

法拉第旋转片单晶体 (**R**are-earth **I**ron **G**arnet single crystals)

GRANOPT

目录

1. 法拉第旋转片的种类	2	7. 防反射膜	19
2. 型号		7-1. 种类	
3. 特性一览		7-2. 特性	
4. 铋置换稀土类铁石榴石单晶体	3	7-2-1. “A”镀膜(对空气)	
4-1. 结晶构造		7-2-2. “E”镀膜(对粘接)	20
4-2. 光学特性	4	7-3. 光入射角的影响	
4-3. 磁特性	5	8. 可靠性测试	
4-4. 铅含量		8-1. 环境测试	
5. 光学特性	6	8-2. 强光带来的影响	21
5-1. 法拉第旋转角和消光比		8-2-1. 脉冲激光	
5-1-1. 测定方法		8-2-2. 光吸收导致的温度上升	
5-1-2. 由波长带来的变化		9. 表面质量	22
5-1-3. 温度特性	7	9-1. 标准规格	
5-1-4. 入射角的影响	8	9-2. 缺陷与 AR 镀膜缺陷带来的影响	
5-1-5. 应力的影响	9	9-3. 划痕与 AR 划痕带来的影响	23
5-2. 插入损耗和折射角	10	9-4. 崩边和缺角	
5-2-1. 测定方法		10. 其他	
5-2-2. 插入损耗		10-1. 条痕	24
5-2-3. 折射角和耦合损耗	11	10-2. 漩涡	
5-2-4. 温度特性		10-3. 波纹	
5-3. 外部磁场和光学特性	12		
5-3-1. 法拉第旋转角和消光比			
5-3-2. 磁畴构造带来的衍射现象	13		
6. 磁特性	14		
6-1. 磁化曲线			
6-2. 饱和磁场			
6-3. 保磁力	15		
6-3-1 不需要磁石的法拉第旋转片	16		
6-3-2 GMF 的使用方法	17		
6-4. 磁补偿温度和居里温度	18		

1. 法拉第旋转片(Faraday Rotator)的种类

本技术资料所记载的是有关本公司(Granopt Co., LTD.)的法拉第旋转片的特性。本公司的所有产品, 都符合 RoHS 认证要求。

G 系列

GTD (TD 表示 Temperature Dependence)是具有良好温度特性和波长特性的法拉第旋转片。一般被用于自由空间(free-space)的光隔离器。

GLB (LB 表示 L-Band)的特征有, 在 L-Band 的波长区域内的插入损耗(Insertion Loss)小, 一般被用于在线型(in-line)的光隔离器(Optical Isolator)。

GSF (SF 表示 Saturation Field)的特征在于其是饱和磁场(Saturation Field)较小的法拉第旋转片。GSF 被用于减小光隔离器的形状, 或改变磁场中法拉第旋转转向的光学开关等。

GMF (MF 表示 Magnet-Free)是指永久磁石, 即不需要来自外部的磁场的法拉第旋转片。

E 系列

ETD 具有与 GTD 完全相同的特性, 是不含有铅(lead)的产品。

2. 型号

订货时, 请依照以下型号指定产品。

AAABBBBCD - 其他信息 ex. GTD 1550 L A - 45 度±0.5 度

AAA	产品种类	GTD, GLB, GSF, GMF, ETD
BBBB	波长	1550(nm); 1310(nm), etc.
C	尺寸	L; 11mm 角 C; 小片
D	防反射膜	A; 对空气 E; 对粘胶 N; 无 X; 其他

其他信息 旋转角的精度、小片尺寸等信息

* 如果您所需要的产品与本公司的标准规格有差异, 请垂询。

3. 特性一览

45 度旋转片的波长系数, $\Delta\theta/\Delta\lambda$ (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 度旋转片的温度系数, $\Delta\theta/\Delta T$ (deg/C)

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

插入损耗(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

厚度(μm) (typ.)

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

磁特性

	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; 小片尺寸 1mm 四角的饱和磁场, 请参照第 6-2 项。

Tcomp.; 磁补偿温度(Compensation Temperature)

Tc; 居里温度(Curie Temperature)

Hc; 保磁力(Coercive Force)

4. 铋置换稀土类铁石榴石单晶(RIG)

4-1. 晶体构造

本公司通过液相外延生长(LPE、Liquid phase Epitaxial)法生产法拉第旋转片材料——铋置换稀土类铁石榴石单晶体(RIG、Bismuth substituted Rare-earth Iron Garnet single crystal)。

RIG 是化学式为 $(C_3)(A_2D_3)O_{12}$ 的非常稳定的氧化物,是具有如图 4-1 所示的立方晶体构造的单晶体。表 4-1 与图 4-2 中记载有 RIG 的物性值。

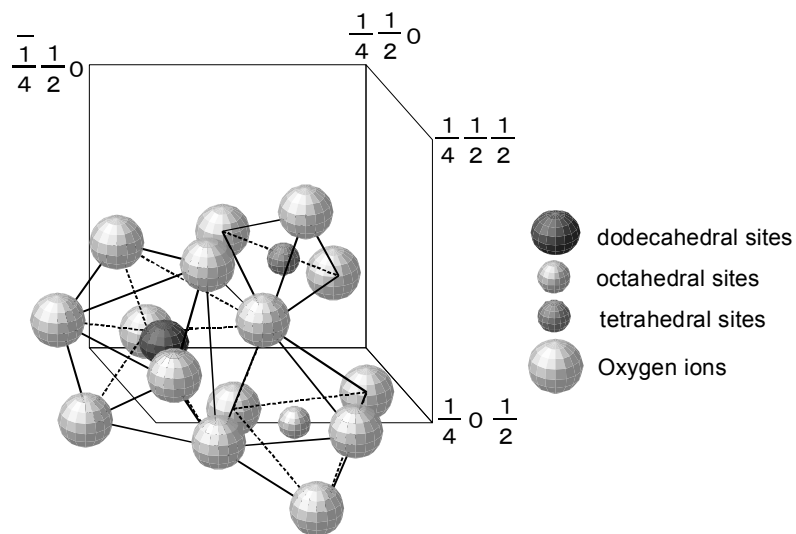


图 4-1 晶体构造 (石榴石单晶体)

Table. 4-1 各种 RIG 的特性

	GTD	GLB	GSF	GMF	ETD
晶格常数(Å)	12.5				
热膨胀系数($10^{-6} K^{-1}$)	11		10		11
折射率(1550nm) * Fig.4-2	2.3 – 2.4				
莫氏硬度*(Mohs' Scale)	7				
杨氏模量*(GPa) (Young's Modulus)	200				
泊松比*(Poisson's Ratio)	0.29				
密度*(g/cm ³)	6.7				
热导率*(W/m K) (Thermal Conductivity)	5				
热容量*(J/mole K) (Heat Capacity)	420				

* 根据文献值计算所得

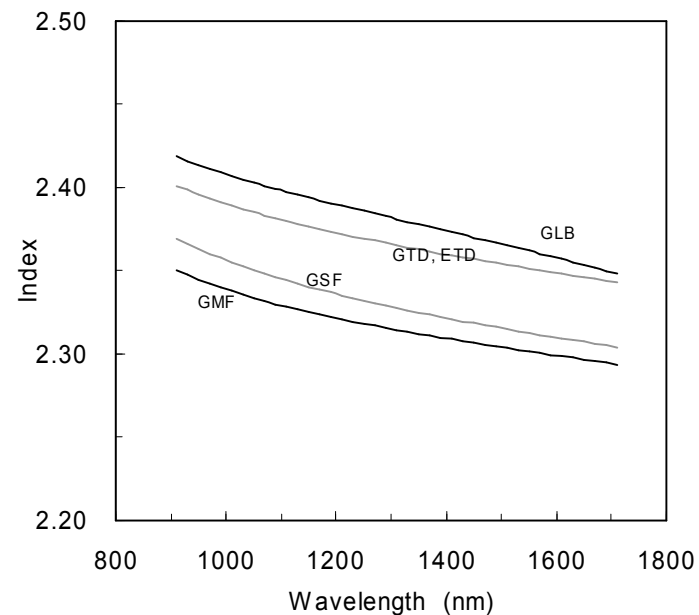


图 4-2 折射率

4-2. 光学特性

RIG 是在 $1\mu\text{m}$ 至 $5\mu\text{m}$ 的近红外区域、中红外区域内透明的，且具有巨大法拉第效应(Faraday Effect)的磁光材料(magneto-optical material)。所谓法拉第效应，是指由于透过磁性物质的光的偏光面的旋转现象，所导致的左右圆偏光的响应差异现象。

RIG 的法拉第旋转系数在近红外区域非常大，为 $1000\sim 2000(\text{deg}/\text{cm})$ 。图 4-3 是 GTD 的法拉第旋转系数，即每 1cm 表示的法拉第旋转角度。各个产品的法拉第旋转系数的大小、波长变化、温度变化各不相同。详细信息请参照第 3 项。本公司通过对产品的膜厚的调整，使产品的法拉第旋转角为特定波长，且呈 45 度。

如果使直线偏振光透过 RIG，则会产生法拉第旋转，而此时直线偏振光会发生若干椭圆极化。该椭圆极化的程度，由消光比(Extinction Ratio)表示。消光比受材料的磁圆二色性、外部应力(参照第 5-1-5 项)、AR 镀膜性能(参照第 5-1-4 项)等的影响。此外，如果测定所使用的光源特性(单色性)较低，如图 4-3，由于法拉第旋转角度的波长变化，可能导致观察到的消光比偏低。

由于所有 RIG 含有在可见光区域内吸收的铁离子，因此在可见光区域是不透明的。此外，由于稀土离子的弱吸收，GLB 以外的产品中，有些商品种类在 L Band 的插入损耗会变大。详细信息请参照第 5-2 项。

