テープターゲットを用いたレーザープラズマEUV光源による 光電子分光装置の開発

西村 靖彦¹, 高橋 全¹, 坂田 篤¹, 東 博純², 山口 直洋³, 原 民夫³

¹(株)トヨタマックス (〒471-0826 愛知県豊田市トヨタ町2番地)

²(株)豊田中央研究所 (〒480-1192 愛知県愛知郡長久手町)

³豊田工業大学 (〒468-8511 愛知県名古屋市天白区久方2-12-1)

Development of Photoelectron Spectromicroscope with Laser-Produced Plasma EUV Light Source Using Tape-Target

Yasuhiko NISHIMURA,¹ Zen TAKAHASHI,¹ Atsushi SAKATA,¹ Hirozumi AZUMA,²

Naohiro YAMAGUCHI,³ and Tamio HARA³

¹TOYOTA MACS INC., 2, Toyota-cho, Toyota, Aichi 471-0826

²TOYOTA Central R&D Labs., Inc., Nagakute, Aichi 480-1192

³TOYOTA TECHNOLOGICAL INSTITUTE, 2-12-1, Hisakata, Tempaku, Nagoya, Aichi 468-8511

(Received June 11, 2004)

A photoelectron spectromicroscope with a monochromatized laser-produced plasma EUV light source has been developed, and its performance was investigated. The monochromatized laser-produced plasma EUV light source can operate at 50 Hz repetition rate. First, various experiments were carried out to investigate the characteristics of this EUV light source. When an aluminum tape-target was used to produce 13 nm radiation, it was observed that there exists an optimal irradiation intensity of the laser beam for excitation. It turns out that the power density ranging from 400 GW/cm² to 500 GW/cm² on a target is required. Besides, a spatial distribution of the main spectral line radiation was measured in the cross sectional view to the plasma. It was found that there was a region where the 13 nm radiation is dominant, which exists at the position about 1 mm away from the target surface. Moreover, the absolute radiation intensity of the 13 nm radiation in the EUV light source was measured and estimated to be 4 [mJ/2πsr/±2 %BW/pulse].

Then, by using this developed photoelectron spectromicroscope, photoelectron spectrum observation has been performed. When a GaAs wafer was used as a sample, photoelectron spectra of Ga-3d and As-3d in GaAs were observed. At present, spatial resolution of less than about 5 μm could be obtained. This result shows that the developed photoelectron spectromicroscope can be applied to valence-band electron analysis successfully.

Key Words: Photoelectron micro-spectroscopy, Laser-produced plasma, Monochromatized EUV light, Aluminum tape-target.

1. はじめに

従来、半導体素子表面の欠陥・検査においては、SEM(走査型電子顕微鏡)や従来型X線光電子分析装置(XPSまたはESCA装置)などが用いられている。X線管を用いた光電子分光技術では、数μmの分解能しか得られていないのが現状である。また、従来手法ではエネルギーが高くなることや輝度が低いため試料表面数nmにおける元素及び化学結合状態を得ることが難しい。そこで、第3世代の放射光を用いた軟X線光電子顕微鏡分析が活発に行われているが^{1,2)}、マシンタイムや装置コストの点から、製造現場や研究室レベルで使用できる光電子顕微鏡装置開発が期待されている。その中、レーザープラズマ光源とTOF法を用いたXPS装置の研究開発が報告され³⁾、文部科学省科学

技術振興調整費(1999～2003年度)による実用化研究も進められてきた。その中で、我々は「レーザープラズマ生成技術の研究」を実施し、レーザープラズマ光源の分布において局在的な領域からEUV光を引き出すことによってある程度鏡帯域化を行う方法を提案してきた⁴⁾。この方法によればEUV光の単色化のために回折格子のような分光素子を使わないで、レーザープラズマ強度を低下させることなしにEUV光を利用することが可能になる。

