

科学分析向け高性能回折格子

High Performances Diffraction Gratings for Scientific Applications

Arnaud COTEL

Pierre PICHON

Audray LIARD

Yann BERNARD

Frédéric DESSEROUER

Olivier NICOLLE

フランス・ロンジュモー (Longjumeau, France)にあるHORIBA Jobin Yvon SAS (HJY)において設計・製造されている高性能回折格子は、様々な科学研究の用途において重要な構成要素である。回折格子(グレーティング)は科学研究分野において、自然光、レーザー光またはシンクロトロン放射光の光源の分析、測定、調光に用いられる。本稿では、3つの主要な科学用途について、3つの異なる回折格子を種類別に説明する。すなわち、レーザーパルス圧縮用回折格子、XUVシンクロトロン回折格子および、スペースフライト用回折格子である。

High performances diffraction gratings are usually key components for many scientific applications. Diffraction gratings are used in scientific studies to analyze, measure, propagate or tailor the light sources issued from nature, laser radiation or synchrotron radiation. The three main scientific applications we present are based on three different grating types: Laser Pulse Compression Gratings, Space Flight Gratings and XUV Synchrotron Gratings. These high performances diffraction gratings for scientific applications are designed and manufactured by HORIBA Jobin Yvon SAS (HJY part of HORIBA Scientific) at Longjumeau (France) in the Optical Components Division.

はじめに

HORIBA Jobin Yvon SAS (以下：HJY)の歴史は1819年に遡り、オーギュスタン・フレネル(Augustin FRESNEL)やフランソワ・アラゴ(François ARAGO)といった著名な物理学者達の共同研究から始まっている。当社はその黎明期から光学分野において卓越した高性能な製品を追求し、常に最先端の回折格子のトップイノベータであり続けている。1968年、HJYはホログラフィック回折格子を初めて実用化し、新たな科学実験および研究開発への扉を開いた。大型プロジェクトは、長い期間をかけ計画、準備、そして実行される。重要な構成要素である回折格子の完成までには3~4年かかる場合もある。

レーザー工学分野では、HJYは1983年に行われたチャープパルス増幅法^[1](CPA: Chirped Pulse Amplification)の実証実験に、初の大型金コート回折格子を提供した。HJYのパルス圧縮用回折格子は、世界中のレーザー施設で研究を行う科学者の間で広く使われており、フェムト秒級の超短パルス(1フェムト秒=10⁻¹⁵秒)および非常に高いレーザー強度(ペタワット級=10¹⁵ワット:PW)、加えて最大10²⁰ W/cm²に達する強度のレーザー生成を実現している。このよう

な超高レーザー強度は基礎研究の領域、例えば、高強度場の物理や、超短パルスの高エネルギー電子およびイオンの生成などで利用されている。HJYのパルス圧縮用回折格子を用いた超高強度レーザーの主な用途の一つに、粒子の加速が挙げられる。レーザー・プラズマ相互作用を用いた超小型の粒子加速器の開発が研究者たちにより行われている。それらの小型加速器は、従来の加速器では、数百メートルの加速距離が必要であったが、数センチの距離で非常に高いエネルギー(1 GeV=10億電子ボルト)を得ることを目標として研究が行われている。

シンクロトロン施設や極端紫外光(XUV)ビームラインでは、放射光の計測に超高性能の回折格子が必要となる。HJYのイオンエッチング法によるラメラ型ホログラフィック回折格子(Holographic ion-etched lamellar gratings)は、迷光レベルが非常に低く、シンクロトロンやVUVから軟X線までの用途に最適である。格子が基材に完全に刻み込まれているため高い熱負荷に耐えられることから、これらの回折格子は、最新型のシンクロトロン放射光に十分に適合する。HJYがソレイユシンクロトロン(The Synchrotron SOLEIL)と共同で開発した画期的な技術の一つが、本稿で我々が紹介する溝深さ変化型(VGD:

Variable Groove Depth)回折格子である。

宇宙飛行ミッションにあつては、NASAやESAといった宇宙開発機構で、最も困難な実験用装置にたびたびHJY製品が選ばれている。例えば、サイズ400×400 mm・溝本数6000 gr/mmの収差補正型回折格子をリーマン・ヒューズミッション(Lyman FUSE mission)に初めて提供した。ハッブル望遠鏡には撮像分光器STIS(Space Telescope Imaging Spectrograph)が装備されているが、その回折格子はHJY製である。ハッブル宇宙望遠鏡による新世代の科学探査を可能にする宇宙起源分光器(COS: Cosmic Origin Spectrograph)向けホログラフィック回折格子に関し、2000年にNASAから貴重な賞を授与されている。最近では、NASA Jets推進研究所が2006年に開催した授賞式において、軌道上炭素観測衛星(OCO: the Orbiting Carbon Observatory)用の「卓越した」回折格子3種を納入したHJYの製作チームがその功績を讃えられた。OCO衛星のミッションは、人間活動が気候および地球温暖化に及ぼす影響を評価するための、大気中の高精度でのCO₂含有量測定にある。2009年から2011年にかけて、NASAの「木星赤外線オーロラマッピング装置(JIRAM: Jovian InfraRed Auroral Mapper)」, およびESAの「可視赤外線ハイパースペクトル撮像装置(VIHI: Visible Infrared Hyperspectral Imager)」という2つの大型プロジェクトから、HJYのグレーティングチームにとって大きな課題が与えられた。これらの大型プロジェクトに向けた回折格子は、我々がこれまで製作してきたものの中で最も難しく厳しい超高性能の回折格子の製造である。

レーザーパルス圧縮用回折格子の用途

レーザー・プラズマ相互作用による粒子の加速

HJYのパルス圧縮用回折格子を使用した超高強度レーザーの主な用途の一つに粒子の加速がある。レーザー・プラズマ相互作用を用いた、超小型の粒子加速器の開発が研究者たちにより行われている。それらの小型加速器は、電子の加速において、数センチの距離で非常に高いエネルギー(1 GeV=10億電子ボルト)を得ることを目標としている。こうした超高強度レーザーは世界各地で開発されており、例えばタレス社がローレンス・バークレー国立研究所(LBNL)のために開発したBELLAベタワットレーザーや、光州科学技術院先端フォトニクス研究所(GIST-APRI, 韓国)が開発したPULSERベタワットレーザーなどがある。

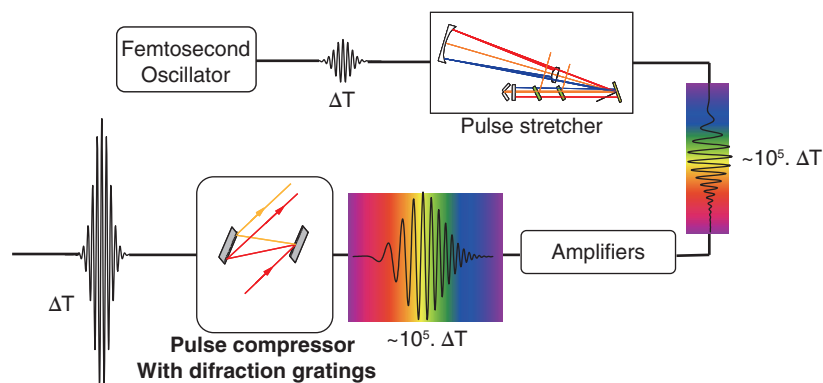


Figure 1 Chirped Pulse Amplification(CPA) technique using high performances diffraction gratings for pulse compression

チャープパルス増幅(CPA)は、フェムト秒級やピコ秒級の超高強度レーザーパルスの生成に広く利用されている。超高強度フェムト秒レーザーの基本的な仕組みをFigure 1に示す。フェムト秒オシレーターにより、近赤外領域においてナノジュール級のエネルギーを持つ、繰返し率がMHzレベルの超短パルスレーザー光が生成される。フェムト秒オシレーターのみでの使用では科学的用途が非常に限られるため、レーザーエネルギーと強度の増大が必要となる。レーザー強度を高める際には、光学部品が損傷しないよう、レーザーパルスの持続時間をフェムト秒からナノ秒へと引き伸ばす必要がある。次に、複数段階にわたって光学増幅器を使用することで、ジュール級のエネルギーレベルが得られる。レーザーの最終段階であり、最重要部にあたるのが、回折格子を用いたパルス圧縮器である。圧縮には2枚または4枚1組の反射型回折格子を使用する。高効率の大型回折格子が必要となるが、より高エネルギーの圧縮パルス生成に対して、レーザー誘起損傷閾値は主な制限因子となる。