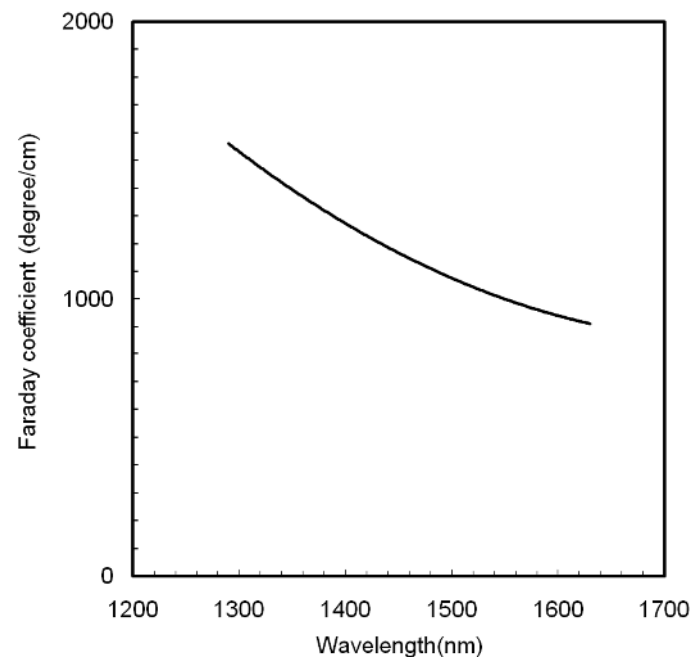


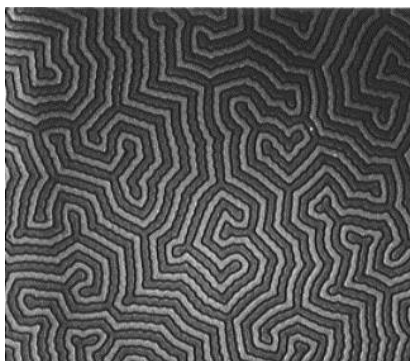
图 4-3 法拉第旋转系数的波长依存性

4-3. 磁特性

RIG 属于强磁(ferromagnetism)材料之一的亚铁磁性(ferromagnetism)材料。普通的强磁材料，形成于磁化(magnetization)相同方向的区域(磁畴、magnetic domain)。如照片 4-1 所示，通过本公司的制造方法 LPE (液相外延)法生产的 RIG，由垂直于膜面的 2 个相反方向的磁畴形成了迷宫(maze)状的磁畴构造。由于通过这 2 个磁畴的光的法拉第旋转相反，所以会导致其透射光的消光比恶化，以及透射光的干涉(参照第 5-3 项)。因此，在没有磁场的条件下，不能将 RIG 作为法拉第旋转片使用。

如果将具有磁畴构造的 RIG 放置于大于其饱和磁场的外部磁场中，则与该外部磁场相反的磁畴将消失，RIG 的磁畴就成为所有磁化方向一致的单一磁畴。于是，透过具有单一磁畴的 RIG 的光将接受一个方向的法拉第旋转，这种情况下 RIG 可作为法拉第旋转片使用。

本公司产品之一的 GMF,其特征是能在强外部磁场下发生磁化,即使外部磁场消失,仍然能维持其单一磁畴状态。因此,在使用 GMF 时,不需要来自外部的磁场。GMF 可以单体作为法拉第旋转片使用。有关 GMF,请确认第 6 项。



照片.4-1 RIG 的磁畴构造

4-4. 铅含量

本公司使用含有铅氧化物的溶剂，通过名为液相外延 (LPE) 法的结晶生长的方法生产 RIG。本公司以前的产品，包含有约 5000ppm 的杂质铅。现在，我们开发了控制铅含量的技术，并开发了 GTD、GLB、GSF、GMF 等 G 系列产品。此外，更开发了通过完全无铅技术所制造的 ETD。图 4-4 是各 G 系列产品的铅含量分布图。铅含量都控制在 1000ppm 以下，且所有产品都符合 RoHS 认证要求。

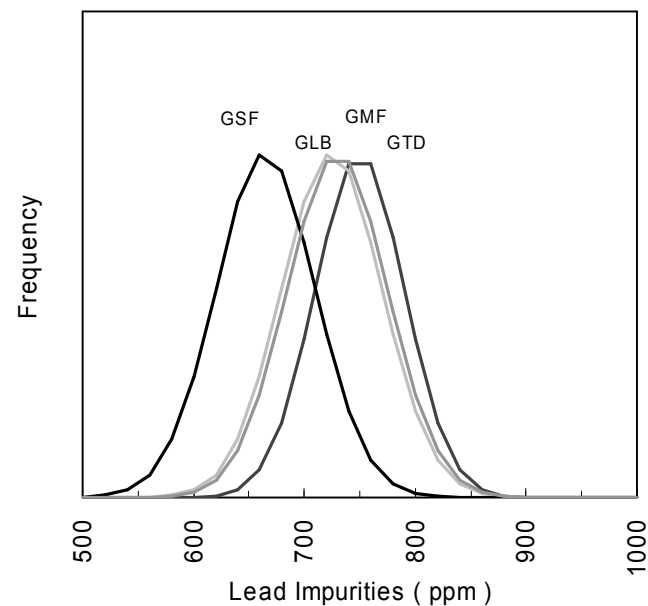


Fig.4-4 铅含量

5. 光学特性

5-1. 法拉第旋转角度和消光比

5-1-1. 测定方法

图 5-1 是本公司使用的法拉第旋转角度和消光比测定装置的基本结构。光源使用单色性高的 DFB 激光。由电脑控制偏光片(Polarizer)和检光片(Analyzer)、样品座、检测器、温度计，测定法拉第旋转角度和消光比。此外，还通过永久磁石向法拉第旋转片提供外部磁场。

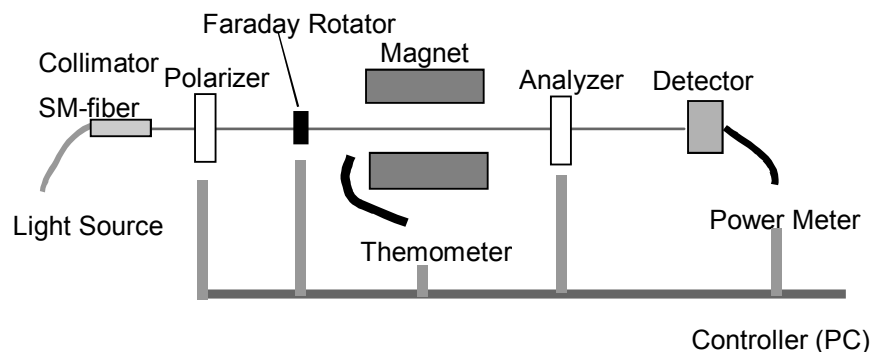


图 5-1 法拉第旋转角度与消光比的测定装置结构

5-1-2. 由波长带来的变化

图 5-2 和图 5-3 表示 GTD 法拉第旋转角度随波长的变化(下面简称波长变化)。第 3 项中记载有各产品具有代表性的法拉第旋转角度的波长变化。波长变化的定义是 45 度法拉第旋转片波长每变化 1nm, 其旋转角度变化的度数。各产品在 O-Band、E-Band 没有差异, 而在 C-Band、L-Band 则得出了不同的值。

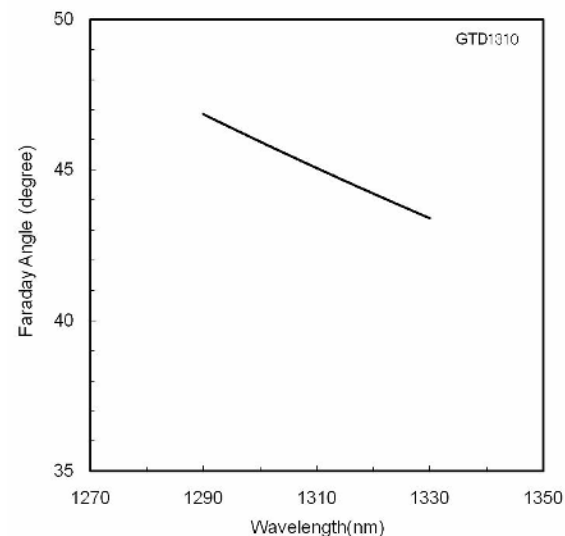


图 5-2 GTD1310 的旋转角度的波长变化

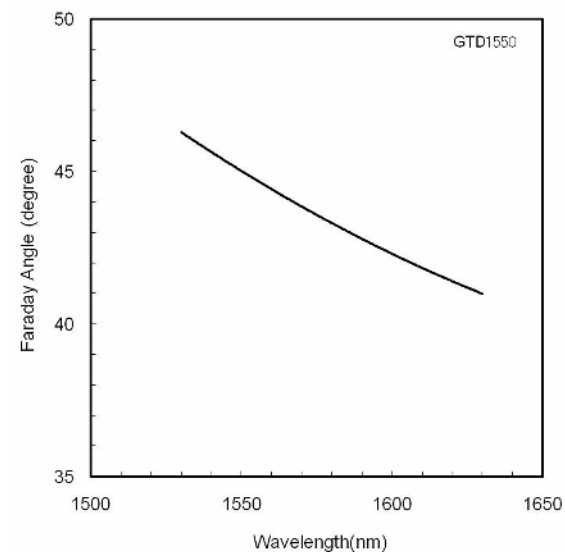


图 5-3 GTD1550 的旋转角度的波长变化

5-1-3. 温度变化

图 5-4 和图 5-5 表示 GTD 法拉第旋转角度随温度的变化。本公司对随温度的变化（温度变化）定义为，根据在 0°C~50°C 的温度范围内，45 度法拉第旋转片每变化 1°C 时所测得的值计算所得的值。GTD、ETD 的温度变化，在 1310nm 和 1550nm 稍有差别，其他产品的温度变化虽然根据商品种类不同而有差异，但随波长的变化并不大。根据图 5-6 可确认到，消光比不随温度而发生变化。

