

真空紫外用モノクロメータ

Erick Jourdain

要旨

ジョバンイボン社(JY)は、グレーティングの開発・生産で世界をリードする利点を活かして、シンクロトロン放射光研究施設向けに、最も革新的な真空紫外用(VUV)モノクロメータを開発した。このモノクロメータは、究極のグレーティング技術と超精密な真空工学を組み合わせたもので、既にいくつかのシンクロトロンセンターに設置され、優れた性能を発揮している。また、現在開発が進められている新しい小型VUV光源と周辺機器の開発には、小型のVUVモノクロメータが不可欠である。本稿では、JYの各種VUV用グレーティング、モノクロメータ、分光器に合わせ、極紫外線リソグラフィやX線光電子分光などの用途を目指して開発を進めている小型のモノクロメータについても紹介する。

1 はじめに

1970年代半ば、ジョバンイボン社(JY)は収差補正型トロイダル・ホログラフィック・グレーティングを開発した。これにより、真空紫外線領域(VUV)における分光性能は目覚ましく進歩し、真空紫外用(VUV)モノクロメータに新たな市場が開けた⁽¹⁾。80年代には、トロイダル・グレーティング・モノクロメータ(TGM)と関連デバイスが世界的に大成功を収めた。当時シンクロトロン放射光施設のVUVビームラインのほとんどに、このモノクロメータが搭載された。現在も最新のビームラインで同様のものが開発されており、2001年から2002年にかけてイギリスDaresburyのシンクロトロン放射光施設に設置されている(図1)。このモノクロメータはJYが保有する真空機械システムの能力を示す好例の一つで、ゴニオメータは角度走査分解能を0.4(arcsec)に保持したまま、最大3つのグレーティング(300×80mm²)を交換できるように約100kgの重量になっている。

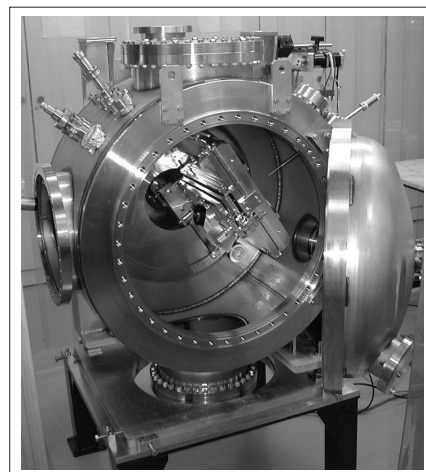


図1 イギリスDaresburyに設置されたトロイダル・グレーティング・モノクロメータ

TGMと関連デバイスの開発に続けて、JYではシンクロトロンの研究者たちと共同研究でモノクロメータの開発・製造を続けた。特に、ここ10年間はシンクロトロン光源の大出力に対応するために、莫大な研究開発が必要となった。これが、フランスの放射光施設(LURE)の科学者たちと協力して、新しいシミュレーションソフト及びオプトメカニカルな解決法を開発しようとした理由である。

シンクロトロン光は、明るい連続スペクトルを持っており、1~100nmの真空紫外線を必要とするような実験に使われる。しかし、シンクロトロンは大規模で高価なため、これが普及を妨げる一因でもあった。今日では、キャピラリ放電やレーザー誘起プラズマなどの新しい小型光源が開発され、シンクロトロン

放射光よりはるかに簡略な装置を使って、VUV領域の実験が卓上で可能になってきた。JYのVUVグループでは、この成長市場に向けて小型モノクロメータ及び分光器をラインナップしている。それらの具体的な応用例を本稿の後半で紹介する。

2 シンクロトロン用VUV 機器

JYでは、モノクロメータの分解能とエネルギー密度を高め、高調波を最小にするために、シンクロトロンセンターと共同で新しいデバイスやモノクロメータの研究開発に力を注いでいる。第3世代のシンクロトロン光源は輝度が高いため、冷却光学素子、高分解能モノクロメータ、安定な機構など専用の機器が必要になってきた。

90年代中頃には、フランスの放射光施設LUREの光学グループと共同で、第3世代のシンクロトロン用の新しいビームライン及びコンポーネントの研究開発プロジェクトをスタートさせた。本プロジェクトでは、まずグレーティングとビームラインの最適化とシミュレーションを行う、次のような3種類の専用ソフトを開発した。これにより、プロジェクトが決定次第、全面的に研究を開始できるようになった。

