

29-36

薄膜材料

光学薄膜

薄膜材料

0484.41

菅原 登* 青木智则*

江涛

1. 前言

光学薄膜是四十年代以后随着真空蒸发法的发展而开始普及的。进入六十年代后，由于电子枪的进步，其应用领域进一步扩大了。为了适应这类装置的发展，光学薄膜所用的材料也由低熔点的金属和氟化物、硫化物等向高熔点的氧化物发展。不只是光学特性，还附加了其它功能，例如导电性和电致变色等特性。而且对薄膜材料和工艺过程的研究也兴旺起来。为了提高生产率，对材料也进行了改良。

最近的光学薄膜，在耐久性、强度以及极力控制滤光片的波长漂移方面比以前要求更加严格。因此，与其说改良材料，还不如说研究的中心转向工艺过程。所要求的光学性能，特别是折射率与材料性能有关，以前材料占据很大比重。本文以最近的光学薄膜材料的研究动向为主题，介绍新的成膜法，新的器件及与其有关材料。

2. 塑料基板用薄膜材料

以 PMMA (有机玻璃)、二甘醇双芳基碳酸酯、PC (聚碳酸酯) 等为代表的塑料上的抗反射膜，因为不能进行基板加热，所以与基板的粘着力减弱。成膜时也存在着因塑料排出的水分、蒸发源发出的辐射热而引起基板变形等问题，这是一个比较难解决的问题。实际上，因为根据塑料的种类，基板和材料存在着相性，所以，可

使用的材料分为以下几种。

采用 PMMA 的最大问题是由于真空排气及受到辐射热而引起的 PMMA 排出水分，其次是因电子枪的反射电子而引起的基板损伤。因此，加热蒸发材料时，应选择受蒸发源辐射热少的材料。折射率材料可采用 SiO_2 、 SiO_3 ；高折射率材料可采用 CeO_2 。最近，由于在装置上下了一番功夫，所以可以把辐射热和反射电子的影响控制在最小限，蒸发时需要大功率的 Ta_2O_5 可以作为高折射材料使用。

以二甘醇双芳基碳酸酯、PC (聚碳酸酯) 为主的基板主要用于眼镜透镜，可以采用部分与前述的 PMMA 不同的薄膜材料。这些眼镜镜片对耐久性、特别是对疵点和裂纹的要求很严格，所以一般的做法是设置一层有机硅薄膜的自旋膜层 (即浸渍涂层；也称为硬涂层) 作为抗反射膜的基底层^[1]。这种有机硅的基底层的生成条件、材料组成和处理很复杂，但各公司都有自己的诀窍。基本的涂敷液都采用大厂家提供的材料，由各公司自己进行改良。二甘醇双芳基碳酸酯作为抗反射膜用材料时，因为折射率低 (1.50 左右)，产品的价格也低，所以可采用 SiO_2 和 ZrO_2 作为抗反射膜用材料。但是最近几年来，由于利用聚胺酯等系高折射基板材料 (1.56 ~ 1.66) 的增多，要求抗反射膜的最大反射率在 0.5% 以下 ($\lambda = 520nm$)，光采用 SiO_2 和 ZrO_2 已满足不了要求。因为这些基板

*日本オプトロン研究开发部 (株)

的耐热性好,故可以采用 Ta_2O_5 、 TiO_2 、 $TiO_2 + ZrO_2$ 膜作为高折射率层。这种制品市场上已有销售。 TiO_2 膜用于无加热基板时,硬度低,用起来麻烦。但由于对基层进行了改良,现已达到了实用水准。

据有关文献报道,利用离子加速器可以改进塑料上薄膜的性质。图 1 示出的是利用 Ar^+ 和 O_2^+ 加速器对 PMMA 基板上的 MgF_2 薄膜性质改进的结果^[2]。据报道,这种薄膜非常好,不会产生裂纹。关于二甘醇双纺基碳酸酯,如图 2 所示,从中可以看出,采用离子加速器可以生成耐热性高的 SiO_2 薄膜^[3]。

在塑料眼镜方面,由于改进了其耐水性,表面可装设不沾水的膜(防水性薄膜)。这是由含氟有机硅化合物的浸渍层制成的。但从生产率的角度,提出了在真空中实施的各种方法,例如直接加热、气化含氟有机硅化合物的方法和利用 CVD(化学汽相淀积)的方法等,现在,正在探寻哪一种是最好的方法。

