パルスEUV光を用いた光電子分光(EUPS)

富江 敏尚^{1,2}, 錦織 健太郎^{1,†}, 李 東勳^{1,††}, 林 景全¹,松嶋 功², 森脇 大樹¹, 屋代 英彦^{1,2}¹(独)産業技術総合研究所 次世代半導体研究センター (〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第2)²(独)産業技術総合研究所 光技術研究部門 (〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第2)

Photoelectron Spectroscopy with a Pulsed EUV Source (EUPS)

Toshihisa TOMIE,^{1,2} Kentaro NISHIGORI,^{1,†} Dong-Hoon LEE,^{1,††} Jin-Quan LIN,¹Isao MATSUSHIMA,² Hiroki MORIWAKI,¹ and Hidehiko YASHIRO^{1,2}¹National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Advanced Semiconductor Research Center,
Central 2, 1-1-1, Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568²National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Photonics Research Institute,
Central 2, 1-1-1, Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568

(Received August 18, 2004)

Photoelectron spectroscopy gives information on electronic states of materials which control properties of materials and devices. Developments of EUV optics and high brilliant pulsed EUV sources in these days have enabled us to develop a new photoelectron spectroscopy, EUPS. With EUPS, we can achieve sub- μm spatial resolution, which is more than one order of magnitude better than that of a commercial XPS. EUPS can observe one mono-layer surface, and ultra-fast phenomena. In this article, after explaining the principle of EUPS, experimental results on observation of chemical shifts, detection of ultra-low level contamination, observation of laser ablation are described. Studies for improving spatial resolution and energy resolution of EUPS are also described.

Key Words: Photoelectron spectroscopy, Sub- μm spatial resolution, EUV, Laser-plasma, TOF, Chemical shift, Ultrafast phenomena, Low level contamination

1. はじめに

レーザー生成プラズマ(LPP)は超高輝度輻射光源であり, その特長を活かすことで, 新たな応用分野が切り拓ける. 狭帯域線スペクトルが発生できる, 短パルスである, という特長を活かした応用として, 新たな光電子分光法を考案¹⁾し, 実用化に向けた技術開発を進めてきた. 種々ある計測分析法の中に, 単色X線を照射した試料から放出される光電子のエネルギー分光を行う, X線光電子分光法(XPS; X-ray Photoelectron Spectroscopy)がある. 元素分析だけでなく, 化学結合状態さらには詳細な電子準位構造の情報も入手可能であり, 材料・デバイスの性能に直結する情報が得られる重要な分析法である. しかし, 市販装置の空間分解能は10-30 μm に過ぎず, ナノテクノロジーの研究が盛んになる中で, 空間分解能サブ μm のコンパクト装置の登場が強く望まれている.

我々が考案したLPPを光源とする光電子分光法を, 極端紫外光(Extreme Ultraviolet)を用いるという意味で, EUPS

と名付けた. ちなみに, 放射光施設では極端紫外光を用いる光電子分光研究の長い歴史があるが, 寡聞にして著者は, 波長を明示する短縮名を見たことがない.

EUPSでは, 後述する工夫により, 空間分解能サブ μm が容易に実現できる²⁾. 92年7月に特許出願し, 95年3月から学会報告を続けているが, 99年度から03年度にかけて実施した科学技術振興調整費「顕微光電子分光法による材料・デバイスの高度分析法の研究開発」(研究代表 富江敏尚)で, 多機関の共同により, 内殻励起のEUPSだけでなく, レーザー高調波を使う価電子帯励起システム, X線光学素子, 光電子分光応用技術など様々な関連技術の開発が行われた³⁾. 多くの, 世界初, 世界最高の成果が得られている. 製品化に向けた技術開発を続けることで, 我が国発の新分析手法が実用化され, 近い将来, 材料・デバイス開発に於ける最重要分析手法になると考えている.

