

JY's Division Information

Grating & OEM

グレーティング・OEM 事業部の製品と技術

Olivier Nicolle

グレーティングは、分光分野においてキーコンポーネントとして使用されている。ジョバンイボン社(JY)のグレーティング・OEM事業部は、分光機器のパイオニアであり世界のリーダーとして、最先端のグレーティングの製作ラインを常に開発し続けている。本稿ではJYが保有するグレーティングの基本技術を述べ、更に本事業部が対象とする応用市場を紹介する。

1 ルールドグレーティング

グレーティングのような高精度な溝を刻む(ルーリング)ことができるメーカーは世界中でも非常に限られている。現在、まともに動くルーリング・エンジンは世界中で10~15台しかなく、そのうちの数台はジョバンイボン社(JY)のものである。

グレーティングのルーリングは、時間がかかり骨の折れる作業で、経験や技能、その上忍耐を必要とする。JYのルーリング・エンジンは、通常、1時間あたり数百回の速度で動く。従って、多数のグレーティングを作るためには、ルーリング・エンジンを故障や磨耗を起さないで1ヶ月ほど連続的に稼働させることが必要となる。

ルーリング・エンジンにおいて最も重要なことは、ダイヤモンドツールの送りが正確な軌道を描くように動かすことである。送りが横にずれると、完成したグレーティングの溝ピッチに誤差が生じてしまう。そこで、各溝の誤差を $0.001\ \mu\text{m}$ 以下の絶対平行度と精度に保つために、ダブル・マイケルソン干渉計で制御しながら、送りを正確に移動させるようにしている。このような製作上の難しさとそれに伴う高いコストを考え、実際に計測機器に用いられるグレーティングのほとんどは、手ごろな“コピー版”、すなわち直接ルーリングされたマスタグレーティングのレプリカである。

2 ホログラフィックグレーティング

ホログラフィの急速な発達は、レーザが可干渉光として入手できるようになった60年代前半に始まった。Dr. G. Pieuchard, Dr. J. Flamand, Dr. Labeyrieらに率いられたJYの開発チームは、1967年にホログラフィを適用したグレーティングを世界で初めて生産した。更に、他社に先駆けてホログラフィを用いて収差補正型グレーティングの開発に成功するなど、その後も精力的に研究・開発を続け、世界中で特許を数多く取得している。

図1に、ホログラフィを利用したグレーティングの生産の原理を示す。

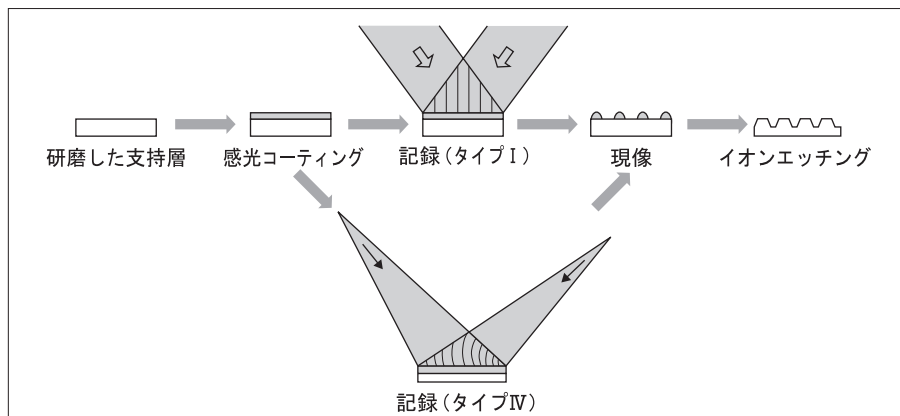


図1 ホログラフィックグレーティングの製作工程

2本のレーザービームをフォトレジストを塗布したオプティカルフラット・ガラス基板(平面度: $\lambda/10$)に照射し、干渉縞を生じさせる。できた干渉縞は、JYが開発した独自の方法で現像処理される。これらの製作工程は非常に繊細で手のかかる作業である。

レーザービームの配置を変更し、適切に設定することによって異なったタイプのグレーティングを作ることができる。左右対称の平行ビームを使って平面型及び凹面型タイプI(ルールドグレーティングと等価)グレーティングを作る。また、干渉縞の作成条件を最適化することによって、収差を完全に補正したタイプIVのグレーティングを得ることができる。