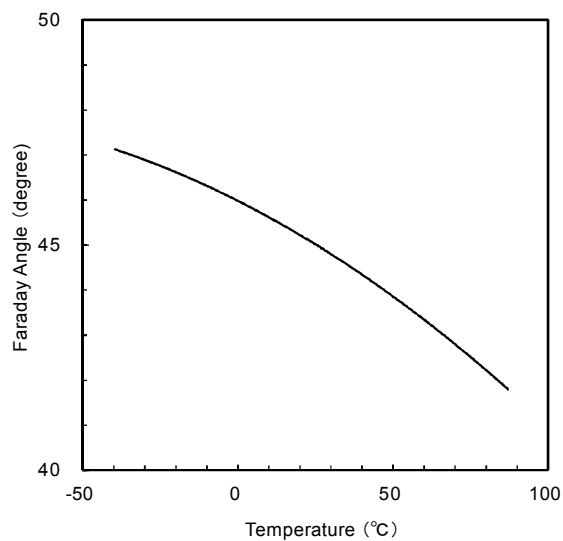


图 5-4 GTD1310 的旋转角度的温度变化

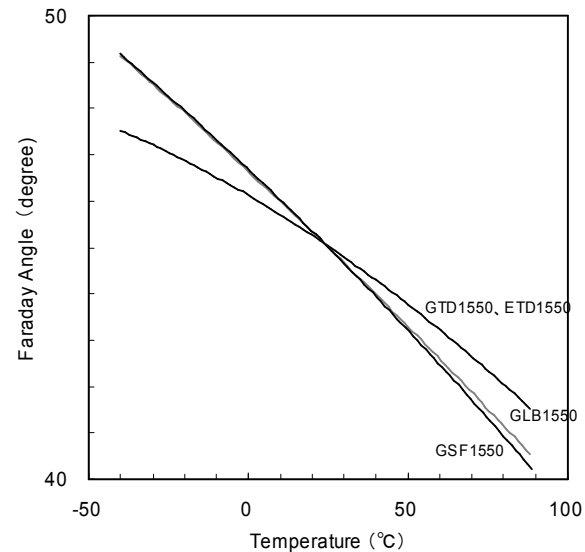


图 5-5 各商品种类的法拉第旋转角度随温度的变化

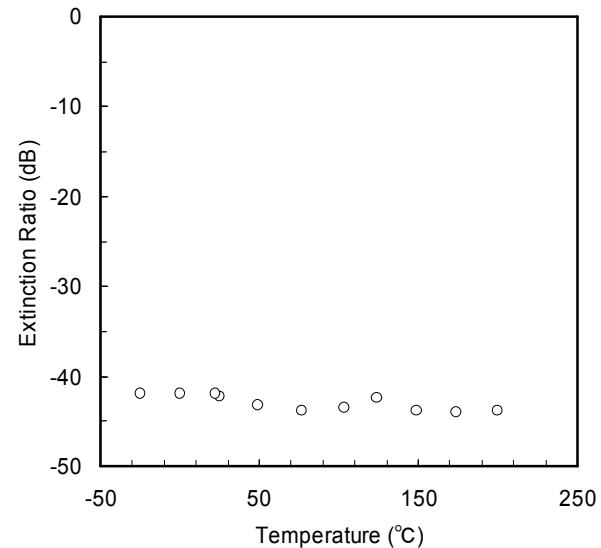


图 5-6 消光比随温度变化的测定例

5-1-4. 入射角度的影响

图 5-8 的●, 表示改变对法拉第旋转片的光的入射角度, 测定法拉第旋转角度之例。
○则是同样条件下的消光比的测定例。

我们使用图 5-7, 就有关法拉第旋转角度不受光的入射角度影响的原因进行说明。法拉第旋转角度与磁化方向相关。普通的 RIG, 由于其磁各向异性(magnetic anisotropy), 在垂直膜面的方向受磁化。如果光倾斜入射, 虽然通过 RIG 的光程长度增加, 但是磁化所产生的影响也减少, 于是相互抵消, 接受一定的法拉第旋转。

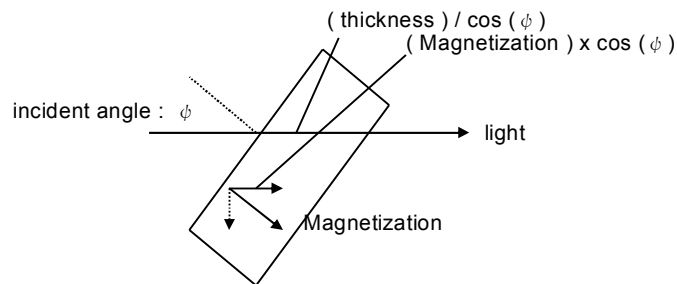


图 5-7 入射角与磁化方向

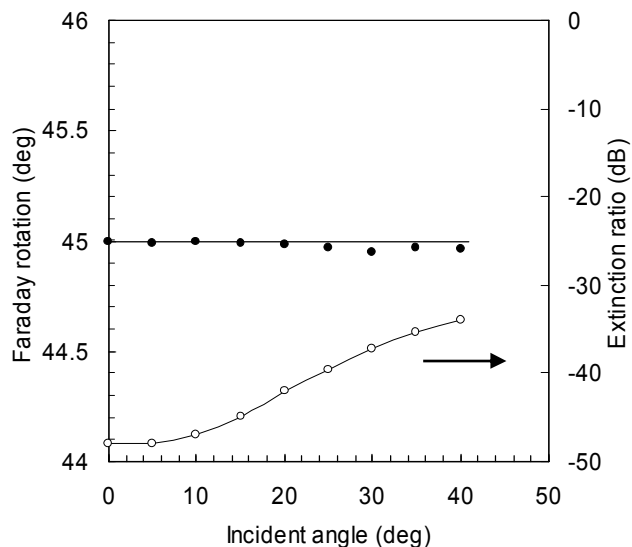


图 5-8 法拉第旋转角度和消光比的测定例

如果入射角度增大, 则消光比减少。这是由于 AR 镀膜的性能降低所导致的。如果 AR 镀膜性能降低, 则在 RIG 内部的部分光会发生多重反射。与入射光相同方向所透过的多重反射光, 受到通常 3 倍至 5 倍的法拉第效应, 由于该多重反射光的影响, 导致消光比的测定结果低下。

图 5-9 表示入射光与插入损耗的关系, 由于产生了多重反射光, 发生了部分反射, 也导致了插入损耗的恶化。

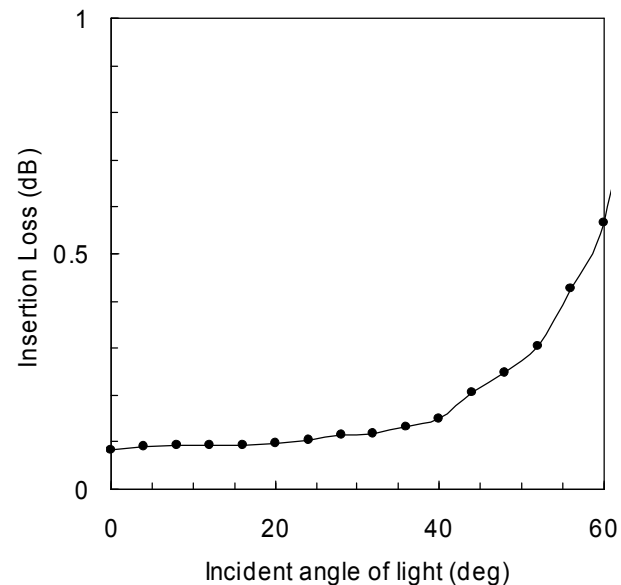


图 5-9 入射角度与插入损耗的测定例

5-1-5. 应力的影响

消光比也随应力恶化。图 5-11 表示在法拉第旋转片上施加外部应力（如图 5-10）所测得的消光比。消光比的恶化取决于光测弹性(Photoelasticity)。图 5-11 的横轴，是入射光的偏光方向与应力所形成的角度，该角度为 22.5 度时，消光比最小，即此时其影响最小。这是因为入射光的偏光面在垂直于应力的方向旋转，透射光以 45 度角旋转。

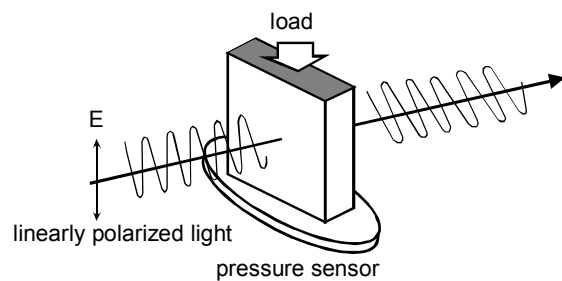


图 5-10 应力影响的测定方法

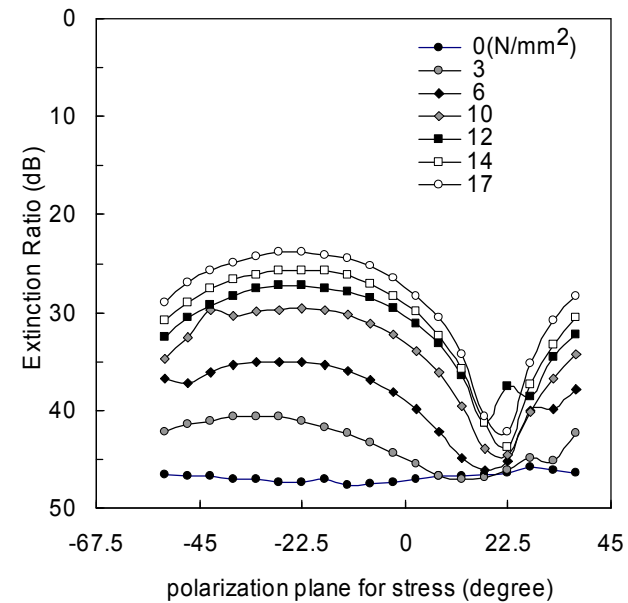


图 5-11 外部应力导致消光比变化

5-2. 插入损耗和折射角度

5-2-1. 测定方法

图 5-12 是插入损耗与折射角度的测定装置结构示意图。光源使用 FP 激光、DFB 激光、波长可变激光等。由电脑控制用于测定试料架、检测器、折射角度的针孔。该装置可分别单独测定插入损耗和折射角度。

插入损耗的定义为：在有或无试料的情况下，透射光强度的差异。折射角度则根据通过针孔的光的衰减量计算而得。

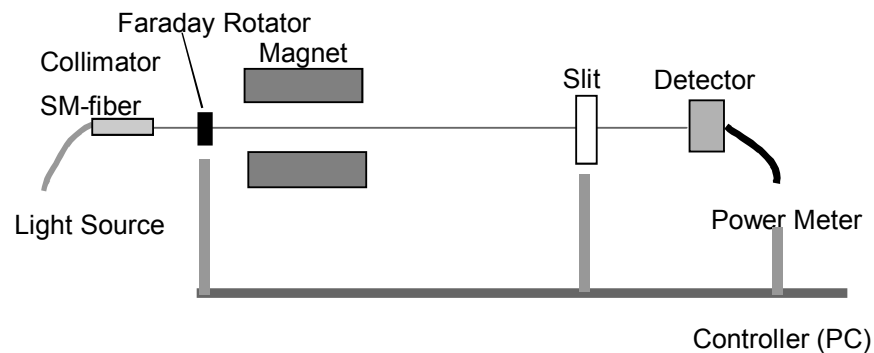


图 5-12 插入损耗与折射角度的测定装置结构

5-2-2. 插入损耗

图 5-13 是在各商品种类的 C-Band 和 L-Band 的插入损耗测定结果。GLB 以外的产品由于稀土类离子的弱吸收，其在 L-Band 的插入损耗增加。因此建议在 L-Band 使用 GLB。