(1) 回折効率の計算

モノクロメータの心臓部であるグレーティングの回折効率と高調波の遮断の最適化がまず必要となる。これらはJY製のソフトで計算できる。このソフトは電磁気学を土台にしたもので、市販のソフトでは対応できないような特殊な真空紫外用の構造でも、溝深さ(c/d)のようなグレーティングパラメータを定義できる最適化アルゴリズムを持っている。

(2) ホログラフィ・パラメータの計算

VUVモノクロメータでは、波長に応じて溝の間隔を変えたグレーティング(Variable Line Spacing Grating: VLS)を用いて収差を補正するものがあり、このグレーティングの溝の間隔は多項関数で与えられる。

JYは、2つの球面波面の干渉により得られる不均一な溝密度のグレーティングを用いて収差を補正するTGMにおいて、似た手法を1975年に提案している。TGMの場合と同様、VLS用グレーティン

グの密度は、2つの波面の干渉により得ることができる。これにより、ゴーストがなく迷光の少ないホログラフィック・グレーティングが得られた。VLSを形成するためのホログラフィ・パターンニング条件の設定や最適化は、JYが開発したソフト⁽²⁾で実行可能である。このソフトは、平面状、球面状、あるいは非球面状のレーザ波面により作り出される干渉条件を算出する。

(3) ビーム光の光線追跡と最適化

斜入射の光学系用としてJYが特別に開発したソフトを用いると、アンジュレータ、ウィグラ、偏向磁石などの光源周辺から実験チャンバまで、VUV光ビーム全体に渡る光線追跡が可能である。光学表面の傾斜誤差や表面粗さを考慮して、計測機器やビームラインの特性をチェックすることができ、また、メリット関数の最小化による最適化も可能である。

これらのシミュレーションソフトを用いて、LUREの第2世代のストレージリングSACOの新しいビームラインを開発した。このストレージリングは、1986年以来稼働しており、高出力であるが、ビームサイズが大きいため輝度が低く、床振動があるなど高分解能分光ビームラインには適していない。このビームラインでは、極紫外線(Extreme Ultra Violet: EUV)領域で高い性能を発揮するモノクロメータの実現に挑んだ。

本プロジェクトにおける設計前提条件は、エンドユーザ及びSACOの実験環境により決定された。モノクロメータは、30-250 nmの波長範囲で、分解能()が150,000以上でなければならない。この高い目標はシンクロトロン・ビームラインでは得られなかったが、波長を走査しない固定モノクロメータで達成できた。

30 nm以上の波長では垂直入射の光学系を適用することができる。この波長では、材料によっては反射率が30%に近いものがあるからである。しかし、分光反射率が30%ということは、モノクロメータの効率を高く保つために、たくさんのデバイスを使う光学系は適用できないことを意味する。そこで、ローランド円を少し変形した配置(Eagle off plane)のシングル・オプティックス・モノクロメータを選択した。このモノクロメータでは、光の分散及び集光を行う光学素子は球面グレーティングだけである。ローランド円型の問題点は、球面グレーティングの焦点が波長走

査中に移動することである。出口スリットの位置を一定に保つためには、走査中にグレーティングを平行移動することが必要になる。

高分解能を達成するために、モノクロメータの焦点距離は6.65 mと規定されている。このような焦点距離とグレーティング溝密度(4,300本/mm)により、目標とする理論上の分解能である200,000以上を得ることができた。ただし、真空下におけるグレーティングの走査及び平行移動機構に対する制約が生じた。例えば、平行移動の際の高さ誤差は、走査角度分解能を0.05 (arcsec)にした状態で、300 mmの範囲で0.5µm以下になっている必要がある。平行移動機構と走査機構を新たに設計後、1999年、JYは新たに革新的なモノクロメータをビームラインに設置した(図2)。