第2節でEUPSの原理を述べ, 第3節でEUPSスペクトルの一例を示す. 第4節と第5節で, 極微量汚染の検出と, 高速現象の観測例を紹介する. 第6節で, サブ μm 分解能の

[†]現在の所属: (株)メガオプト^{††}現在の所属: 韓国科学技術財団

顕微観測について述べ、第7, 8節で、高度化のための、サブns EUV光発生とマルチkHz化について成果と計画について述べる。

2. EUPSの原理

光電子分光法Fig. 1は、励起光と電子の両方を高いエネルギー分解能で分光する必要がある、そのため「暗い」のが、高空間分解能が困難な原因である。EUPSでは、Fig. 2に示すように、光源に、狭帯域線スペクトル発光と、発光の短パルス性を要求する。高効率化のための二つの工夫により、サブ μm 空間分解能が可能になる。

光源が狭帯域線スペクトルを発すれば、何桁もの光源強度低下をもたらす分光器を単色化のために用いなくて良いので、光源利用効率が高くできる。

X線管や放射光という連続光源では、電界中での飛行経路が電子のエネルギーによって異なることを利用して電子分光を行う。高エネルギー分解能の分光には、分析器に入射する電子の角度を制限する必要がある、電子の捕集立体角が小さくなる。また、同時に検出するエネルギー幅が制限される。このため、電子分光の検出率がきわめて低い。電子をパルスの発生させ、飛行時間を計測する飛行時間法(TOF)に依れば、時間軸にエネルギー分散するので、原理的には、高分解能エネルギー分光と、高捕集立体角が両立する。また、広いエネルギー範囲の

Fig. 1 Principle of Photoelectron Spectroscopy.

Fig. 2 Principle of EUPS.

電子が同時に検出できる。この二つの理由で、高い電子検出率が可能である。

上述二つの高効率のための工夫は、LPPで初めて実現できる。LPPの特長を最大限に生かした応用と言える。LPPのピーク輝度は、X線管の輝度より10桁程度大きく、偏向電磁石放射光よりも2~3桁大きい。発光持続時間が1 nsで繰り返し率100 Hzの場合稼働率 10^{-7} であるから、時間平均輝度でもX線管より明るい。偏向電磁石放射光との比較では、時間平均光源輝度では、LPPの方が低いのが、分光器のロスがないこととTOF電子分光の効率の高さから、光電子分光法としては、LPPの方が遙かに大きな信号が得られ、より高い空間分解能の顕微観測ができる²⁾。

EUPSで顕微観測を行う場合のポンチ絵³⁾をFig. 3に示す。LPPからのEUV光を、多層膜を成膜したシュバルツシルト集光光学素子(SO)で試料上に集光し、発生した光電子を、飛行時間法でエネルギー分析する。マイクロビームの走査で化学状態の空間分布情報が得られる。

3. EUPSスペクトル

EUPSで得られる光電子スペクトルの一例をFig. 4に示す⁴⁾。励起光は、BNターゲットで生成したLPPの水素様ボロイオンのライマン α 線(4.86 nm)である。

飛行時間法では光源と計測系の時間分解能 Δt で電子分光のエネルギー分解能 ΔE が制限されるが、 $\Delta E \propto \Delta t/t^3$ の関係にあるので、減速電界を印加して電子の速度を落として飛行時間 t を長くすれば、エネルギー分解能 ΔE が改善できる⁵⁾。Fig. 4では、減速電場は135 Vであった。このように、Si/SiO₂/SiNにおけるSiの2p電子の結合エネルギーの化学シフトが容易に識別できる。

水素終端処理したSiを試料にした測定では、Si 2p電子のスピントラッキングも分離できている^{2,6)}。波形のフィッティングから、光電子スペクトル上のエネルギー分解能は0.5 eV以下と見積もられる。光源と計測系の時間分解能の寄与を差し引くと、光源のスペクトル幅は、0.3 eV程度、つまり1/1,000のバンド幅と評価できる。

Fig. 4の縦軸は、1ショットで検出されたエネルギー幅1 eV当たりの電子の数である。数10ショットの積算で、十分な質のスペクトルが得られた。

Fig. 3 Conceptual view of an EUPS micro-spectroscopy system. (from the report of the project³⁾).

