

技術資料 No.G006-J

ファラデー回転子 ( **R**are-earth **I**ron **G**arnet single crystals )

**GRANOPT**

6/1/2015

## 目次

1. ファラデー回転子の種類	2	7. 反射防止膜	19
2. 品番について		7-1. 種類	
3. 特性一覧		7-2. 特性	
4. ビスマス置換希土類鉄ガーネット単結晶について	3	7-2-1. “A”コート(対空気)	
4-1. 結晶構造		7-2-2. “E”コート(対接着剤)	20
4-2. 光学特性	4	7-3. 光の入射角の影響	
4-3. 磁気特性	5	8. 信頼性試験	
4-4. 鉛含有量		8-1. 環境試験	
5. 光学特性	6	8-2. 強い光による影響	21
5-1. ファラデー回転角と消光比		8-2-1. パルスレーザ	
5-1-1. 測定方法		8-2-2. 光吸収による温度上昇	
5-1-2. 波長による変化		9. 表面品質	22
5-1-3. 温度変化	7	9-1. 標準仕様	
5-1-4. 入射角の影響	8	9-2. 欠陥や AR 抜けの及ぼす影響	
5-1-5. 応力の影響	9	9-3. キズや AR キズの及ぼす影響	23
5-2. 挿入損失と屈折角	10	9-4. チッピングと角欠け	
5-2-1. 測定方法		10. その他	
5-2-2. 挿入損失		10-1. ストリエーション	24
5-2-3. 屈折角と結合損失	11	10-2. スワール	
5-2-4. 温度特性		10-3. アンジュレーション	
5-3. 外部磁界と光学特性	12		
5-3-1. ファラデー回転角と消光比			
5-3-2. 磁区構造による回折現象	13		
6. 磁気特性	14		
6-1. 磁化曲線			
6-2. 飽和磁界			
6-3. 保磁力	15		
6-3-1 磁石を必要としないファラデー回転子	16		
6-3-2 GMF の使用方法	17		
6-4. 磁気補償温度とキュリー温度	18		

## 1. ファラデー回転子の種類

この技術資料は、当社のファラデー回転子の特性について記載したものです。当社の全製品は、RoHS 規制に適合しています。

### G シリーズ

**GTD** (TD は Temperature Dependence の意)は、温度特性と波長特性に優れたファラデー回転子です。一般的にフリースペースの光アイソレータに用いられています。

**GLB** (LB は L-Band の意)は、Lバンドの波長域において、挿入損失が小さいことを特徴としていて、一般的にインラインの光アイソレータに用いられています。

**GSF** (SF は Saturation Field の意)は、飽和磁界が小さいことを特徴とするファラデー回転子です。光アイソレータの形状を小さくするために、また磁界にてファラデー回転の向きを変える光スイッチなどに使われます。

**GMF** (MF は Magnet-Free の意)は、永久磁石といった外部からの磁界を必要としないファラデー回転子です。

### E シリーズ

**ETD** は、**GTD** と全く同じ特性を持ち、鉛を全く含まない製品です。

## 2. 品番について

ご注文の際は、下記の品番にて製品をご指定して下さい。

AAABBBBCD – その他情報 ex. GTD 1550 L A - 45 度±0.5 度

AAA	品種	GTD, GLB, GSF, GMF, ETD	
BBBB	波長	1550(nm); 1310(nm), etc.	
C	サイズ	L; 11mm 角	C; チップ
D	反射防止膜	A; 対空気	E; 対接着剤
		N; なし	X; その他

その他の情報 回転角の精度やチップサイズといった情報

\* 当社の標準仕様とご要求が異なる場合は、ご相談下さい。

## 3. 特性一覧

### 45 度回転子の波長係数, $\Delta\theta/\Delta\lambda$ (deg/nm)

	GTD	GLB	GSF	GMF	ETD
1310nm	0.085	/	0.085	0.085	0.085
1480nm	0.07	0.075	0.075	0.075	0.07
1550nm	0.06	0.07	0.065	0.065	0.06
1590nm	0.055	0.065	0.06	0.06	0.055

### 45 度回転子の温度係数, $\Delta\theta/\Delta T$ (deg/C)

	GTD	GLB	GSF	GMF	ETD
1310nm	0.04	/	0.07	0.07	0.04
1480 - 1590nm	0.045	0.065			0.045

### 挿入損失(dB)

	GTD	GLB	GSF	GMF	ETD
1310 - 1550nm	0.1	0.05	0.1	0.1	0.1
1590nm	0.16		0.12	0.16	0.16

### 厚さ(μm) (typ.)

	GTD	GLB	GSF	GMF	ETD
1310nm	310	/	320	280	310
1550nm	450	390	475	420	450

### 磁気特性

	GTD	GLB	GSF	GMF	ETD
Hs(Oe)	700	800	200	/	700
Tcomp.(C)	<-50	<-50	-50	0	<-50
Tc(C)	300	300	250	230	300
Hc(Oe)	/	/	/	500	/

Hs; チップサイズ 1mm 角の飽和磁界、6-2 項をご参照下さい。

Tcomp.; 磁気補償温度

Tc; キュリー温度

Hc; 保磁力

#### 4. ビスマス置換希土類鉄ガーネット単結晶(RIG)

##### 4-1. 結晶構造

当社では、ファラデー回転子の材料であるビスマス置換希土類鉄ガーネット単結晶(RIG)を液相エピタキシャル(LPE)法にて製造しています。

RIG は、 $(C_3)(A_2D_3)O_{12}$  の化学式で記載される極めて安定な酸化物で、図 4-1 に示すように立方晶の結晶構造を有する単結晶です。表 4-1 と図 4-2 に、RIG の物性値を記載しました。

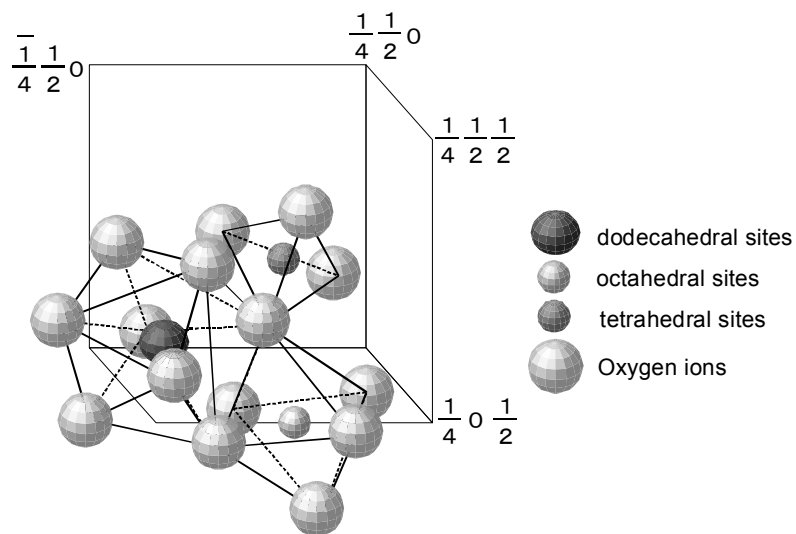


図 4-1 結晶構造 (ガーネット単結晶)

Table. 4-1 各種 RIG の特性

	<i>GTD</i>	<i>GLB</i>	<i>GSF</i>	<i>GMF</i>	<i>ETD</i>
格子定数 (Å)	12.5				
熱膨張係数 ( $10^{-6} K^{-1}$ )	11		10		11
屈折率 (1550nm) * Fig.4-2	2.3 – 2.4				
モース硬度*	7				
ヤング率 (GPa)	200				
ポアソン比*	0.29				
密度* ( $g/cm^3$ )	6.7				
熱伝導率* ( $W/m K$ )	5				
熱容量* ( $J/mole K$ )	420				

\* 文献値からの算出

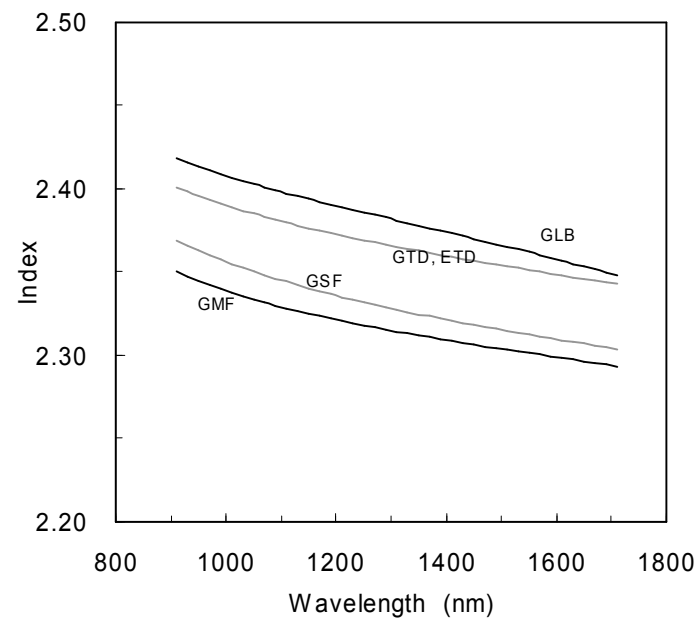


図 4-2 屈折率

## 4-2. 光学特性

RIG は 1 $\mu\text{m}$  から 5 $\mu\text{m}$  の近赤外域や中赤外域で透明で、巨大なファラデー効果を持つ磁気光学材料です。ファラデー効果とは、磁化した物質を透過した光の偏光面が回転する現象で、左右円偏光の応答性の違いから生じる現象です。

RIG のファラデー回転係数は、近赤外域で 1000~2000(deg/cm)と、とても大きな値です。図 4-3 は、GTD のファラデー回転係数、すなわち 1cm 当たりのファラデー回転角を示したものです。ファラデー回転係数の大きさやその波長変化、温度変化は、製品によって異なります。詳しくは、3 項をご参照下さい。当社の製品は、ファラデー回転角の大きさが特定の波長で 45 度となるように、製品の膜厚を調整しています。

直線偏光を RIG に透過させるとファラデー回転が生じますが、このとき直線偏光はいくらか楕円化します。この楕円化の程度は、消光比にて表わします。消光比は、材料の磁気光学や外部応力(5-1-5 項参照)、AR コートの性能(5-1-4 項参照)などにより影響を受けます。また測定に使った光源の特性(単色性)が低い場合には、図 4-3 のファラデー回転角の波長変化が原因で、消光比が低く観察される場合もあります。

全ての RIG は、可視域で吸収のある鉄イオンを含みますので、可視域では不透明です。また GLB を除き他の製品では、希土類イオンの弱い吸収のため、L バンド帯で挿入損失が大きくなる品種があります。詳しくは 5-2 項をご参照下さい。