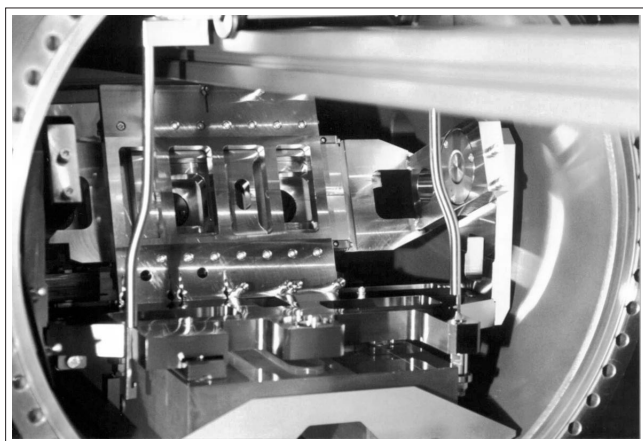


図2 フランスLUREに設置されたEagle Off Plane モノクロメータ

設置・引き渡し完了以来、このモノクロメータは、スペクトル分解能が208,000(図3)、迷光は従来の最良レベル(図4)を示し、科学者が予想した以上の性能を発揮している。この分解能は、現在もシンクロトロン・モノクロメータの世界記録となっている。

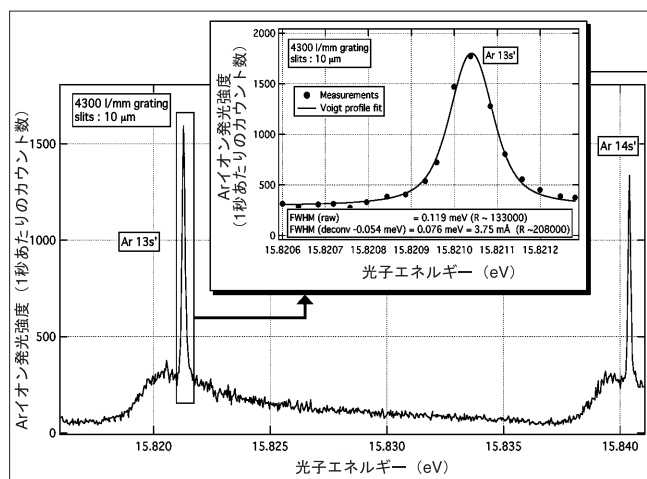


図3 モノクロメータの分解能208,000()を実証したAr自動イオン化分光スペクトル

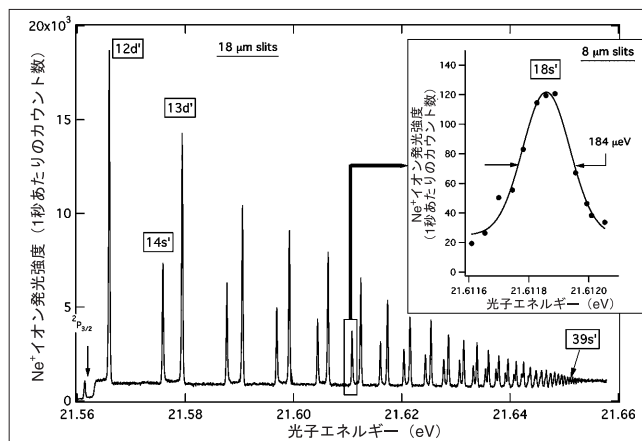


図4 モノクロメータの低い迷光レベルを実証したNe自動イオン化分光スペクトル

3 小型の真空紫外線分光機器

大手の半導体メーカーが進めているEUVリソグラフィ技術開発プロジェクトでは、波長13.5 nmの小型VUV光源を試作した。キャピラリ放電やレーザ誘起プラズマ、中空陰極などの光源は、プロジェクトが目標とした出力や繰り返し速度、信頼性は達成できていない。しかし、既に、数nmから数百nmまでの波長範囲で、この分野で従来使われていたペニング放電光源よりはるかに高エネルギー、繰り返し率を実現している。現在、これらの新しい光源は、シンクロトロンのような高い特性までを必要としない実験用として使われている。例えば、EUV反射率測定、X線光電子分光法(XPS)、EUVエリプソメトリ、蛍光測定などに使われている。

シンクロトロン・モノクロメータの設計に関する長年の経験や、グレーティングの開発・生産能力をベースに、JYは、これらの新しい光源に対応する各種の小型VUVモノクロメータと分光器を製品化している。トロイダルグレーティングと関連機器は、焦点距離が数百mmのものに比較し、スループットや分解能が高い。

