

はじめに

通常のスเปクトロメータ（分光器：スペクトルの強度測定）ないしは、モノクロメータ（単色光計：種々の波長を含んだ光束からの必要な波長の単色光のピックアップ）は、だいたいにおいて、散乱させる媒体（プリズム・グレーティングなど）、入射・出射スリット、そして平行ビームを作り上げる為の光学部品（ミラーなど）によって構成され、波長データの記録においては、出射スリットの後ろに配置された光検出器が、グレーティングや出射スリットが可動している間に、入射した光を連続的に検出しなければなりません。分光器内各部の可動にはメカニカルな動き（コンピュータコントロールを含む）が前提とされ、時間を要することは勿論、それ自体が光測定上、トラブルになることでさえ多々ございます。

多くのアプリケーションにおいて、特に各種産業において、測定時間を短縮し、外的要因に影響を受けない構造を持つ分光器は、最大の優位性を持つことと我々は考えております。我々、Carl Zeiss社は1970年代後半からダイオードアレイ使用の分光器の開発を進めておりました。

- * ダイオードアレイ（128～1024素子）
出射スリットの位置に固定されていますので、散乱された光のスペクトラム全体を可能な限り幅広く記録します。また、検出器自体と出射スリットの同一化により、余分なコストがかかっておらず、分光器全体の低価格化の実現に貢献しております。
- * Carl Zeiss社製グレーティング
通常、分光測定に必要な、光の集光及び平行化に必要なレンズやミラーの役割も併せ持っています。必要部品の軽減化は、OEM採用及びFA上での使用において大きな決め手となります。
- * 専用光ファイバー（クロスセクションコンバータ）
入射に使われますファイバーは複数本束ねてあるバンドルファイバー型式を採っており、入射光量を効率良くします。出射口は、それ自体が分光器の入射スリットになっており複数本束ねてあるファイバーが一本づつスリット上に並べた設計になっています。複雑なファイバーカップリングは必要ありません。

これらの各部コンポーネントは、Carl Zeiss社で開発された分光器本体に頑丈にモールドされており、諸環境（温度、湿度、振動など）に強い設計となっております。諸環境下での使用が可能で、各部のアライメントが必要無く、高速（max.0.1ミリ秒）で測定できるのは、"MMSシリーズ"だけです。

"MMSシリーズ"による、斬新なアイデアの実現は1994年度の "Photonics Award" 受賞にもつながりました。



概念

1) 概念

分光デバイスの大きさというのは、グレーティングのマウント、入出射スリット、検出器、そしてイメージングミラーなどによって技術的に決まります。物理的には、高分解能な検出を求める場合の焦点距離の拡大ということも問題となります。ただ多くのアプリケーションにおいて高分解能というのは必要とされなく、高い再現性が必要とされますので、超小型なデザイン (30mm x 30mm) という分光器本体デザインは充分と言えます。

"MMS シリーズ"の主要な概念は以下の三つに分かれます。

通常考えられていた分光器のデザイン (光学的にもメカニカル的にも) を変える。
物理的に必要と考えられる部品を最小限にとどめる。
製品それぞれに、可能な限り理想的な部品を採用し、品質の向上をはかる。

2) 光学コンポーネンツ

"MMSシリーズ"に使われています光学コンポーネンツは.....

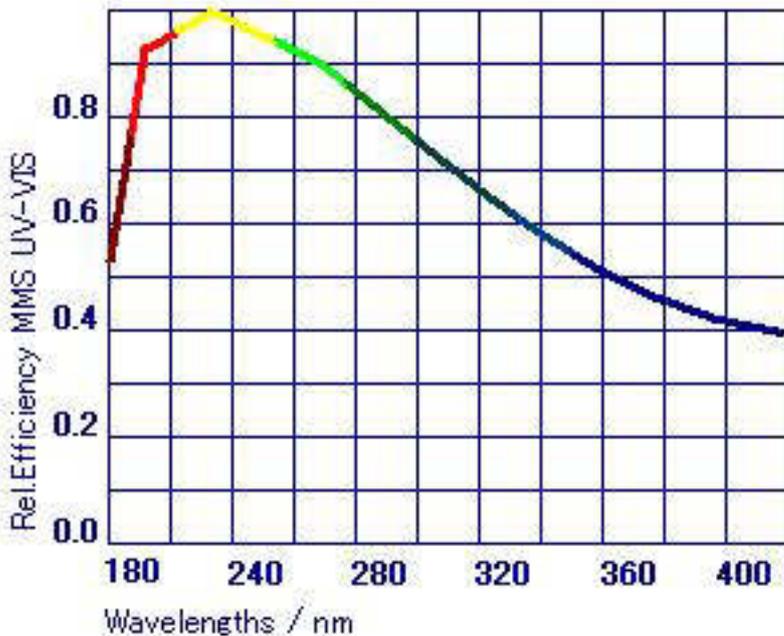
ホログラフィック・グレーティング

専用光ファイバー <クロスセクションコンバータ> (入射スリット兼用)

フォトダイオードアレイ (出射スリット兼用)

分光器本体 (各種サイズが異なります)

分光器本体 (可視光領域対象モデル) はUBK7 (ガラス) 製でできており、ガラスの曲率がついた底面にグレーティングが直に刻まれてます。従って、グレーティングが動いたり、ガスや塵によって汚れる心配は全くありません。また、小さいグレーティングの使用により、光学的に密集された光を効率良く解析ができ、収差補正の必要性がなくなります。ガラスの透過特性により、紫外光領域対象のモデルには、石英が採用されてます。どうしても、220nm付近以下からのガラス材質の透過性が悪くなるからです。又、ガラスの熱膨張による短波長のドリフトも問題となるからです。