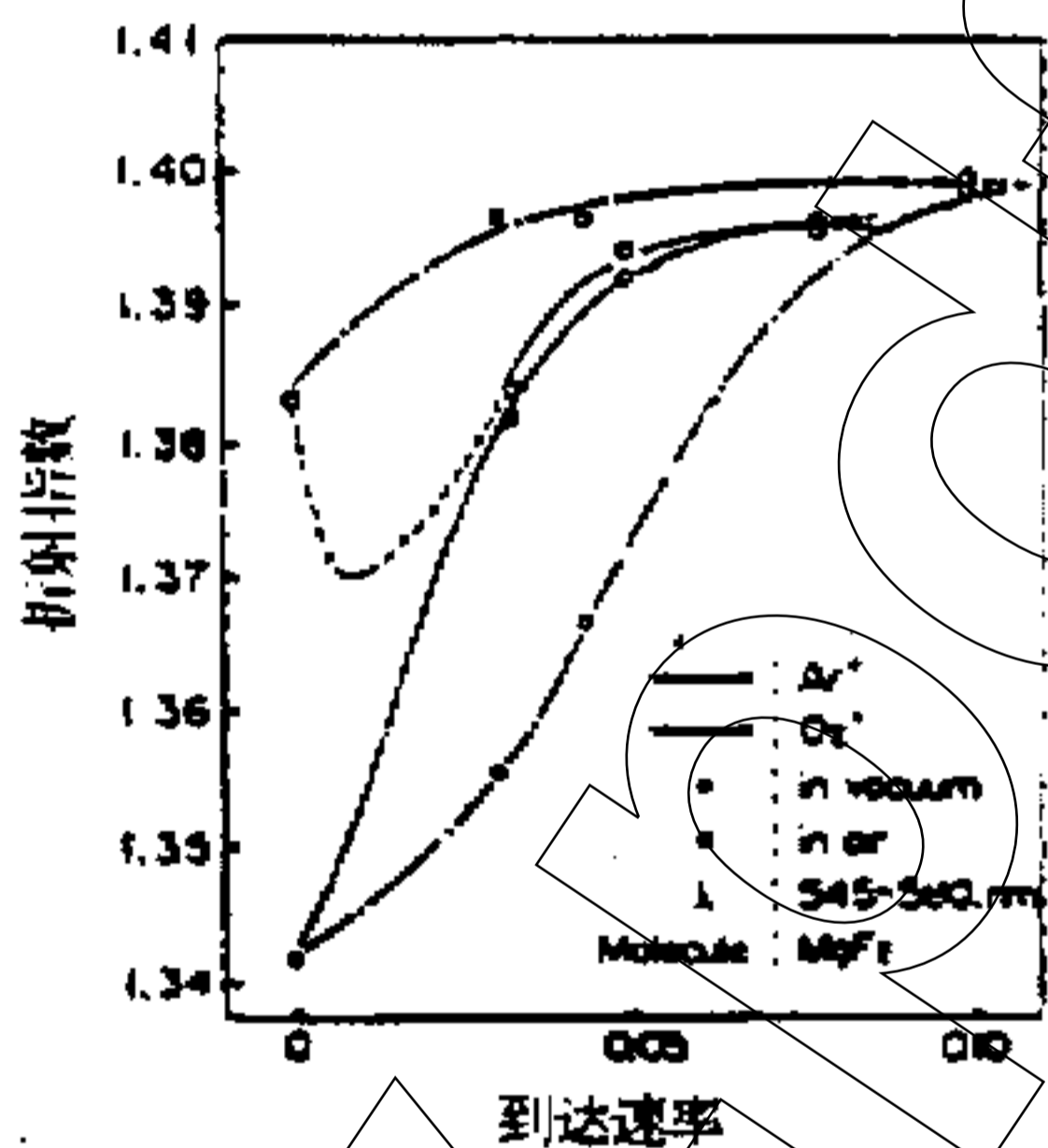


图 1 利用 O_2^+ 和 Ar^+ 加速器的 MgF_2 薄膜的 PMMA 基板上的折射率变化

3. 紫外区域用光学薄膜材料

随着紫外激光应用的日益昌盛,为了高效率地利用高能量的紫外光,必须使用

抗反射膜和反射镜。可是,由于紫外光能量高,所以向光学薄膜照射激光时容易产生损伤。为了防止损伤,必须进行预处理。首先利用超声波清洗基板表面,然后再进行离子束腐蚀等^[4]。另外,再对照使用波长选择光学薄膜材料,这样可以进一步减少损伤。