2.1 タイプI:平面及び凹面グレーティング

平面及び凹面のタイプIのホログラフィックグレーティングの製作時には、2本のレーザービームが平行で、法線に対して対称になるように設定される。溝の間隔 d は、式 $d = 2 \sin \theta / \lambda$ から求められる。ここで、 λ は波長、 θ は干渉ビーム間の角度の半分を示す。

このプロセス条件により、等間隔に溝が形成される。 θ を変化させると溝の間隔を任意に調整することができる。ただし、 $\theta = 90^\circ$ の時が最大で、この時 $d = 2/\lambda$ となる。

JYでは、溝密度が最大6000本/mmのタイプIのホログラフィックグレーティングを製作することができる。

2.2 タイプIV:収差補正型グレーティング

タイプIVの収差補正型グレーティングは、一般的に2つの点光源を使って記録する。このため、溝は等間隔でなくなり、共焦点双曲面、または楕円面に対応することになる。2つの光源を適切な位置や角度、アーム長さにすることにより、収差(通常は非点収差とコマ収差)を最低限に抑えるために必要となる高い自由度が得られる。これは、特殊な仕様の溝を形成するような場合に有効に働く。この手法についてはJYが特許を取得している(アメリカ特許番号第4,842,353号「Diffraction apparatus with correcting grating and method of making」A. Thevenonら)。このようにJYでは、過去20年間に独自のソフトウェアと光学系を作り出してきた。

タイプIVの収差補正型グレーティングは、アレー検出器を搭載した分光器用のフラットフィールドグレーティングと真空紫外用の溝間隔可変型グレーティング(VLSグレーティング)の2種類の用途に特に適合する。従来、分光スペクトルを得る時には、凹面グレーティングをローランド円上に置いて使用していた(ローランド円とは、凹面グレーティングの中心点と曲率の正接半径により定義される円のこと)。点光源の入力スリットはこの円上に設定され、焦点ぼけや第1次コマ収差のないスペクトルが円上に形成される。通常、球面収差はそれほど大きくはないが、非点収差はかなり大きい。この結果、ローランド円配置した光学系では、ほんのわずかの回折光しか利用できないことになる。図2にローランド・マウンティングを示す。

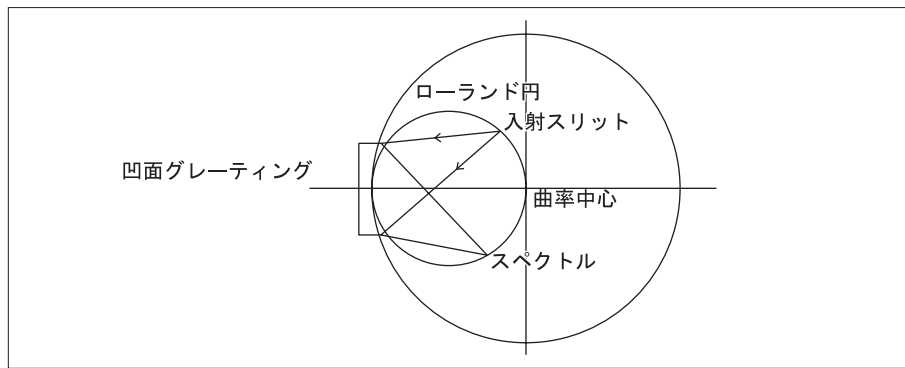


図2 ローランド円の配置

一方、収差補正型凹面グレーティングは、あるスペクトル領域で、直線に近い焦点曲線を形成するように設計することが可能である。フラットフィールドグレーティングは、直線上にスペクトルを描くため、リニアアレー検出器を搭載した測定器に適用する場合に最適である。更に、収差補正により集光効率も改善される。

この方式を使うと、グレーティング以外の光学部品は必要としない。分光器はスリットと、アレー検出器、及びタイプIVの収差補正型凹面グレーティングで構成されるため、産業用として最も信頼性高く、簡単で高性能の光学系を得ることができる。図3に、典型的な収差補正型凹面グレーティングのジオメトリを示す。