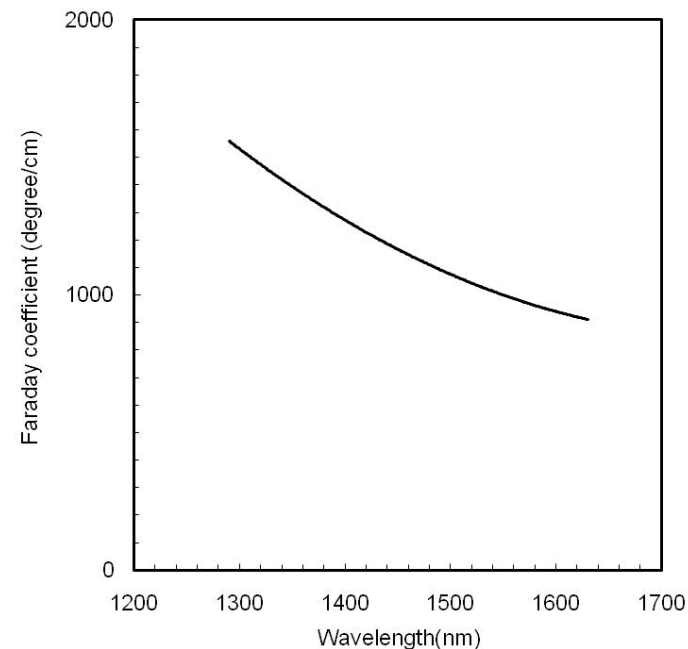


図 4-3 ファラデー回転係数の波長依存性

### 4-3. 磁気特性

RIG は、強磁性体の一種であるフェリ磁性体です。一般的に強磁性体は、磁化が同じ方向に揃った領域(磁区)で形成されています。当社の製法である LPE 法で製造した RIG では、写真 4-1 のように、膜面に垂直な 2 つの逆方向の磁区によって、迷路状の磁区構造が形成されています。これら 2 つの磁区を通過した光のファラデー回転は、それぞれ互いに逆向きとなるため、その透過光の消光比は悪化しますし、また透過光の干渉を生む原因ともなります(5-3 項参照)。従って、磁界を与えずに RIG をファラデー回転子として使うことはできません。

磁区構造を持つ RIG にその飽和磁界以上の外部磁界を与えると、その外部磁界と逆向きの磁区は消失して、磁化の方向が全て揃った単一磁区となります。単一磁区を持つ RIG を透過した光は、一方向のファラデー回転を受けるので、ファラデー回転子として使うことができます。

当社の製品の中でも **GMF** は、強い外部磁界を与えることで磁化して、その単一磁区の状態が、外部磁界を取り去っても維持することを特徴としています。従って、**GMF** を使う場合、外部からの磁界は必要としません。**GMF** は、それ単体でファラデー回転子として使うことができます。**GMF** については、6 項をご確認下さい。

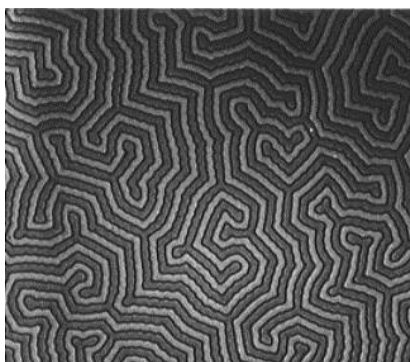


写真.4-1 RIG の磁区構造

### 4-4. 鉛含有量

当社では RIG を、鉛酸化物を含んだ融液から、LPE 法と呼ばれる結晶育成方法にて製造しています。以前の当社の製品は、約 500ppm の鉛を不純物として含んでいました。当社では、鉛含有量を制御する技術を開発して、**GTD** や **GLB**、**GSF**、**GMF** といった G シリーズの製品を開発しました。さらに、鉛を全く含まない技術で製造した **ETD** も開発しました。図 4-4 は、G シリーズの各製品の鉛含有量の分布です。鉛含有量は 1000ppm 未満に制御され、全ての製品が RoHS 規制に適合しています。

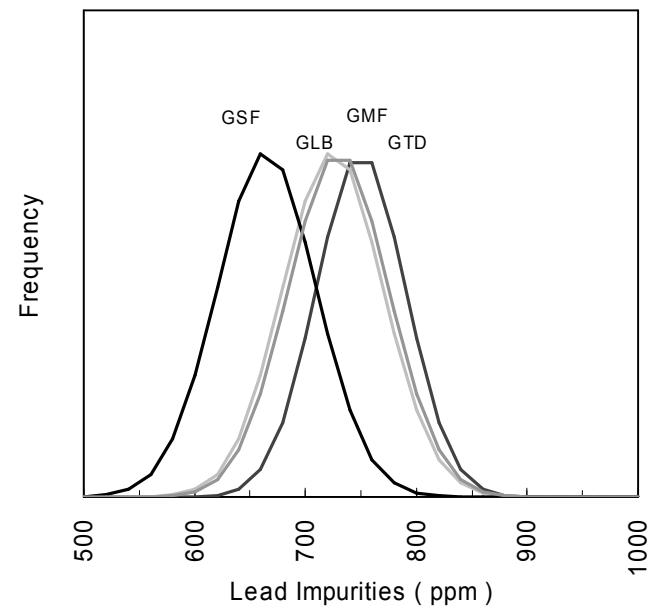


Fig.4-4 鉛含有量

## 5. 光学特性

### 5-1. ファラデー回転角と消光比

#### 5-1-1. 測定方法

図 5-1 は、当社で使っているファラデー回転角と消光比の測定装置の基本構成です。光源には、単色性の高い DFB レーザを用いています。偏光子と検光子、試料ホルダー、検出器、温度計をコンピュータ制御して、ファラデー回転角と消光比を測定しています。ファラデー回転子には、永久磁石にて外部磁界を与えています。

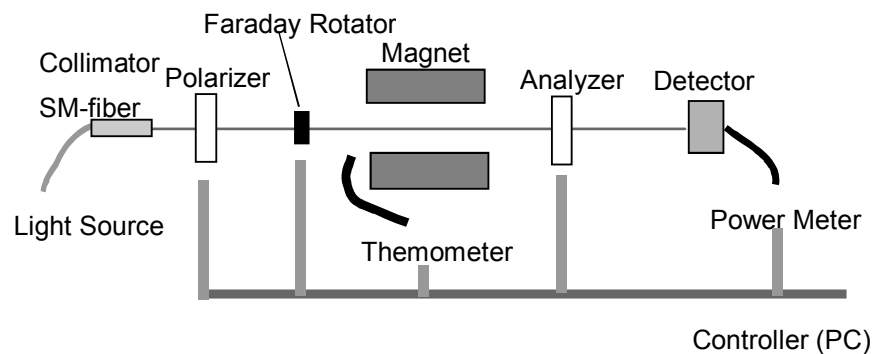


図 5-1 ファラデー回転角と消光比の測定装置構成

#### 5-1-2. 波長による変化

図 5-2 と図 5-3 は、GTD のファラデー角の波長による変化です。3 項には、各製品の代表的なファラデー回転角の波長変化を記載しています。波長変化は、45 度ファラデー回転子が 1nm 当りに、その回転角が何度変化するかで定義しています。O バンドや E バンドでは、各製品に違いはありませんが、C バンドや L バンドでは異なった値となっています。

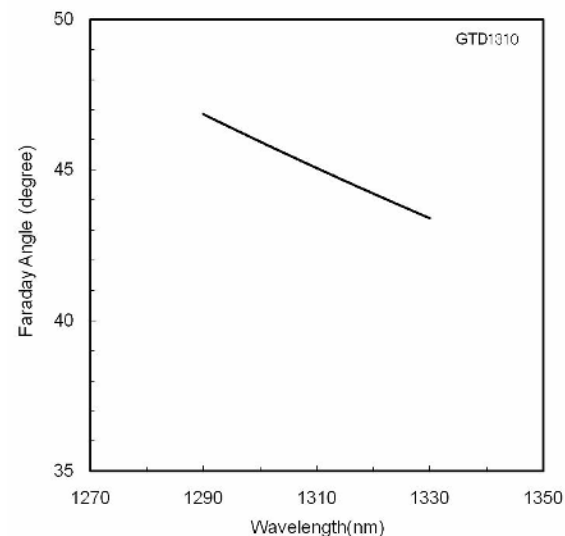


図 5-2 GTD1310 の回転角の波長変化

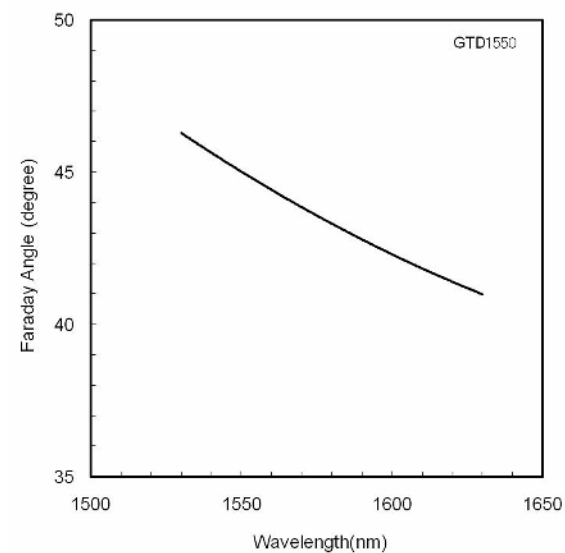


図 5-3 GTD1550 の回転角の波長変化

### 5-1-3. 温度変化

図 5-4 と図 5-5 は、GTD のファラデー回転角の温度による変化です。当社では、温度による変化を、45 度ファラデー回転子が、1□当りに変化する値を 0°C~50°C の温度範囲で測定したデータから算出した値にて定義しています。GTD や ETD の温度変化は、1310nm と 1550nm では若干異なりますが、他の製品では、品種によっては異なるものの、波長による大きな違いはありません。