Fig. 4 Observation of chemical shifts of Si 2p by EUPS.⁴⁾

4. 極微量汚染の検出

EUPSの一つの特長は、表面への高感度性である。EUV光の光子エネルギーは数10 eVから200-300 eVであり、この照射で試料から放出される光電子は、数10 eVから200 eVのエネルギーを持つことになる。固体中の電子の非弾性散乱の平均自由行程は、50-100 eVで最小で、1原子層程度である。つまり、EUPSでは、固体表面1原子層の情報が得られる。XPSで発生されるk eV電子は、5原子層程度、UPSで発生する光電子の脱出深さは、20原子層程度である。固体表面1原子層の分析においては、EUPSはXPSより5倍も高感度である。

この特長を活かして、極微量汚染の評価を試みた^{7,8)}。EUVリソグラフィー用のプラズマ光源に於いては、EUV光を捕集する多層膜鏡の汚染が問題になる。Xeよりも高い効率期待されるとしてSnプラズマが注目されている。多層膜に一旦付着するとそこに止まるので、汚染対策が必要であり、高感度検出法の開発が重要である。1原子層のSnが多層膜に付着すると、反射率が4%低下するので、EUPSで被覆率1%のSnが検出できれば、0.04%の反射率低下相当の汚染が検出できることになる。

Sn板ターゲットから8 mmの場所にSiウエハーを置き、プラズマを生成して付着したSnのEUPS計測を行ったところ、10ショットで、信号量が飽和した。つまり、Siウエハーのほぼ全面がSnで被覆された。Siウエハーの前に、穴の空いた遮蔽板を置き、穴の開閉率を変えて観測された信号の変化を観測したところ、Sn4dの位置の信号量は開口率に比例して増大した。被覆率数%，つまり反射率0.2%相当のSn汚染、が検出できることが分かった。

Snプラズマに曝さない場合でも、Snの4d電子の位置に光電子信号がある。このバックグラウンドの処理ができれば、より小さな被覆率が検出できる。BNをターゲットとするプラズマから発生する255 eVのEUV光で励起すると、結合エネルギー25 eVのSn 4d電子が220 eV程度のエネルギーで放出される。-210 Vの遅延電界を印加した時の光電子スペクトルを図に示す。Snが付着したSiウエハーの場合、平坦なバックグラウンド信号が40 eV近傍にあるフェルミ端まで延びている。その上に、12 eV近傍にピークを持

Fig. 5 EUPS spectra of an un-treated Si wafer and a Sn-deposited Si wafer.

つSn4dが見える。ピーク値のみの変化から被覆率数%が検出できたが、Fig. 5に示した波形を使ってフィッティングを行えば、より微量な汚染が検出できる。また、Fig. 5のスペクトル波形にはノイズが多いが、これは、この時のターゲット装置が高繰り返し化に対応しておらず、積算ショット数が少なかったからである。ターゲット装置の改良で、1-2分の計測時間でこの百倍のショット数の積算が可能である。つまり、統計雑音が1/10にでき、感度が10倍高くできる。

Fig. 5のSnプラズマに曝していない未処理のSiウエハーのスペクトルには、16 eVにピークが見られる。これは、Siの自然酸化膜の酸素に起因するピークであるとされている。これが自然酸化膜に起因するであろうことは、弗酸処理をすると消えることと、次に紹介する実験で確認できた。

未処理のSiウエハーのEUPSスペクトルでは、結合エネルギー99 eVのバルクSiの信号は殆ど見えず、結合エネルギー103 eVのSiO₂のSi2p信号だけである。このSiウエハーを、EUPSの分析室に入れ、真空容器の外からパルスレーザーを照射して、レーザーアブレーションすると、直後のEUPSスペクトルではSiO₂の信号が消え、バルクSiの信号だけになった。しかし、時間が経つに連れ、バルクSiの信号が小さくなり、SiO₂の信号が出現した。この様子を

Fig. 6 Signal intensities of Si, SiO₂ and O electrons from a laser-ablated Si wafer as a function of time after ablation.

