

ジョバンイボンのコア技術 グレーティングとその応用

Michel Mariton

要旨

グレーティング(回折格子)は、入射光をさまざまな波長に分散させる光学素子で、分光分析、多重化通信、レーザーシステムなどの重要なコンポーネントとして利用される。この分野のパイオニアで現在の世界的リーダーでもあるジョバンイボン社(JY)は、そのコアテクノロジーとして、新型グレーティングの製造に取り組んできた。本稿ではJYのグレーティングの特長とその光学分野への応用例を紹介する。

1 はじめに

ジョバンイボン社(JY)は、J-B. Soleilにより1819年パリに設立された。その初期には、Augustin Fresnelの実験用レンズを製作するなど、著名な科学者との共同研究も盛んに行われていた。こうして築かれた信頼を土台として、卓越した科学技術と広範な事業展開を両立すべく努力を続けてきた結果、今や取引高の85%がフランス国外で達成されるまでになった。

この論文では、グレーティングを例に挙げながら、JYの基本テクノロジーの開発について、また、然るべきユーザにタイミングよく新製品を届けるためのJYの市場努力について紹介する。

JYは1997年にHORIBAグループに参加し、財政支援、プロダクトエンジニアリングのノウハウ、品質文化に関して協力を得ることで、科学技術面・マーケティング面の強化を図った。300mmの半導体ウエハ用超薄膜分析装置(UT-300)を例に挙げて、この提携の将来性について解説する。最後に、将来の展望を述べて、論文を締め括る。

2 グレーティング

2.1 ルールドグレーティング

グレーティングの第1号は、アメリカの天文学者David Rittenhouseが1786年に製作したものとされている。その後も、科学的研究に用いる質の高いグレーティングを製造すべく、さまざまな試みがなされた。19世紀末になってようやく、ジョンズ・ホプキンス大学のHenry Rowland教授が、精巧な刻線機械を使ってグレーティングを製作し始め、こうして生まれたルールドグレーティングは、分光学の分野に衝撃を与えた。

グレーティングの刻線に求められる高い仕様を満たすには、高度のテクノロジーが必要となるため、その製造が可能なメーカーは世界中に数社しかない。JYの刻線機械は、現在良好に稼働している、世界でわずか20台の刻線機械の中に入っている。

グレーティングは、理論上は、多数の細長いスリットを同一平面に平行に等間隔で並べたもの、ということになっている。しかし実際は、これらのスリットの代わりに、平行に刻まれた溝が用いられる。

グレーティングの主要な特性の一つはスペーシング、すなわち隣り合った2つの溝の対応する点の間の距離である。スペーシングは一般にその逆数、すなわち格子定数(1mmあたりの溝本数)によって表される。分光器のニーズにより、グレーティングの刻線はますます緻密になり、1mmあたりの溝本数はますます増え、その結果、要求どおりに刻線を施すことが更に難しくなっている。

その上、グレーティングの質が、溝の真直度・平行度・等距離度の調整精度と密接に関わっているという事実が、事態を更に困難にしている。

また、グレーティングの所期の用途によって決まる溝の輪郭は、最初の溝から最後の溝まで一定に保たなければならない。従って、作動中の刻線ツールの磨耗は、すべて制御されなければならない。

凹面グレーティングの刻線の場合はまた特別で、輪郭は、溝の端から端まで厳密に均一でなければならない。というのもこの場合、刻線ダイヤモンドは、平行に移動するのではなく、グレーティングの曲率中心の周りを動いているからである。こうした動きは、偏心円ゾーン形状の現われ方の欠陥をなくす上で効果を発揮し、更に、非常に大きな口径を持つ凹面グレーティングへの刻線も可能にしている。この先進のメカニズムは、2光束干渉計によって制御され、最高次数においても、ゴースト(望ましくないスペクトル線)はほとんどない。

グレーティングの刻線は、経験と技能と非常な根気を要する、時間がかかって骨の折れる工程である。JYの刻線機械は、通常、1時間に600ストロークのスピードで作動する。そのため、標準的なグレーティング数個に刻線を施すのに、90日以上も機械を作動させなければならないこともある。

刻線機械の最も重要なパラメータは、ダイヤモンドキャリアッジのストロークごとの正確な動きである。少しでも左右にずれれば、完成したグレーティングの溝のスペーシングに誤差が生じてしまう。キャリアッジは、マイケルソン2光束干渉計の精密な制御のもと、完全に平滑なルール上を動く。このマイケルソン干渉計は、溝位置の2乗平均平方根誤差が $0.001\mu\text{m}$ 未満になるように絶対平行度及び移動精度を維持すべく、キャリアッジの移動を制御している。