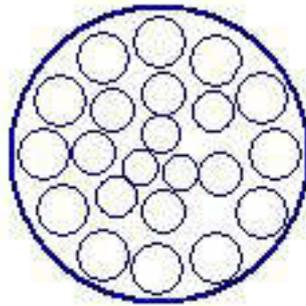


紫外光領域対象 (MMS UV-VIS & MMS UV) に使われているグレーティングは短波長側にブレードされた平面ホログラフィックグレーティングです。非偏向な光に対して非常に高い解析効率を誇る製品です。加えて、グレーティング自体が出射スリットを兼ねているフォトダイオードアレイに光のイメージを送ってます。グレーティング上の刻線数の多様性と曲率がかかった刻線の採用により、コマ収差 (注1) を修正し、焦点カーブをフラットにします。これにより、フラットな構造のフォトダイオードアレイが最適に光検出できる焦点カーブを確保します。超小型な "MMSシリーズ" の短い焦点距離でさえも、6mm以上の長さのフラットなスペクトラを獲得できます。(但し、モデルによって刻線数、ブレード波長は異なります)

注1) コマ収差: レンズの種々の輪帯で倍率が異なっていることによるレンズの収差。これはレンズ系の主軸から離れた距離の画像の部分に生じる。軸外物点が、画面の中心に向かって明るく小さな頭を持った (正のコマ、内向コマ) もの、もしくは画面の中心から離れて明るく小さな頭を持った (負のコマ、外向コマ) ものと彗星状の像として現れる。



専用光ファイバー <クロスセクションコンバータ> (入射スリット兼用) は光量に対する感度を重視した設計になっております。ファイバーの入口部は、複数 (30本) のファイバーが俵状にバンドルされていて分光器の入射スリット部に当たる出口部は30本のファイバーの口が、それぞれスリット状に並べてあります。(図1を参照)スリット状のファイバーの長さはフォトダイオードアレイの高さに相当します。そのようにして、光量の取り込みには、理論上限界に近く達成されます。非常に明るい分光器である理由となります。クロスセクションコンバータ自体の技術は非常に洗練されており、ファイバー長の延長及び入口部のコネクタの変更だけが、改造できる箇所となります。



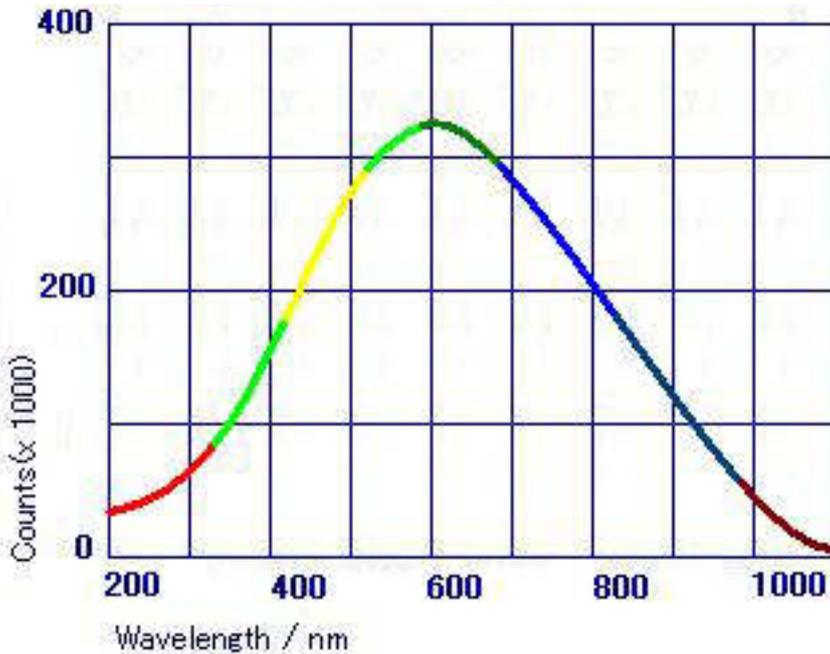
Output
 $b \approx 70 \mu\text{m}$
 $h = 2.5 \text{ mm}$

Input
 $\varnothing = 0.5 \text{ mm}$
 $\text{NA} = 0.2$
 approx. 30 single fibers

フォトダイオードアレイ (出射スリット兼用) は、浜松ホトニクス社製のフォトダイオードアレイ (S3904-256Q相当) を内蔵しています。

MMS専用ということで、特別に小さくデザインされております。また、二次光のカットオフ・フィルターが直接コーティングされており、900nmまでは有効となっております。

- CCDと比較してのフォトダイオードアレイの優位性
- より大きなダイナミックレンジ (無冷却デバイスとの比較で)
- 紫外光領域での高感度
- ノイズが少ない
- クロストークの最小化
- トレイリング効果が無い



3) トータルパッケージ

MMS 全体としては、分光器本体とフォトダイオードアレイからの信号処理を行うプリアンプの基盤の両方を保護するアルミニウムのダイキャストに入ってます。大きさは、40mm x 70mm x 60mmです。また、S/N比を良くする為に、アースをとることが不可欠ですが、アース線を取り付けるポートも付いてます。

" MMSシリーズ"の技術的特性

まず通常、分光器を選択する際に、分光器自体がどれだけの波長範囲を対象としていることが最も重要な基準となります。それに続くのは、スペクトル自体と光の強度に対する分解能が挙げられます。ただ、この分解能の定義というのが、分光器製品ごとに、明確に定義されない場合がありますので、Carl Zeiss社としての考え方をここに記させていただきます。

注1) 波長分解能 (主に以下の4つの要因を用います)

レイリー基準注2) - Rayleigh (DIN Standard : ドイツ標準規格)
 線幅 (半値幅) - FWHM
 素子分解能
 素子の分散 - $\Delta \lambda_{\text{Pixel}}$