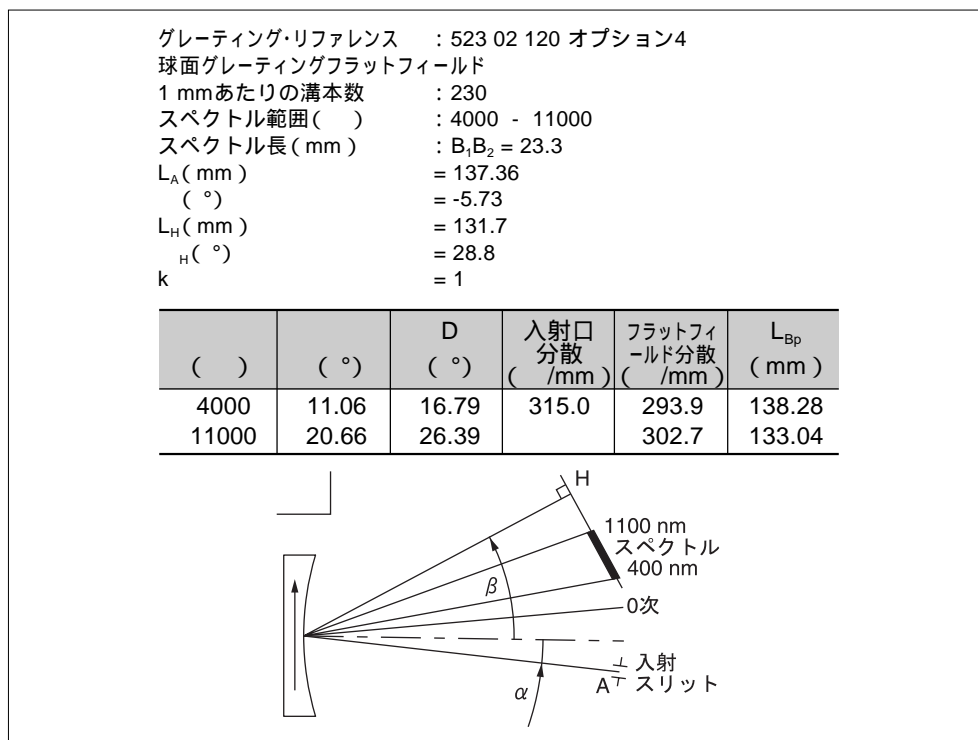


図3 典型的な収差補正型凹面グレーティングのジオメトリ

同様に、最大の光子収集効率が必要とされる真空紫外用としては、VLSグレーティングが非常に有効であることが立証されている。理由は、VLSグレーティングが特有の溝構造を持っており、回折及び集束の両方に対して最適化できるためである。その結果、真空紫外領域において効率の低いコーティングを施しているために、本来なら利用できる光子を無駄にしてしまうような光学部品を省くことが可能になる。

タイプIVの収差補正型凹面グレーティングは、従来のルールドグレーティングでは困難であった科学及び工業分野に対し、解決策を提供することができるようになった。

2.3 ホログラフィックグレーティングのS/N比

グレーティングのユーザにとって最も重要なファクタはS/N比である。信号強度(S)はグレーティングの効率に比例し、ノイズ(N)はゴーストと迷光から生じる。一般的にはゴーストは、グレーティング内の周期的な欠陥により生じる疑似スペクトルである。

ローランドゴーストは、ルーリングエンジンに使用されている非常に精度の高いネジのリードやピッチの周期的なエラーと関連している。迷光は、ランダムで非周期的な振動と、反射面の不完全な平面度の2つに起因する。

ホログラフィックグレーティングは、溝ピッチが完全に等しい状態での干渉現象を記録したものである。従って、ゴーストがなく、迷光は典型的なルールドグレーティングと比較してはるかに少なくなる。また、S/N比は通常非常に高い。

2.4 ホログラフィックグレーティングのエッチング

グレーティングをもっとうまく利用するためには、エネルギーをどれかの次数に集中させることが考えられる(ただし、0次は除く)。エネルギー分布は溝の形状に依存することは以前から知られており、これは、反射素子(溝)をグレーティング面に対して傾くような形状(ノコギリ刃状)にすることで得られる。

JYでは、1982年という早い時期からブレード・イオンエッチ・ホログラフィックグレーティングを製品化した。その後、JYは層状形状の利点を見つけ、新しいファミリーとして加えた。このグレーティングの2次回析効率は、ルールドグレーティングやノコギリ刃状のホログラフィックグレーティングの効率に比較すると極めて小さくなる。従って、これらのグレーティングは、スペクトル範囲の非常に広い光源を使うような用途に特に適している(他の方法では1次回析のノイズレベルが高くなる)。