図 5-6 では、消光比は温度によって変化しないことを確認しています。

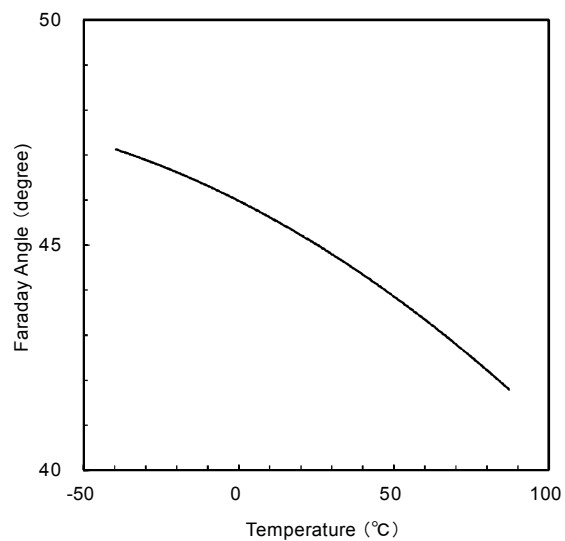


図 5-4 GTD1310 の回転角の温度変化

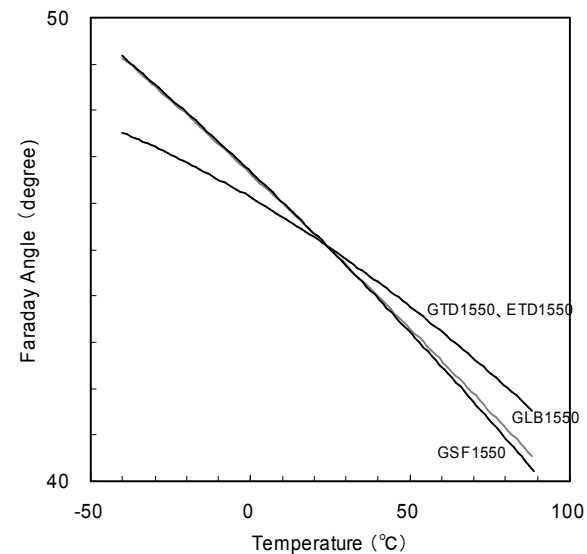


図 5-5 各品種のファラデー回転角の温度変化

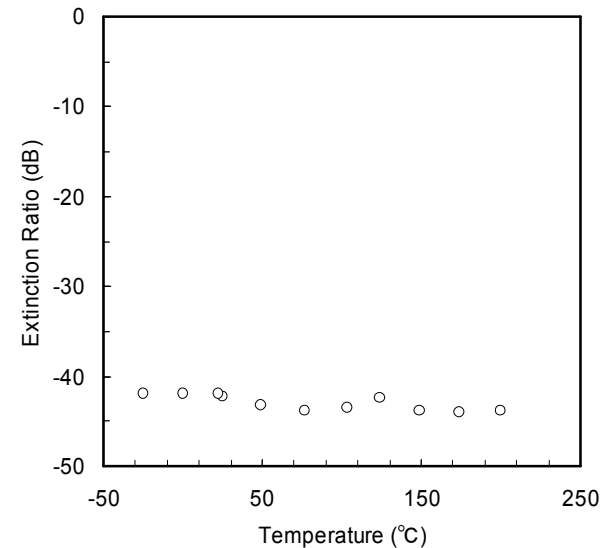


図 5-6 消光比の温度変化の測定例

#### 5-1-4. 入射角の影響

図 5-8 の●は、ファラデー回転子に対する光の入射角を変えて、ファラデー回転角を測定した例です。また、○は同様に消光比の測定例です。

ファラデー回転角が、光の入射角の影響を受けない理由を、図 5-7 を使って説明します。ファラデー回転角には、磁化の方向が関与します。一般的な RIG は、その磁気異方性により膜面に垂直に磁化されます。斜めから光を入射しても、RIG を通過する光路長は長くなりますが、磁化そのものの影響は減るため、相殺して一定のファラデー回転を受けることとなります。

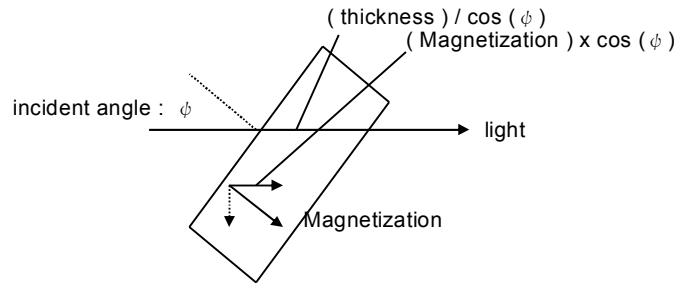


図 5-7 入射角と磁化方向

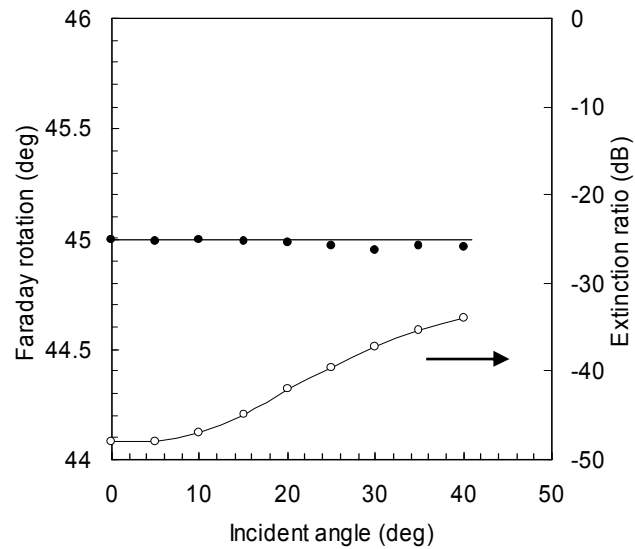


図 5-8 ファラデー回転角と消光比の測定例

消光比は入射角度が大きくなると低下します。これは、AR コートの性能が低下するためです。AR コートの性能が低下すると、RIG 内部で一部の光が多重反射します。入射光と同じ向きに透過した多重反射光は、通常の 3 倍、5 倍といったファラデー効果を受け、この多重反射光の影響で消光比の測定結果が低下するのです。

図 5-9 は、入射光と挿入損失の関係ですが、多重反射光が生じたことで、一部反射して、挿入損失もまた同じ理由で悪化します。

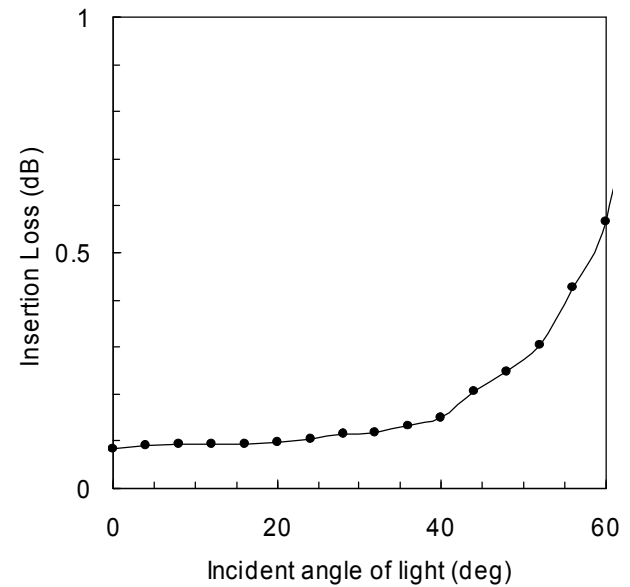


図 5-9 入射角と挿入損失の測定例

### 5-1-5. 応力の影響

消光比は、応力によっても悪化します。図 5-11 は、図 5-10 のように外部応力をファラデー回転子に与えて、消光比を測定した結果です。消光比の悪化は、光弾性効果によるものです。図 5-11 の横軸は、入射光の偏光方向と応力との成す角度ですが、22.5 度のときに消光比は最小に、すなわち影響が最も小さくなっています。これは入射光の偏光面が、応力とは垂直な向きに回転、応力とは垂直な方向を挟んで 45 度回転しているためです。

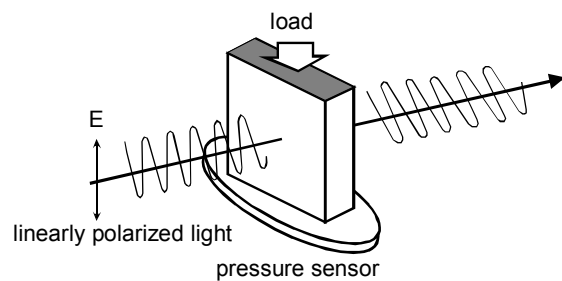


図 5-10 応力の影響の測定方法

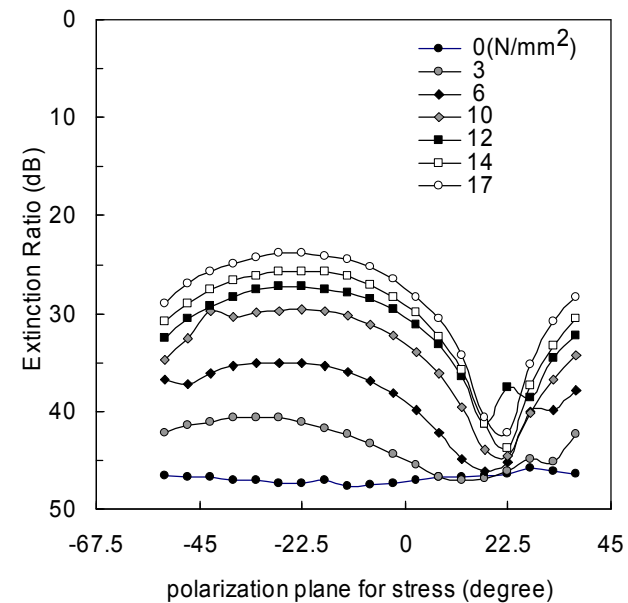


図 5-11 外部応力による消光比の変化

## 5-2. 挿入損失と屈折角

### 5-2-1. 測定方法

図 5-12 は、挿入損失と屈折角の測定装置の構成を示した図です。光源には、PF レーザ や DFB レーザ、波長可変レーザなどを用います。コンピュータにて、試料ホルダー、検出器や屈折角を測定するためのピンホールを制御します。この装置では、挿入損失と屈折角を独立して測定することが可能です。

挿入損失は、試料の有無による透過光の強度の差異で定義しています。屈折角は、ピンホールを通過した光の減衰量から算出しています。

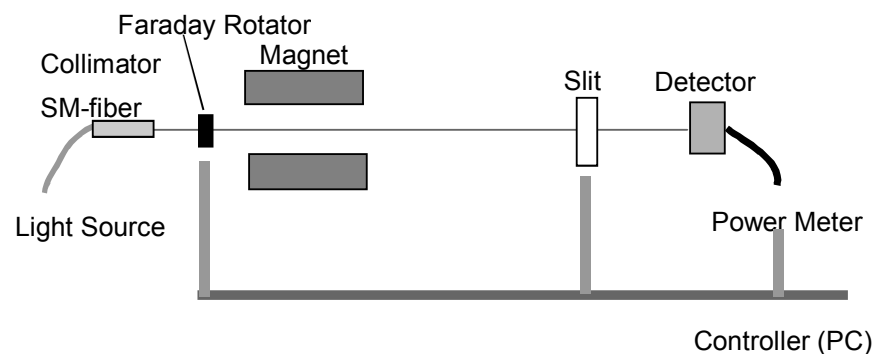
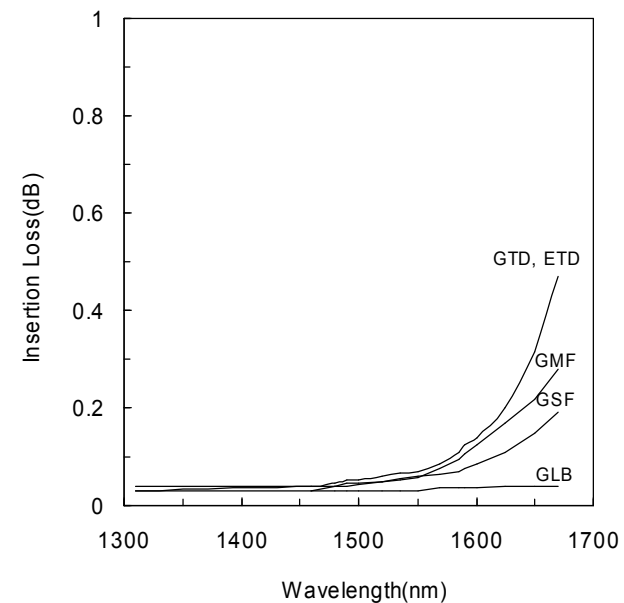