注2) レイリー基準: 円形開口を持ったレンズ系が無収差の時、点物体の像は同心の輪によって囲まれた有限の大きさの円板として現れる。二つの点の内、一つの像の中心が始めの最小の輪の上に落ちるように、二つの点が分離していると、その二つの点はレイリー基準により解像していると言う。装置の対物レンズから観察した時に点物体の分離角が存在する条件は、

$$= \frac{1.22}{a}$$

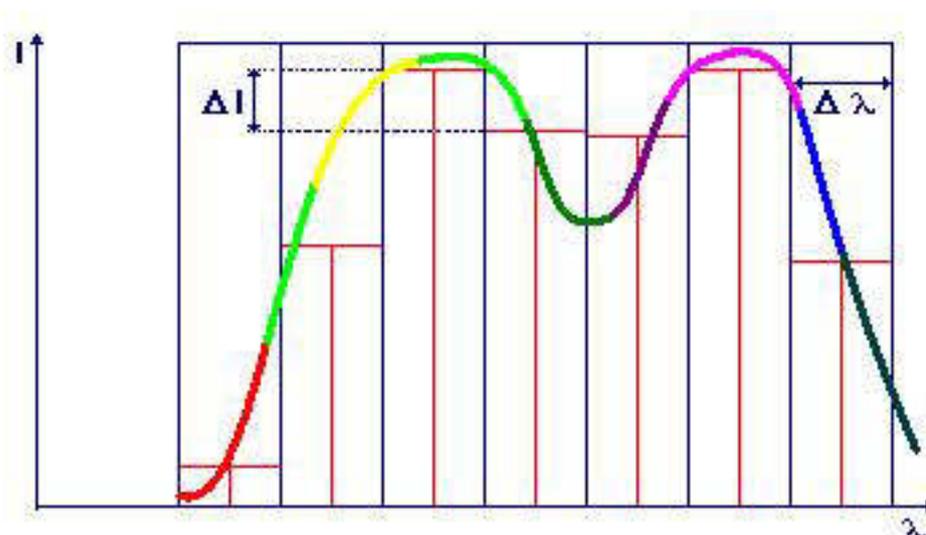
ここで、 λ は光の波長、 a は対物レンズの口径。

これら、4つの要因を定義を用いることによって分光器使用の3通りの大きな性能を発揮できます。

スペクトル内の複数のスペクトル線を分割 (像の位置の解析)
 スペクトル線形の識別
 スペクトル内のピーク波長と最大光強度を測定

2) スペクトルを分割する

ドイツ標準規格 (DIN) によれば、レイリー基準はスペクトル線の分割に関連していると言われてます。レイリー基準は、分断された2つのスペクトル Rayleighの間隔が、どれだけ広くとられているかということ、まず念頭に置き、そしてそれらの分割されたスペクトル線 lineの各々の間隔幅がスペクトル全体の幅より、著しく小さくされることが望まれます。これは、スペクトル自体を分割する上での重要な条件となります。



2 lines with $I_{\text{max},1} = I_{\text{max},2}$ are separated,
 if $I_{\text{decrease}} = 19\%$

3) スペクトル線の幅

スペクトル線 lineの各々の間隔幅の測定を可能とするには、分光器でそれぞれの線自体を、線のスペクトル幅以内で広げることが前提でなければならない。これを行うには、分光器によって作られる線自体の広がり FWHMを知ることが非常に重要になります。

$$\begin{aligned} \text{FWHM} &= 2 (I_{\text{max}} / 2) - 1 (I_{\text{max}} / 2) \\ \text{FWHM} &= 0.8 \times \text{Rayleigh} \end{aligned}$$

4) 波長精度

絶対的な波長の位置 を決めるには、特定のスペクトル内の単線への波長精度 ±が効いてきます。分光器内の測定では、この ±が重要となってきます。このパラメータ値は、読み出し部（検出素子、出射スリット等）のポジショニングの正確性（=決して動いてはならない）とそれらの再現性がいかに安定しているかの二つの要因に依存しております。

これとは逆に、波長の絶対精度は分光器の焦点距離や光に対しての散乱範囲に間接的に依存しており、ある意味では分解能として特定することは困難となります。

分光器の再現性は主に、それらのメカ部分の安定度と温度ドリフトによって、大きく影響されます。以上の要因は、モールド加工されております "MMSシリーズ"においては、全く心配する必要がありません。

5) 散乱

フォトダイオードアレイ 1 素子に対する波長 pixelは波長分解能としては、意味をなしません。なぜなら、それは単にフォトダイオードアレイ上のリニアな散乱であるからです。1 素子あたりのリニアな散乱と波長分解能は入口スリットの幅と分光器のイメージング特性（焦点距離等）を通して関連しています。"MMSシリーズ"の場合は入口スリットが3素子分のイメージに設計されてますので、波長分解能 Rayleighは、 pixelの三倍と考えられます。

フォトダイオードアレイ使用の分光器の利点

1) 信頼できる波長分解能

入射する光の波長を以下に正確に取り込むかを考え、検出素子を固定化することによって "MMSシリーズ"の分解能は、可動コンポーネントを伴った通常の分光器と違い、検出素子内のスペクトルの中心線に対して、二つの左右に隣接したスペクトル線を確実に識別します。

二つの左右に隣接したスペクトル線が固定化された検出素子上で識別される場合、スペクトルの中心線が山の頂点の部分 (I_2) に、二つの隣接した線が谷側に (I_1, I_3) 存在します。それらの、3つの線は、光強度として

$$I_2 = 0.81 \times I_1 (I_3)$$

という関係であれば分割され、波長 () というのは実質 2つの素子上の2本の線 (I_2 と I_1 もしくは、 I_2 と I_3) であらわされます。従って、3素子ずつの読み取りでスペクトル自体の中心線 (= 最大強度の線) と左右に隣接した二つの線の評価ができます。これが、"MMSシリーズ"の信頼できる波長分解能の理由です。しかしながら、もし二つの素子の間 (I_1 と I_2) に最大強度の線がイメージされたら、明確に波長変化を検出するには4つの素子が必要となってきます。理由は、二つの素子 (I_1 と I_2) は両方とも同等の強度を記録してしまい、次の素子 (I_3) まで波長変化の81%が出てきません。従って、実際のスペクトルの山は三素子にまたがってなければならないのです。フォトダイオードアレイ使用の分光器は、素子ごとの光に対する散乱の等間隔幅を応用して、分離された1素子ごとの光情報を検出し、3素子ずつ読み出します。コンピュータ上でのデータ処理には、あらゆるイメージ条件において波長検出をしなければなりませんので4素子が必要とされます。

2) 放物カーブに対する均分化

ピーク波長 λ_{max} (ないしはピーク強度 I_{max}) を決めるには、スペクトル線は最低3素子でイメージされなければなりません。(図2参照)