ホログラフィックグレーティングのもう一つのメリットは、ガラス面までエッチングが可能で、これにより、シンクロトロン光のような極めて強い光に対しても、非常に高い耐久性を有することである。

3 OEM用複製技術

複製法を使うと、マスタグレーティングと同じ品質と性能を持ったグレーティングを数千、数万個複製することが可能になる。生産コストを大幅に削減するため、産業用として使うことが可能になる。

図4に複製グレーティングの製作プロセスを示す。

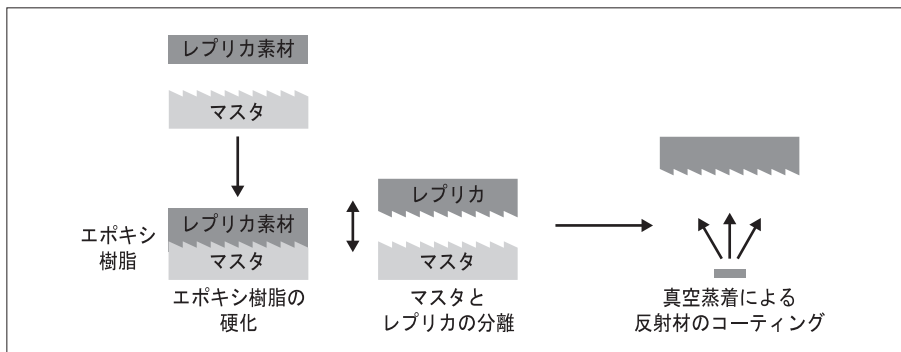


図4 複製グレーティングの製作プロセス

まず、マスタグレーティングを選び、真空下でこれに分離層と反射膜をコーティングする。次に、薄い樹脂をコーティングした基板を、マスタグレーティングの溝面に圧着させる。樹脂が硬化した後、マスタとレプリカを分離する。このようにして、マスタの溝が樹脂の層に成型される。この樹脂層はガラス基板に強く固着している。

4 最先端技術を発展させるLMJ用デバイス

Laser Mega Joule (LMJ) は、フランス原子力庁 (Commissariat à l'Énergie Atomique: CEA) がボルドーに建設中の高エネルギーレーザー核融合研究施設である。2008年の完成時には、240本のパルスレーザービームが2 mmのターゲット上に集光され、2MJの出力が得られることになる。これにより、核融合反応が始まるような高密度、高圧、高温の境界条件が整うことになる。

LMJの特徴は、大型の回折光学部品を使用している点で、これに匹敵する世界で唯一の施設であるアメリカのローレンスリバモア研究所 (American National Ignition Facility) では、従来の屈折光学部品が使用されている。

CEA科学者とJYの技術者の密接な協力の下、JY製の集光型グレーティング (400 × 400 mm²) の実現性が確認され、2000年にはデモ用試作品 (8から12ビーム) の生産を開始した。

図5に、JY社で製作した2つのグレーティングのSEM像を示す。

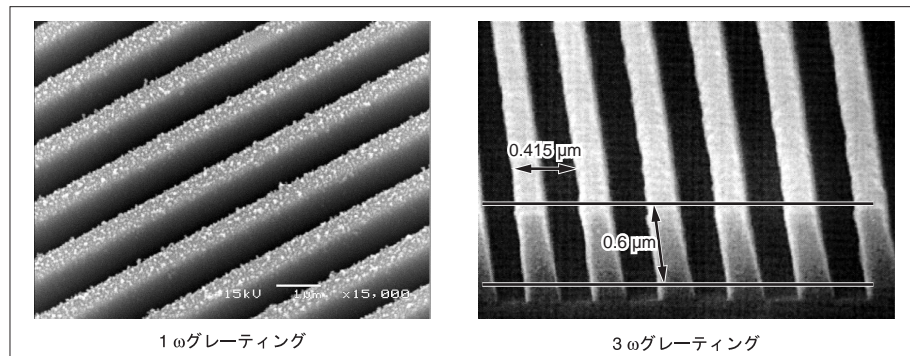


図5 LMJ用グレーティングのSEM像

ホログラフィックグレーティングに関する最先端技術を更に発展させる主要要素は、溝の数と、高いアスペクト比(幅が約 $0.5\ \mu\text{m}$ で、深さが $1\ \mu\text{m}$ から $2\ \mu\text{m}$)である。更に特筆すべき点は、 $400 \times 400\ \text{mm}^2$ という寸法自体、営利企業としては世界初である。