図 5-12 挿入損失と屈折角の測定装置の構成

### 5-2-2. 挿入損失

図 5-13 は、各品種の C と L バンド帯での、挿入損失の測定結果です。GLB を除く製品では、希土類イオンの弱い遷移吸収のため L バンド帯で挿入損失が増加しています。L バンド帯では、GLB のご使用を推奨致します。

図 5-14 は、GLB の短波長域での挿入損失を示した図です。GLB 以外の製品は、この値よりも 1.5 倍程度の挿入損失を持ちますので、短波長域においても GLB のご使用を推奨しています。



5-13 各品種の挿入損失

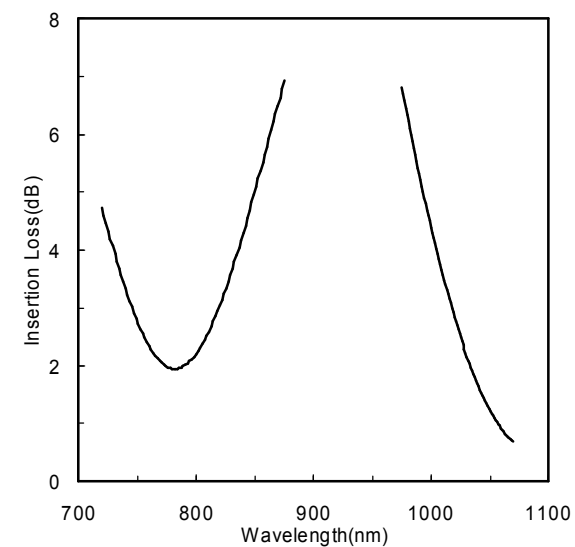


図 5-14 GLB の短波長域での挿入損失

### 5-2-3. 屈折角と結合損失

インラインの光アイソレータの挿入損失の原因には、ファラデー回転子の光吸収などによる挿入損失と、ファラデー回転子による光の屈折(屈折角)による結合損失とがあります。当社では、挿入損失と、また結合損失に影響するファラデー回転子での屈折角を別々に定義して、その仕様を定めています。当社は結合損失では保証できません。なぜならば結合損失には、ファラデー回転子の屈折角の影響が、コリメータや他の部品の構成を通じて間接的に表れるからです。

### 5-2-4. 温度変化

図 5-15 と図 5-16 に、挿入損失の温度変化の測定結果を示します。図 5-15 は、GTD1310 での測定結果ですが、吸収損失の無い波長域では、挿入損失は温度変化しません。しかし、図 5-16 に示すように、吸収損失のある  $1\mu\text{m}$  付近では、挿入損失の温度変化が観察されます。

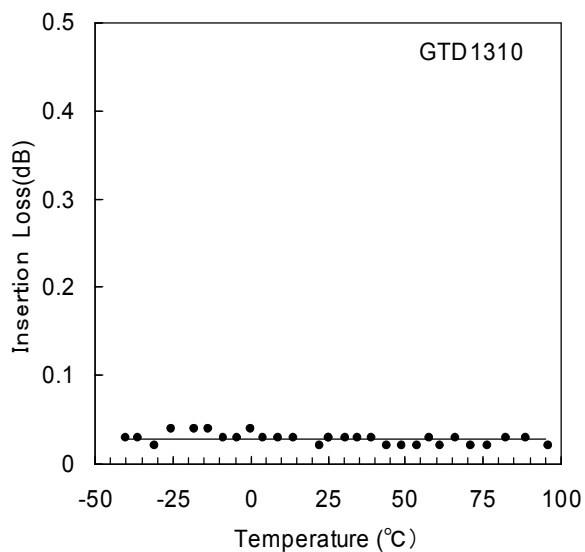


図 5-15 GTD1310 の挿入損失の温度変化

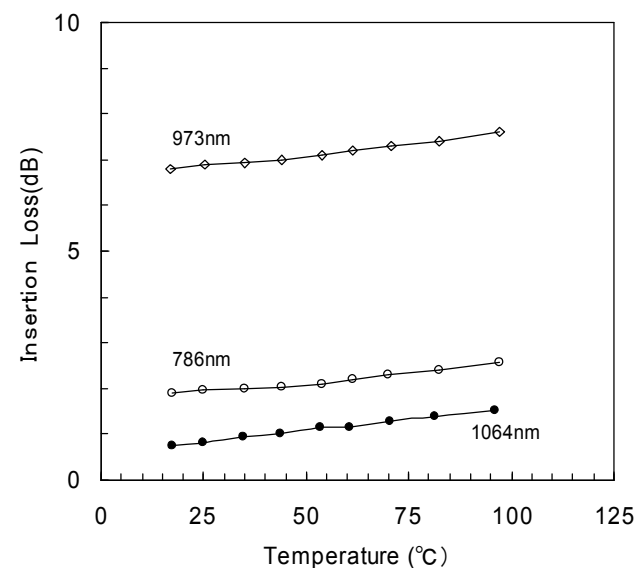


図 5-16 GLB の短波長域での挿入損失の温度変化

### 5-3. 外部磁界と光学特性

#### 5-3-1. ファラデー回転角と消光比

RIG が磁氣的に飽和していない場合、RIG には写真 4-1 のような多磁区構造が形成されています。未飽和のRIGに光が通過すると、それぞれの磁区を通過した光は、反対方向のファラデー回転を受け、それぞれの光の干渉により回折現象が生じます(5-3-2 項参照)。結果として、未飽和のRIGを透過した光は、反対方向のファラデー効果を受けた光と干渉光の総和として観察されます。

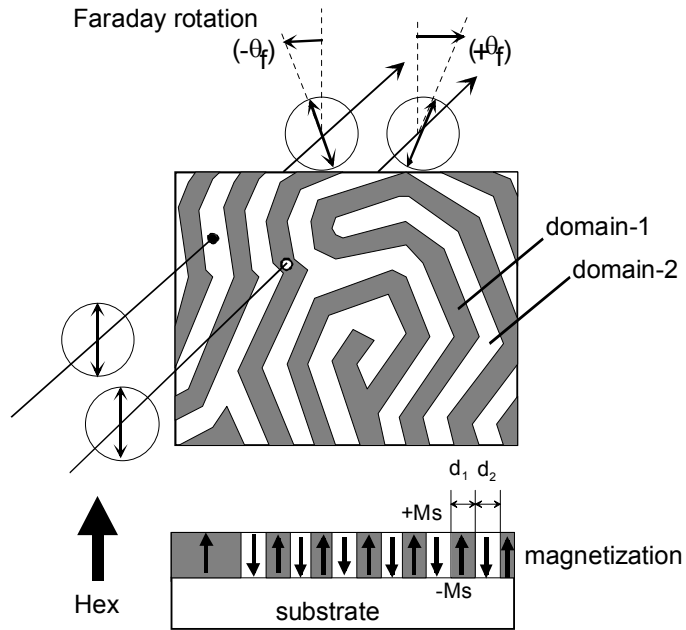


図 5-17 RIG の多磁区構造とファラデー回転

図 5-18 は、外部磁界に対して、ファラデー回転角と消光比を測定した例です。ファラデー回転角は、外部磁界に対して見かけ上は直線的に変化します。しかしながら、消光比が低下していることから明らかなように、ファラデー回転角の大きさが直線的に変化しているものではありません。RIG のファラデー回転は、ヴェルデ定数で表わされるような、外部磁界に比例する磁気光学効果とは、原理的に全く異なります。

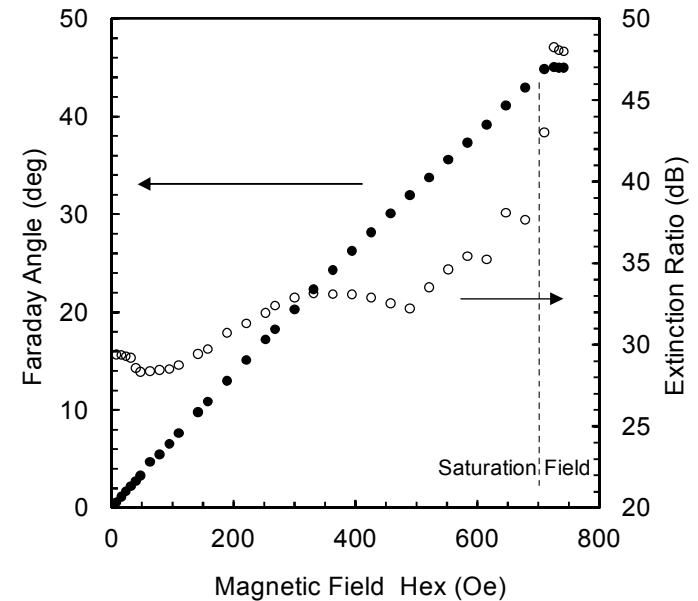


図 5-18 多磁区構造におけるファラデー回転角と消光比の測定例

### 5-3-2. 磁区構造による回折現象

磁気的に未飽和のファラデー回転子を光が通過すると、多磁区構造により図 5-19 のように回折現象が生じます。0 次の透過光( $n=0$ )は、磁区の面積の差異に応じたファラデー回転が生じたように、入射光の偏光面に対して見かけ上は、一定の回転が観察されますが、回折光は入射光の偏光面に対して垂直な偏光面を持ちます。回折する光の量は、例えば 45 度回転子の場合、多磁区の構造にも寄りますが最大で-3dB 程度、実測では-1dB 程度です。有限の大きさを持つ検出器を使って、磁気的に未飽和のファラデー回転子の挿入損失を測定した場合に、損失の値が大きく評価されるのはこのためです。