Fig. 6に示す．横軸は， $1\text{L} = 10^{-6} \text{ Torr sec}$ の単位である． SiO_2 とOの信号が100L前後で出現した．Oの信号は直ぐに飽和したが， SiO_2 の信号は，増大し続けた．もしもこの結果が大気中でも当てはまるならば，Siの信号はミリ秒では消えることになる．つまり，水素終端処理などを施さないとSiの信号は見えない．実際には，購入したつまり何十日も大気に曝したSiウエハーでも，極めて微小ではあるが，Siの信号は認められる．

5. 過渡現象の光電子分光観測

EUPSでは光源のパルス幅がナノ秒であるので，高速過渡現象の，光電子分光観測が可能である．その一例として，錫板のレーザーアブレーションのダイナミクスのEUPS観測を紹介する．

アブレーションされたガスで電子を検出するMCPが破損及び損傷されないために， 50 mJ/cm^2 という極めて低い照射密度でアブレーションを行うなどの工夫をした．また，極微量のアブレーション物質からの光電子信号が，錫板から放出される大量の光電子に埋もれないように，実験配置の工夫を行った．種々の制限要因があったので，光電子信号は極めて微弱で，アブレーションの影響を検出するのは容易でなかったが，Fig. 7に示す結果が得られた⁹⁾．

レーザーアブレーションの直後にEUV照射を行って光電子の検出を行うと，飛行時間100 nsでの光電子信号が若干増大し，且つ，パルス幅が若干広がった．これは，Sn 4d電子が検出されたため，と考えられる．TOF信号の，時刻80 nsから120 nsまでの間の信号の積分値の変化をFig. 7に示す．横軸は，レーザーアブレーション後の，EUPS観測のためのEUV照射のタイミングである．アブレーションにより，光電子信号は急峻に増大し，その増大は約40 nsの時定数で減少した．

信号が微弱なためスペクトル波形の精度はそれほど高くないが，通常の固体では見られない構造が観測されており，これは過渡的現象に起因すると考えられる．

6. 顕微観測

Fig. 7 Photoelectron signal as a function of time after laser ablation of a Sn plate.⁹⁾

EUV光を用いる最大の利点の一つは，高空間分解能の光学素子が利用できることである．いわゆるX線多層膜は，波長10 nm前後のEUV光を高い垂直入射反射率で反射できる．この多層膜を成膜した凸面鏡と凹面鏡を組み合わせたシュバルツシルト光学系(SO)を用いることで，サブ μm のマイクロビームが得られる．上にも述べたように，条件を選べば被覆率1%の情報の検出ができるので，サブ μm マイクロビームの照射で，100 nm以下の微細構造の異常が検出できると期待できる．SOの性能が向上できれば，直径0.5 μm 以下のマイクロビームが形成でき，50 nm以下の微粒子も検出できるだろう．

EUPSでのサブ μm 分解能を実現するには，光電子の高捕集効率化が最重要課題の一つである．パルス性を損なわないで高効率で電子が捕集できるものとして，磁気ボトルが知られている．従来は，ガス試料で且つ数eVの低エネルギー電子への適用例しかなかった．我々は，固体試料から発生する数十eVの光電子の捕集に適用し，十分に大きな捕集効率を得られること，それにより，サブ μm EUVマイクロビーム照射でも，十分に大きな光電子信号が得られること，などを報告してきた¹⁰⁻¹³⁾．

磁気ボトルは有用なコンポーネントであるが，数十eVの電子の捕集のためには，1テスラ近い強磁場が必要で，そのため，2-3 mmに近接した磁極構造が必要になる．この物理的制約のため，観測できる試料の大きさが1-2 mmに制限されてしまう．光電子分光は非破壊が一つの特長であり，大きなウエハーの非破壊でのEUPS検査が強く望まれている．そこで我々は，それを可能にするための方式として，短飛行管方式を考案した．電子を検出するMCPの口径を大きくし，試料になるべく近く設置することで，検出立体角を大きくしよう，と言うものである．