また、2002年度より2003年度に実施した「地域新生コンソーシアム」事業「線集光型X線源を用いた高分解能光電子顕微鏡装置の開発」では、レーザープラズマEUV光源と従来型分析装置との融合を目指した光電子分析装置の開発を進めてきた⁵⁾。

これが実現すると、新規に新しい分析装置を導入する

ことなしに光電子顕微鏡を手にすることができるので、昨今の経済状況の中、企業や大学などの研究室にとって望ましい技術である。

本報告では、これらのプロジェクトにより得られた知見を基に開発したレーザープラズマEUV光源による光電子分析装置について報告するものである。具体的には、単色化されたEUV光を発生させるための候補となるターゲットとして波長13 nmを発光するアルミニウムテープターゲットを開発し、同ターゲットへの最適照射強度、EUV光の取出し位置など最適化を行った。基礎実験結果を基に、50 Hzの繰返運転が可能なレーザープラズマEUV光源を開発した。開発した光源と従来型分析装置であるエネルギー分散型分析装置と結合した光電子分析装置を試作し、試料としてGaAsを用いて光電子スペクトル観察を行った。また、試作した分析装置の空間分解能についても評価を行った。

2. 実験装置

2.1 レーザープラズマEUV光源開発用実験装置

光電子分析装置用レーザープラズマ光源に使用するターゲットの選定、ターゲットへの最適照射強度を求めるために用いた実験装置をFig. 1に示す。本装置は、励起用レーザー(Quanta-Ray: model GCR-290-10)からのレーザー光(wavelength: 532 nm, pulse duration: 7ns, energy/pulse: 0.8 J)を真空容器内に配置したターゲットに集光照射してレーザープラズマを生成する装置である。同装置はターゲット上での照射強度を約 10^{10} ~ 10^{11} W/cm²の範囲で変えることができるよう集光レンズ($f=300$ mm)に精密ステージが取り付けられており、調整が行えるシステムとなっている。そして生成されたプラズマからのEUV光は、ターゲット面に平行方向に配置した平面結像型斜入射回折格子分光器を用いて観察した。分光器はトロイダルミラー、スリット、回折格子(日立製:1200 lines/mm)とEUV光検出器から構成される。トロイダルミラーへの斜入射角度は2°とし、回折格子への斜入射角度は2.8°である。ターゲットとトロイダルミラー間の距離はトロイダルミラーとスリット間の距離の約6倍であるので、例えばスリット幅100 μ mの時、ターゲット法線方向に対する空間分解能は約600 μ mとなる。また、EUVスペクトル検出に

Fig. 1 Experimental set-up of laser-produced plasma source.

は、背面照射型X線CCDカメラ(Princeton Instruments社製: SX-TEA/CCD-1024-TKB/1 セルサイズ: 24 μ m $\times$ 24 μ m)を使用した。

2.2 光電子分析装置用レーザープラズマ光源開発

Fig. 2に示すような50 Hzに対応した光電子分析装置用レーザープラズマEUV光源装置を開発した。同装置の光源部は、励起用レーザー(Continuum: Powerlite Precision 9050)からのレーザー光(wavelength: 532 nm, pulse duration: 4~8 ns, energy/pulse: 0.6 J)をテープ上に形成されたアルミニウムテープターゲットを50 Hzの繰返し周波数で供給可能な供給装置と、ターゲットから発生するデブリからレーザー入射窓を保護するデブリストッパー、生成されるプラズマからのEUV光以外の進入の取り込み領域を制限する迷光防止板($\phi=20$ mm)の開口上に配置したBeフィルター($t=200$ nm)、ターゲット面に沿った方向からのデブリからシュバルツシルトミラーを保護するための斜入射ミラー、及び照射パルス制御装置、フェイルセーフ回路など様々な装置により構成されている。さらに光源チャンバーには、平面結像斜入射回折格子分光器接続ポートが設けられており、発生するEUV光スペクトルの観察が可能となっている。