グレーティングの刻線における上記の困難と、そのことによる費用の高さから、現在機器に使用されているグレーティングの大部分は、直接刻線を施した「マスタ」グレーティングの「コピー」すなわちレプリカである。

2.2 ホログラフィックグレーティング

ホログラフィの原理は、1948年にD. Gabor によって初めて発見された。この偉業が認められて、Gabor は、1971年にノーベル物理学賞を受賞した。

ホログラフィの急速な発展は、可干渉光源としてレーザーを利用できるようになった60年代初期に始まった。現在コレージュ・ド・フランスで天文学教授を務めているDr. A. LaBeyrieの独創的な研究に基づき、

Dr. G. PieuchardとDr. J. Flamandが率いるJYのグレーティングチームは、1967年に初めて実用的なホログラフィックグレーティングの製作に成功した。更にJYは、ホログラフィを利用した収差補正型のグレーティングを世界に先駆けて開発し、その後も徹底的な研究・開発を続け、多数の国際特許を取得した。

現在JYは、多種多様なルールドグレーティングに加えて、高品質のホログラフィックグレーティングも提供する、世界に数社しかない企業の一つとなっている。

図1は、ホログラフィックグレーティングの製造原理を示したものである。

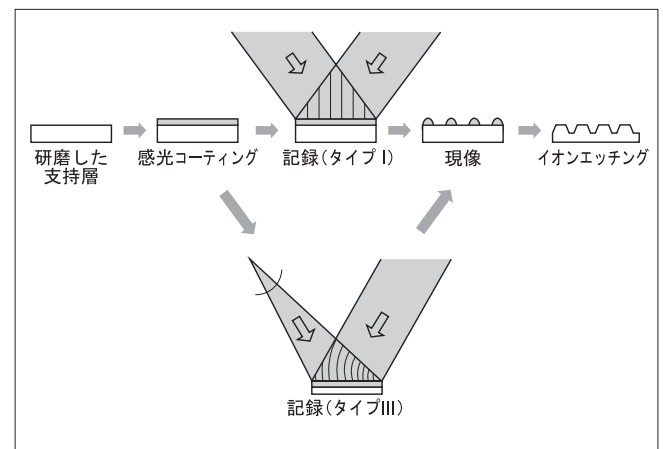


図1 ホログラフィック記録

オプティカルフラットガラス(平面度 $/10$)の上に置かれた感光材料に、2つの単色レーザー光線を当て、干渉縞を作る。

感光材料に記録された干渉縞に、JY独自の加工が施される。記録と加工は非常に精密な作業である。

レーザー光線の配置を変えることにより、平面及び凹面タイプ(ルールドタイプと同等)のグレーティング(左右対称の平行光線の場合)か、凹面タイプ(収差補正タイプ)及びタイプ(無非点収差タイプ)のグレーティング(非平行光線の場合)を製造することができる。

JYは、1mmあたり6000本もの溝を持つホログラフィックグレーティングを提供することができ、ルールド及びホログラフィックのマスタ版を基にしたレプリカを、毎年数万個製造している。

2.3 LMJ用大型透過グレーティング

LMJは、フランスの原子力委員会(CEA)が、現在ボルドーで建設中の高エネルギーレーザー施設である。2008年の施設完成時には、240本のパルスレーザー光線を2mmのターゲットに集束させて、2MJのエネルギーを放出し、核融合に必要な高密度・高圧・高温状態を作り出すことになっている。

LMJの独創性は、大型の回折光学コンポーネントを用いている点にある。これに匹敵するシステムは世界に1つだけあるが(アメリカカリフォルニア州のローレンスリバモア研究所にある国立点火実験施設(NIF))、こちらは古典的な屈折光学コンポーネントを使用している。

CEAとJYの科学者が緊密に協力しあった結果、このユニークなコンポーネント(400×400mm²の集束グレーティング)の実現可能性が確認され、1999年にデモンストレーション用の試作品(8~12本の光線)の製造が開始された。

図2は、JYが製造したグレーティングのうちの2つ*1を、走査型電子顕微鏡(SEM)で拡大した断面図である。このホログラフィックグレーティング技術の飛躍的進歩は(400×400mm²という市販品としては世界初のサイズに加えて)溝本数と高アスペクト比(幅約0.5μmに対して深さ1~2μm)に負うところが大きい。

グレーティングは極めて高いエネルギーレベルで稼動することになるため、その効率を(この用途の場合)グレーティングは透過モードで使用され、効率は透過エネルギーと入射エネルギーの比率によって表される。限りなく1に近くなければならない。そうすることによって、システムのエネルギー移動の総量を最大限に保ち、消耗に伴うグレーティングの損傷を防ぐのである。図3は、グレーティングの表面全域で達成された効率を表したグラフである。このグラフからわかるように、多くの地点で理論上の最大効率である95%が達成されており、その平均値は90%を超える。これはCEAから要求された仕様を超える好成績である。