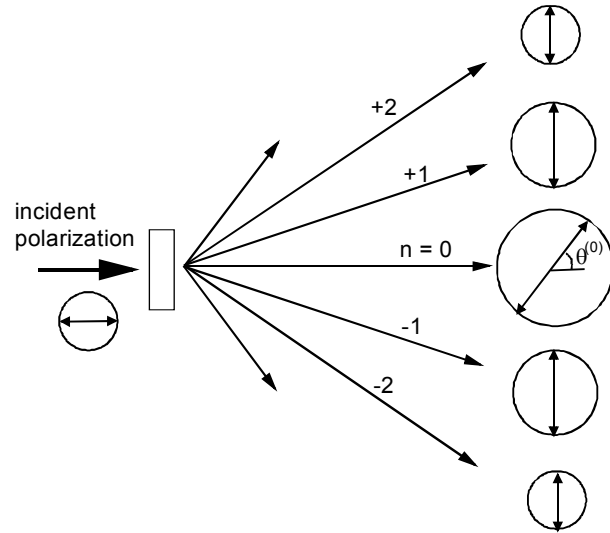


図 5-19 多磁区構造による回折

## 6. 磁気特性

### 6-1. 磁化曲線

図 6-1 に、ファラデー回転子の磁化曲線を測定するための測定装置の構成を表します。ファラデー回転子に外部磁界が加わると、磁区の幅が外部磁界に応じて変化します。磁区を透過、または回折した光を、検光子にて垂直な 2 つの成分に分離します。これら 2 つの成分の差分を取ることで、ファラデー回転子の磁化曲線を描くことができます。図 6-2 は、この装置によって測定した *GTD* の磁化曲線です。

飽和磁界  $H_s$ 、核形成磁界  $H_n$  や保磁力  $H_c$  は、この磁化曲線から読み取ります。

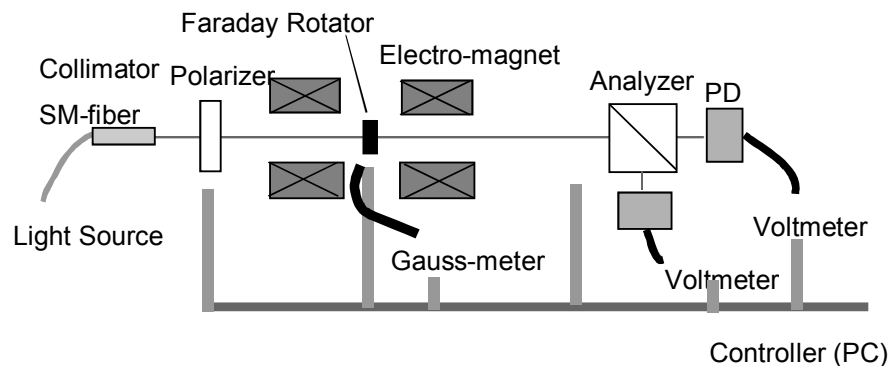


図 6-1 磁化曲線の測定装置の構成

#### 飽和磁界 $H_s$ :

飽和磁界は、ファラデー回転子が磁気的に飽和する磁界であって、多磁区構造から単磁区構造に変わる磁界です。飽和磁界より大きな磁界を与えることで、ファラデー回転子は必要なファラデー回転角を持つようになります。飽和磁界は、ファラデー回転子の形状によって変わります。詳しくは、6-2 項をご参照下さい。

#### 核形成磁界 $H_n$ :

磁気的に飽和するために与えた外部磁界を減らすと、特定の磁界で磁区構造が現れます。当社では、この特定の磁界を核形成磁界  $H_n$  と定義しています。詳しくは 6-4 項をご参照下さい。

#### 保磁力 $H_c$ :

*GMF* では、加えられた磁界を減らしても磁区が生じず、逆向きの磁界を加えることで、その磁化の向きが反転します。磁化が反転する磁界を、保磁力と呼びます。保磁力  $H_c$  と核形成磁界  $H_n$  とは、原理的にはほぼ同じ意味ですが、当社では *GMF* に対しては、この値を保磁力  $H_c$  と定義しています。詳細は 6-3 項をご参照下さい。

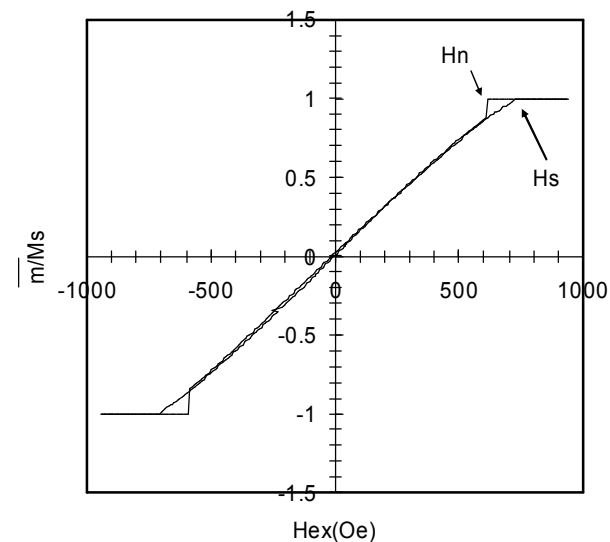


図 6-2 *GTD* の磁化曲線

## 6-2. 飽和磁界

加えた磁界が RIG の飽和磁界に達すると RIG は磁氣的に飽和して、ファラデー回転子として動作します。従って *GMF* を除き他の品種を使う場合、飽和磁界  $H_s$  よりも大きい磁界を RIG に加えることのできる永久磁石が必要となります。図 6-3 は、*GTD* や *ETD* の飽和磁界  $H_s$  の温度変化です。また、図 6-4 は、*GSF* の飽和磁界の温度変化です。飽和磁界は、温度によって変化しますのでご注意ください。当社では、使用温度範囲  $-20^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$  で必要な飽和磁界を仕様で定めています。

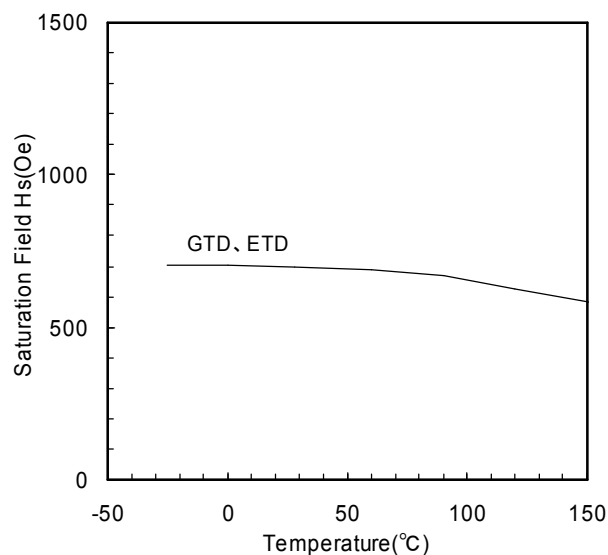


図 6-3 *GTD* と *ETD* の飽和磁界の温度変化

飽和磁界  $H_s$  は、製品の形状により異なります。図 6-5 は、製品形状とその反磁界係数の関係を近似した図です。横軸はサイズ/厚み、縦軸は反磁界係数を示します。無限に大きい平板 (横軸が  $\infty$ 、反磁界係数は 1) の飽和磁界に、図 6-5 の反磁界係数をかけたものが、実際の製品サイズでの飽和磁界となります。サイズが小さければ小さいほど、厚さが厚ければ厚いほど、反磁界係数は小さく、飽和磁界は小さくなります。当社では、通常使われる 1mm のチップ形状での飽和磁界を仕様として定めています。

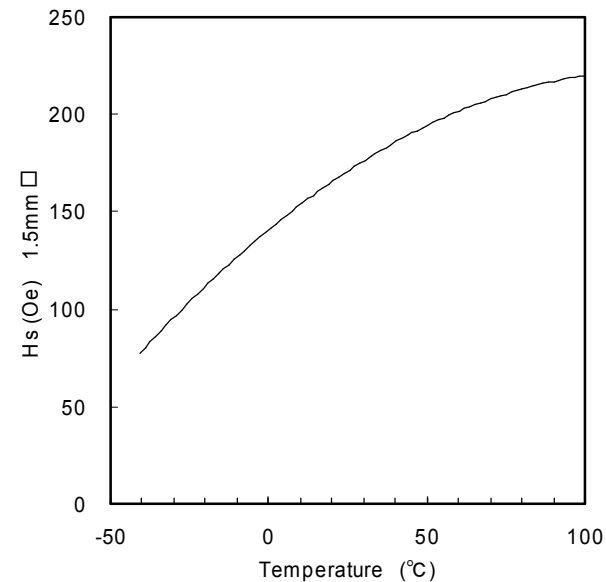


図 6-4 *GSF* の飽和磁界の温度変化

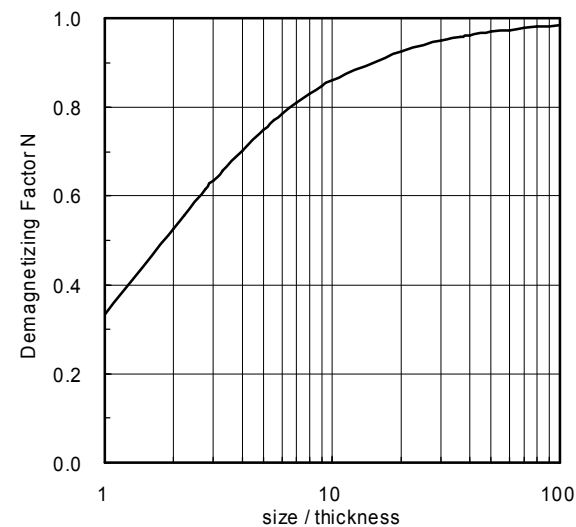


図 6-5 製品形状と反磁界係数

### 6-3. 保磁力

#### 6-3-1. 磁石を必要としないファラデー回転子

図 6-6 は、磁石を必要としないファラデー回転子 *GMF* の磁化曲線です。*GMF* は、四角のヒステリシス曲線(磁化曲線)を持ち、外部からの逆向きの磁界が加わっても、一定のファラデー回転を維持することを特徴としたファラデー回転子です。しかし、保磁力  $H_c$  以上の逆向きの磁界が加わると、磁化の向きが逆転してファラデー回転の向きは反転、または、脱磁します。従って *GMF* をご使用になる場合は、加わる可能性のある磁界には十分ご注意ください。

チップサイズの *GMF* の保磁力  $H_c$  は、400(Oe)から 2000(Oe)と個々に違った値となります。保磁力は、切断の方法など外的な応力や切断面の形状の影響を受けます。そこで、当社では個々のチップの保磁力  $H_c$  を測定して、仕様を満足することを確認してから出荷しています。ご自身でチップサイズに切断する場合は、当社では保磁力  $H_c$  を保証できませんので、ご注意ください。