2.3 光電子分析装置

Fig. 2に示すエネルギー分散型分析装置(PHI社製: MODEL 10-360 改良型)を用いて試料物質の光電子スペクトル観察を行った。同分析装置は、主にシュバルツシルトミラー、サンプルホルダー半球型電子エネルギー分析器、積分型電子検出部から構成されている。試料から発生した光電子は光電子検出口から半径279.4 mmの半球型エネルギー分析器(検出可能エネルギー範囲は、~1 keV)へ導かれ、下流側に配置された検出用MCP(F1208-01: 2段増幅型、直径30 mm)により検出される。そしてMCPの背面には蛍光面(蛍光体P20)を配置し、MCPからの電子を可視化し、真空容器外に配置したCCDカメラ(浜松ホトニクス製: ORCA II-ER)で観察するシステムとなっている。このCCDカメラにより暗電流が低く抑えられ、高感度で長時間の画像蓄積に優れている。一回のエネルギー測定範囲はMCP及びCCDカメラに依存しており約50 eVである。そしてエネルギー分解能 ΔE は予備試験結果から0.6 eV

Fig. 2 Experimental set-up for the photoelectron microscope.

であった。サンプルホルダー(最大取り付け試料サイズ：10 mm×40 mm)は、真空容器外部から4軸移動調整可能なシステムが構築されており、微動させるための高精度ピエゾステージも組み込まれている。

3. 実験結果と考察

3.1 ターゲット選定とEUV光発光空間分布

エネルギー($h\nu$)の光子が照射されると被測定試料中の電子は、光子からもらったエネルギー($h\nu$)から電子の束縛エネルギー(E_B)と仕事関数(W)だけのエネルギーを失って伝導体の真空準位より上の準位に励起され運動エネルギー(E_K)をもった光電子として現われる。この関係を式で示すと式(1)となる。

$$E_K = h\nu - E_B - W \quad (1)$$

そこで、単色化されたEUV光を発生させるために、候補となるターゲットの選択を行った。Table 1に代表的な元素の各遷移における波長と強度を示したものである⁶⁾。また、参考文献7)や8)に示されるように原子番号の小さいイオンでは、比較的高輝度の線スペクトルを有することから、強度が高く、加工性がよく、必要とする波長帯に複数の輝線スペクトルが少ないアルミニウムを選び、波長

13 nm(約95.4 eV)を用いることとした。アルミニウムの場合、必要とする波長13 nmに近い強い線スペクトルとしては波長16 nm付近のEUV光が存在するが、これは3価のアルミニウムイオン($Al^{3+} : 1s^2 2s^2 2p^6 \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^5 3s$)からのEUV光であり、波長13 nmのEUV光は、4価のアルミニウムイオン($Al^{4+} : 1s^2 2s^2 2p^5 \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^4 3s$)からのEUV光であるため、イオン価が異なる波長13 nmと波長16 nmのスペクトル強度を比較することにより、生成されるプラズマの空間分布を予測することができる。また、開発する光電子分析装置において、レーザープラズマEUV光源で生成される波長13 nmのEUV光を集光させる際、多層膜ミラーを用いるため、多層膜ミラーの反射波長域から外れた波長16 nmのEUV光は殆ど反射しないため、光源に波長16 nmが若干残っていても、それほど大きな問題とならない。

次に、研究開発をしている光電子分析装置では、レーザープラズマEUV光源を開発するにあたって、試料に対して照射するEUV光を微小領域に絞る必要がある。そのためには、光源を小さく制限する必要がある。従って、光源プラズマのどの部分から励起用EUV光を引き出せば最も効率良くシュバルツシルトミラーに導くことが出来るか知らなければならない。そこで、選択したターゲットから生成されるプラズマの空間分布を詳細に観察

Table 1 Binding energy and kinetic energy photoelectron from GaAs.