図4に、大型透過グレーティングの写真を示す。

今回のCEAの科学者との協力により、JYは、ホログラフィックグレーティング分野のリーダーとして、その先端技術を改良することができた。更に、2008年以降のCEAのニーズを満たすことにより、JYが製造するすべてのグレーティング、引いてはすべてのJY製機器の進歩に役立つものと期待している。

*1: 光路に沿って角振動数の比が1:3の2種類のグレーティングを使用。

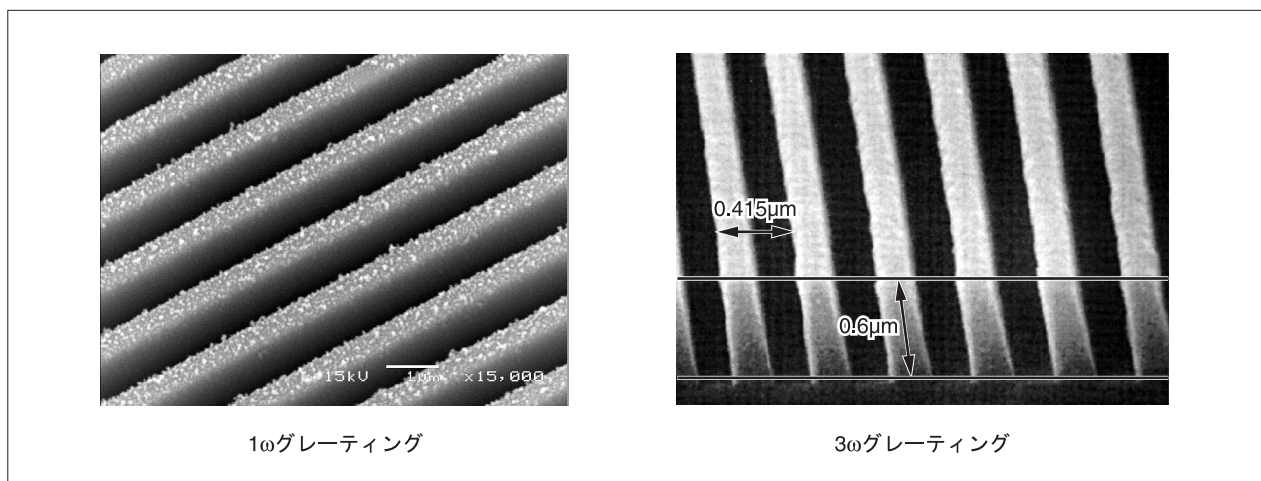


図2 グレーティングのSEM拡大断面図

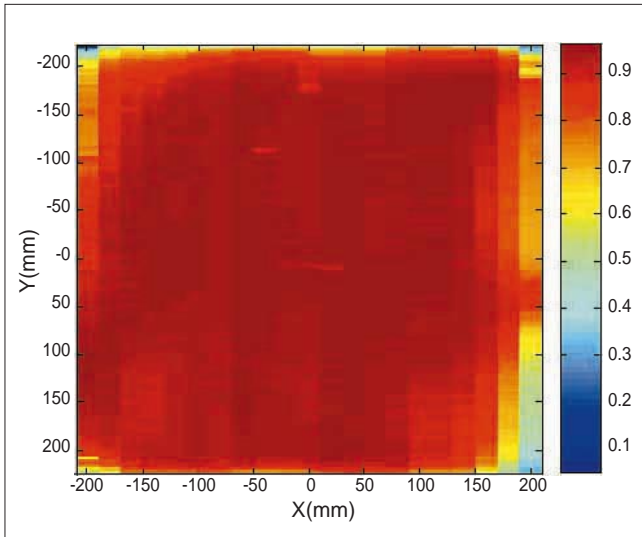


図3 集束グレーティングの効率

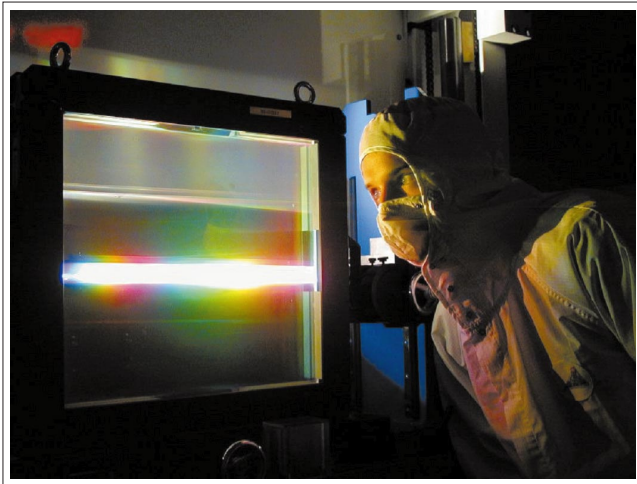


図4 大型透過グレーティング

3 光学分光器市場への進出

グレーティングは、光学分光器の重要なコンポーネントである。そこでJYは、グレーティングに関する豊富な知識を基に、分光器市場のニーズを満たす他のテクノロジーをグレーティングと組み合わせることで、事業範囲の更なる拡大を図ったのである。図5に、その展開イメージを表現する。