3素子それぞれにかかる3つの光強度の線 (I_1, I_2, I_3) が中心波長 ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) の点から、図2の放物カーブに真っ直ぐに伸びています。放物カーブをこのように均分すると、ピーク波長 λ_{max} とピーク強度 I_{max} に対するデータを含むピークのカーブが出てきます。この方式の正確性は、中心波長に対しての絶対波長精度に大きく依存しており、MMS シリーズのようなフォトダイオードアレイ使用の分光器は有効であります。

Parabola equation

$$I(\lambda) = a\lambda^2 + b\lambda + c$$

係数

$$a = (I_3 + I_1 - 2I_2) / 2 \Delta\lambda^2$$

$$b = (I_3 - I_1) / 2 \Delta\lambda - 2a\lambda_2$$

$$c = I_2 - a\lambda_2^2 - b\lambda_2$$

$$\lambda_{max} = -b / 2a$$

必要に応じて、それぞれの素子に波長校正をかけることもできますが安定した環境で行わなければ、振動や温度変化が起こる度に校正が変わります。

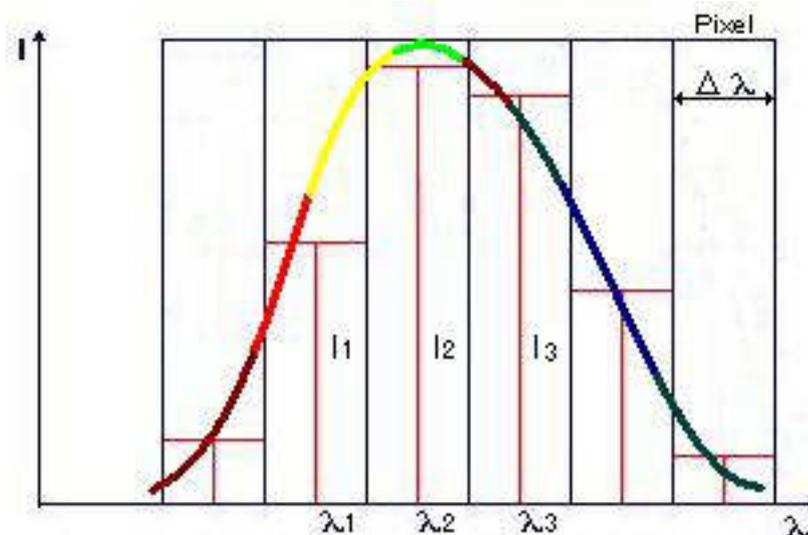


図2

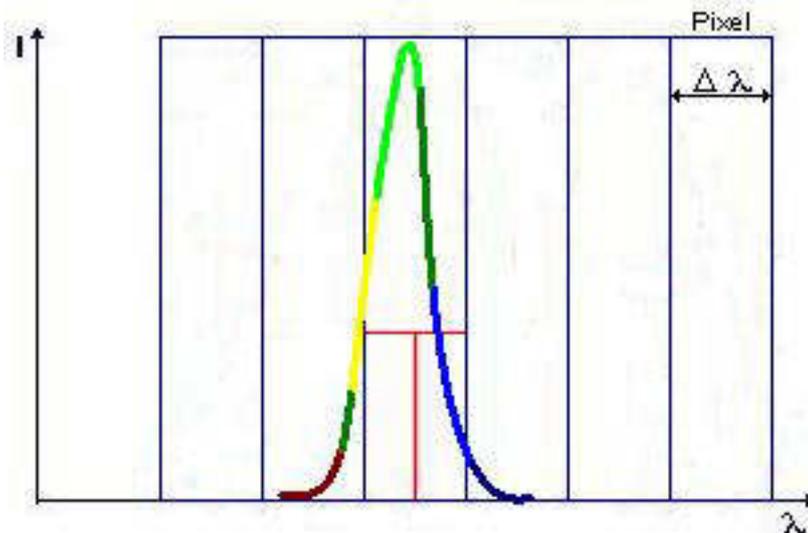


図3

フォトダイオードアレイ使用の分光器のイメージングパフォーマンスが3素子分より少なく光があたる場合、結果として何も検出できないケースがあります。線自体が出力時において非常に狭く、不正確性を増す格好の状況に明らかになってしまいます。たとえば、もし線自体が一つの単素子上だけでイメージされれば、素子上の波長 λ_{pixel} は、不正確なデータということです。

3) 半値幅の決定

放物カーブに対する均分化は半値幅上のデータを出すことにも役立っています。これによって、 $I_{max} / 2$ は放物カーブに対する均分化の中でのみ存在します。放物適合の半値幅とガウシアン適合の半値幅の間のミラーの異なった性質のみが、違いとして出てきます。

フォトダイオードアレイ使用の分光器によって示される半値幅は素子それぞれの位置にライン依存しています。我々が、仕様としてだしているものは最悪のケースを想定して算出した半値幅です。

もっと十分に、また複雑にスペクトルを分析するには、ガウシアン又はローレンツカーブを使うのが良いでしょう。それができれば、また素子それぞれの位置にライン依存せず半値幅を算出することもできるでしょう。

$$FWHM = 2 \left\{ (b / 2a)^2 - (c - I_{max}) / a \right\}^{1/2}$$

光強度の測定

光強度を測定するには、以下の四つの依存しあっている要因をふまえなければなりません。

検出される信号変化の最小化及び安定化

検出信号の変化を抑え安定化させることは、分光器の内部において光軸の安定の為、エレクトロニクスからのノイズを低減することを意味します。初期設定において、ノイズの量を限定することは非常に重要になってきます。"MMSシリーズによって出されるデータは、例えば10ミリ秒光を取り込んだとしたら標準の公差は、20回のデータ記録の後に算出され、光強度を限定した精度をも算出します。

$$I = I_{\text{noise}} =$$

ダイナミックレンジとは、サチュレーションの強度値 I_{sat} とノイズ I_{noise} (=) の比率として定義され、S/N比 (シグナル to ノイズ) に related します。その範囲は、暗電流によって変化します。S/N比は検出器自身だけでなく、測定された信号がデジタル化される上での細分化にも依存しております。

$$\text{Dynamic range} = S/N = I_{\text{sat}} / I_{\text{noise}}$$

となります。それ故に、信号変化の最小はサチュレーション信号として、16384分の1カウントとなります。

光量を検出しなければなりません。高感度な"MMSシリーズは、こんな意味においても非常に適した分光器です。

Preamplifier

Output:	3 V (full modulation)
Sensitivity:	40 $\mu\text{A/V}$
Rise time:	35 $\text{V}/\mu\text{s}$
Frequency range:	< 400 KHz
Power consumption:	50 mW