Wavelength [nm]	Intensity [A.U.]	Z.CHARGE	Element	Wavelength [nm]	Intensity [A.U.]	Z.CHARGE	Element
12.903	50	10.04	Ne	13.0344	180	12.03	Mg
12.904	200	11.05	Na	13.0354	180	12.03	Mg
12.914		17.16	Cl	13.039		13.03	Al
12.9198	90	20.08	Ca	13.04	100	10.05	Ne
12.9248		17.16	Cl	13.0411	800	13.04	Al
12.928		14.1	Si	13.0431	40	7.04	N
12.9322	10	20.1	Ca	13.0537	60	12.03	Mg
12.9337	20	7.04	N	13.061	18	10.04	Ne
12.936	50	10.05	Ne	13.0624	80	12.03	Mg
12.94	50	14.09	Si	13.063	100	12.05	Mg
12.9423	250	20.08	Ca	13.068	16	10.04	Ne
12.9448	90	20.08	Ca	13.068	200	11.04	Na
12.9464	10	11.03	Na	13.07	20	12.03	Mg
12.95	150	9.05	F	13.0701	10	12.05	Mg
12.9711	100	12.03	Mg	13.0723	100	11.04	Na
12.9729		12.11	Mg	13.074	30	10.04	Ne
12.973	700	13.03	Al	13.077	16	10.04	Ne
12.9785	450	8.05	O	13.0847	1000	13.04	Al
12.9811	30	7.04	N	13.085	60	8.99	O
12.9857	320	12.03	Mg	13.0883	1	20.1	Ca
12.9871	550	8.05	O	13.1002	900	13.04	Al
12.989	50	14.11	Si	13.1217	500	20.12	Ca
12.9935	360	20.08	Ca	13.1254	50	7.04	N
12.9942	100	11.04	Na	13.1345	300	11.04	Na
12.9966	220	12.03	Mg	13.136	54	10.05	Ne
12.9973	90	20.08	Ca	13.1413	200	11.04	Na
12.9975	180	12.03	Mg	13.1419	1	20.07	Ca
13.002	20	14.11	Si	13.1438	900	13.04	Al
13.0041		12.11	Mg	13.146		14.11	Si
13.006		13.11	Al	13.147	1	20.07	Ca
13.0086	200	12.03	Mg	13.1516	10	9.04	F
13.0118	180	12.03	Mg	13.1633	650	19.08	K
13.0141		12.11	Mg	13.1635	300	11.04	Na
13.0191	90	20.08	Ca	13.1638	10	9.04	F
13.021		13.11	Al	13.164	50	14.11	Si
13.0246	140	12.03	Mg	13.1647	150	13.03	Al
13.025	140	8.99	O	13.1738	20	8.04	O
13.026	110	10.05	Ne	13.1758	40	8.04	O
13.0294	200	12.05	Mg	13.1812	70	8.04	O
13.0295	180	12.03	Mg	13.188	500	19.08	K
13.034	25	7.05	N	13.199	45	10.04	Ne

するために、トロイダルミラーを有する空間分解計測ができる斜入射分光器を用いてターゲット表面からの距離と発生するEUVスペクトルの観察を行った。分光器の観察軸を固定した状態でターゲットと集光レンズの距離を保つことによりターゲット上での照射強度を約 5×10^{11} W/cm²で保ち、レーザー光軸に沿って並行に移動させ、ターゲット表面から4.5 mmまでのEUVスペクトル観察を行った結果の一例をFig. 3に示す。このスペクトルはそれぞれ一回のレーザー照射で得られたEUVスペクトルである。ターゲット表面ではBremsstrahlungあるいは放射再結合による連続スペクトルと波長13 nmの線スペクトルが強く観察され、イオン価の低いプラズマから発生する波長16 nmのEUV光は比較的弱く観察される。これに対し、ターゲット表面から離れるほど連続スペクトルやイオン価の高いプラズマからのEUVスペクトルは弱くなり、イオン価の低いプラズマからの線スペクトルが強くなっている。これはレーザー照射されたターゲット表面は非常に高温であり、プラズマが膨張して冷却する過程で低いイオン価のプラズマが形成されていると予測される。同観察により得られたデータから、波長13 nmのピーク強度のターゲット法線方向に対する推移をFig. 4に示す。この結果に見られるように、ターゲット表面から1 mmはなれた位置で波長13 nmの強度が最大になっていることがわかった。

