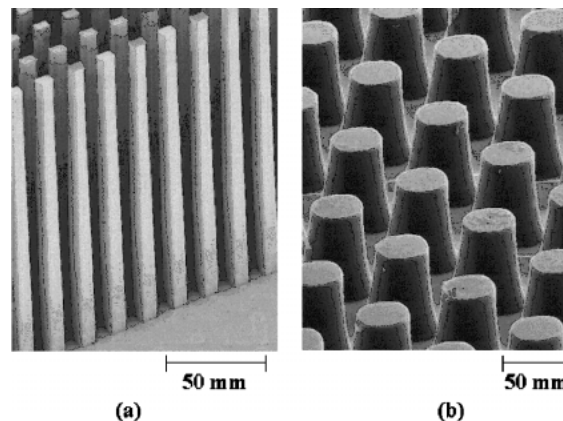


Figure 20. SEM images of PMMA, (a) square poles, (b) 3D columns made by sidewall tilting.

る。我々は任意3次元形状の実現を目標に全ての方法を試みている。特にb)では、専用のX線マスクとレジスト基板を別々に移動可能な9軸の露光ステージを開発し、立体構造形成のために基礎検討を開始したところである。X線マスクとレジスト基板との位置合わせ精度は $0.1 \mu\text{m}$ 以下である。一方c)の手法は我々が独自に開発を進めて来た手法であり、スループットが高い、立体構造の任意性が高い等の特徴を有しているが、いかに吸収体厚みに2次元分布を持つX線マスクを作製するかが技術的ポイントである。我々は、電子ビーム描画装置を用い、ナノレベルエリアの露光量制御によって、立体吸収体を持つX線マスクを高精度に作製するプロセスを開発している。以下に立体構造体の作製例を示す。Figure 20(a)には四角柱の片側面のみが傾斜面になっているレジスト構造体。(b)は $\phi 50 \mu\text{m}$ の傾斜面のついた円錐形レジスト構造体。これらはX線マスクの吸収体の材質にAuを使用し、厚みを0

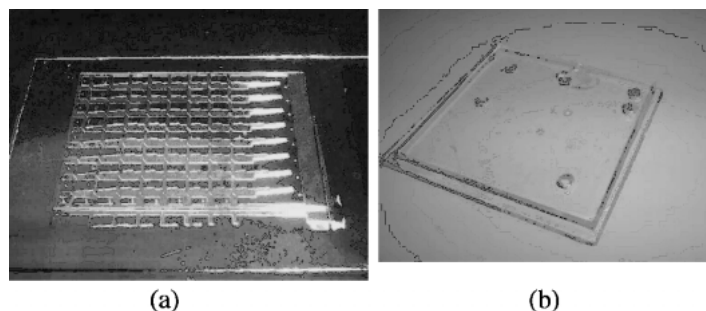


Figure 21. Photographs of microdevices of (a): the mold master of an 8×8 optical switch, (b): the plastic microchip for electrophoresis.

～5 μm の範囲で制御している。実際に X 線マスクの吸収体厚みを制御し立体マイクロ構造体を形成した。構造体側面に傾斜面を付加することは、課題となっている樹脂成形最終工程の金型離型にも有利であると考えられる。

6.4 実際のマイクロデバイスへの適用

我々は、LIGA による X 線ディープリソグラフィ工程と共に、後続工程の電鍍や樹脂成形プロセスの開発も同時に進め、既に高強度の Ni 電鍍金型、ホットエンボシングや精密射出成形装置を用いたマイクロ樹脂成形体の試作を行った。さらに IT、バイオ産業関連のマイクロデバイスに適用した。具体的には次世代携帯端末の小型化に対応したマイクロ電気部品、携帯端末用の光学部品、ブロードバンドに対応した 8×8 の光スイッチ、使い捨て型の樹脂製のマイクロ電気泳動チップの開発を行った。一例として、試作した 8×8 光スイッチの PMMA 金型マスターとマイクロ電気泳動チップの写真を Fig. 21 (a), (b) にそれぞれ示した。なお本研究の一部は、財新産業創造研究機構 (NIRO)、立川商工会議所がそれぞれ新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から委託された地域新生コンソーシアムの助成と科研費基盤研究 B の援助を受けて行われた。