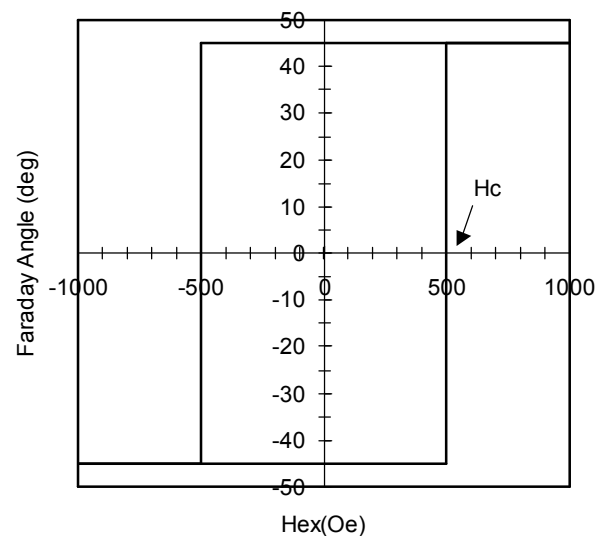


図 6-6 *GMF* の Hex- $\theta$  曲線

図 6-7 は *GMF* の保磁力  $H_c$  の温度変化です。 $H_c$  は温度上昇によって小さくなり、一瞬でも高温になるとその保磁力は失われます。製品に加わる温度履歴に、ご注意ください。*GMF* に加わる外的な応力によっても、脱磁することがありますので、取り扱いにはご注意ください。

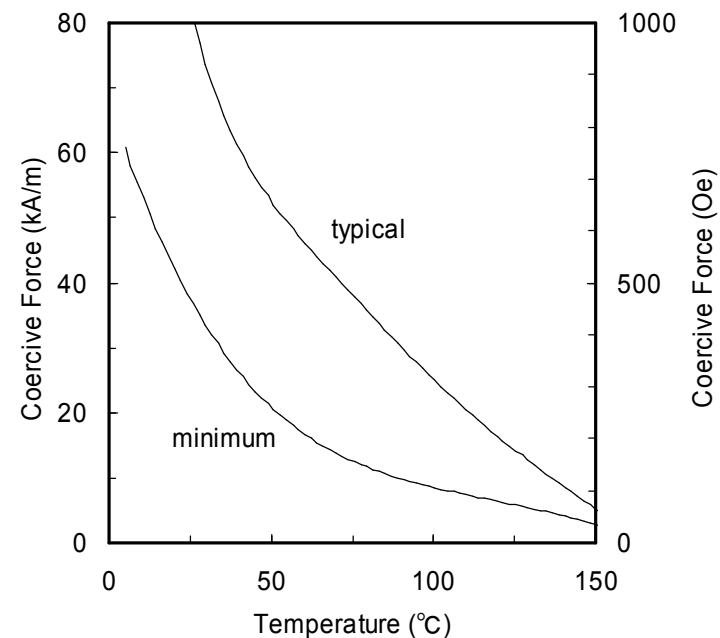


図 6-7  $H_c$  の温度変化

### 6-3-2. GMF の扱い方

GMF は、磁化を保持して、永久磁石など外部からの磁界を必要とせず動作することを特徴としています。しかしながら、GMF は外部磁界が存在する環境下では、動作する温度範囲に制限が生じます。温度が高く、外部磁界が大きい場合には、GMF は磁化を失い、ファラデー回転子として動作しなくなります。一旦高温で磁化を失った場合には、室温に戻しても、ファラデー回転子としては動作しません。

チップの GMF は、当社で予め着磁しています。磁化の向きは、図 6-8 をご参照下さい。当社では、チップトレイの上から下に向かって磁化しています。光を磁化と同じ向きに入射すると、偏光面は左回り(反時計回り)に回転致します。また、ご自身で着磁することも可能です。

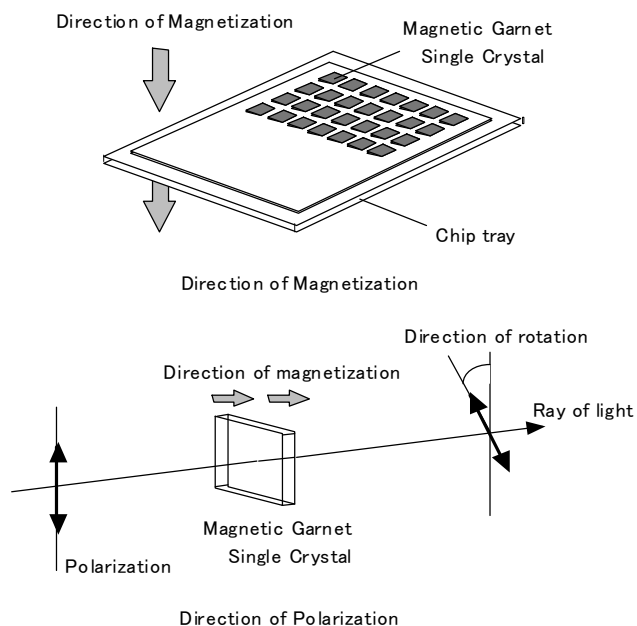


図 6-8 着磁の向き

前項で記載したように、Hc の値は個々のチップ品により異なります。図 6-7 では、下限の Hc と典型的な Hc を持つチップ品の Hc の温度変化を示しています。保磁力 Hc は、温度に対して可逆的に変化しますが、一旦高温で脱磁しますと、低温に戻しても、脱磁した状態のままとなり、ファラデー回転子として動作しません。ファラデー回転子として動作するためには、再着磁が必要ですが、保磁力は再着磁により戻ります。

GMF は、例えば切断といった外的な応力によっても影響を受け脱磁して、その保磁力が変化することもあります。

最後に再着磁の方法を記載します。GMF は、強い外部磁界を与えることで再着磁することができます。外部磁界は、電磁石や永久磁石で与えることが可能です。何らかの理由で脱磁した場合は再着磁して下さい。再着磁では、GMF を 40°C 以上に保ち、面に垂直に 3000(Oe)以上の外部磁界を与えることを推奨致します。温度が低い場合は、更に大きな磁界が必要になり、十分な外部磁界を与えないと、本来の保磁力が得られません。また、室温(25°C)よりも低温で行うと、十分な特性が得られない可能性もあります。外部磁界を加えるのは、一瞬(例えば 1 秒)で十分です。貴社で切断された場合は、外部磁界を与えた後に、個々のチップが十分な保磁力を持っているか、確認することをお勧めします。例えば、逆向きに 400(Oe)の磁界を加え、逆向きに磁化されることがないか、といった簡易的な方法で確認することも可能です。

#### 6-4. 磁気補償温度とキュリー温度

RIG には、磁気補償温度 ( $T_{comp.}$ ) やキュリー温度 ( $T_c$ ) といった、(飽和)磁化がゼロとなる特別な温度が存在します。品種によって異なりますが、 $220^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$  のキュリー温度以上で、RIG の(飽和)磁化は 0 となり、ファラデー回転角もまた 0 となります。磁気補償温度も品種によって異なりますが、全品種にて室温より低温であり、この温度で RIG の(飽和)磁化は 0 となり、磁気補償温度前後では(飽和)磁化の向きが反転します。RIG に外部磁界を与えると、この磁気補償温度の前後で、ファラデー回転角もまた反転することになります。

図 6-9 は、当社の GMF にその保磁力以上の磁界を与えて、ファラデー回転角の測定を行った例です。この GMF の磁気補償温度は約  $-10^{\circ}\text{C}$  ですが、その  $-10^{\circ}\text{C}$  付近でファラデー回転角の符号は反転します。これは、RIG の(飽和)磁化の向きが外部磁界に従うためです。GMF に外部磁界を与えなければ、図 6-10 のように、磁気補償温度付近でファラデー回転角の符号が反転することはありません。GMF にその保磁力以上の外部磁界を与えてご使用することはできませんので、ご注意ください。

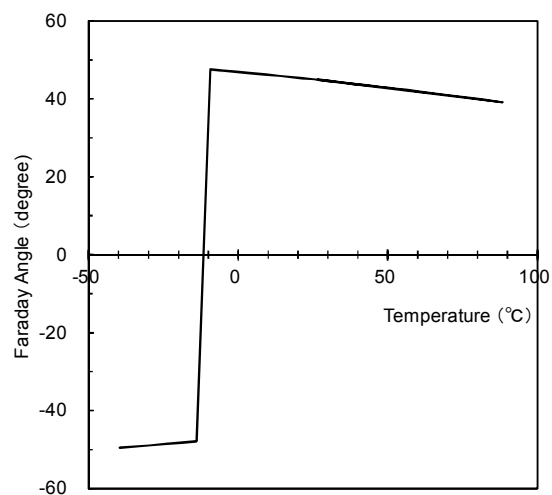


図 6-9 磁気補償温度付近でのファラデー回転角変化、外部磁界あり。

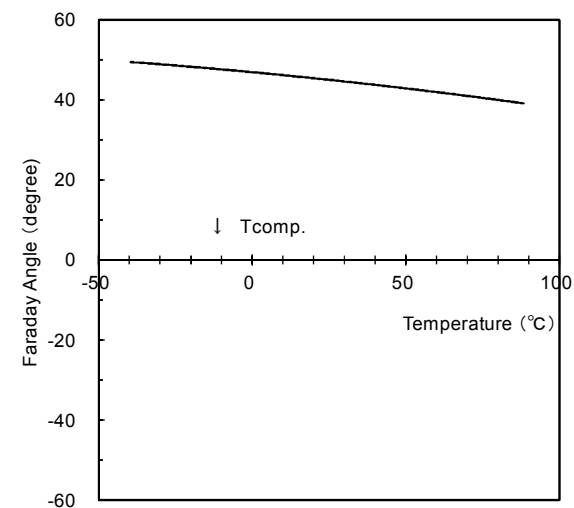


図 6-10 磁気補償温度付近でのファラデー回転角変化、外部磁界なし。

## 7. 反射防止膜 (AR-Coating)

### 7-1. 種類

Table.7-1. 反射防止膜の種類

Item code	Index	中心波長	反射率(片面)
A	対空気	ご指定	$\leq 0.2\%$
E	対接着剤	固定、1300 – 1650 nm	$\leq 0.2\%$
N		反射防止膜なし	
X		その他	

表 7-1 は当社で付けている反射防止膜です。反射防止膜は、蒸着法にて付けます。“A”コートは、空気中において、ご指定の中心波長で反射率が小さくなるように設計された反射防止膜です。“E”コートは、ファラデー回転子と他の光学部品を接着剤で貼り付けた状態で、ファラデー回転子での反射を防ぐのを目的に設計された反射防止膜であり、広い波長範囲で反射率が小さくなるように設計された反射防止膜です。

ファラデー回転子の両面に異なった種類の反射防止膜を付けることも可能なので、ご相談下さい。

### 7-2. 特徴

#### 7-2-1. “A”コート(対空気)

“A”コートは、空気(屈折率 1)に対して設計された反射防止膜です。特定の波長で、反射率が小さくなるように設計されています。“A”コートは、 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  または  $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$  で構成されています。図 7-1 は、1550nm 波長  $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$  の一例です。