そこでさらに詳細にプラズマの空間分布を調べるために、ターゲット近傍に250 μ m幅のスリットを配置して、分光器の観察軸をターゲット法線方向へ250 μ mずつ移動させ観察したスペクトルから波長13 nmと波長16 nmのピーク強度を求め比率計算を行い、2次元的に示した結果をFig. 5に示す。ターゲット面内方向の処理においては、観察したCCD画像の空間分布を規格化して100 μ mステップでデータ処理を行った。また、ターゲット法線方向はデータ処理時にステップ間のスムージングを行っている。

Fig. 3 Soft X-ray spectra from aluminum tape-target irradiated by a single YAG laser shot, observed through a silicon nitride filter, (a): at the target surface, (b): at +1 mm, (c): at +2 mm, (d): at +4 mm from the target surface.

Fig. 4 Spatial distribution of EUV light intensity at the wavelength of 13 nm along the target normal, when the position of observation was changed with every 500 μ m step.

Fig. 5 Spatial distribution of the intensity ratio of the 13 nm/16 nm soft X-ray from the aluminum tape-target irradiated with about 5×10^{11} W/cm².

る。Fig. 5に示されるように、ターゲット表面付近ではイオン価が高くなっていることがEUV光空間分布から明確になった。

以上の結果より、生成されるレーザープラズマの空間分布を利用して発光の単色化を図ることが可能となる。アルミニウムテープターゲットの場合、EUV光の取出し位置をターゲット表面より1 mm離れた場所に空間アパーチャを配置することにより、波長13 nmを効率良く取出すことができることがわかった。

3.2 波長13 nm EUV光源(ターゲット)への最適照射強度

ターゲットへ照射する励起用レーザーの最適照射強度に関する検討を行った。観察位置を前項で得られた結果を基に、ターゲット法線方向に1 mm、約600 μ mの測定視野と固定し、ターゲットへの励起用レーザー照射強度を約 2×10^{11} ~ 1.8×10^{12} W/cm²と変化させたときに発生するEUVスペクトルを観察し、波長13 nmピーク強度変化を測定した。測定に際して励起用レーザーの照射強度を変化させるために、集光レンズホルダーに設けたステージを用いて焦点をターゲット表面に対して移動させながら行った。尚、ターゲット上の照射強度 I は、実際に照射し

たターゲットの照射痕を顕微鏡で観察し、式(2)を用いて算出した。

$$I = \frac{E}{S \times t} [\text{W/cm}^2] \quad (2)$$

(I = 照射強度, S = 照射断面積, t = 励起用レーザーパルス幅)

Fig. 6に示すグラフは、照射強度に対する波長13 nmのピーク強度推移を示したものである。この結果から、 $4 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 程度のレーザー光を照射することで、波長13 nmが最も強く発生していることがわかった。また、 $5 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 以上の場合波長13 nmの強度が徐々に減衰していたのでその理由を探るために観察したスペクトルを詳細に調べた。Fig. 7に約 $4 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ と約 $10 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ の時の画像スペクトルを示す。この結果に見られるように照射強度が高くなったときは、波長4 nm付近に Al^{8+} 、 Al^{9+} イオンからの発光が確認されており、ターゲットに与えたエネルギーが高価イオン生成に費やされたため、波長13 nmの強度が低下したと思われる。