图 5-14 是 GLB 的短波长区域的插入损耗示意图。GLB 以外的产品，具有高于 GLB 产品 1.5 倍左右的插入损耗，因此在短波长区域，我司也建议贵司使用 GLB。

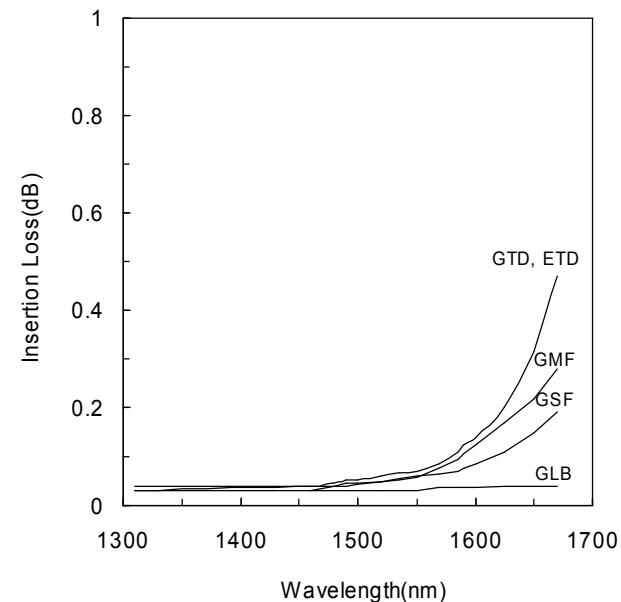


图 5-13 各商品种类的插入损耗

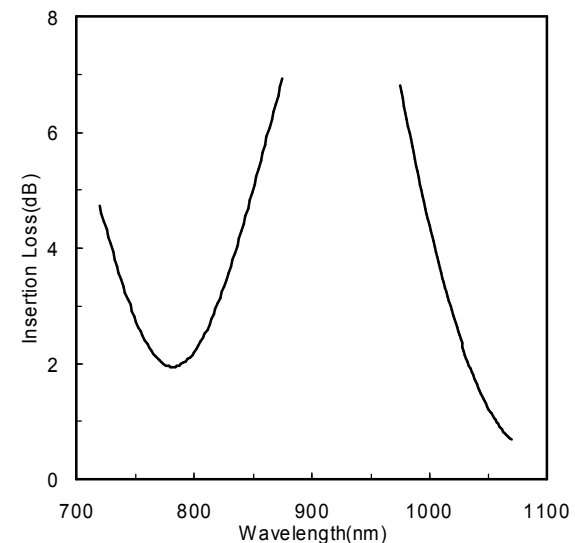


图 5-14 GLB 在短波长区域的插入损耗

5-2-3. 折射角和耦合损耗

在线型光隔离器的插入损耗的原因有：由于法拉第旋转片的光吸收等导致的插入损耗、以及法拉第旋转片引起的光折射（折射角度）导致的耦合损耗(Coupling Loss)。本公司对插入损耗，以及影响耦合损耗的法拉第旋转片的折射角进行分别定义，并制定其规格。耦合损耗受法拉第旋转片的折射角的影响，但该损耗是通过准直器或其他配件而间接表现的，因此本公司并不对耦合损耗提供保证。

5-2-4. 温度变化

图 5-15 和图 5-16 是插入损耗随温度变化的测定结果示意图。图 5-15 是 GTD1310 的测定结果，在没有吸收损失的波长区域中，插入损耗不随温度变化。而如图 5-16 所示，在有吸收损失的 $1\mu\text{m}$ 附近、可观察到插入损耗随温度的变化。

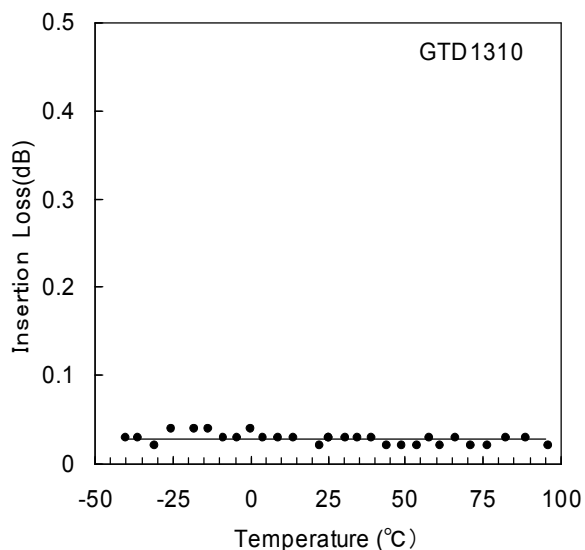


图 5-15 GTD1310 的插入损耗随温度的变化

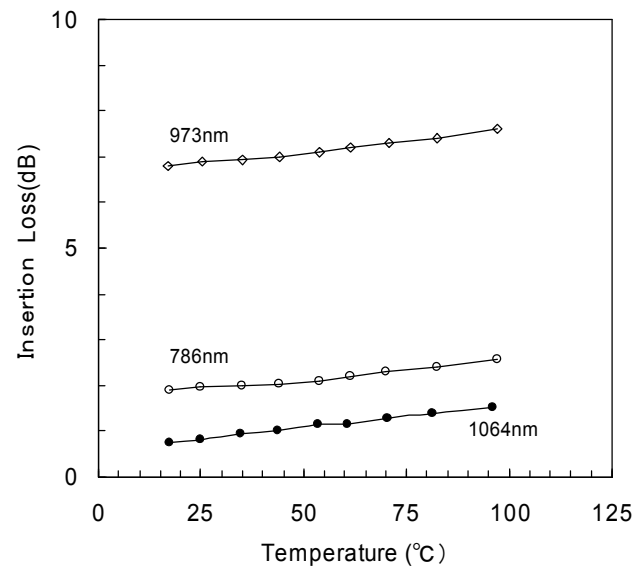


图 5-16 GLB 在短波长区域的插入损耗随温度的变化

5-3. 外部磁场和光学特性

5-3-1. 法拉第旋转角度和消光比

在磁性不饱和的情况下，RIG 会形成如照片 4-1 的多磁畴构造。如果光透过未饱和的 RIG，透过各个磁畴的光将受到相反方向的法拉第旋转，由各个光的干涉产生衍射现象(参照第 5-3-2 项)。其结果，所观察到的透过未饱和的 RIG 的光是受到相反方向的法拉第效应的光与干涉光的总和。

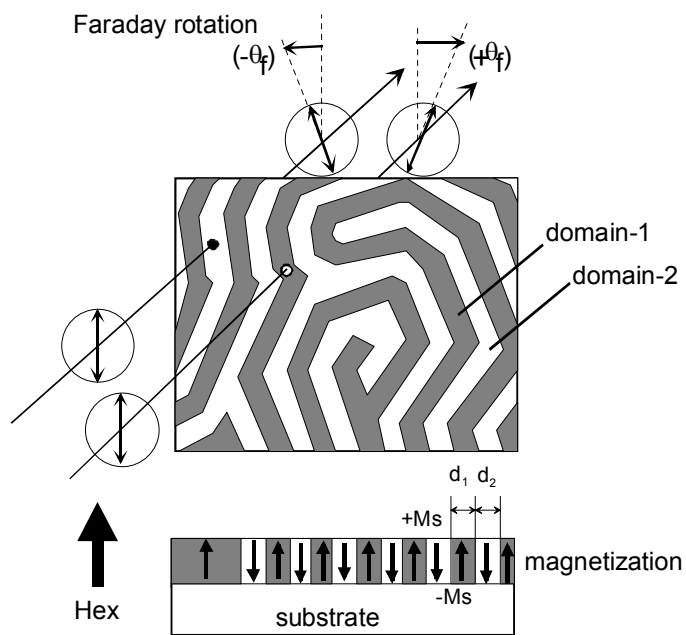


图 5-17 RIG 的多磁畴构造和法拉第旋转

图 5-18 是外部磁场下，测定法拉第旋转角度与消光比之例。相对外部磁场来看，法拉第旋转角是成线性变化的。但是，由于消光比是减少的，因此可以断定法拉第旋转角度的大小并度非线性变化。磁光效应使用费尔德常数(Verdet's Constant)表示，与外部磁场成比例，而 RIG 的法拉第旋转在原理上与磁光效应完全不同。

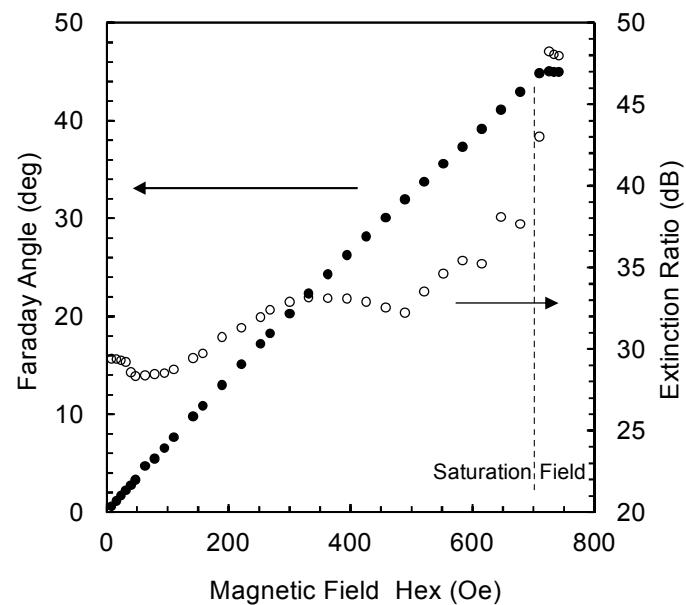


图 5-18 多磁畴构造中法拉第旋转角度与消光比的测定例

5-3-2. 磁畴构造引起的衍射现象

如果光通过未饱和磁性的法拉第旋转片，由于多磁畴构造，会发生如图 5-19 所示的衍射现象。0 次的透射光($n=0$)，如同由于磁畴面积的差异所产生的法拉第旋转，相对入射光的偏光面，能观察到一定的旋转，而衍射光则具有垂直于入射光偏光面的偏光面。衍射的光量根据多磁畴的构造而不同，例如 45 度旋转片的情况下，最大为-3dB 左右，实测为-1dB 左右。因此，使用具有有限大小的检测机测定磁性未饱和的法拉第旋转片的插入损耗时，测定值大于实际值。