Interface

Video - Output:	SMB - socket
Diode array drive:	Micromodul - connection MICS - D 10
Connector assignment:	Pin 1,3,5,7,9: 0 V - digital ground
	Pin 2: start
	Pin 4: Phi 2 - clock rate
	Pin 6: EOS - End of Scan
	Pin 8: - 5 V
	Pin 10: + 5 V

Top view

Bottom view

System data

Realised with:	14 - Bit - AD - conversion, integration time 10 ms clock rate 28 KHz and 20 -cycles
Dynamic range:	2 ¹⁴
Noise:	1 count standard deviation

以前は、検出器とその後ろに付くエレクトロニクスが、いかに理想的にリニアリティーを持てるかということが懸念されていましたが、現在は、幸い半導体製検出素子が高精度なので、そのリニアリティーが広い範囲で完璧に保たれております。しかしながら、サチュエーション（リニアリティーでは無い極端な状態）を起こす前に電流の増加によって、検出素子自体で検知される量子の数に対してリニア性が無くなるため、検出器のリニアリティーの範囲はダイナミックレンジより小さい宿命にあります。

4) 外的要因による影響

下の図4は、感度自体が温度自体の変化に全く影響されないことを示しており、温度変化が深刻な要因になる近赤外領域においての感度変化もほとんど無いこともわかります。加えて、フォトダイオードアレイの S / N比も全く温度変化によつ影響はありません。温度の変化による影響で挙げられるのは、温度上昇で暗電流 I_{dark} が増加し、ダイナミックレンジの変化につながることです。ただし、検出器自体を冷却することで解決は充分可能です。

$$I_{dark}(T + 7K) = 2 I_{dark}(T)$$

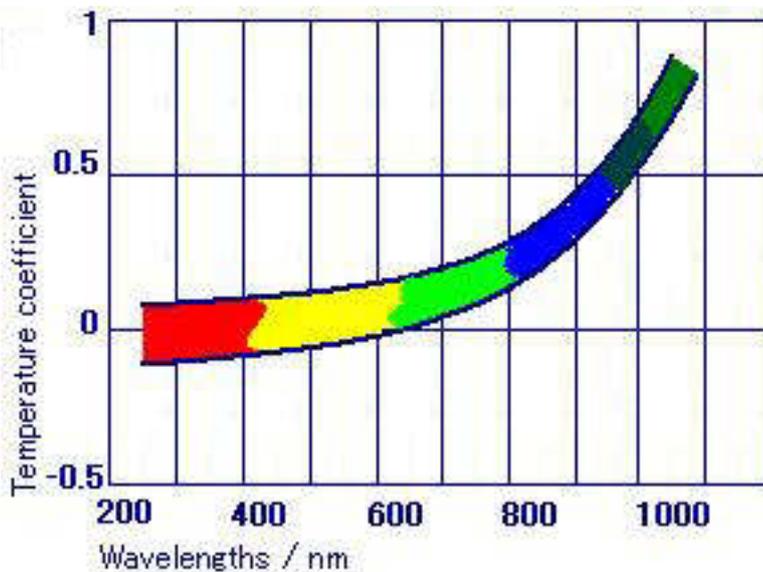


図4

温度のほかには、光の安定度というのも重要な要因になります。光源の選択において電源を安定化させることをお薦め致します。

5) 感度

"最小な検出できうる変化値"は相対的に出せますが、絶対的な値としては、検出できうる最低光量の識別（ないしは、変化値の判断として量子数のカウント）が非常に困難な為、出しておりません。光源の光強度及び光の取り込み方（ファイバーカップリング等）の効率が、難しくさせておりますし、それぞれの波長には依存性もあります。

の要因を考えれば、"MMSシリーズは感度において信頼性の高い製品と言えるでしょう。各種レーザーなど、バンド幅が狭い光に対しても非常に感度が良く、"MMSシリーズの感度としては、 10^{13} カウント（ヘリウムネオンレーザーを 1W を 1 秒間照射して）です。（10カウント/ 1PW/S）

散乱光

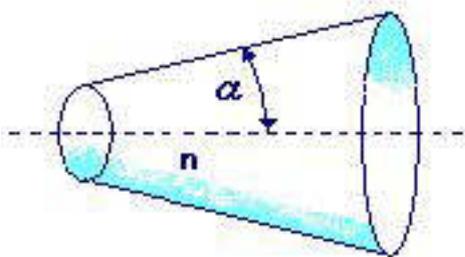
散乱光データに対しての仕様は、特定の測定ユニット（各光源）との接続をしなければ意味をなしません。散乱光データを限定する光源には、紫外領域用に重水素ランプ、可視光領域用にキセノンランプ、そして可視から近赤外領域用にハロゲンランプの三種を用意します。より確実な比較測定を可能にする為、各ランプの散乱レベルを OG570 やKG3 フィルターを使って調整し、短波長側にフィルターの効果を設定します。フォトダイオードアレイ自体に800nmまでの二次散乱のカットフィルターがコーティングされていますので、フィルターの効果は短波長側（190-800nm）に限定されるからです。

散乱光はダイナミックレンジに変化を与えます。例えば散乱光自体の成分が0.1%以下で、散乱時に起こる放射においての変化が10%であれば、ダイナミックレンジに対して10⁻⁴変化を起こします。もし散乱を起こす放射が無ければ、散乱光の量はフィルターを通してかなり減るでしょう。10⁻⁷の変化の中で10³散乱をカットできます。このように、大抵のケースで大きな問題として取り上げられます "ノイズ"は、とても限られた範囲内の現象です。加えて、散乱光による信号がもっと解明されれば、コンピュータによって散乱成分の削除も可能となり、より向上した測定ができるでしょう。