以上のことよりターゲット法線方向に1 mm離れた位置をEUV光取出し位置とした場合、波長13 nmのEUV光を効率良く発生させるためには $4 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2 \sim 5 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ の範囲のターゲットへの照射強度が適していることがわかった。

3.3 光源位置での波長13 nmの放射強度の見積

前項3.1及び3.2に示した実験を基に開発した装置に平面結像型斜入射回折格子分光器を取り付け、測定したスペクトルから光源位置における波長13 nmエネルギー放射($2\pi\text{sr} \cdot \pm 2\% \text{ BW}$ あたり)を算出した。現在、EUV光の光源位置での光量を測定する装置として、多層膜ミラーと半導体センサーにより構成された装置(Flying Circus)がEUVL関連分野での評価標準として用いられているが、本研究では現状ツールによる簡易計算にて大凡の放射量を求める方法を採用することとした。光源位置での放射強

Fig. 6 Intensity of the 13 nm emission as a function of laser irradiation power density, where the irradiation intensity at aluminum tape-target surface is changed from about 2×10^{11} to $1.8 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$.

Fig. 7 Spectrophotographs obtained by using CCD camera. The power density is (a) $4 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$, or (b) $1.0 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$.

度測定実験の配置をFig. 8に示す。同装置は光源から前置ミラーまでの距離は800 mm、同ミラーからスリット(100 μm 幅)までの距離が95 mm、同スリットから回折格子(日立製: 1200 lines/mm)までの距離が237 mm、同回折格子からCCDカメラ(Princeton Instruments (Roper Scientific)社製: PI-SX:1300 back-illuminated セルサイズ: 20 $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$)までの距離が235 mmである。尚、観察には、SiNフィルター(厚さ200 nm)を分光器内に取り付け、Si L殻吸収端(波長12.4 nm)により高次回折光を除去するために用いた。分光器内に入射した光子数を N_{in} とするとCCDカメラから検出される発生する電子の個数 N は⁹⁾

$$N = N_{\text{in}} \eta \epsilon_{\text{CCD}} \frac{h\nu}{3.65} \frac{1}{g} \quad (3)$$

で表すことができる。ここで、 $h\nu$ は着目する光子のエネルギー(eV)、 η は回折格子の効率、 ϵ_{CCD} はCCDの量子効率($\epsilon_{\text{CCD}} = 0.41$)、 g は使用したCCDカメラのgain(5e-/count)である。使用した回折格子の1次光回折効率、文献10)に示されている結果から $\eta = 0.04$ (理論計算値では ~ 0.2)とした。そして、CCDカタログ値から波長13 nm付近の量子効率 ϵ_{CCD} は約41%であった。また、式(3)中の3.65はCCD素子内の電子-正孔対生成エネルギー(eV)である。次に、光源位置での積分発光光子数を N_{T} とすると分光器に入射した光子数 N_{in} は、以下の式で表すことができる。

$$N_{\text{in}} = N_{\text{T}} \frac{\Omega}{2\pi} \text{TRS} \quad (4)$$

Fig. 8 Experimental layout for quantitative measurement of spectral emission intensity in the developed light source system.

ここで、 Ω は分光器前置鏡の受光立体角、Tはフィルター(SiN)透過率($T = 0.1$)、Rは前置鏡の理想反射率($R = 95\%$)、Sは前置光学系に対する分光器スリット透過率である。使用した分光器は、分光器入口側で前置鏡面内方向のEUV光源が一端集光される構造となっており、実験配置からスリット透過率は $S = 1/4 \sim 1/5$ 程度となる。

シングル照射してプラズマを生成させ観察したスペクトル(Fig. 9)を数値データに変換し積分した値からCCDカメラから発生する電子の個数Nを求め、上述の計算式(3)、(4)を用いて光源位置での波長13 nmの放射強度を算出した結果、 $約4 \text{ mJ}/2\pi\text{sr} \pm 2\% \text{ BW} \cdot \text{pulse}$ であった。本測定に用いた前置鏡の反射率は表面の凹凸による散乱のために今回用いた値より小さい可能性があるため、光源の放射強度は上述の数値より大きくなっていると思われる。