真空室には、大型のパルス圧縮用ホログラフィック回折格子(金コート処理, または多層膜誘電体コーティング上にイオンエッチング処理, Figure 2参照)が2枚または4枚設置されており、これによりPeta Watt (PW: 10¹⁵ W)領域のレーザー強度と、最大で10²⁰~10²² W/cm²にも達するエネルギー密度を実現する。これらの性能を達成するためにHJYはプロセスや性能の改善を続け、現在ではレーザーコミュニティに超大型回折格子(高さ360×幅565×厚さ40 mm)を提案できるまでになった。こうしたパルス圧縮用回折格子

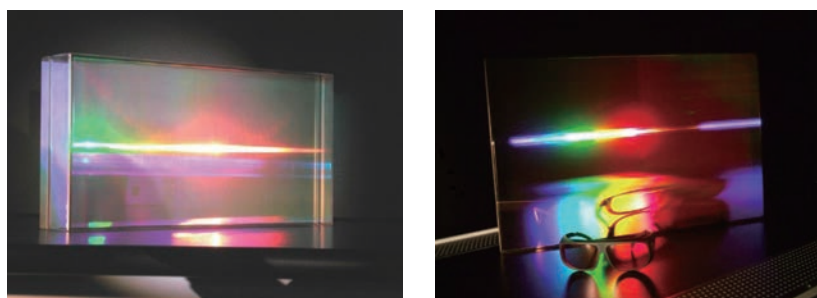


Figure 2 Picture of Multi-Layer Dielectric (MLD) grating(left) and Gold-coated grating(right)

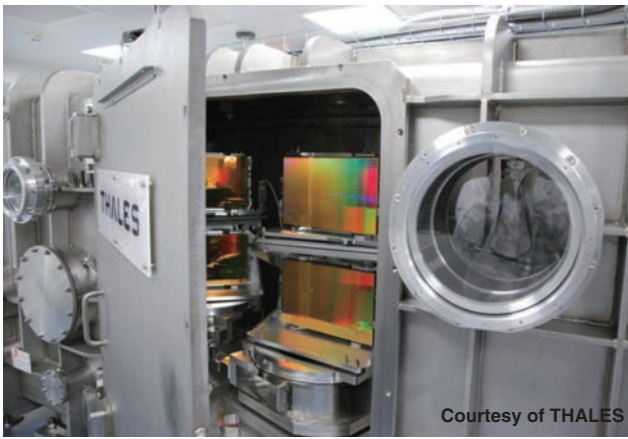


Figure 3 Pulse Compressor vacuum chamber with four HJY gold-coated diffraction gratings

(PCG)の製造工程や特性化は、多くの時間が費やされ複雑なものとなっている。レーザシステムにHJYの大型パルス圧縮用回折格子を設置することにより、韓国のGIST-APRIチームはフェムト秒パルスを繰返し率0.1 Hzで1 PW^[2]にまで圧縮することに成功している。これはこの繰返し率におけるレーザ強度の世界記録である。また、タレス社がLBNLのために開発したBELLAレーザの目標は、1.3 PW、繰返し率1 Hzのビーム生成である^[3]。2011年、高レーザ強度の生成を可能にするため、HJY製の大型パルス圧縮用回折格子が真空室に設置された(**Figure 3**)。HJY製パルス圧縮用回折格子は非常に高い性能・特徴を持つ。

- 90%を超える高い回折効率で貴重な増幅エネルギーを伝達
- 増幅されたスペクトルを保ち、フーリエ変換限界パルス持続時間まで再圧縮する広帯域性能(150~200 nm)
- 高い波面品質により回折限界スポットへのフォーカスが可能
- レーザシステムの最大エネルギーおよび最大レーザ強度に耐えられる、高いレーザ損傷閾値(LDT)
- 空気中でも真空中でも使用可能
- パルス圧縮器に設置しても長期間の使用に耐える