“A”コートは、RIG( $n=2.39$ 、表 4-1 参照)と基板( $n=1.96$ )から構成される GLB1064 にも付けることは可能ですが、RIG と基板との屈折率差から生じる反射は防ぐことはできません。この場合、RIG の面を光源側に向けてご使用されることを推奨します。

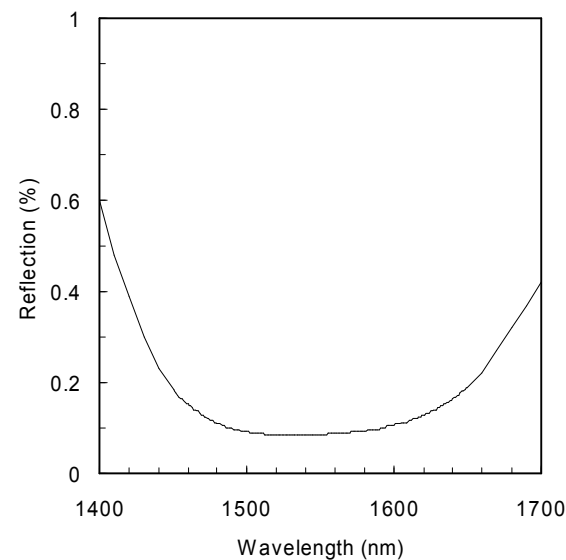


図 7-1 “A”コートの一例(評価例)

### 7-2-2. “E”コート(対接着剤)

“E”コートは、ファラデー回転子と他の光学部品を接着剤で貼り付けた状態で、反射を防ぐのを目的に設計された反射防止膜で、1300nm から 1650nm の広い波長範囲で反射率が小さくなるように設計されています。“E”コートは、 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  で構成されています。図 7-2 には、反射防止膜の性能を接着剤の屈折率が変わった場合でシミュレーションした結果です。

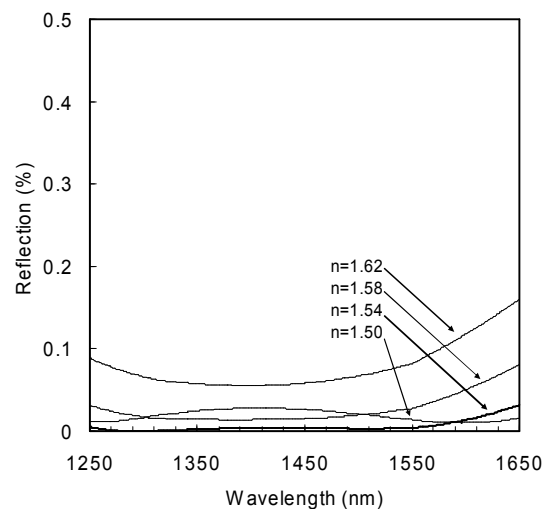


図 7-2 計算結果

### 7-3. 入射角度

入射する光の角度が大きいと、反射防止膜の性能は低下します。図 7-3 は、“A”コートでの計算結果ですので、ご参照下さい。

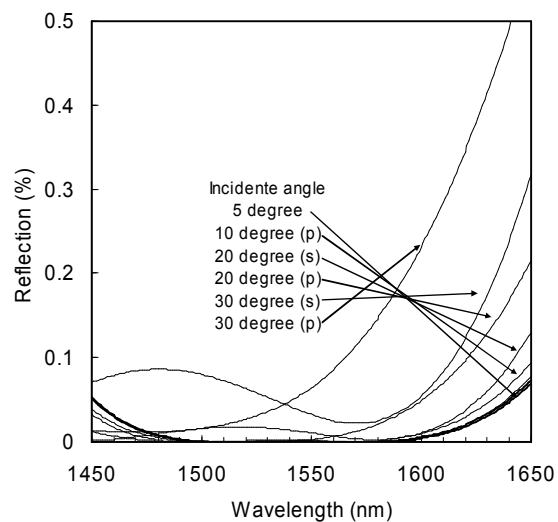


図 7-3 入射角度と反射防止膜の性能

## 8. 信頼性試験

### 8-1. 環境試験

当社の製品は、下記条件の環境試験を合格しています。評価項目は、ファラデー回転角、消光比、挿入損失、外観、反射防止膜の付着強度(テープテスト)です。*GMF* については、保磁力の評価も行っています。

高温試験	100°C、2000 時間
低温試験	-40°C、2000 時間
耐湿試験	90°C、90%Rh、2000 時間
ヒートサイクル試験	-45°C - 90°C、1000 サイクル

8-2. 強い光の影響  
8-2-1. パルスレーザ

図 8-1 は、下記パルスレーザによる損傷の試験結果です。当社では、この結果から、損傷を受ける最小の光強度は、100 MW/cm<sup>2</sup> 程度であろうと見積もっています。

パルスレーザ	ビーム径	18 μmφ
	光強度	0-800 MW/cm <sup>2</sup>
	パルス幅	20 ns
	周波数	6 kHz
	照射時間	2 sec

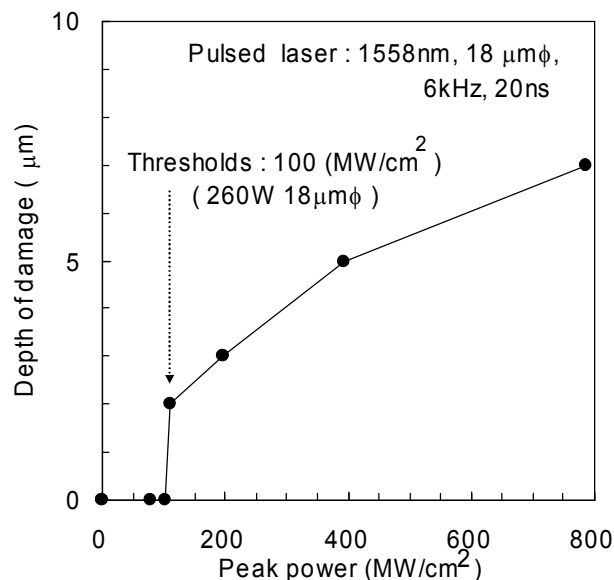


図 8-1 パルスレーザによる損傷

8-2-2. 光吸収による温度上昇

図 8-2 は、光の強度と挿入損失の関係を測定した結果です。ファラデー回転子には A1T1064、レーザには 1064nm でビーム径 1mmφ の YAG レーザを使っています。100mW 以下の 1064nm 波長で A1T1064 は、0.8dB 程度の挿入損失

を持ちます。●は、基板を除去した A1T1064nm を透過した光の強度、■はその透過率を表します。入射光の強度 200mW 以上で、透過光が著しく減少しています。これは、RIG で吸収された光によって、RIG の温度が上がり、RIG の吸収が増加するために起こった現象です(5-1-4 項を参照)。光の吸収による温度上昇が、熱が逃げる割合よりも上回ったために生じた現象と考えています。○や□は、基板を取り除いていない A1T1064 を使って、同じ試験を行った結果です。基板によるヒートシンクにて、スムーズに熱が逃げ、吸収の増加が 1W まで生じなかったとの結果です。1200-1600nm 波長では、光の吸収が小さいので数 W まで、温度上昇は生じないと推察しています。

\* A1T1064 は、現在製造していません。GLB1064 が代替品です。

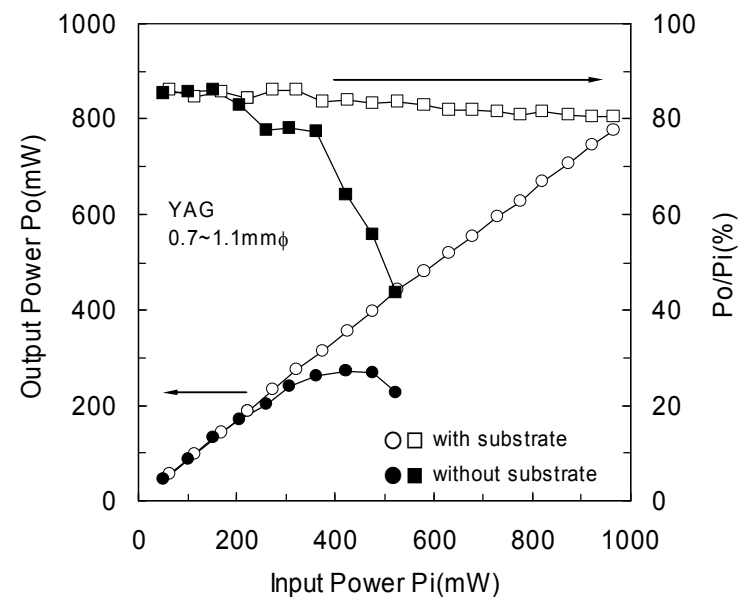


図 8-2 光の強度と透過率

9. 表面の品質

9-1. 標準仕様

表 9-1 11mm 角、AR コート付き

仕様		
有効範囲	10.5x10.5mm 全四隅、一辺 1mm の直角三角形部分を除く (AR なし)	
チッピング	有効範囲に無きこと	
RIG のキズ	2 $\mu$ m $\leq$ 幅 < 5 $\mu$ m 5 $\mu$ m $\leq$ 幅	総和 $\leq$ 10mm 無きこと
AR キズ	2 $\mu$ m $\leq$ 幅 < 20 $\mu$ m 20 $\mu$ m $\leq$ 幅	総和 $\leq$ 10mm 無きこと
AR 抜け	50 $\mu$ m $\leq$ 幅	無きこと
他の欠陥	30 $\mu$ m $\leq$ 大きさ < 350 $\mu$ m 350 $\mu$ m $\leq$ 大きさ	$\leq$ 5 個 無きこと

表 9-2 チップサイズ、AR コート付き

仕様		
有効径	製品サイズ $\leq$ 1mm	$\leq$ (製品サイズ - 0.2)mm $\square$ $\phi$
	1mm < 製品サイズ $\leq$ 2mm	$\leq$ (製品サイズ $\times$ 0.8)mm $\phi$
チッピング	有効径内に無きこと	
RIG のキズ	幅 < 2 $\mu$ m 2 $\mu$ m $\leq$ 幅 < 5 $\mu$ m 5 $\mu$ m $\leq$ 幅	不問 総和 $\leq$ 製品サイズ $\times$ 0.8 無きこと
AR キズ	幅 < 2 $\mu$ m 2 $\mu$ m $\leq$ 幅 < 20 $\mu$ m 20 $\mu$ m $\leq$ 幅	不問 総和 $\leq$ 製品サイズ $\times$ 0.8 無きこと
AR 抜け	50 $\mu$ m $\leq$ 大きさ	無きこと
他の欠陥	大きさ < 10 $\mu$ m 10 $\mu$ m $\leq$ 大きさ < 30 $\mu$ m 30 $\mu$ m $\leq$ 大きさ	不問 $\leq$ 5 個 無きこと

9-2. 欠陥や AR 抜けの影響

図 9-1 は、欠陥による損失への影響を計算(実線)、及び測定(●)した結果です。光のビーム径は、300 $\mu$ m と 400 $\mu$ m、ビームの中心に欠陥があると仮定しています。