レーザーのエネルギー伝達を最大にし、グレーティングの損傷を防ぐために、グレーティングは超高エネルギーレベルで作動し、効率をできる限り1に近づけなければならない。なお、本用途では、グレーティングは透過モードで用いられており、出力エネルギーと入力エネルギーの比を効率としている。

図6は、効率をマッピングしたものである。理論上の最大効率95%が多数得られており、平均値は90%以上となっている。これはCEAからの要求仕様より優れた数値となっている。

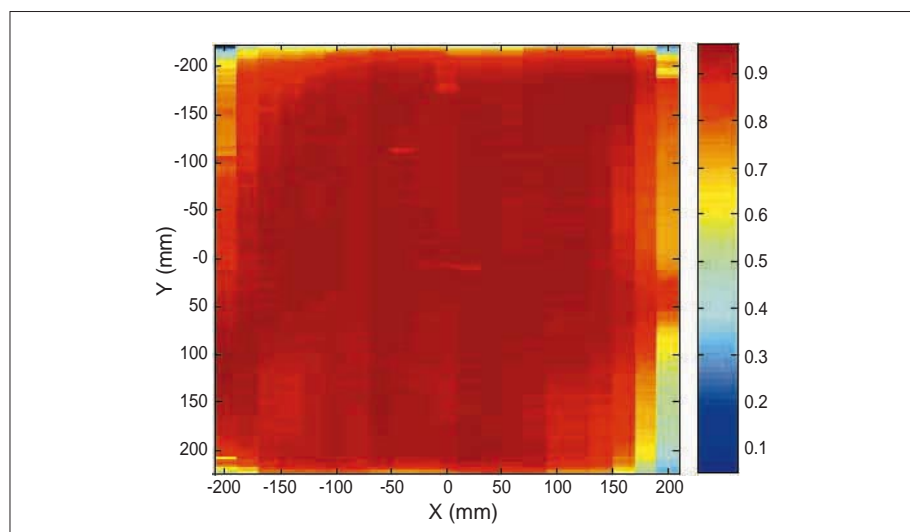


図6 LMJ用グレーティングの効率分布

CEAの科学者たちとの協力により、JYはホログラフィックグレーティングの分野で世界のリーダーとして最先端技術を更に発展させることができた。この成果は、JYの他のグレーティングの開発・生産に対しても大きく貢献している。

5 分光市場への取り組み

グレーティングは、あらゆる分光機器のキーコンポーネントである。JYは、グレーティングのノウハウを土台にして、他の技術を組み込むことによりエンドユーザ市場のニーズに応えてきた。また、科学界と共に新しい技術を開拓・開発し、画期的なグレーティングを活用した用途開発に励んでいる。これらの技術革新の成果は、OEMグループを通してお客様に提供され、部品と同じように集積化した光学系を提案することにより、お客様に新しい価値をもたらすことになる。

グレーティング・OEM事業部では、次の3つの製品群を担当している。

5.1 カスタムグレーティング

この製品群は、非常に高性能で特殊仕様を必要とする先端科学分野のニーズに対処するものである。カスタムグレーティングは、宇宙飛行や天文学、高出力レーザ、パルス・コンプレッサ、シンクロトロン放射光の分野で使われるもので、高度な設計・生産技術が必要な分野である。具体的な製品としては以下のものがある。

- ホログラフィックグレーティング
- 収差補正型グレーティング
- 凹面グレーティング
- シンクロトロン用イオンエッチグレーティング
- パルスコンプレッサ用金メッキグレーティング
- パルスコンプレッサ用多層膜誘電体グレーティング

LMJのような大型・高効率・高エネルギー分野における革新的な仕事は、常に技術革新を求めるJYの伝統を示す典型例である。事実、JYは、NASA(アメリカ航空宇宙局)やESA(ヨーロッパ宇宙機関)などから指名を受けるケースが多い。例えば、ライマン・フューズ計画用として、最初に収差補正型グレーティング(400×400 mm² 6000本/mm)を提供したのはJYである。また、ハッブル望遠鏡には、撮像分光器STISが搭載されており、そのグレーティングはJY製のものである。最近では、2000年12月に、ハッブル望遠鏡の宇宙起源解明用分光装置(Cosmic Origin Spectrograph: COS)用のホログラフィックグレーティングが認められ、NASAから表彰された。