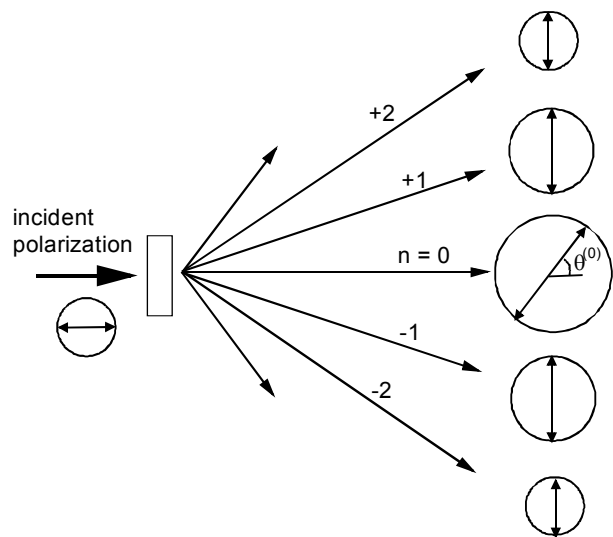


图 5-19 多磁畴构造引起的衍射

6. 磁特性

6-1. 磁化曲线

图 6-1 是测定法拉第旋转片的磁化曲线的测定装置的结构示意图。如果在法拉第旋转片上施加外部磁场，磁畴宽度随外部磁场而变化。透过磁畴的光或衍射光由检光片分离为互相垂直的 2 个成分。取这两个成分的差分,可画出法拉第旋转片的磁化曲线。

图 6-2 是通过该装置所测定的 GTD 的磁化曲线。

我们从该磁化曲线中读取饱和磁场 H_s 、核形成磁场 H_n 、保磁力 H_c 。

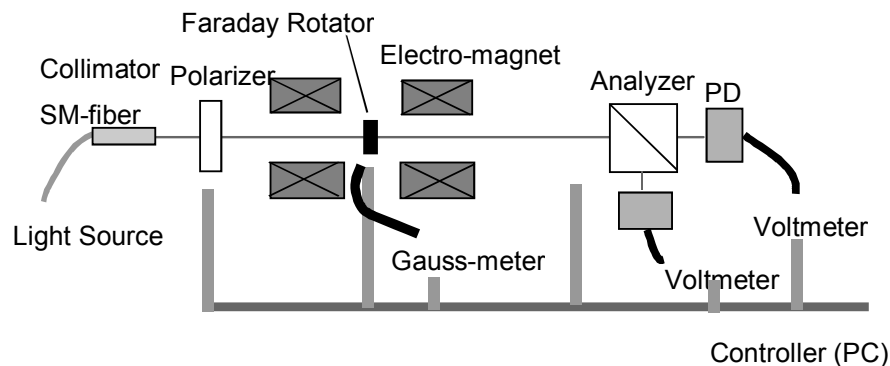


图 6-1 磁化曲线的测定装置的结构

饱和磁场 H_s :

饱和磁场中, 法拉第旋转片有磁性饱和的磁场, 是由多磁畴构造转变为单磁畴构造的磁场。如果施加大于饱和磁场的磁场, 法拉第旋转片将获得必要的法拉第旋转角度。饱和磁场随法拉第旋转片的形状而改变。详细信息请参照第 6-2 项。

核形成磁场(Nucleation Field) H_n :

如果降低为实现磁性饱和而施加的外部磁场, 则将特定磁场出现磁畴构造。本公司对该特定的磁场定义为核形成磁场 H_n 。详细信息请参照第 6-4 项。

保磁力 H_c :

GMF 中, 即使降低施加的磁场也不会产生磁畴, 因此可通过施加反方向的磁场, 使其磁化的方向反转。磁化反转的磁场称为保磁力。保磁力 H_c 与核形成磁场 H_n , 原理上几乎相同, 但本公司对于 GMF , 将该值定义为保磁力 H_c 。详细信息请参照第 6-3 项。

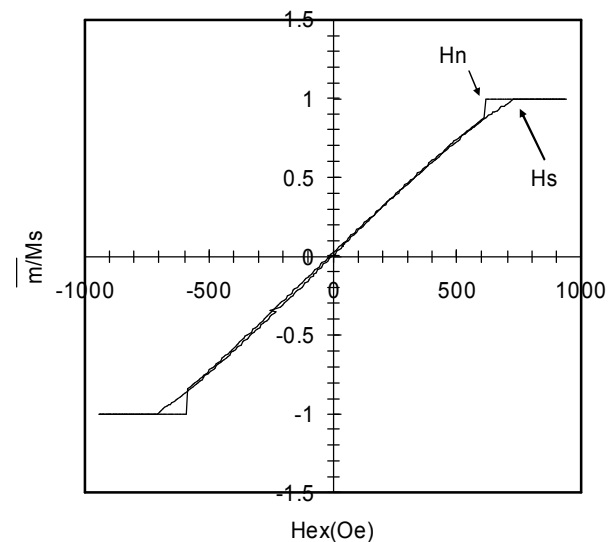


图 6-2 GTD 的磁化曲线

6-2. 饱和磁场

如果所施加的磁场达到了 RIG 的饱和磁场，则 RIG 磁性饱和，并作为法拉第旋转片动作。因此，在使用 GMF 以外的其他商品种类时，需要能向 RIG 施加大于饱和磁场 H_s 的磁场的永久磁石。图 6-3 是 GTD、ETD 的饱和磁场 H_s 随温度的变化。图 6-4 是 GSF 的饱和磁场随温度的变化情况。饱和磁场是随温度变化的，本公司制定的规格是：在使用温度范围 $-20^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ 内所必要的饱和磁场。

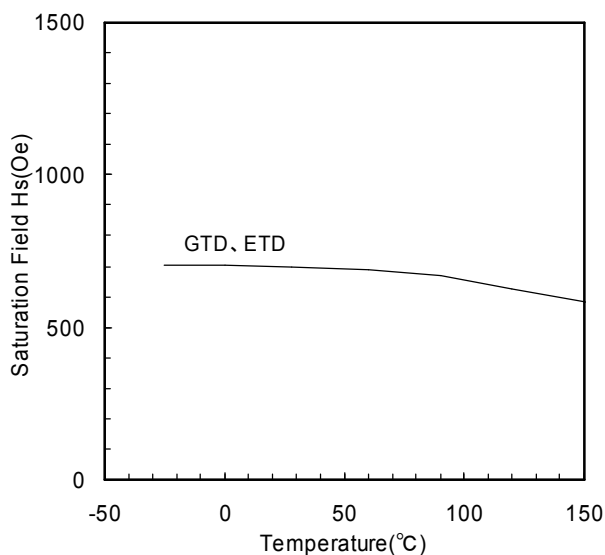


图 6-3 GTD 与 ETD 的饱和磁场随温度的变化

饱和磁场 H_s 根据产品的形状而各不相同。图 6-5 是产品形状与其退磁因子的关系的近似图。横轴表示尺寸/厚度，纵轴表示退磁因子 (Demagnetization Factor)。在无限大平板 (横轴为 ∞ ，退磁因子为 1) 的饱和磁场上乘以图 6-5 的退磁因子，即实际产品尺寸下的饱和磁场。尺寸越小，厚度越厚，其退磁因子越小，饱和磁场也越小。本公司制定的规格是通常使用的 1mm 片状小片的饱和磁场。

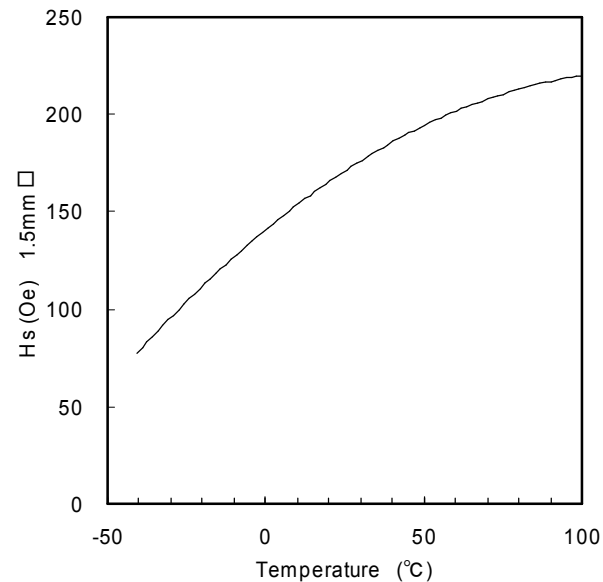


图 6-4 GSF 的饱和磁场随温度的变化

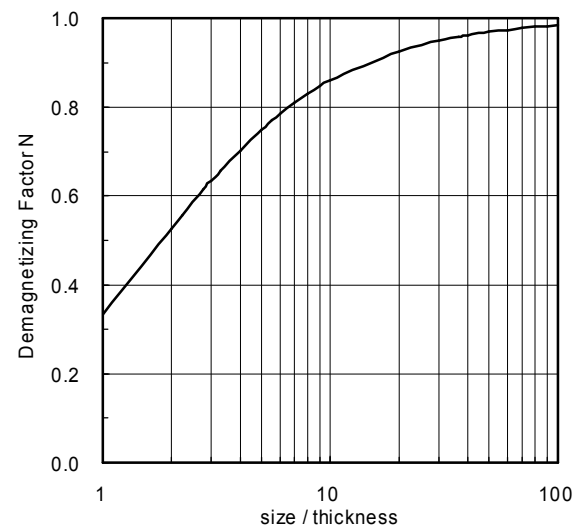


图 6-5 产品形状与退磁因子

6-3. 保磁力

6-3-1. 不需要磁石的法拉第旋转片

图 6-6 是不需要磁石的法拉第旋转片 *GMF* 的磁化曲线。*GMF* 是具有方形磁滞 (hysteresis) 曲线(磁化曲线), 其特征是即使从外部施加反向磁场, 也能维持一定的法拉第旋转的法拉第旋转片。但是, 如果施加大于保磁力 H_c 的反向磁场, 其磁化方向将反转, 法拉第旋转方向也将反转, 亦或是脱磁。因此, 在使用 *GMF* 时, 必须充分注意可能有的磁场。

小片尺寸的 *GMF* 的保磁力 H_c , 从 400(Oe)至 2000(Oe)各不相同。影响保磁力的因素有: 切割方法等外部应力、断面的形状等。本公司测定每个小片的保磁力 H_c , 在确认产品符合规格后再出货。如果贵司自行切割, 则本公司不对保磁力 H_c 提供保证, 敬请注意。