有効径4 cmのMCPを試料から20 cm弱の距離に置いて観測したところ，磁気ボトルを用いた場合の半分の大きさの信号が得られた．この短飛行管系を用いた，線幅6 μm のメッシュの5 μm ピッチの光電子強度マッピングを報告した¹⁴⁾．その後，0.2 μm ピッチで分解能1 μm 程度のマッピングを得ている．

複数本の短飛行管を配置して，信号を積算すれば，磁気ボトルと同程度あるいはそれを上回る大きさの信号も期待できる．マルチ短飛行管方式では，原理的に分析する試料の大きさに制限はない．現在，4インチウエハーの試料が観察できるシステムを設計中である．大口径試料に対応できる短飛行管方式の製品化に向けた高度化では，EUV光の短パルス化，システムのマルチkHz化などが，技術課題である．

7. サブnsパルスEUV線スペクトルの発生

EUPSの特長の一つは，飛行時間型の電子分光である．高い捕集効率のために飛行管を短くすると，飛行時間が短くなるので，エネルギー分解能を確保するためには，光源の短パルス化が必要になる．これまで，プラズマの生成にパルス幅3 nsのYAGレーザーを用いてきたが，より

Fig. 8 Temporal profile of EUV emission from an Al plasma.¹⁵⁾ (a) 0.2 ns laser irradiation. (b) 3 ns laser irradiation.

短パルスのレーザーが必要になる。短パルスレーザーとしてTi:Sレーザーが90年代から登場しているが、この数年の技術の進歩は著しく、市販品で、mJのパルスエネルギーが1kHzで得られるようになってきている。Ti:Sレーザーを用いた短パルスEUV光の発生実験を行った¹⁵⁾。

結果をFig. 8に示す。ターゲットはAlで、発光の時間波形を、SiNフィルターをつけたX線ダイオードで計測した。(a)がTi:Sレーザーのパルスエネルギー0.8 mJ、パルス幅200 psのストレッチパルスを約10 μm 径に集光照射した時の波形、(b)がパルスエネルギー50 mJ、パルス幅3 nsのYAgレーザーの2倍高調波を約50 μm 径に照射したときの波形である。200 psパルス照射の光電子信号総量は、3 nsパルスの場合の1/10であるが、ピーク値では70 %程度と十分に大きい。パルス幅は1 nsを切っており、短飛行管でも十分なエネルギー分解が得られる見通しである。

第6節で紹介したSOを用いた顕微観察では、光源はTaプラズマであった。Taプラズマは連続スペクトルを放射する。SOの多層膜の反射スペクトルによる狭帯域化のみであるので、得られたEUPSスペクトルのエネルギー分解能は3 eV程度になる。Alプラズマを光源にすれば、16.01 nmと16.17 nmの2本の線スペクトルが輻射されるので、両方の寄与が分離できない場合にエネルギー分解能0.7 eV、二つが分離して検出できれば、エネルギー分解能数十meVも期待できる。ところが、図(b)で分かるように、3 ns YAGレーザーで生成したAlプラズマの発光持続時間は長くなった¹⁶⁾。パルス幅が長いとTOF分光のエネルギー分解能が低下する。Taプラズマの場合は、照射レーザーのパルス波形とはほぼ同じEUVパルス波形になる。このような事情もあって、SOを用いるときはTaプラズマを光源としている。しかし、200 psのTi:Sレーザーを用いることで、Alの線スペクトルでも発光時間が短くできることが確認できたことで、エネルギー分解能の高いサブ μm 顕微EUPS観察ができる見通しが得られた。

8. マルチkHz光源の開発

8.1 レーザー開発

光源のパルス幅を短くすることで、エネルギー分解能は高くできるが、光子の総数は少なくなり、光電子の数が減る。精度の高いショットノイズの小さな光電子スペクトルを描くために必要な検出すべきカウント数は一定であるので、短パルス化すると、より多くのパルスの信