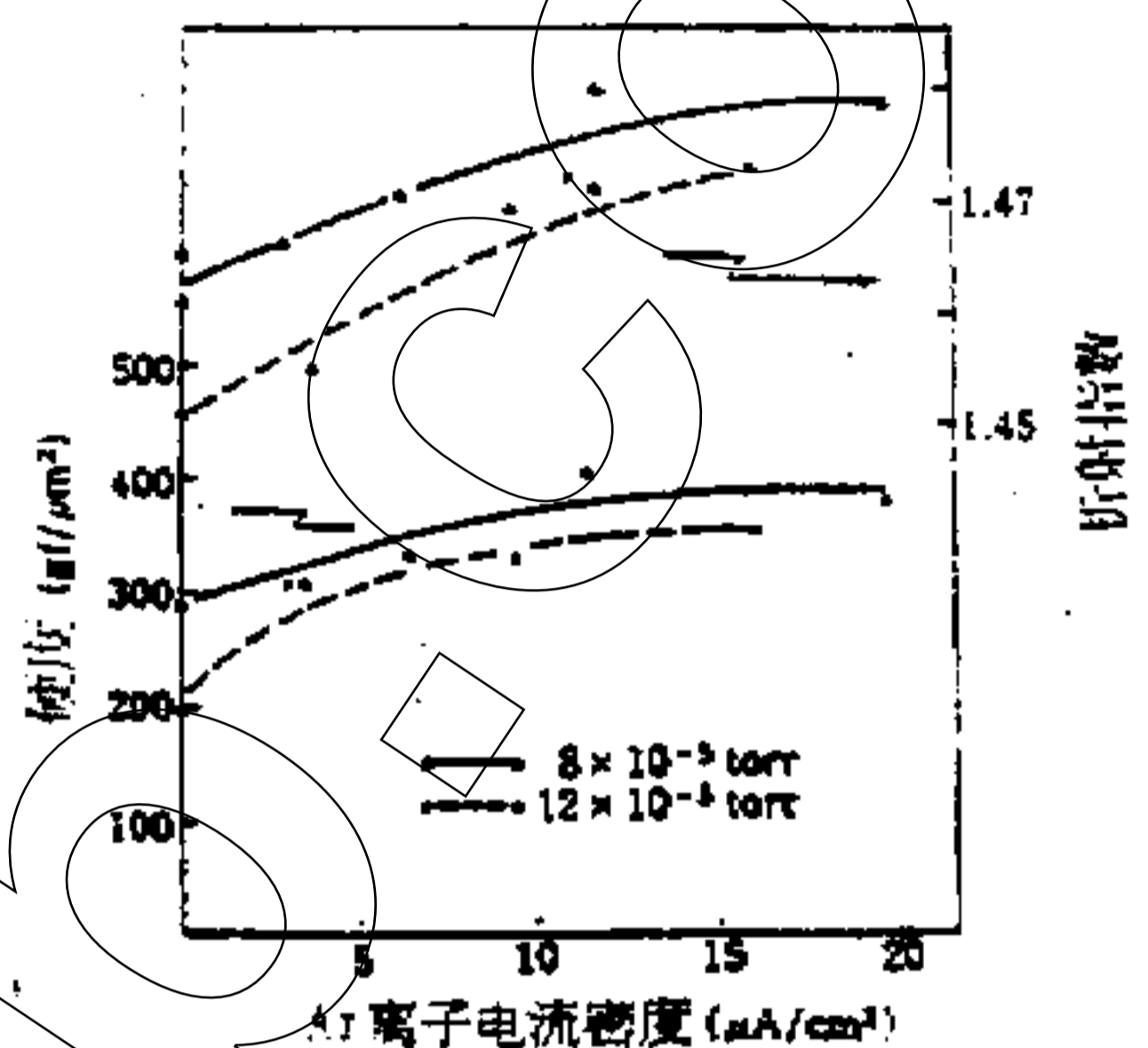


图 2 利用 Ar^+ 加速器制成薄膜的分解温度

3.1. 400 ~ 300 nm 用材料

表 1 示出了主要物质的吸收端^[5]。此波长用的物质,低折射率层可采用 SiO_2 、 MgF_2 ,高折射率层采用 ZrO_2 、 HfO_2 、 Al_2O_3 等。从最近的研究资料看,对于上述波长的反射镜,采用 ZrO_2 、 HfO_2 、 $ZrO_2 - Y_2O_3$ 作为高折射率物质^[6]。

3.2. 300 ~ 190 nm 用材料

主要研究与 $KrF(248 \text{ nm})$ 、 $ArF(193 \text{ nm})$ 等激光对应的抗反射膜,从对损伤的观察来看^[7],这些波长的损伤主要是由杂质的吸收和多孔吸收引起的。因而,理所当然要采用高纯度化的材料。要用带隙大的材料制作抗反射膜和反射镜。主要材料,低折射率层可采用 SiO_2 、 MgF_2 、 Na_3AlF_6 ,高折射率层可采用 LaF_3 、 GdF_3 、 Al_2O_3 等。