クロスセクションコンバーターとSMA型入射コネクタの特性

入射部ファイバーに採用しておりますクロスセクションコンバーター（俵状に並べたバンドルファイバー一本一本を縦に並び替える）とSMA型入射コネクタは、その光学的特性が優れ、他の光源等とのスムーズな接続を可能とした非常に簡便なツールです。

屈折率値 (n) そして、入射角 (α = 口径数値NAによって決まる) から成り立ちます。"MMSシリーズの、光導波係数は 0.157mm² sr となります。



$$\begin{aligned} G &= F \times n^2, \\ &= 2 \times (1 - \cos \alpha), \\ &= \arcsin NA \end{aligned}$$

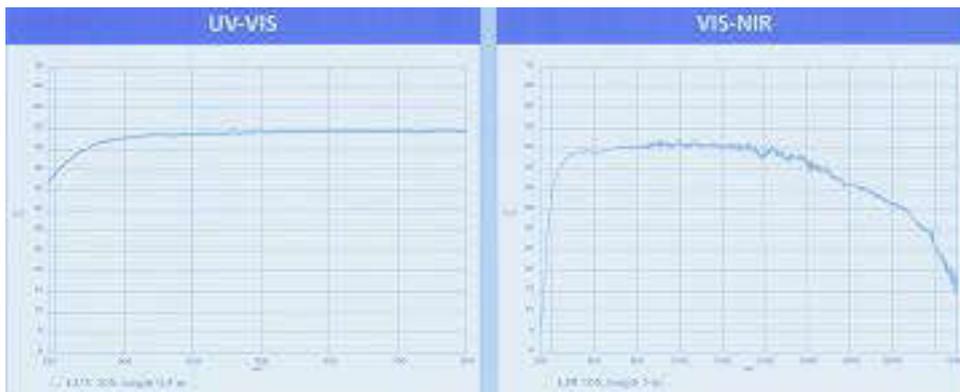
光導波係数 (G) は、各種光源との適合を考える上では、最も良い目安となるもので、フレネルロス注3) 4%を考えた上でも、"MMSシリーズは非常に高い光導波を実現していることを表しております。

注3) フレネルロス：入射光の一部が屈折材料の表面から反射することによって生じる光損失（ファイバー端面での面反射）

2) 光の透過を増やす

クロスセクションコンバーターの採用によって、光の透過は、従来のスリット(長方形)使用より、効率が良くなりました。クロスセクションコンバーターという方式において、透過される光の総量は光が発せられている全体のエリア A_{pt} と光学的に測定ができるエリア A_{eff} との比 FF, CSC として算出されます。クロスセクションに用いられますファイバー一本一本のコア径 d_{fiber} とファイバーの総本数によって光学的に測定ができるエリア A_{eff} は決まり、出射スリット部では、そのまま列になって並べられている状態でエリア A_{eff} は存在しております。

$$FF, CSC = N \times d_{fiber}^2 / d_{Apt}^2$$
$$FF, Slit = 4b / (\quad \times d_{Slit})$$



フォトダイオードアレイ使用分光器を最大限活用する

散乱効果や入射から検出までの光導波の原理を考慮して製作されております"MMMSシリーズ"は、光への高感度特性に優れております。入射するスリットの幅が検出素子の2~3素子分に相当すればグレーティングによって光の像は1対1の割合でイメージされます2~3素子以上に相当すればS/N比や感度自体が悪くなり(1素子がバンド幅自体をカバーできない)、また2~3素子以下に相当すれば波長精度が悪くなります。従って、クロスセクションコンバーター方式のバンドルファイバーそれぞれの径が70 μ m(有効スリット径:約60 μ m)という理由は、フォトダイオードアレイの1素子の幅が25 μ mというサイズであるということと関係します。そして、素子の高さをバンドルファイバーそれぞれの径で割った数値が、そのままバンドルの本数(30本)になります。

エレクトロニクスによる制御

"MMMSシリーズ"には、通常、浜松ホトニクス社製 "S 3904-256Q" という256素子のシリコンのフォトダイオードアレイがモールド接着されております。可能な限り入射される場所から近くに検出部を置きたいという当社の要求に浜松ホトニクス社は、標準のサイズより短いモノを設計するという形で応えて下さいました。そして当社の高効率のグレーティングによって分散を抑えて、その短いアレイに光をもっていくことが実現しました。

それぞれの素子は、入射光によって放電されるコンデンサーの役目を持ち、その後蓄電をして光の量を情報として提供します。蓄電する時間は、光の強度に比例して繰り返され、自動スキャンとも呼べる特徴があります。又、それぞれ素子は同じ信号ラインを通して交互に信号読み出しを行います。それと、外部クロック周波数 f は一つの素子から次の素子へのスイッチング時間や一素子あたりの時間 t_{pixel} に対しての時間間隔によって決まり、それによって可能な最小取り込み時間 $t_{\text{int,min}}$ をも限定されます。

$$\begin{aligned}t_{\text{pixel}} &= 1 / f \\t_{\text{int,min}} &= (N + 1) \times t_{\text{pixel}} \\t_{\text{max}} &= 2 \text{ MHz} \quad t_{\text{int}} \quad 127 \mu\text{s}\end{aligned}$$

取り込み時間は、連続的なスタートパルスの間での時間間隔によって決まります。スタートパルスによってデータの処理は開始されます。例えば、1秒間のような長い取り込み時間で、冷却無しでもおおよそ100カウントを数えます。

2) プリアンプ

フォトダイオードアレイの電氣的制御は浜松ホトニクス社から関連データシートに記述されていますが、"MMSシリーズ純正のプリアンプは、3Vppまでのビデオ信号を極めて低いノイズ特性の上で電圧変換を行います。それに加えて、ダイオードアレイによって必要とされます外部TTLレベル変換も同時に行います。

各アプリケーションへの対応

"MMSシリーズの柔軟性に富んだデザインは、多くのアプリケーションにおいて非常に採用されやすく、分析されるサンプル、使用する環境、測定方法などを限定することがございません。クロスセクション変換法を採用したバンドルファイバーによる入射はまた、光の取り込み方も簡便にし、SMAコネクタによって各光源やサンプルチャンバーとの接続も楽にできます。そのうえ、入射を円で行うことによって、通常のスリットでの入射より照明の位置状況を、より正確に取り込むことを可能としています。