7. 電子・レーザー後方コンプトン散乱による γ 線³³⁾

同期された、極短パルス放射光発生研究の一つとして、また電子ビーム診断の一環とし、本システムの研究を行っているが、将来的には低スピン状態の励起を選択的に引き起こす光反応実験に使用することを目指している。

BL-1 の長直線部 (約 14 m) を使用した。この長直線部は β 関数が大きく変化するため、電子・レーザーの衝突断面が必ずしも得をするわけではない。実験ホールに置かれたレーザー源からのレーザー光は 6 枚のミラー、1 枚のレンズ (焦点距離 5 m) で長直線部中心に focus させる。レーザー源からこの中心までの距離は 22 m である。発生 γ 線はミラー (M6) を通過して真空外へ出る。20 mm ϕ , 10 mm ϕ , 2 mm ϕ の鉛コリメータ (厚み 90 mm) が用意されており、外から制御、交換可能になっている。このコリメータで長直線部中心からみて、その開口角は 0° を中

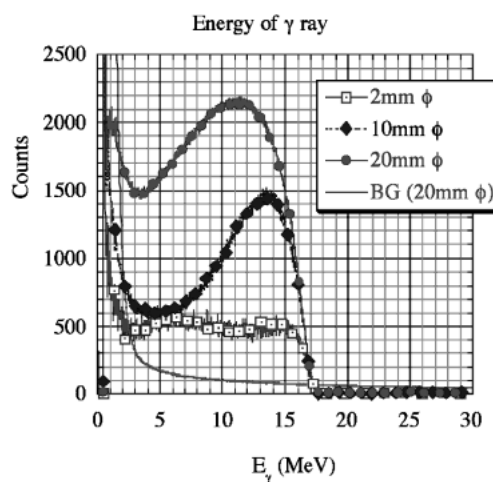


Figure 22. Energy spectrum vs. collimator.

心におおよそ ± 0.66 mrad., ± 0.33 mrad., ± 0.066 mrad. に相当している。検出器は 3" ϕ × 3" NaI シンチレータ検出器を使用した。この検出器は鉛コリメータから 1 m 下流の所に置かれている。

レーザー源は Nd YVO₄ laser (1,064 nm, max. 5 W) で、レーザー源出口の横方向および縦方向 waist 径は 0.42 mm, 角度は 3.4 mrad (full) である。途中のレンズによる倍率は約 2 倍であり、衝突中心部でのレーザーの径は約 1 mm になる。これは、電子ビームのエミッタンスを横縦それぞれ 4.02×10^{-8} m \cdot rad および 4.38×10^{-9} m \cdot rad. とし、衝突中心で完全に重なるように設定した。レーザー源を駆動できるようにして、またミラー (M1, M2), コリメータ位置を調整して、発生 ϕ 線数が最大になるように電子ビーム軸とレーザー光軸の調整を行った。

電子ビームエネルギー: 1 GeV, その平均電流 10 mA, レーザー出力を 0.36 W での、コリメータに依存したエネルギースペクトルおよび制動放射 γ 線スペクトルの測定結果を Fig. 22 に示す。エネルギーは 40 K の 1.461 MeV および数種の標準 γ 線で校正されている。 γ 線の最高エネルギー 17.6 MeV は正面衝突での計算と一致している。

得られたエネルギースペクトルと EGS4³⁴⁾を使用したシ

ミュレーション計算と比較した。計算では、各々の衝突点でのエネルギー分布、衝突断面の位置依存、発生 γ 線のミラー、窓等通過にともなう減衰、検出器効率等を取り入れている。測定と計算との一致は非常に良い。この結果から、0.67 mrad. のコリメーションに対して、約 3×10^4 個/秒、また0.33 mrad. および0.067 mrad. のコリメーションに対して、各々約 1×10^4 個/秒、約 6×10^3 個/秒を得た。この γ 線収量は、残留ガスでの制動輻射による大量の背景 γ 線と、検出器の最大計数速度で制限されている。