3.4 開発した光電子分析装置における光電子スペクトル観察結果と空間分解能

前節に示したような発光強度をもつEUV光源を50 Hzで運転し、Au斜入射ミラーを介して2.3の光電子顕微鏡装置に導いて光電子分析実験を行った。用いた試料はGaAs化合物半導体である。Fig. 10 (a)に示すように検出面に入る光電子の運動エネルギーが47~92 eVの設定において、2つの光電子ピークが検出画像に明確に現われた。この時のEUV光照射時間は10分であった。本光電子分光器で分析される電子のエネルギー絶対値の較正はまだ実施していないが、相対値に関しては電子ビームを試料に照射した時の弾性散乱ピークの測定を通して正確にわかっている。画像に現われたピークは束縛エネルギーの関係から、画面上に現われたものがAs 3d、下側がGa 3d光電子によるピークであると考えられる。画像強度の運動エネルギー軸に沿った分布をプロットしたものをFig. 10 (b)に示

Fig. 9 (a) Observed CCD image. (b) Spectral distribution deduced from the image. The spectrum was obtained in a single laser shot.

Fig. 10 (a) Photoelectron output image of the XPS system. (b) Profile of photoelectron intensity as a function of its kinetic energy. Sample is GaAs wafer. Exposure of EUV light is 10 min.

す。これは通常のXPS装置で得られる光電子スペクトル曲線に相当する。2つのスペクトルピークが明瞭に認められ、その間隔は約21 eVである。単体のGaおよびAsの3d電子の束縛エネルギー差が23 eVで、この測定結果を説明できないのに対し、GaAs中のGa 3d、As 3d束縛エネルギー差は21.3 eVであり、観測結果とよく一致する。従って、今回の測定によってGaAs化合物からのGaとAsの光電子を観測できた。Fig. 10 (b)のエネルギー軸の目盛の絶対値はAs 3d光電子の運動エネルギー(53.9 eV)に合わせて表示してある。以上のように、開発したレーザープラズマEUV光源を用いた光電子分析システムにより、試料の光電子分析が行えることが示された。

次に開発した光電子顕微鏡装置の空間分解能を調べるために、GaAs試料表面にレジストを幅20 μm 毎に塗布したテストパターンを有した試料を用いた。試料を5 μm ずつ移動しながら光電子スペクトル観察を行い、As 3d光電子信号強度の変化を調べた。尚、同測定は豊田工業大学において本研究で用いたアルミニウムテープターゲットによるレーザープラズマEUV光源装置を用いて実施された。その結果をFig. 11に示す。同図は横軸に試料移動量、縦軸にその時のAs 3d光電子スペクトル強度を示してある。測定結果から大凡の空間分解能を推定すると約5 μm 以下であることがわかった。このようにして決めた空間分解能は試料上の大凡のEUV光集光サイズを反映していると考えられ、シュバルツシルトミラーの設計値(倍率1/244, NA = 0.25, 設計中心波長13.1 nm $\pm$ 0.1 nm)から、光源の大きさは約700 μm 程度であることが予測される。通常「生成されるプラズマサイズ」=「光源サイズ」となるため、生成されるプラズマを小さくすることが空間分解能を向上させる方法として考えられる。生成されるプラズマサイズを小さくする方法として例えば、励起用レーザー光のパルス幅を短くしたりすることで少しは小さくすることも可能である。しかしながら本手法の特徴は、生成されるプラズマの空間分布を活用し、必要となる波長を効率良く取り出すことにある。そこで、デブリの飛散量が少ない位置であるターゲット法線から80度から90度傾いた位置¹¹⁾に200 μm 以下のピンホールを配置することにより、デブリによるピンホールのダメージも少なく、生成されるプラズマの空間分布を利用したサブミクロンの空間分解能をもった光電子顕微鏡装置を実現することが可能であると予測される。

Fig. 11 Intensity of the As 3d peak as a function of the irradiated position in the GaAs sample. The surface of the sample was coated with a line and space pattern of photoresist whose width was 20 mm.