"MMSシリーズで、最も重要な特徴としては、小型なモジュール、光に対しての高感度性、外的要因による影響が全く無い、という三点が挙げられます。それらにより、"オンライン検査"に対して非常に有効なツールとなります。例えば、印刷機の中に組み込み、紙や色自体の検査も実績としてあります。

1) 発光アプリケーション

光源からの光を分光器モジュールに直接入射し、発光状態を観察します。その高感度特性から、光量を落とさず分光器の中へ取り込んでくれますし、集光レンズ等を併用されれば、なお良いでしょう。

(図5参照)

- 使用例の一部
- 1 照明器具の品質チェック
 - 2 LED や波長可変半導体レーザーの波長測定
 - 3 蛍光や発光の測定
 - 4 太陽光、炎の燃焼状況、プラズマ放電等のモニター
 - 5 ウィーンの変位則 注4) に伴っての温度 T の測定
(例;3000K 966nm)

注4) ウィーンの変位則：黒体の温度が上昇すると、放出した放射エネルギーの強さが急激に増加し、放出力のピークは電磁スペクトルのより短い波長にシフトすることを示した定数。放射力のピークが現れる波長とその時の温度との積は定数で近似的に $2897.8 \mu\text{m K}$ に等しい。(図6参照)

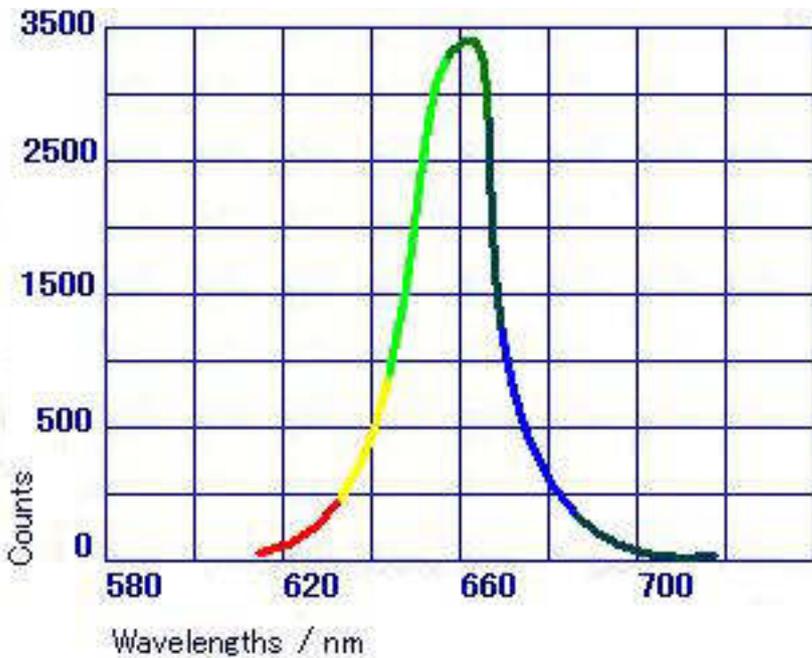
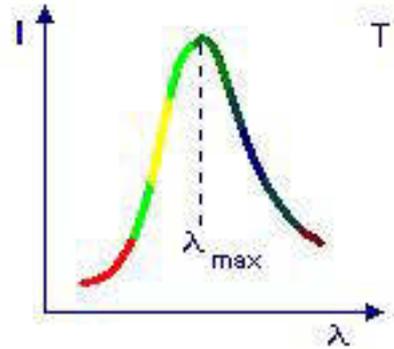


図5



$$\max \times T = 2.8978 \times 10^3 \text{m} \times K$$

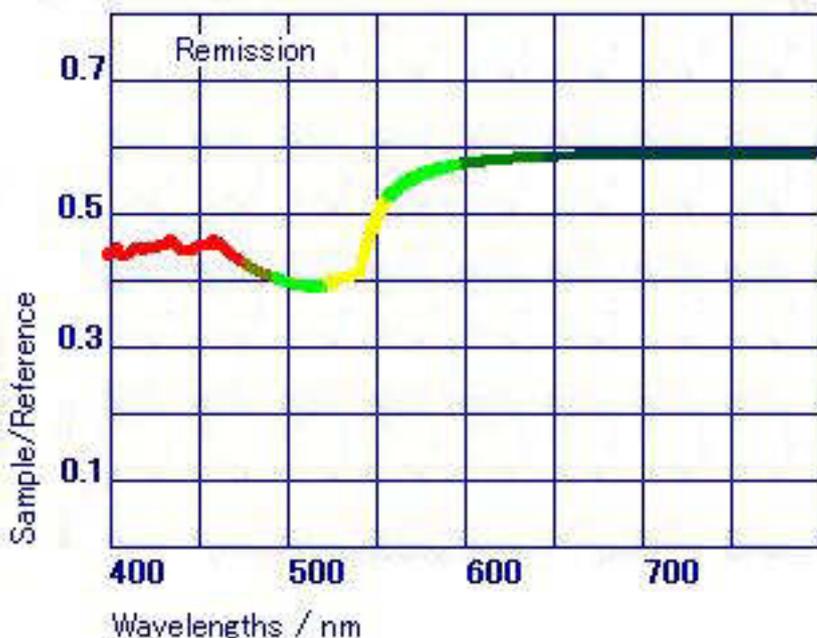
図6

アプリケーション使用における条件

LEDのようにシングルラインのエミッションへは、精度が優れています。ただし、放射光の中で、観察したいシングルラインが非常に近くに複数存在した場合（10nm、7nm、もしくは3nm以内）には、"MMSシリーズは、あまり適したツールとは言えないでしょう。

2) 拡散反射アプリケーション

散乱光からの拡散反射は、サンプル表面からの色情報などが判断できます。分光器使用において留意しなければならない点は、光源と検出器の位置、すなわちサンプルへの入射やサンプルからの出射に対する角度を適切に決めなければなりません。光の量に影響を与えるからです。それと、ほとんどの場合、光源には、ハロゲンランプなどの広いバンドの光放射を使用致しますので、このことも、光の量の適切な取り込みを必要とする理由となります。クロスセクションコンバーター方式は、以上の点を考えても非常に有効な手段となります。(図7参照)