号を積算する必要がある。このため、光源は高繰り返し化が必要になる。上述のように照射レーザーは現在1 kHzまで製品化されており、1 kHzの繰り返しは可能になっているが、性能を高めるには、10 kHz超のEUV光源が必要になる。プラズマを生成するTi:Sレーザーの繰り返し率を10 kHz超にするには、熱レンズ効果を軽減するために、Ti:Sレーザーロッドを液体窒素温度程度まで冷却する必要がある。我々は、10 kHz超の繰り返しを目指して、Ti:Sレーザー再生増幅器の開発を行っている。Fig. 9に示す構成の1 kHz励起の再生増幅器で、Ti:Sロッドを励起するレーザーからTi:Sレーザーへのエネルギー変換効率に関して、世界最大の37 %を達成し、平均出力7.4 Wを得ている¹⁷⁾。1パルスのエネルギーは7.4 mJであり、これは、上述の実験で使った市販レーザーのエネルギーの数倍である。EUV光の短波長化には、照射パワーの増大が必要であり、我々が開発しているTi:S再生増幅器を用いることで、EUV光の短波長化が実現できると期待できる。

8.2 ターゲット開発

固体ターゲットでプラズマを生成すると、クレーターが形成される。強い安定なEUV光を得るには、クレーターを避けてレーザー照射をする必要がある。サブナノ秒の数mJレーザー照射の場合に、クレーターの大きさは数十 μm になるので、ターゲットを0.1 mm/shot移動させれば良い。セラミックスであるBNの場合はテープ化が困難であるが、TaやAlは、50 m程度の長さのテープ化できるので、0.1 mm/shotでテープを送ると、50万ショットという超多数回の連続高繰り返しプラズマ生成ができる。しかしそれでも、1 kHzで運転する場合、500秒つまり、8分でテープが消費され、交換が必要になる。10 kHzの場合は、1分弱に過ぎない。従って、LPP光源のマルチkHz化には、新たなターゲット供給技術の開発が必要である。

我々は、マルチkHz光源用のターゲットとして、液滴搬送法を開発している¹⁸⁾。振動するノズルから水を噴射することで、数kHzから数十kHzの液滴が生成できる。水に微粒子を溶解し、その溶液をノズルに送ることで、微粒子がマルチkHzで供給できる。ノズル径を0.1 mmとし、水の噴出速度を12 m/sとすると、毎秒0.1 ccが供給され、1時間で消費される水の量は0.36リットルである。数十リットルの容量のタンクを準備すれば、100時間連続運転ができる計算である。必要に応じてタンクへの溶液の補給もで

Fig. 9 Configuration of Ti:s re-gen by which the world record conversion efficiency of 37 % has been achieved.¹⁷⁾

きるので、実質的に無限時間のターゲット供給が可能、ということになる。今後開発すべき技術は幾つかあるが、マルチkHz光源のターゲット供給問題は、液滴搬送で解決できると考える。

9. おわりに

超高輝度である、微小点光源である、狭帯域線スペクトルが発生できる、短パルスである、というレーザー生成プラズマの特長を最大限に活かした応用として、考案した光電子分光法EUPSにより、再現性の高い高速過渡現象を内殻励起光電子分光で観察出来るようになった。我々が進めてきたEUPS技術の研究開発により、現在広く利用されているX線管を光源とするXPSの2桁近くも高いサブ μm 空間分解能が、研究製造現場で実現できるようになりつつある。装置化にあたっては、励起及び信号取り込みの高繰り返し化が現在最大の課題である。より多くの元素が観測できるためのEUVマイクロビームの短波長化が必要であるが、科振費「顕微光電子分光法—」の中で、NTT-ATが従来の3倍もの高い反射率の6 nm用多層膜成膜技術を開発した。これをEUPS用のシュバルツシルト集光光学系の成膜に適用するには、成膜率の高度制御技術と面内での膜厚傾斜技術が必要であるが、これらもほぼ確立されており、6 nm光の利用も可能になる見通しである。6 nm光が使えると半導体の最重要元素であるSiや生体中で重要な働きをするPが観測できるようになる。より高空間分解能化のための集光光学基板の高精度化についても、同課題の中でニコンが技術開発を行い、0.5 μm 以下への集光も展望がある。今後は、シュバルツシルト用光学基板の低コスト化も重要課題である。これまで装置がなかったため、顕微光電子分光の応用技術は殆ど行われていなかったが、我々のプロジェクトでは、応用技術の研究にも取り組み、学術的に重要ないくつかの成果を挙げ、顕微光電子分光の重要性を示してきた。今後顕微光電子分光研究が盛んになっていくと考えている。