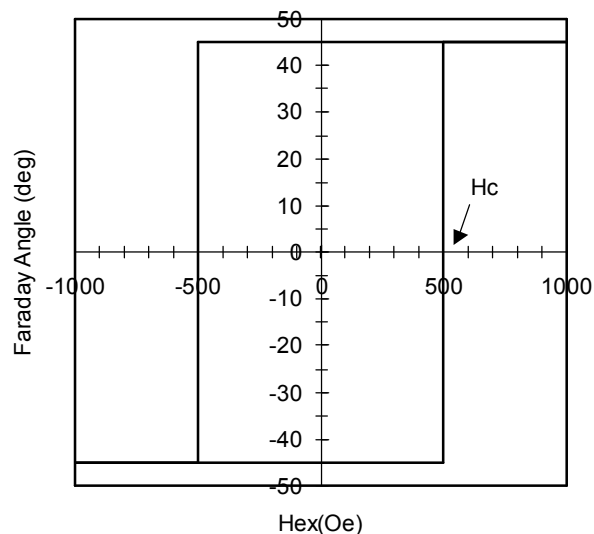


图 6-6 *GMF* 的 Hex- θ 曲线

图 6-7 是 *GMF* 的保磁力 H_c 随温度的变化情况。随着温度的升高, H_c 变小, 即使发生瞬间的高温, 也会使其保磁力消失。因此请注意施加于产品的温度履历。此外, *GMF* 也会因外部应力而发生脱磁, 请小心使用。

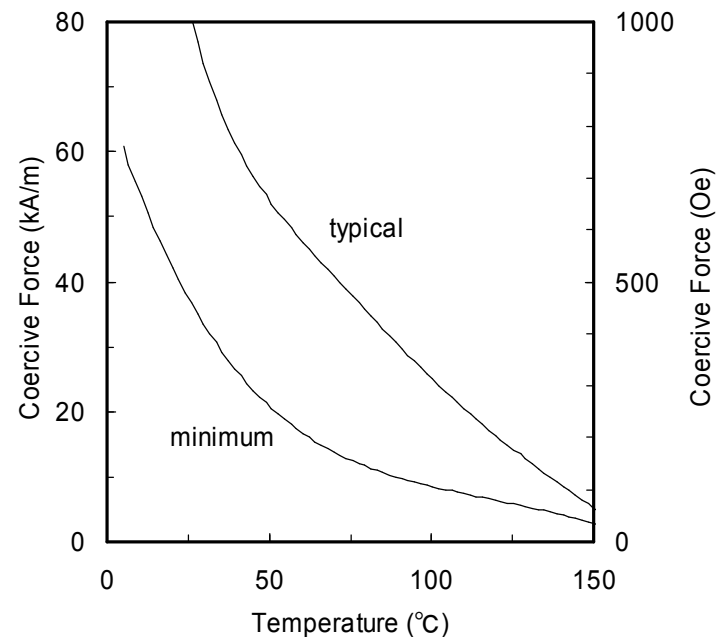


图 6-7 H_c 随温度的变化

6-3-2. GMF 的使用方法

GMF 的特征为，能保持磁化，其动作驱动不需要永久磁石等外部磁场。但是，GMF 在有外部磁场的的环境下，需规定其动作的温度范围。如果温度高，外部磁场大，GMF 将丧失磁性，法拉第旋转片将不能旋转。并且，一旦在高温下失去了磁性，即使恢复室温，GMF 也无法再作为法拉第旋转片将不能旋转。

本公司对小片状的 GMF 进行事先充磁。磁化的方向请参照图 6-8。本公司对小片托盘从上到下方进行磁化。如果光从与磁化相同的方向入射，则偏光面向左旋转（逆时针旋转）。此外，贵司也可以自行对产品进行充磁。

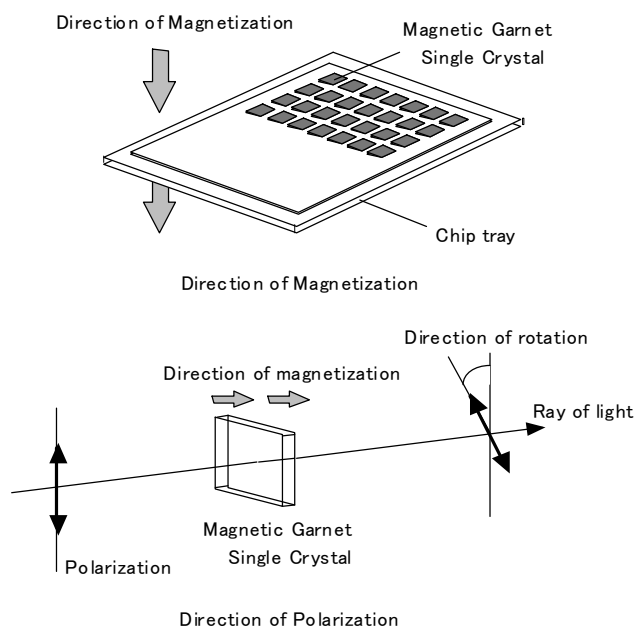


图 6-8 充磁的方向

如前项所述，各个小片的 Hc 值不同。图 6-7 表示具有下限 Hc 与典型的 Hc 的小片产品的 Hc 随温度的变化。保磁力 Hc 随温度发生可逆变化，但是一旦发生了高温脱磁，则即使恢复到低温，也只能处于脱磁状态，作为法拉第旋转片将不能旋转。为了恢复法拉第旋转片的旋转功能，必须再次进行充磁，保磁力也需通过再充磁才能恢复。

GMF 会受例如切割等外部应力的影响而导致脱磁，其保磁力也会发生变化。

最后讲述再充磁的方法。我们可通过向 GMF 施加强外部磁场实现再充磁。外部磁场可使用电磁石、永久磁石。如果发生了脱磁，请进行再充磁。再充磁时，建议将 GMF 保持在 40°C 以上，施加与面垂直的 3000(Oe) 以上的外部磁场。如果温度较低，则需要更大的磁场，不施加充分大的外部磁场，将无法恢复原有的保磁力。此外，如果温度低于室温(25°C)，GMF 可能无法获得充分的特性。外部磁场的施加只需要瞬间（例如 1 秒）即可。如果贵公司实施了切割，则建议您在施加外部磁场后，确认各个小片是否具有充分的保磁力。例如通过施加反向的 400(Oe) 的磁场，确认其是否被反向磁化等简易的方法进行确认。

6-4. 磁补偿温度和居里温度

RIG 中存在有磁补偿温度(T_{comp})、居里温度(T_c)等使(饱和)磁性为零的特别温度。该温度根据各种商品种类而不同, 系在 $220^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ 的居里温度以上, RIG 的(饱和)磁性将为 0, 法拉第旋转角度也为 0。磁补偿温度也根据商品种类而不同, 所有商品的磁补偿温度都低于室温, 在该温度下 RIG 的(饱和)磁性为 0, 在磁补偿温度附近, (饱和)磁性的方向反转。如果向 RIG 施加外部磁场, 在该磁补偿温度附近, 法拉第旋转角度也会反转。

图 6-9 是对本公司的 GMF 施加大于其保磁力的磁场后, 进行法拉第旋转角度的测定例。该 GMF 的磁补偿温度为约 -10°C , 在 -10°C 附近, 法拉第旋转角度的符号反转。这是因为, RIG 的(饱和)磁化方向是根据外部磁场而定的。此外, 如果不对 GMF 施加外部磁场, 如图 6-10 所示, 在磁补偿温度附近不会发生法拉第旋转角度的符号反转。对 GMF 施加大于其保磁力的外部磁场, 则 GMF 不能使用, 敬请注意。

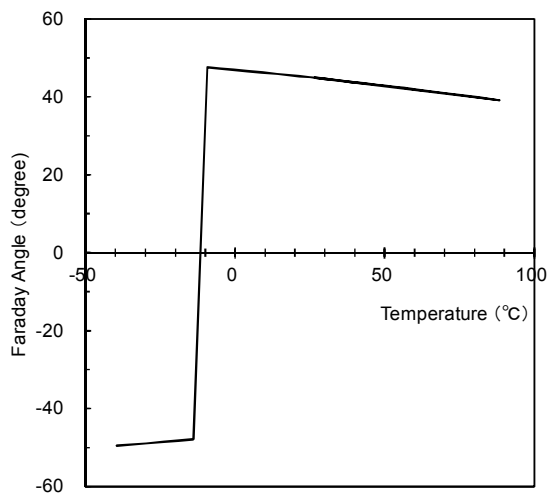


图 6-9 磁补偿温度附近的法拉第旋转角度变化 (有外部磁场)。

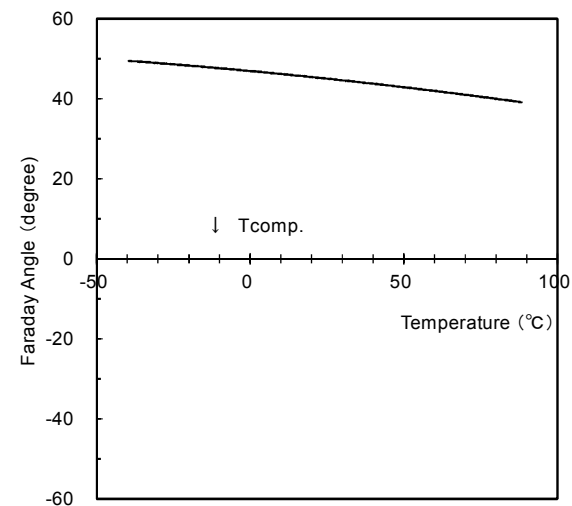


图 6-10 磁补偿温度附近的法拉第旋转角度变化 (无外部磁场)。

7. 防反射膜(AR-Coating)

7-1. 种类

Table.7-1. 防反射膜的种类

Item code	Index	中心波长	反射率(单面)
A	对空气	指定	$\leq 0.2\%$
E	对粘接	固定、1300 – 1650 nm	$\leq 0.2\%$
N		无防反射膜	
X		其他	

表 7-1 是本公司所涂敷的防反射膜。防反射膜使用蒸透方式涂敷。“A”镀膜是为在空气中，使指定的中心波长反射率变小而设计的防反射膜。“E”镀膜是在用胶将法拉第转子与其他光学配件相互粘贴的状态下，为防止法拉第旋转片的反射而设计的防反射膜，同时也是在大范围的波长领域，使反射率变小的防反射膜。