これまでは検出器としてNaIを使用してきたが、Ge半導体検出器に交換し、電子電流、レーザー出力を上げて、光反応実験を行う予定である。また、検出器はリングの設置されたトンネル内に置いているが、近い将来トンネル外に移し、この施設を一層充実させたいと考えている。

7. おわりに

SPRING-8 (高輝度光科学研究センター: JASRI, 日本原子力研究所, 理化学研究所) には、ニュースバルの設計・建設・立ち上げから利用運転実現において多大の御協力をいただきました。改めてここに謝意を表します。とりわけ加速器部門, 施設管理部門, 放射線安全管理室及び事務局の皆様にお礼申し上げます。また挿入光源の調整での理化学研究所播磨研究所の北村英男氏及び田中隆次氏のご尽力に感謝申し上げます。PDI 研究では研究組合 ASET の五明由夫氏, 杉崎克己氏及び朱郁葱氏の協力をいただきましたことに感謝いたします。

なおビームラインの詳細については冊子を用意しております。利用に関する問い合わせも含め、希望される方は高度研事務長 (電話: 0791-58-0259) へご連絡下さい。また以下のホームページから必要な情報やコンタクトパーソンも得られますのでご利用下さい。

<http://www.lasti.himeji-tech.ac.jp>

参考文献

- 1) 安東愛之輔: ニュースバル計画, 放射光 **19**, 260 (1996).
A. Ando et al.: J. Synchrotron Rad. **5**, 342 (1998).
- 2) Y. Fukuda, T. Uyama, S. Hashimoto and A. Ando: Nucl. Instr. Methods **A485**, 851 (2002).
- 3) A. Ando, Y. Fukuda and S. Hashimoto: Nucl. Instr. Methods **A481**, 43 (2002).
- 4) H. Kinoshita, K. Kurihara, Y. Ishii and Y. Torii: J. Vac. Sci. Technol. **B7**, 1648 (1989).
- 5) International Technology Roadmap for Semiconductors, International SEMATECH, 2000.
- 6) T. Watanabe, K. Mashima, M. Niibe and H. Kinoshita: Jpn. J. Appl. Phys. **36**, 7597 (1997).
- 7) H. Kinoshita, T. Watanabe, D. Bajuk, J. Daniel, Y. Kimpara, M. Kriese and Y. Platonov: Proc. SPIE **3767** 164 (1999).
- 8) T. Watanabe, H. Kinoshita, H. Nii, Y. Li, K. Hamamoto, T. Oshino, K. Sugisaki, K. Murakami, S. Irie, S. Shirayone, Y. Gomei and S. Okazaki: J. Vac. Sci. Technol. **B18**, 2905 (2000).
- 9) T. Watanabe, T. Haga, M. Niibe and H. Kinoshita: J. Synchrotron Rad. **5**, 1149 (1998).
- 10) S. Hashimoto, A. Ando, S. Amano, Y. Haruyama, T. Hattori, K. Kanda, H. Kinoshita, S. Matsui, H. Mekaru, S. Miyamoto, T. Mochizuki, M. Niibe, Y. Shoji, Y. Utsumi, T. Watanabe and H. Tsubakino: Trans. Mater. Res. Soc. Jpn **26**, 783 (2001).
- 11) H. Kinoshita, T. Watanabe, M. Niibe, M. Ito, H. Oizumi, H. Yamanashi, K. Murakami, T. Oshino, Y. Platnov and N. Grupido: Proc. SPIE **3331**, 20 (1998).
- 12) T. Watanabe, H. Kinoshita, H. Nii, Y. Li, K. Hamamoto, T. Oshino, K. Sugisaki, K. Murakami, S. Irie, S. Shirayone, Y. Gomei and S. Okazaki: J. Vac. Sci. Technol. **B18**, 2905 (2000).
- 13) H. Nii, H. Kinoshita, T. Watanabe, K. Hamamoto, H. Tsubakino and Y. Sugie: Proc. SPIE **4409**, 681 (2001).