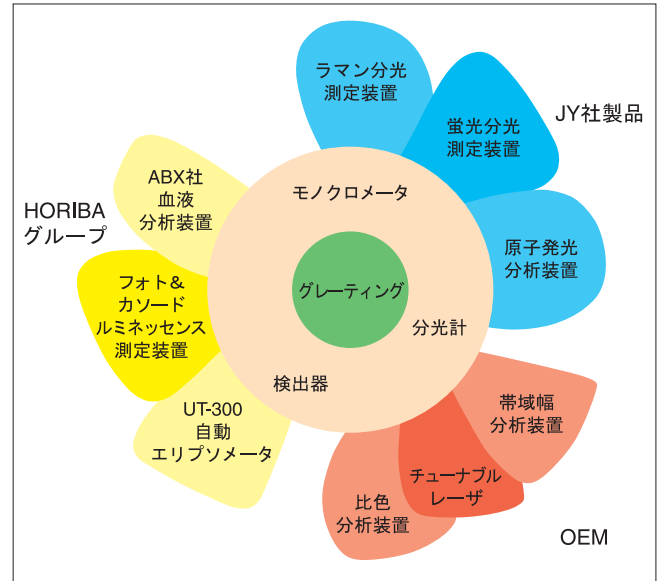


図5 グレーティングから分光法へ

ここで特に重要なのは、JYの中核を成す光学技術力とHORIBAグループの総合力との共同により、ABXの臨床化学検査システム Pentra 400や、HORIBAの全自動超薄膜計測システム UT-300(図6)のような革新的な製品が生まれたという事実である。



図6 UT-300 全自動超薄膜計測システム

JYは、エコール・ポリテクニク(フランス)のB. Drevillon 教授との共同研究により、世界に先駆けて分光エリプソメトリ技術を産業に応用した。教授の率いるチームは、SN比と測定速度を大幅に改善する位相変調方式を開発した。JYは、80年代後半に、この研究を卓上エリプソメータUVISELとして工業化し、現在も同分野のトップの座にある。1996年にはフランス科学研究賞も受賞している。JYの中核を成す光学・電子工学・機械工学技術にはもちろんのこと、エリプソメトリ技術にも、強力なモデリング及び最適化アルゴリズムが必要であるため、JYは、応用数学とソフトウエアを専門とするエンジニアをチームに加えて、技術ベースの拡大を図ることになった。

1997年にHORIBAグループに参加後、分光エリプソメトリ技術が同グループの半導体戦略に役立つ可能性が見えてきた。エリプソメトリ技術は、とりわけ、透明薄膜の複合層の特性を調べたり、その厚さを測ったりするのに適している。半導体産業では、より小さな寸法に向かって限界まで進化するため、超薄ゲート酸化膜の場合のように、エリプソメトリなどの限られた技術をもってしなければ、計測が不可能という事態が起こっている。

そうすると今度は、UVISELのようなセンサに、1時間に最大で200のウエハを分類するロボット型ウエハハンドラーを組み合わせ、工場オートメーションシステムとのソフトウエアインターフェイスを開発する必要が生じた。この開発は、HORIBA京都本社の研究開発部門のJYに対する力添えがなければ実現しなかっただろう。このことは、高度な光学技術を持つJYと、機器のトップメーカーであるHORIBAの提携がいかに有意義であるか、ということを示している。

4 おわりに

JYは、そのコアテクノロジーであるグレーティングの開発を今後も継続する。先端技術を更に改良するために、最適化した多層誘電体を使って有望な初期結果も得られている。このようにJYは、最高の科学水準を維持し、HORIBAグループにおける光学部門の中核としての役目を果たすべく、努力してゆく。

産業用製品については、世界のトップに立つことができるものに的を絞って、市場の要求に注意深く耳を傾けながら開発にあたる。

HORIBAグループとの提携によって得られた先端技術と市場ターゲットは、1819年にJ-B. Soleilが工房を創設して以来連綿と受け継がれてきた我が社の役割を再確認させてくれる。2019年には創立200周年を迎えるが、その時も尊敬されるメーカーとして、また光学分光法分野の世界的リーダーとして活躍していたものだ。



Dr. Michel Mariton

Jobin Yvon S.A.S.
Director General