我司还能在法拉第旋转片两面涂敷不同种类防反射膜，贵司如有需要敬请垂询。

7-2. 特征

7-2-1. “A”镀膜(对空气)

“A”镀膜是相对空气(折射率 1)所设计的防反射膜。在特定波长下，使反射率变小。“A”镀膜由 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 或 $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ 构成。图 7-1 是 1550nm 波长 $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ 的一例。

“A”镀膜还可以涂敷于由 RIG($n=2.39$, 参照表 4-1)和基板($n=1.96$)构成的 GLB1064 上,但是不能防止由 RIG 和基板的折射率差所产生的反射。这种情况下,建议您将 RIG 面面向光源侧使用。

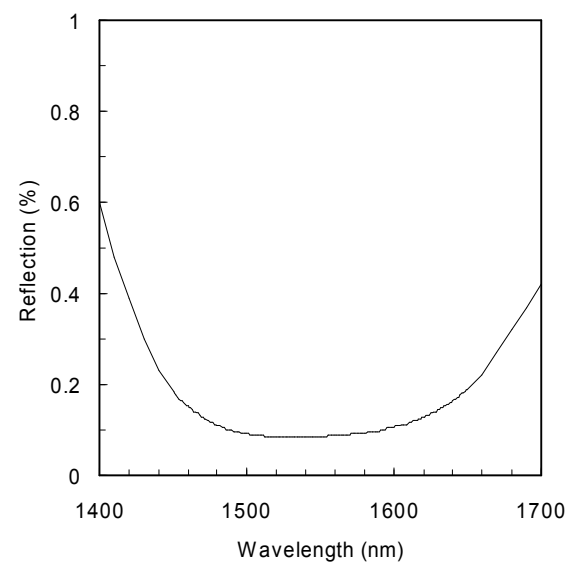


图 7-1 “A”镀膜的一例(评价例)

7-2-2. “E”镀膜(对粘合剂)

“E”镀膜是在使用胶将法拉第旋转片与其他光学配件相互粘合的状态下，用于防反射的防反射膜，在1300nm至1650nm的大范围波长领域，使反射率变小。“E”镀膜由SiO₂/TiO₂构成。图7-2是在粘合剂的折射率发生变化时，模拟防反射膜性能的结果。

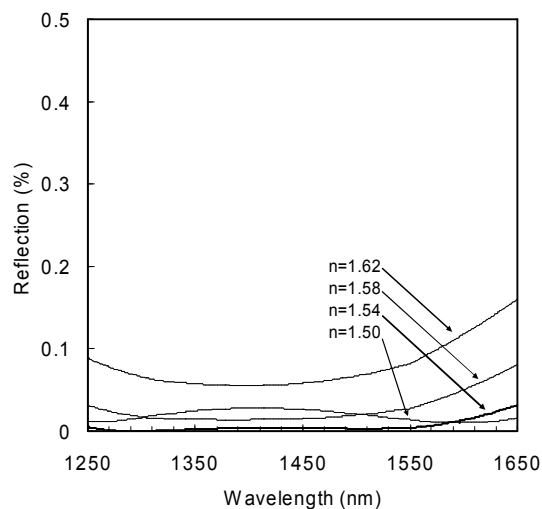


图 7-2 计算结果

7-3. 入射角度

入射光的角度越大，防反射膜的性能越低。图7-3是使用“A”镀膜后的计算结果，请参考。

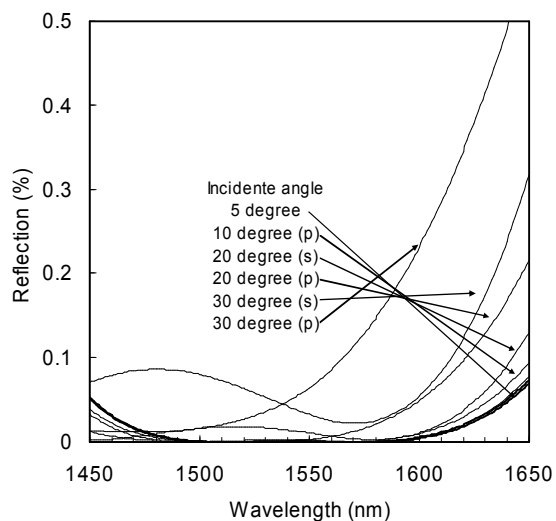


图 7-3 入射角度与防反射膜的性能

8. 可靠性测试

8-1. 环境测试

本公司产品通过了下述条件的环境测试。评价项目为：法拉第旋转角度、消光比、插入损耗、外观、防反射膜的附着强度(粘附试验)。对于 GMF 还进行保磁力的评价。

高温测试	100°C、2000 小时
低温测试	-40°C、2000 小时
耐湿测试	90°C、90%Rh、2000 小时
热循环测试	-45°C – 90°C、1000 次循环

8-2. 强光带来的影响

8-2-1. 脉冲激光

图 8-1 是由下述脉冲激光导致损失的测试结果。本公司从该结果估算，受损伤的最小光强是 100 MW/cm^2 左右。

脉冲激光	光束直径	$18 \mu\text{m}\phi$
	光强	$0\text{-}800 \text{ MW/cm}^2$
	脉冲宽度	20 ns
	频率	6 kHz
	照射时间	2 sec

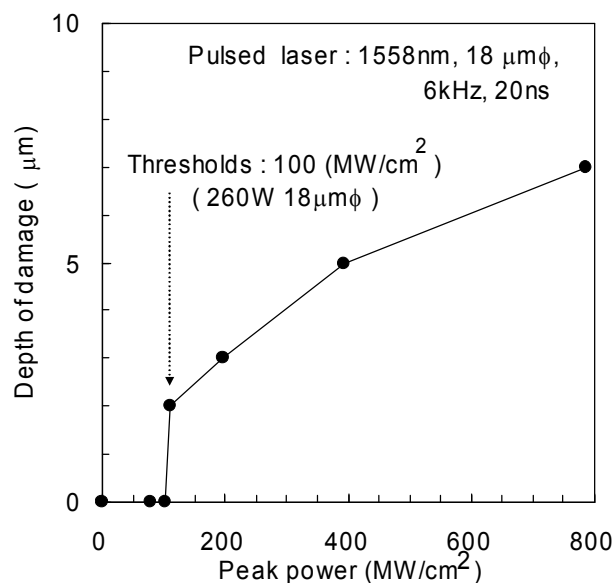


图 8-1 脉冲激光导致的损伤

8-2-2. 光吸收导致的温度上升

图 8-2 是对光强与插入损耗关系的测定结果。法拉第旋转片使用 A1T1064、激光则使用光束直径为 $1\text{mm}\phi$ 的 1064nm 波长 YAG 激光。100mW 以下的 1064nm 波长的 A1T1064，有 0.8dB 左右的插入损耗。●表示透过除去基板的 A1T1064nm 的光强，■则表示其透射率。如果入射光强度为大于 200mW，则透射光显著减少。

该现象是由于 RIG 所吸收的光导致的 RIG 温度上升，从而使 RIG 的吸收增加(参照第 5-1-4 项)。可以认为，光的吸收导致温度上升，散热比例也随之上升。下图中的○和□是使用未除去基板的 A1T1064 进行相同测试所得的结果。基板的热库效应使热顺利散发，在输入功率低于 1W 的情况下，没有发生光吸收增加的现象。在 1200-1600nm 波长范围内，由于光的吸收量小，输入功率在数瓦以下，可估计其温度不会上升。

* 公司现不生产 A1T1064，GLB1064 为替代商品。

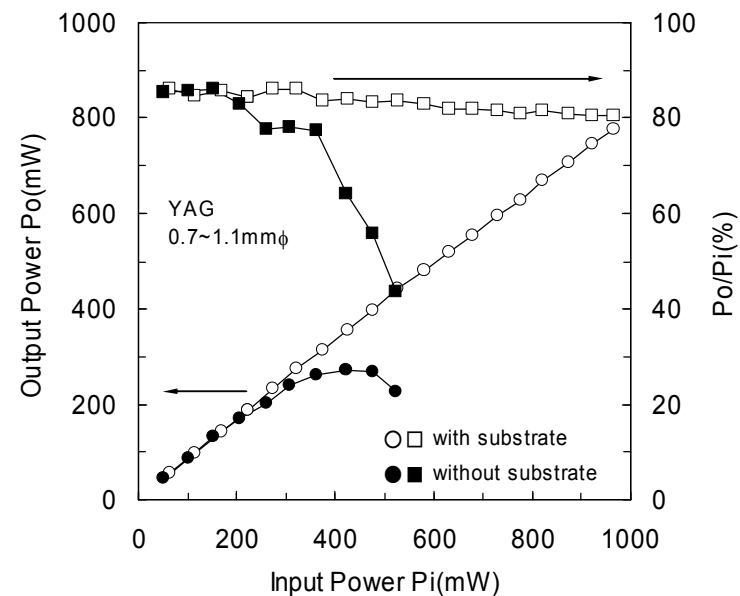


图 8-2 光强与透射率

9. 表面质量

9-1. 标准规格

表 9-1 11mm 角、带 AR 镀膜

规格		
有效范围	10.5x10.5mm 四角, 1 边为 1mm 的直角三角形部分除外(无 AR)	
崩边	有效范围内无崩边	
RIG 的划痕	2 μ m \leq 宽度 < 5 μ m 5 μ m \leq 宽度	总和 \leq 10mm 无
AR 划痕	2 μ m \leq 宽度 < 20 μ m 20 μ m \leq 宽度	总和 \leq 10mm 无
AR 镀膜缺陷	50 μ m \leq 宽度	无
其他缺陷	30 μ m \leq 大小 < 350 μ m 350 μ m \leq 大小	\leq 5 个 无

表 9-2 小片尺寸、带 AR 镀膜

规格		
有效直径	产品尺寸 \leq 1mm	\leq (产品尺寸- 0.2)mm ϕ
	1mm < 产品尺寸 \leq 2mm	\leq (产品尺寸 \times 0.8)mm ϕ
崩边	有效直径内无崩边	
RIG 的划痕	宽度 < 2 μ m	不限
	2 μ m \leq 宽度 < 5 μ m	总和 \leq 产品尺寸 \times 0.8
	5 μ m \leq 宽度	无
AR 划痕	宽度 < 2 μ m	不限
	2 μ m \leq 宽度 < 20 μ m	总和 \leq 产品尺寸 \times 0.8
	20 μ m \leq 宽度	无
AR 孔	50 μ m \leq 大小	无
其他缺陷	大小 < 10 μ m	不限
	10 μ m \leq 大小 < 30 μ m	\leq 5 个
	30 μ m \leq 大小	无