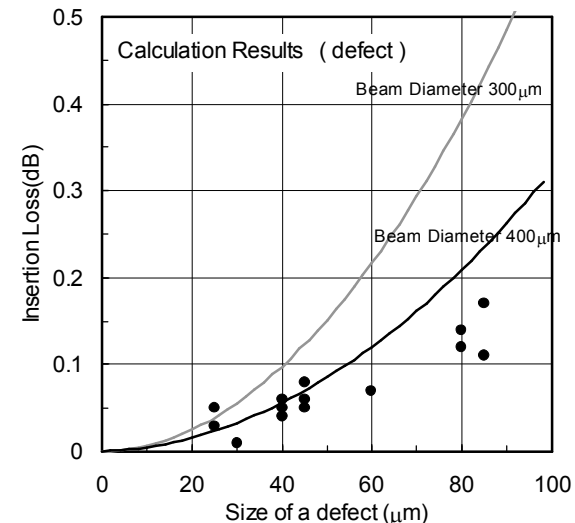


図 9-1 欠陥の影響

図 9-2 は、AR 抜けが損失に及ぼす影響を計算した結果です。図 9-2 では、AR 抜けが反射率に及ぼす影響についても計算しています。欠陥や AR 抜けは、損失や反射率にある程度影響を及ぼしますが、これらの計算は、欠陥や AR 抜けがビームの中心にあると仮定して計算しています。実際には、図 9-3 で示すように、ビームの中心に欠陥や AR 抜けが存在する確率は極めて小さく、中心からずれることによって、その影響はかなり小さなものとなります。

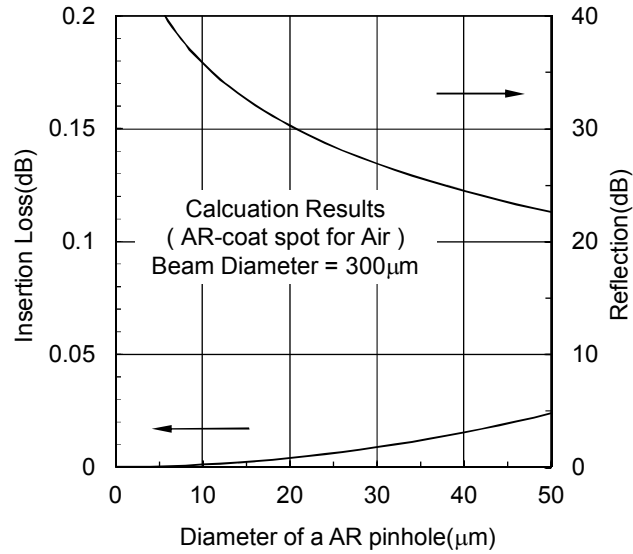


図 9-2 AR 抜けの影響

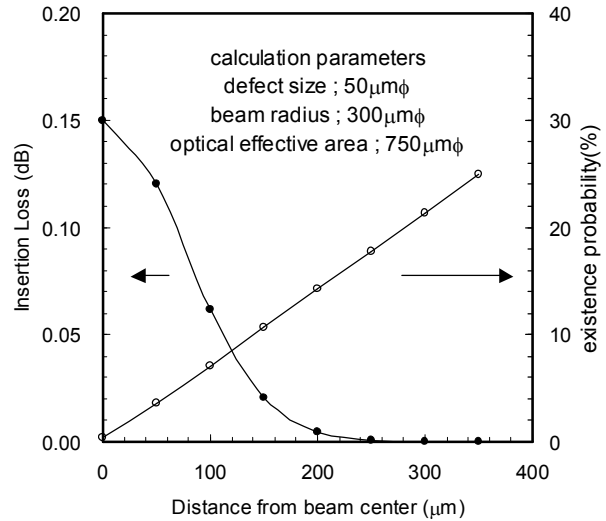


図 9-3 欠陥や AR 抜けの存在確率とその影響

### 9-3. RIG のキズと AR キズ

図 9-4 は、RIG 上のキズが損失に及ぼす影響につき、計算と測定した結果(●)を示します。反射防止膜上の浅い AR キズは、損失には影響を及ぼしませんので、当社では 2 種類のキズの仕様を別々に定義しています。

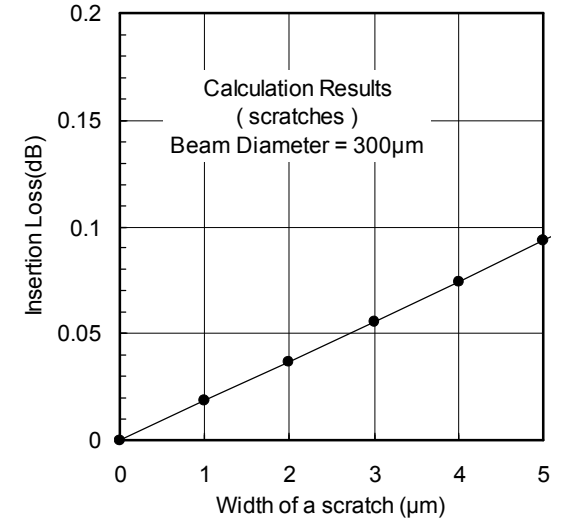


図 9-4 RIG 上のキズが及ぼす影響

### 9-4. チッピングと角欠け

当社では、チッピングと角欠けについて下図のように定義しています。チッピングは、切断面からの入り込みの深さで定義しています。角欠けは、欠けている部分で定義しています。チッピングと角欠けが有効範囲に無きこと、が標準仕様となります。

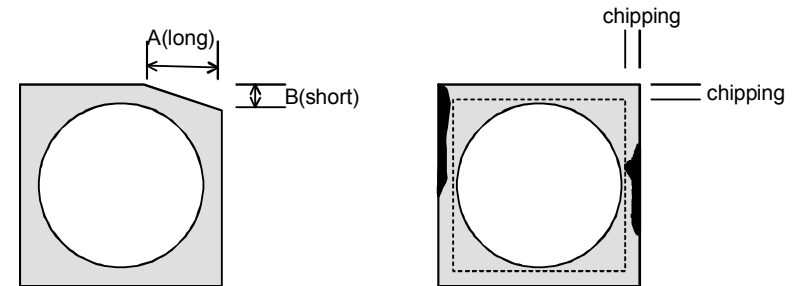


図 9-5 チッピングと角欠け

## 10. その他

### 10-1. ストリエーション

写真 10-1 は、赤外顕微鏡で観察されるストリエーション(成長縞)の一例です。当社では、GGG 基板を種結晶として、液相エピタキシャル法(LPE 法)にて、RIG を結晶成長しています。GGG 基板では、周期的な温度の変化や結晶成長速度の変化にて、組成や不純物密度の微妙な変化が生じ、年輪状のストリエーションが生じることがあります。GGG 基板上に育成した RIG においても、基板のストリエーションが反映されて、写真 10-1 のように赤外顕微鏡にて屈折率の微妙な変化として、観察されることがあります。

当社では、ストリエーションが見られる RIG のファラデー回転角、消光比、挿入損失といった光学特性を、全面に対して測定、ストリエーションがこれら光学特性に影響しないことを確認しています。

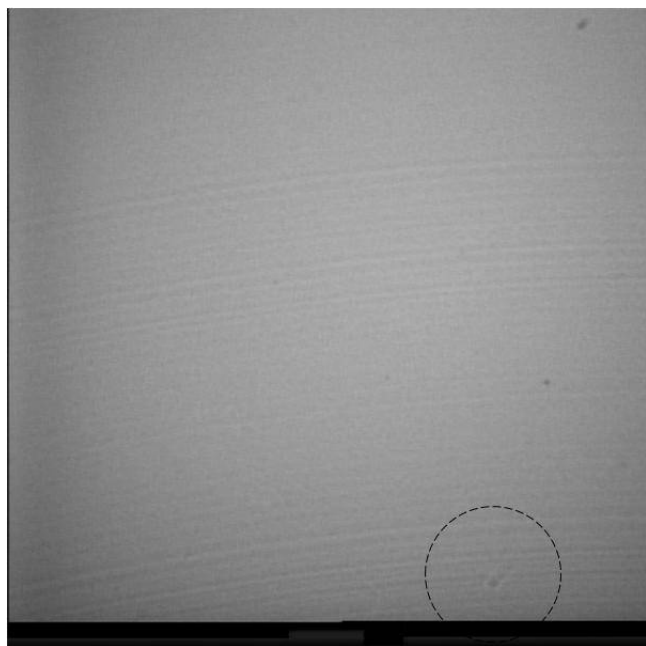


写真 10-1 ストリエーションとスワール

### 10-2. スワール

写真 10-1 (点線)にて、V 形状に観察されているものは、スワールと呼ばれるもので、LPE 法で製造される RIG に発生するものです。結晶成長過程で、RIG に発生した小さな結晶欠陥を起点として、融液の対流の影響を受け、組成の微妙な変化から生じる屈折率の変化が、赤外顕微鏡によって観察されるものです。当社では、ストリエーションと同様、スワールそのものは光学特性に大きな影響を与えるものではないことを確認しています。

### 10-3. アンジュレーション

RIG 表面には、ナノスケールレベルのアンジュレーションがあると考えています。図 10-1 には、アンジュレーションの反射光への影響を誇張して示しました。金属顕微鏡などで稀に観察されるストライプ状の縞は、反射防止膜の設計外である可視域での反射光がこのアンジュレーションの影響を受け、観察されたものであると考えています。

結晶育成過程で RIG には、基板との熱膨張係数の違いから、内部応力が生じています。GGG 基板を除去すると、個々の製品はこの内部応力により反ります。当社では、この反りを減らしながら鏡面研磨して、最終的に CMP にて表面を仕上げます。表面のアンジュレーションは、CMP の特にエッチングにて、この反りが反映されたものと考えています。

当社では、アンジュレーションの光学特性への影響を評価しましたが、アンジュレーション自体が、光の波長よりもかなり小さなものであることから、大きな影響になるものではないことを確認しています。

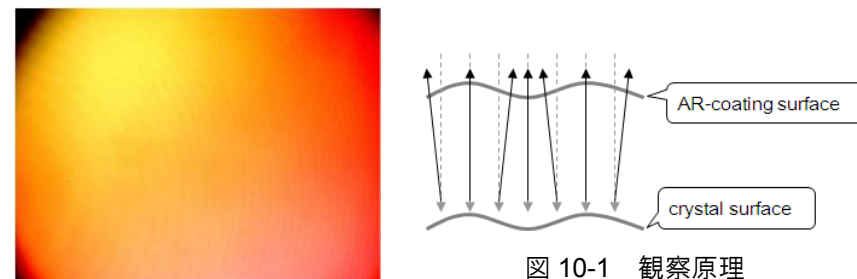


図 10-1 観察原理

写真 10-2 表面のアンジュレーション