- 14) T. Watanabe, H. Kinoshita, H. Nii, K. Hamamoto, H. Hada, H. Komano and S. Irie: J. Vac. Sci. Technol. **B19**, 736 (2001).
- 15) T. Watanabe, K. Hamamoto, H. Kinoshita, H. Tsubakino, H. Hada, H. Komano, M. Endo and M. Sasago: J. Photopolym. Sci. Technol. **14**, 555 (2001).
- 16) K. Hamamoto, T. Watanabe, H. Tsubakino, H. Kinoshita, T. Shoki and M. Hosoya: J. Photopolym. Sci. Technol. **14**, 567 (2001).
- 17) K. Kanda, Y. Haruyama, M. Fujisawa and S. Matsui: Nucl. Inst. Meth. A, **467-8**, 500 (2001).
- 18) J. Taniguchi, K. Kanda, Y. Haruyama, S. Matsui, M. Tokunaga and I. Miyamoto: Jpn. J. Appl. Phys. **41**, 4304 (2002).
- 19) 出田智也, 神田一浩, 松井真二, 小西康夫, 近藤克哉, 石垣博行: 第62回応用物理学関係連合講演会, 2001年秋季 [13G-II-7].
- 20) K. Kanda, T. Ideta, Y. Haruyama, H. Ishigaki and S. Matsui: Jpn. J. Appl. Phys., to be published.
- 21) 佐野友彦, 森脇和幸, 林真至, 神田一浩, 松井真二, 井藤幹隆: 第49回応用物理学関係連合講演会, 2002年春季 [28p-ZS-17/III].
- 22) J. H. Underwood et al.: Rev. Sci. Instrum. **67**, 1 (1996) (CD-ROM only).
- 23) M. Domke et al.: Rev. Sci. Instrum. **63**, 80 (1992).
- 24) H. Medeck, E. Tejnil, K. Goldberg and J. Bokor: Opt. Lett. **21**, 1526 (1996).
- 25) K. Sugisaki, Y. Zhu, Y. Gomei, M. Niibe, T. Watanabe and H. Kinoshita: SPIE Vol. **4146**, 47 (2000).
- 26) Y. Gomei, K. Sugisaki, Y. Zhu, M. Niibe, T. Watanabe and H. Kinoshita: SPIE Vol. **4506**, 39 (2001).
- 27) M. Niibe, M. Mukai, T. Tanaka, K. Sugisaki, Y. Zhu and Y. Gomei: SPIE Vol. **4782**, (2002) to be published.
- 28) K. Sugisaki, Y. Zhu, Y. Gomei and M. Niibe: SPIE Vol. **4688**, (2002) to be published.
- 29) E. W. Becker et al.: Microelectron. Eng. **4**, 35 (1986).
- 30) H. Mekaru et al.: Nucl. Instrum. & Methods A, **467-8**, 741 (2001).
- 31) H. You, et al.: 4th International Workshop of High Aspect Ratio Micro Structure Technology (HARMST), Book of Abstract, 13-14 (2001).
- 32) 植田寛康, 他: 平成14年電気学会全国大会講演予稿集, 194 (2002).
- 33) K. Aoki, K. Hosono, K. Tanimoto, S. Amano, S. Miyamoto, T. Mochizuki, A. Ando, T. Hashimoto and Y. Shoji: Proc. of the 13th Symp. on Accelerator Science and Technology; pp. 131-133 (2001).
- 34) W. R. Nelson, H. Hirayama and D. W. O. Rogers: The EGS4 code system, SLAC-265, Stanford University, 1985.