9-2. 缺陷与 AR 镀膜缺陷(pin-hole)带来的影响

图 9-1 是对缺陷所带来的损耗的计算结果(实线), 以及测定(●)结果。假定光束直径为 300 μ m 与 400 μ m, 光束的中心有法拉第旋转片的缺陷。

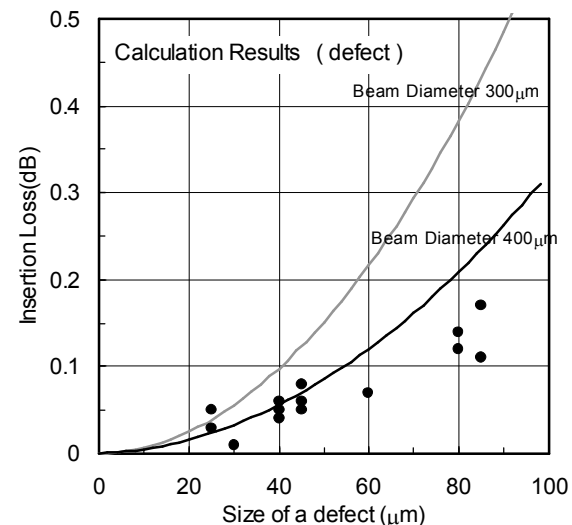


图 9-1 缺陷的影响

图 9-2 是对 AR 镀膜缺陷所带来的损耗的计算结果。图 9-2 中, 就 AR 镀膜缺陷对反射率所带来的影响也进行了计算。缺陷、AR 镀膜缺陷对损耗、反射率有一定的影响, 但是这些都是假定该缺陷或 AR 镀膜缺陷位于光束中心而计算所得的。实际情况, 如图 9-3 所示, 光束中心存在有缺陷的概率极低, 缺陷等如果偏离中心, 则其带来的影响微乎其微。

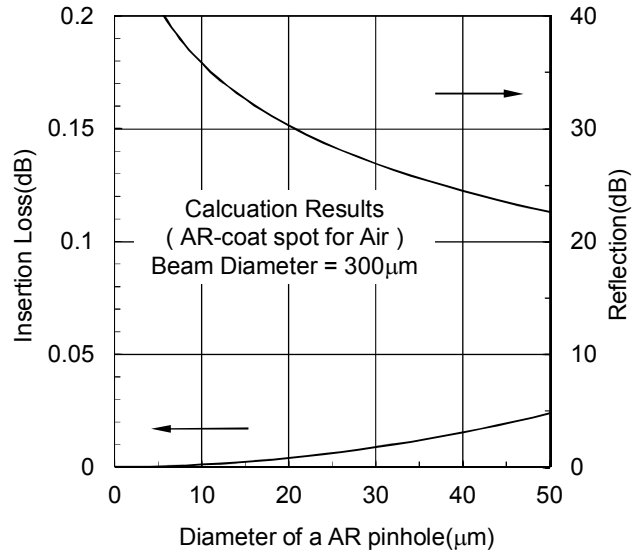


图 9-2 AR 镀膜缺陷的影响

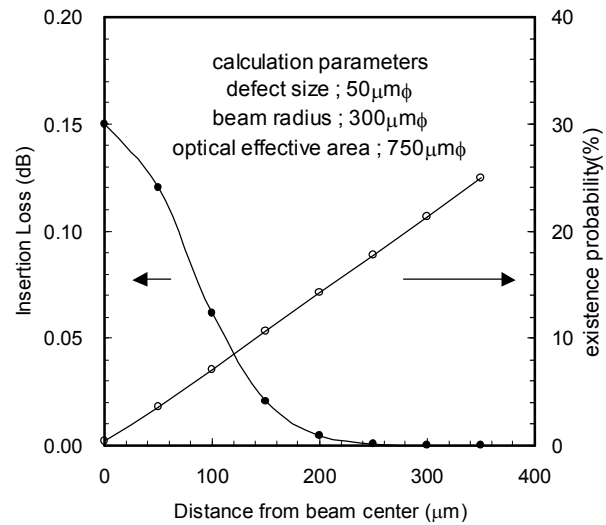


图 9-3 缺陷、AR 镀膜缺陷的存在概率及其影响

9-3. RIG 的划痕与 AR 划痕

图 9-4 表示 RIG 上的划痕所带来的影响的计算和测定结果(●)。防反射膜上的轻微 AR 划痕，不会导致损耗，因此本公司对 2 种划痕的规格进行分别定义。

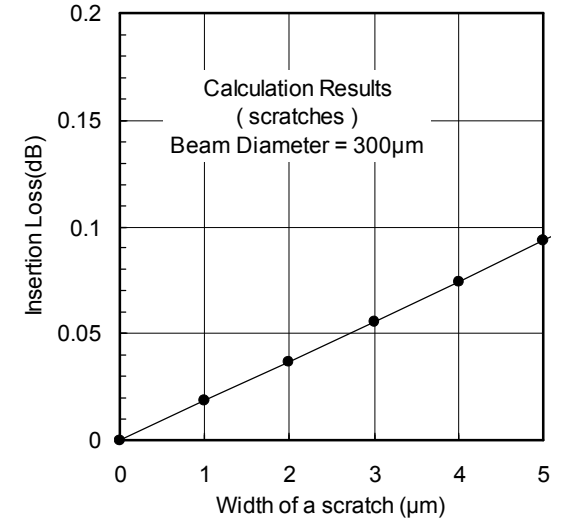


图 9-4 RIG 上的划痕及其带来的影响

9-4. 崩边(chipping)和缺角(corner brake)

本公司对崩边和缺角的定义如下图所示。崩边定义为从切割面起的进入深度。缺角则定义为缺少的部分。公司标准规格为，有效范围内无崩边和缺角。

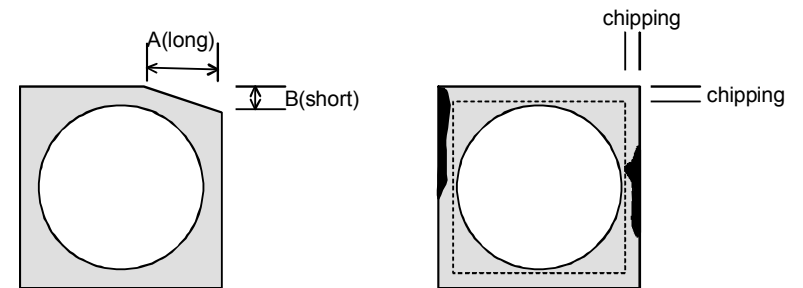


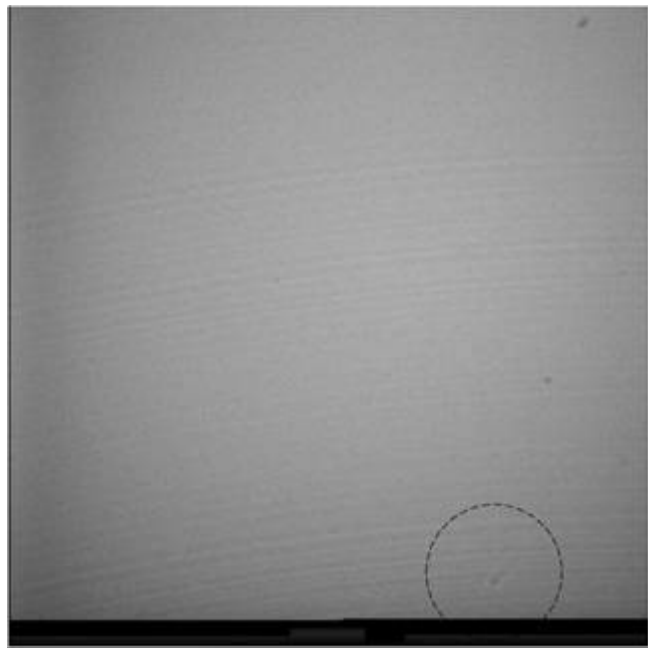
图 9-5 崩边和缺角

10. 其他

10-1. 条痕(Growth Striation)

照片 10-1 是使用红外线显微镜所观察到的条痕(生长条纹)一例。本公司以 GGG 基板作为籽晶体,通过液相外延生长法(LPE 法)培养 RIG 晶体。GGG 基板会跟随周期性的温度变化、结晶生长速度的变化等,产生结构、杂质密度的微妙变化,形成年轮状的条痕。在 GGG 基板上生长而成的 RIG,也会反映基板的条痕,可通过红外线显微镜观察到如照片 10-1 所示的折射率的微妙变化。

本公司对存在条痕的 RIG 的法拉第旋转角度、消光比、插入损失等光学特性进行了全面测定,可以确定条痕对这些光学特性没有影响。



照片 10-1 条痕与漩涡

10-2. 漩涡(Swirl)

照片 10-1 中所观察到到的 V 状物称为漩涡,是通过 LPE 法所制造的 RIG 中所产生的。在结晶生长过程中,以 RIG 所产生的小结晶缺陷为起点,受到融液对流的影响,结构的微妙变化导致了折射率的变化,可通过红外线显微镜观察到。本公司对漩涡进行了验证,漩涡与条痕一样,对光学特性不会产生重大影响。

10-3. 波纹(Surface Undulation)

一般认为,RIG 表面有纳米级的波纹。图 10-1 夸张表示了波纹多反射光的影响。使用金属显微镜等偶尔能观察到的条纹,被认为是未设计防反射膜的可见光区域内的反射光受到该波纹的影响后所观察到的。

结晶生长过程中的 RIG 中,由基板与热膨胀系数不同会产生内部应力。如果去除 GGG 基板,各个产品则由于该内部应力而反翘。本公司在减少该反翘的同时,研磨镜面,最后通过 CMP (Chemical Mechanical Polishing) 完成表面抛光。表面的波纹被认为是 CMP 的特殊腐蚀所产生的。

本公司评价了波纹对光学特性的影响,由于波纹本身远小于光的波长,因此其对光学特性没有重大影响。



照片 10-2 表面的波纹

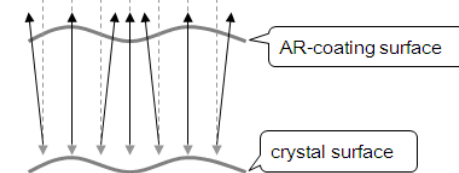


图 10-1 观察原理