5.2 真空紫外分光器とビームライン

本製品群は、JYの分光機器の製作能力を土台にして、シンクロトロングレーティングの経験から生まれたものである。主な市場目標は、シンクロトロン用の真空紫外分光機器(個々の光学部品から分光ビームラインまでを含む)である。

JYは、小型の卓上型モノクロメータや分光器を通して、先端科学技術分野に真空紫外計測技術を提供してきた。これらの計測機器の用途は、プラズマ解析から、X線レーザ、表面解析、紫外線エリプソメトリ、更には半導体のキャラクタリゼーションまで広範囲に渡っている。

5.3 OEM

OEM部門では、JYの豊富なオプトメカニカルに関する専門知識・技術をお客様に提供し、お客様側でのコストを削減したり、最新の革新的な解決策を作り出すお手伝いをしている。

レプリカグレーティングや測定器（モノクロメータ、分光器）、CCD検出器、更には、光源から検出器までを完全に統合した光学システムを提供している。また、光学機器の製造・組立契約もまた、付随サービスの一つである。

本事業部は、先進的要求対応と信頼性の高さにより、大変好評いただいている。JYの経験豊富なエンジニアリングチームは、あらゆる共同プロジェクトを積極的に受け入れ、市場ニーズに対応するソリューションを追求している。対象分野としては、電気通信から測色、分析化学、半導体、バイオテクノロジーまで非常に幅広い。

図7にフラットフィールド分光器を示す。

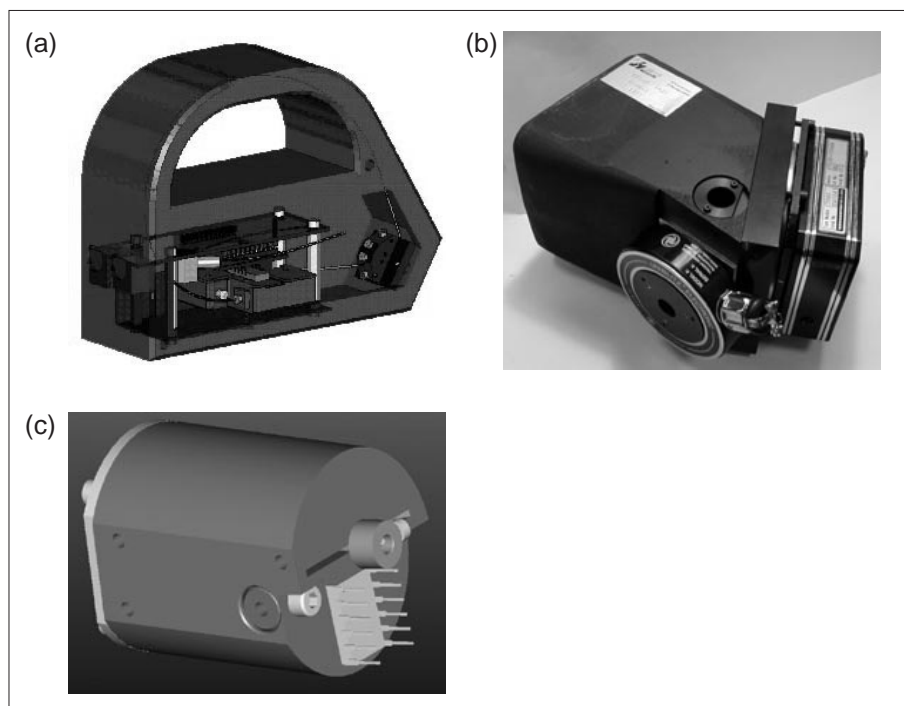


図7 フラットフィールド分光器
 (a) 比色用ダブルスリット分光器 CP-20
 (b) 検出器・シャッター付き分光器 CP-140
 (c) バイオ用分光器 CP-30

6 おわりに

グレーティング・OEM 事業部は、今後ともグレーティング技術の研究開発を継続していく。多層膜誘電体グレーティングに代表されるような最先端技術を更に発展させることにより、有望な成果を生み出すことを期待している。そして、それがJYにおける本事業部のセンター・オブ・エクセレンスとしての機能を果たすことになる。

一方、産業用途を指向した分野では、市場のさまざまなニーズを注意深くリサーチすることが、世界で確たるポジションを確保することになる。そこでは、小さな市場にも対応する姿勢が成功へと導くだろう。



Olivier Nicolle

Jobin Yvon Inc.
Gratings and OEM Division
Director