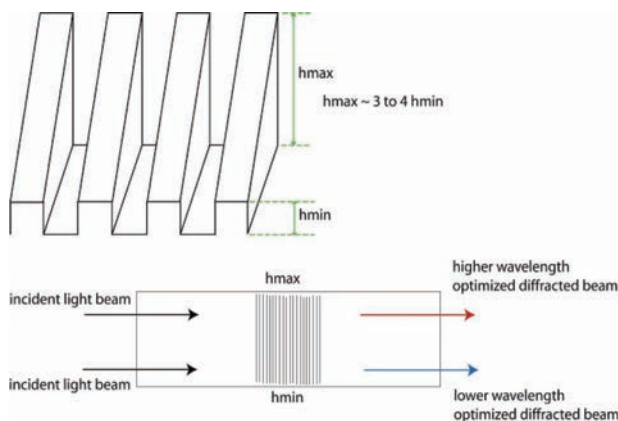


Figure 5 Variable Groove Depth (VGD) grating

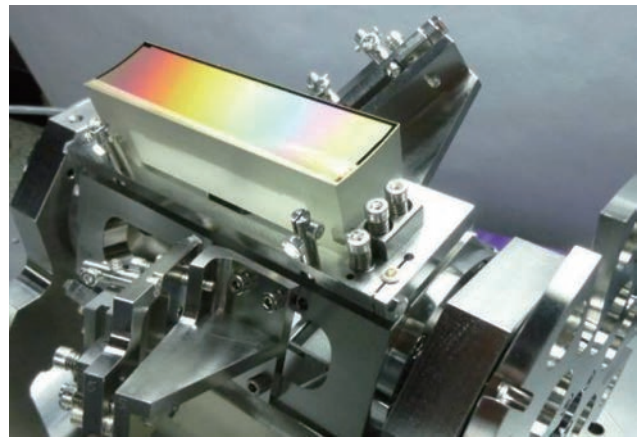
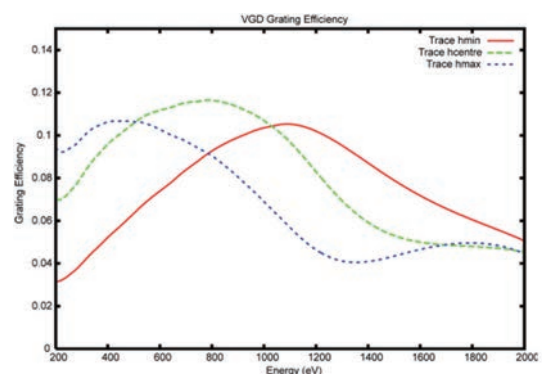


Figure 4 VUV Synchrotron Grating

この種類の回折格子は、多様なレーザ構成に合わせたカスタマイズが可能である。

シンクロトロン用途向けXUV回折格子

シンクロトロン施設やXUVビームラインでは、放射線の計測に超高性能の回折格子が必要となる。HJYのイオンエッチング法によるラメラ型ホログラフィック回折格子は、迷光や回折効率において、また高調波ノイズの低減によって、非常に高い性能を発揮する。用途によって異なる種類のVUV回折格子を様々な形状(平面、球面、円筒状、環状)や溝密度(等間隔型、取差補正型または**Figure 4**の間隔変化(VLS)型)で製造することが可能である。溝間隔変化型回折格子は、多項式型法則によって定義される溝密度の変化を示す。この種の回折格子は、グレーティングモノクロメーターの焦点のぼけを補正する目的でシンクロトロンビームラインの設計に広く使われている。HJYはソレイユシンクロトロン(The Synchrotron SOLEIL)と共同で、ホログラフィックレコードのジオメトリーを定義するソフトウェアツールをVLS回折格子向けに開発した。これにより任意の多項式型VLS法則に基づく回折格子の製作が可能となった。



VUV回折格子の分野では、ある大きなイノベーションにHJYが参画した。溝深さ変化型(VGD)回折格子である。VGD型はフランスのソレイユシンクロトロンとの共同開発によるもので、VUV回折格子の溝の深さに調整を加えたものである(Figure 5)。

VGD回折格子は、溝深さの値(h)をh-minからh-max(h-minの3~4倍)に調整することで、連続的なブレイズ波長の補正と高調波ノイズの修正を同じ分散値(同じ溝密度)で行うことが可能である。このため、刻線領域の一方の端から他端まで、溝深さが連続的に変化する。結果として、回折格子のエネルギーレンジの拡大がVGD回折格子の変換によってのみ行われることとなり、従来のHJY製イオンエッチング式ホログラフィックVUV回折格子の高い性能は維持される。Figure 5に示すように、異なる溝深さの値(h)によって、エネルギーレンジにおける最大効率を変化させることが可能である。

スペースフライト用回折格子

HJYでは、ホログラフィック式/刻線式の反射型および透過型スペースフライト用回折格子を長年製造している。我々はこの2年間で、刻線回折格子の製造において我々が限界と考えてきた一線を、2つの大型プロジェクトによって超えることができた。