4. まとめ

レーザープラズマEUV光源による光電子分析装置を試作し、同装置の光源の特性、光電子スペクトル観察を行った。その結果、光電子分析装置に必要なレーザープラズマEUV光を得るには、励起用レーザー光の最適照射強度があり、アルミニウムターゲットを用いた場合、ターゲット上で約400 GW/cm²～500 GW/cm²のエネルギーが必要であることがわかった。また、生成されるプラズマには空間分布が存在し、同ターゲットにおいてはターゲット表面から約1 mm離れた位置を観察(取出し)位置とすることがよいことがわかった。また、生成されるレーザープラズマEUV光の光源位置での放射強度は約4 mJ/2πsr・±2 % BW・pulseであった。

開発したレーザープラズマEUV光源を用いることにより光電子スペクトル観察が可能となり、GaAsからのGa 3dとAs 3dの光電子スペクトルの観察が可能な価電子帯励起の光電子分析装置を開発することが出来た。そして試料上での空間分解能は現状で約5 μm以下を得ることができている。

今後は、開発した装置の空間分解能向上並びに同光源

の更なる最適化を実施すること、試料を2次的にスキヤニングすることにより光電子の顕微分析が行えるようにすることを目標としていく。後者に関して、測定データを画像化する技術についても検討を進めていきたい。更には、よりエネルギーの高い光源を開発し内殻(Si 2pなど)の光電子スペクトル観察が可能な装置開発を進めていく予定である。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省、科学技術振興調整費による「顕微光電子分光法による材料・デバイスの高度分析評価技術に関する研究」並びに経済産業省「地域新生コンソーシアム事業」により行われました。ここに記して謝意を表します。

アルバックファイ(株)渡邊 勝巳様には、エネルギー分散型分析装置の改造、調整を行っていただき有益な議論をさせていただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) W. Ng, A. K. Ray-Chaudhuri, S. Liang, S. Singh, H. Solak, J. Welnak, F. Cerrina, G. Margaritondo, J. B. Underwood, J. H. Koetright, and R. C. C. Perera: Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **347** (1994) 422.
- 2) F. Barbo, M. Bertolo, A. Bianco, G. Cautero, S. Fontana, T. K. Johai, S. La Rosa, G. Margaritondo, and K. Kazanacheyev: Rev. Sci. Instrum. **71** (2000) 5.
- 3) H. Kondo, T. Tomie, and H. Shimizu: Appl. Phys. Lett. **72** (1998) 2668.
- 4) 西村 靖彦, 坂田 篤, 東博 純: 秋季 第61回応用物理学会学術講演会予稿集 (2000) 578; 応用物理学会.
- 5) 西村 靖彦 他: 第23回年次大会 レーザー学会 (2002).
- 6) Raymond L. Kelly: Atomic and ionic Spectrum lines below 2000 Angstroms: Hydrogen through krypton; J. Chem. Ref. Data, Vol. 16, suppl. 1, (1987).
- 7) 大道 博行: レーザー研究 **27** (1999) 3.
- 8) 西村 靖彦 他: レーザー研究 **29** (2001) 659.
- 9) C. Fujikawa, N. Yamaguchi, T. Hara, T. Kawachi, H. Oyama, K. Ando, and Y. Aoyagi: Rev. Sci. Instrum. **69** (1998) 2849.
- 10) W. Schwanda, K. Eidmann, and M. C. Richardson: J. X-ray Sci. and Technol. **4** (1993) 8.
- 11) H. Azuma, Y. Nishimura, A. Sakata, and A. Takeuchi: Appl. Surf. Sci. **197-198** (2002) 224.