JYではVUV用として次のような機種をラインナップしている。

3.1 LHT 30

LHT 30は、収差補正型トロイダルグレーティングをコアとして設計された世界で最初のVUV用モノクロメータである。本器は、3つの異なるグレーティングを用いて10 nmから300 nmまでのVUV全体をカバーする。また、数Åの分解能を持っており、30年経過した現在も特に優れた実験用モノクロメータである。

3.2 VTM 300

VTM 300(図5)は新世代の収差補正型トロイダルグレーティングをコアとして設計されたもので、1つのグレーティングでモノクロメータ及びフラットフィールド分光器として使うことができる。出射孔を1つの出射スリットから2次元検出器に代えた簡単な構造で、モノクロメータとして励起波長を選択したり、フラットフィールド分光器として、光源またはサンプルからの放射光の特性を評価することができる。50 nmから300 nmまでのEUV領域をカバーしており、主にリソグラフィの評価や、100 nm付近では他と比較できないほど高いスループットを持った蛍光励起用として使われる。

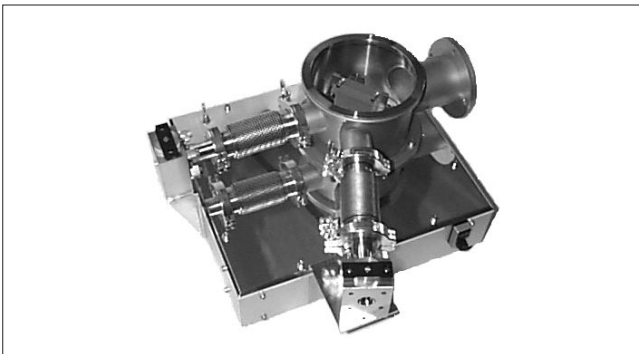


図5 真空紫外分光器 VTM 300

3.3 TGS 300

VUV光源の特性評価は、光源の性能と信頼性の向上にとって重要な課題であり、TGS 300はそのために開発された分光器である。交換可能な3つのフラットフィールド型トロイダルグレーティングを使って、9-32 nm、10-110 nm、または、15-170 nmの広い範囲を数Åの分解能で、時間分解に関する研究を行うことができる。本器には2次元マルチチャンネル・プレート検出器(MCP)またはVUV-CCDカメラが搭載され、光源の評価に最適である。

3.4 PGM 200

PGM 200は他の機種と違って、収差補正型平面グレーティングとトロイダルミラーを組み合わせている。このようなわずかな設計の違いが、入射ビームと出射ビームを平行にし、設置スペースに制限があるような場合に特に有利となる。これは高調波やガスまたは個体ターゲットのプラズマで発生するVUVレーザの場合である。PGM 200は同じ光学系でモノクロメータと分光器の両方に使うことができ、VTMよりも汎用の装置である。

4 おわりに

JYは、長年に渡りVUVシンクロトロン用光学系及びモノクロメータの設計・製作に関する多くの経験を積み、高い評価を得てきた。これは、技術面での大きな成功と、世界のシンクロトロン研究機関による調査により裏付けられている。これはJYのグレーティング・エンジニアリングチームとシンクロトロンの科学者たちが密接に協力し、分光技術を向上させてきた結果である。この成果は、成長中のVUV領域における他の応用にも貢献できるはずである。今後とも、常に新しいソリューションを提供していきたいと考えている。

参考文献

- [1] D. Lepere "Monochromateur a simple rotation du reseau, a reseau holographique sur support torique pour l'ultraviolet lointain", Nouvelle Revue d'Optique, vol. 6 (3), pp. 173-178 (1975).
- [2] B. Deville et al. "Holographically recorded ion-etched variable-line-space gratings", Proc. SPIE Vol. 3450, p. 24-35, Theory and Practice of Surface-Relief Diffraction Gratings: Synchrotron and Other Applications, Wayne R. McKinney; Christopher A. Palmer; Eds.
- [3] L. Nahon et al. "Very high spectral resolution obtained with SU5: A vacuum ultra violet undulator-based beamline at Super-ACO", Review of Scientific Instruments, vol. 72, number 2, February 2001, p.1320-1329.



Dr. Erick Jordain

Jobin Yvon S.A.S
VUV Product Manager