EUPSでは、サブ μm 空間分解能、高い時間分解能とともに、表面一原子層の情報に高感度である、計測損傷が小さいという特長もある。既に、サブミリ径のマイクロビーム照射のEUPSで、半導体分野で重要な幾つかの酸化膜の評価を始め、XPSとの比較も行っており、興味深いデータが得られつつある。今後、幅広い分野に於ける材料・デバイスの主たる分析技術になると期待している。

謝 辞

本研究は、文部科学省科学技術振興調整費総合研究課題「顕微光電子分光法による材料・デバイスの高度分析法の研究開発」により行われた。また、一部は、同省原子力試験研究「超高輝度kHzプラズマX線光源とその応用の研究開発」、NEDOからの委託研究「次世代半導体材料・プロセス基盤技術開発」「極端紫外線(EUV)露光システムの基盤技術開発事業」に依って行われた。

参考文献

- 1) 富江 敏尚：特許第2764505，英国特許，米国特許#5,569,916.
- 2) T. Tomie, H. Kondo, and H. Shimizu: *Proc. SPIE* **3157** (1997) 176.
- 3) 科振費総合研究課題成果報告http://www.chousei-seika.com/2004_s/2004_s_7/2004_s_7_5koudobunseki/mokuji.htm
- 4) H. Kondo, T. Tomie, and H. Shimizu: *Appl. Phys. Lett.* **72** (1998) 2668.
- 5) H. Kondo, T. Tomie, and H. Shimizu: *Appl. Phys. Lett.* **69** (1996) 182.
- 6) 富江 敏尚，近藤 洋行，清水 秀明：第44回応用物理学関係連合講演会 (1997)。
- 7) Dong-Hoon Lee, et al.: "UPS observation of sub-nm-thick debris contamination on optics" 第49回応用物理学関係連合講演会，Hiratsuka/Japan, (2002)。
- 8) Dong-Hoon Lee, et al.: 第63回応用物理学学会学術講演会，新潟，(2002)。
- 9) 錦織 健太郎，青田 達也，倉島 優一，小宮 山和匡，S. Fontana，屋代 英彦他：第48回応用物理学関係連合講演会 (2001)。
- 10) 錦織 健太郎，坪井 利夫，屋代 英彦，富江 敏尚：第47回応用物理学関係連合講演会 (2000)。
- 11) 錦織 健太郎，坪井 利夫，S. Fontana，小宮 山和匡，青田 達也，屋代 英彦，富江 敏尚：第61回応用物理学学会学術講演会 (2000)。
- 12) 錦織 健太郎，青田 達也，倉島 優一，小宮 山和匡，S. Fontana，屋代 英彦，富江 敏尚：第48回応用物理学関係連合講演会 (2001)。
- 13) 錦織 健太郎，李 東勲，小宮 山和匡，横田 泰志，青田 達也，屋代 英彦，富江 敏尚，伊藤 稔：第49回応用物理学関係連合講演会 (2002)。
- 14) 錦織 健太郎，森脇 大樹，J. Q. Lin，富江 敏尚：第51回応用物理学関係連合講演会 (2004)。
- 15) J. Q. Lin，錦織 健太郎，森脇 大樹，屋代 英彦，富江 敏尚：第51回応用物理学関係連合講演会 (2004)。
- 16) 錦織 健太郎，李 東勲，小宮 山和匡，横田 泰志，青田 達也，屋代 英彦，富江 敏尚，伊藤 稔：第49回応用物理学関係連合講演会 (2002)。
- 17) 松嶋 功，屋代 英彦，富江 敏尚：第51回応用物理学関係連合講演会 (2004)。
- 18) J. Q. Lin，錦織 健太郎，森脇 大樹，屋代 英彦，富江 敏尚：第51回応用物理学関係連合講演会 (2004)。