木星赤外線オーロラマッピング装置(JIRAM)向け回折格子

プロジェクトの1つはNASA木星ミッションである。木星大気の高解像度画像の撮影、および2~5 μmの近中赤外線領域におけるスペクトル特性の取得であった。JIRAMはこのミッションにおける機器の1つであり、低密度でブレイズ角の小さな回折格子を同機器のために作成する必要があった。そのような刻線回折格子の作成は、ダイヤモンドに大きな負荷が掛かることから困難とされる。その負荷量は1 cm²あたり数トンに相当する。これにより、刻線回折格子が本来持つあらゆる特性を得ることが、従来品(1 mmあたりの溝数が数百本の中密度、およびブレイズ角が中程度のもの)よりも難しくなる。溝の形状(効率に影響)と溝の真直度(波面誤差に影響)が最も決定的な要素となる。この回折格子の寸法は60×32 mmで溝本数は30.3本/mm、ブレイズ角は非常に小さい。顧客は最大50%の相対効率を期待していたが、フライト用モデルについては絶対値で90%以上、認定試験用モデルについては絶対値で85%にまで達した。迷光の総量に関しても、溝位置の不揃いにより生じ



Figure 6 Picture of the JUNO Spacecraft including the HJY grating in the JIRAM instrument

る誤差がわずか18 nm RMSと小さいことが主な理由となり、これよりずっと大きな数値を刻線回折格子に期待していた顧客を良い意味で驚かせることとなった。波面誤差の許容値λはλ/8にまで圧縮された。

苛酷な環境試験の後でも、これらの性能は全て維持された。70℃~-175℃の温度サイクル試験および温度50℃、相対湿度95%の24時間試験における光学的特性および性能への影響はなく、我々の製作したマスターグレーティングが宇宙条件に耐えられることが証明された。4トンの探査機ジュノーは2011年8月5日、アトラスVロケットに搭載され、ケープ・カナベラルから打ち上げられた。木星上空への到達予定は2016年6月となっている^[4](Figure 6)。

可視赤外線ハイパースペクトル撮像装置(VIHI)向け回折格子

JIRAMの成功後、HJYに顧客から、ブレイズ角が小さく、溝密度が低く、非常に広いスペクトル領域を持つ、さらに難度の高い回折格子の製作依頼があった。

機器はVIHI(可視赤外線ハイパースペクトル撮像装置)と呼ばれ、水星表面観測の国際ミッション「ベピ・コロombo(BepiColombo)」に使用される数々の機器の一部である。VIHIの光学機器は望遠鏡と分光器により構成されており、400~2000 nmのスペクトル領域(スペクトルサンプリング:6.25 nm)で、近水点での空間サンプリング間隔を100 mとした、ハイパースペクトルイメージングによる惑星表面画像の取得が可能となる。対象波長が位置するスペクトルの両端において効率が最高となる、単一の回折格子の作成が課題となった。最終的にはスペクトルの中間部を無視し、400 nmでは顧客が期待する数値のほぼ2倍、2000 nmでは数値を50%上回る効率を実現する回折格子を設計、製

造した。JIRAMの場合と同様、この回折格子は光学的特性の低下もなく全ての環境試験に合格し、我々のプロセス・品質がまたも実証された。この宇宙探査機はアリアンV打上げロケットで2017年に打ち上げられ、2024年に軌道に到達する予定である^[5]。

参考文献

- [1] D. Strickland and G. Mourou, *Opt. Comm.*, **56**, 219(1985).
- [2] J. H. Sung, S. K. Lee, T. J. Yu, T. M. Jeong and J. Lee, *Opt. Letters*, **35**, No.18, 3021(2010).
- [3] S. Laux et al, *Opt. Letters*, **37**, No. 11, 1913(2012).
- [4] http://www.nasa.gov/mission_pages/juno/main/index.html (09/07/2015)
- [5] <http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=30> (09/07/2015)



Arnaud COTEL

Scientific Gratings Technical Sales & Marketing Manager
HORIBA Jobin Yvon SAS
Ph. D



Pierre PICHON

Diffraction Gratings R&D Engineer
Optical Component Division
HORIBA Jobin Yvon SAS
Ph. D



Audray LIARD

Diffraction Gratings Production Manager
Optical Component Division
HORIBA Jobin Yvon SAS



Yann BERNARD

Project Manager
Optical Component Division
HORIBA Jobin Yvon SAS



Frédéric DESSEROUER

Scientific Gratings Engineering Manager
Optical Component Division
HORIBA Jobin Yvon S.A.S.



Olivier NICOLLE

Director of the Optical Component Division
HORIBA Jobin Yvon SAS