使用例の一部

- 1 サンプルからの拡散反射光を観ての色測定
- 2 各種コーティング状況の測定
- 3 紙の品質分析

アプリケーション使用における条件

特に、限られた条件は無く、その再現性の高さや高感度特性から、色(色度)測定に非常に優れています。

3) 反射アプリケーション

反射は、文字通りサンプル表面から直接反射する光を指し、センサーに対して光源が必要となります。その際に、反射率そのものは入射角 によって決まることを考えなければなりません。ちなみに、0°入射が、最もシンプルな手法で光源からサンプルを経て検出器側まで十分に光を持っていく角度です。(図8参照)

- 使用例の一部1 金属や誘電体を使った通常コーティングや ARコート の分析
- 2 金属ミラーなどの金属加工をモニター
 - 3 エリプソメトリー (注5)

5) エリプソメトリー：特定の様式で、表面から反射した後の偏光ビームの楕円度の変化の測定

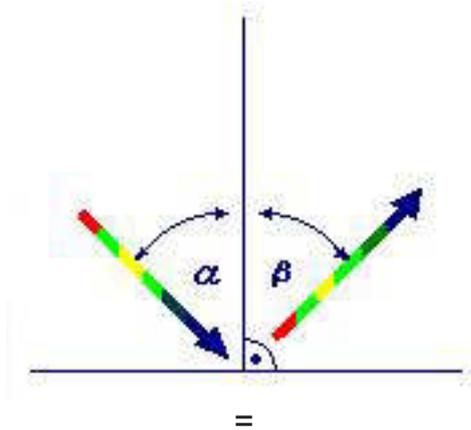


図8

アプリケーション使用における条件

いないので、多くの場合において波長精度の正確性が、分解能の高さそのものより重視されて考えられなければなりません。

依存性を示してくれます。光源と "MMSシリーズにつなげた光ファイバーを用いました浸漬プローブ (透過プローブ) で、サンプル液に浸せば液体濃度測定が手軽に出来ます。液体の濃度は、吸収係数を通して吸収定数で算出されます。光自体は、平行になるように勧めます。従って。大抵の浸漬プローブ (透過プローブ) は平行ビームを作るように工夫されております。また、プローブとクロスセクションコンバーターは SMAコネクタで、簡単に接続できます。(図9参照)

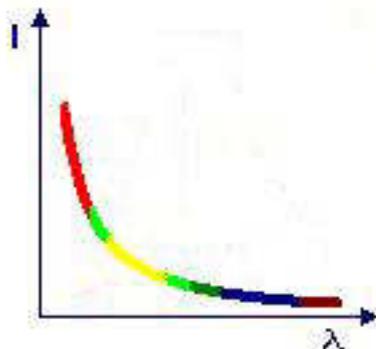


図9

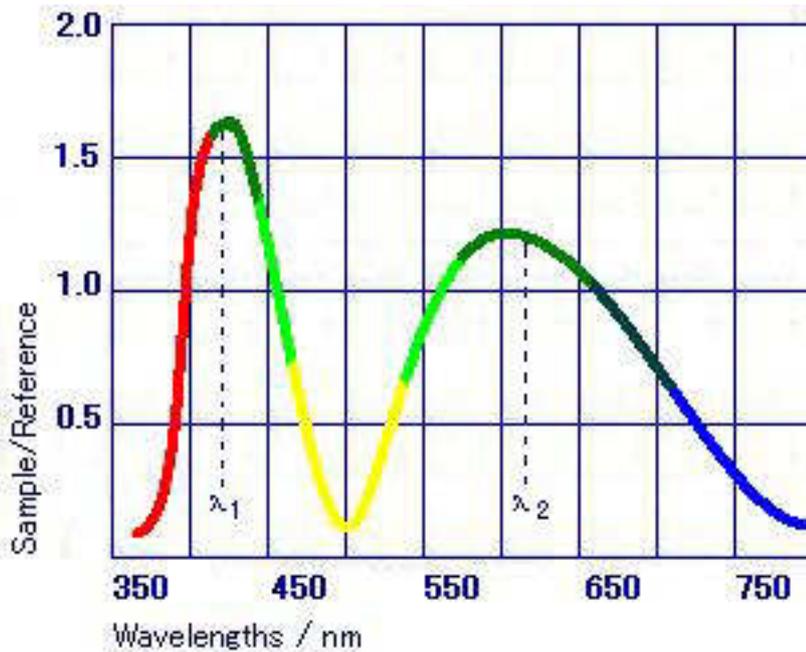
使用例の一部

- 1 色フィルターや干渉フィルターの透過測定評価
- 2 液体濃度測定

注6) ランバートの吸収測：溶液の透過率や透明な固体の内部透過率は層の厚さの指数関数であるという法則

5) 光干渉アプリケーション

透明な層に対して白色光源を使い入射しますと、特定波長間の光路の違いとして光干渉が起こり光学膜厚 $n \times d$ (λ_1 , λ_2 干渉の山の一番目と二番目が算出出来ます。また、屈折率 n がわかれば、幾何学的な膜厚 d は算出できます。各コーティングシステムに対してのフレンジ部分や顕微鏡部などには、ファイバーカップリングによって簡便にでき、膜厚 d がわかっていれば、散乱 $n(\lambda)$ も出てきます。



$$2 n \times d = \lambda_1 \times \lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_2)$$

図10

使用例の一部1 フォトレジスト膜、各フィルムの膜、誘電体膜の厚み測定

アプリケーション使用における条件

正確な膜厚測定を行うには、波長精度がやはり問われ、測定可能な最大膜厚は波長分解能 (2つの干渉山の分別)、最小膜厚は対象波長領域 (干渉のサイクルの内、少なくとも1.5サイクル分の記録) に関連して限定されます。薄い膜厚測定 (干渉サイクルの内、0.5サイクル分以下) はかなりの光強度が必要とされます。測定可能な、膜の厚みは、最大約25 μm で最小は約200nm です。基本的に光学干渉による測定ですので膜の透明度もポイントとなり、膜の乗っている基板のフラット度も考慮しなければなりません。