表1 激态复合物激光器用膜材料的物理性质

	膜材	折射率	吸收端 (nm)	热传导率 ($J/cm \cdot s \cdot K$)	熔点 ($^{\circ}C$)	比热 ($cal/K \cdot mol$)	扬氏系数 (Pa) $\times 10^{10}$	热膨胀系数 (K^{-1}) $\times 10^{-6}$
高 折 射 材 料	Al_2O_3	1.70	190	0.00004	2050	22.96	35.1	5.9
	ZrO_2	2.21	230	0.016	2700	15.26	21.9	4.2
	Y_2O_3	2.06	210	0.16	2410	27.09	11.0	7.3
	HfO_2	2.20	215	0.016	2838	14.73		3.8
	Sc_2O_3	2.07	205					6.6
	ThO_2	1.85	200	0.17	3350	16.10	23.1	7.24
	MgO	1.82	190	0.30	2800	10.17	23.9	10.5
低 折 射 材 料	SiO_2	1.42	190	0.012	1710	12.98	7.0	0.5
	MgF_2	1.41	190	0.15	1266	16.39	16.2	16.0
	LiF	1.39	180	0.14	870	11.12	7.28	37.0
	LaF_3	1.60	190	0.061	1750			4.6
	NdF_3	1.61			1410			
	NdF	1.37	190	0.25	988	11.85	5.78	36.0
	ThF_4	1.60	180		900	26.45		-2.5

4. 红外区域用光学薄膜材料

红外区域用光学薄膜可用于冷镜的可见、红外分光、红外滤光片类、Nd:YAG等各种激光器用反射镜等。所采用的材料本质上相类似。但是，由于各层的厚度增大，在膜应力的作用下容易产生裂纹和膜剥落，所以，可以根据使用环境和影响薄膜的热能量大小分类材料。

4.1. 冷镜

可用于灯泡的内壁和反射镜，对性能的要求并不严格。主要是采用 TiO_2/SiO_2 的复合物，特别是如果对耐热性有所要求的话，则可采用 Ta_2O_5/SiO_2 的复合物。另外，长时间以来一直采用的还有 ZnS/MgF_2 的复合物。如果向 ZnS 中添加 TiO_2 和 ZrO_2 ，可以提高膜的耐久性，这项技术已申请专利^[10]。

4.2. 红外激光反射镜

用于 Nd:YAG($\lambda = 1.06\mu m$) 激光反射镜时，与上述冷镜不同，必须考虑对激光器的损伤。输出小时也可采用 TiO_2/SiO_2 的结构组成。因为 TiO_2 薄膜本身单晶晶界引起的散射大，容易造成激光器损伤，所以，可采用 ZrO_2 、 HfO_2 ^[11]、 Ta_2O_3 。

4.3. 红外滤光片

设计和制作红外滤光片时，必须注意 O-H 键引起的吸收 (2800 ~ 3200 nm, 6000 ~ 7400 nm)。不同的材料吸收量不同。从表 2 中的各种氟化物的红外特性中可以看出，在材料方面尤其引人注目。据报道，远红外区域的低折射率物质可采用 YF_3 和 HfF_4 、 ZrF_4+S 来取代 ThF_4 和 ThF_2 ^[12]。以前，因为 Th 是放射性元素，所以日本国内基本不采用。

表 2 红外区域的薄膜特性

物质名称 (膜厚 nm)	透明度	由 H_2O 引起的吸收	IR 领域的吸收	n:8, 10 μm k:8, 10 μm	耐湿性 测试	摩擦 测试	卷带 试验
AlF_3 (1480)	非常 明显	无	8 μm 时 1% 9 μm 时 2% 10 μm 时 4% 11 μm 时 8%	1.31, 1.30 0.001 0.04	优秀	Ge, ZnS 优秀	优秀
DyF_3 (2000)	有散射	2 ~ 12 μm 时非常强	只有 4.5 ~ 5.5 μm 时 方可使用		良	Ge, ZnS 剥离, 玻璃伤	剥落
HfF_4 (1960)	优秀	无	10.6 μm 时 1% 11 μm 时 1.5% 12 μm 时 3%	1.36, 1.35 0.001 0.002	优秀	Ge, ZnS 优秀	优秀
IRX (1500)	明显	2.8 ~ 3.2 , 5.6 ~ 7.3 时 2% ~ 3%	10.6 μm 时 1% 11 μm 时 2% 12 μm 时 3%	1.44, 1.43 0.001 0.006	玻璃优 秀, ZnS 优秀	Ge , 玻璃伤	优秀
LaF_3 (1600)	Ge: 明显	2.8 ~ 3.2 , 5.6 ~ 7.3 时 5% ~ 10%	10.6 μm 时 2% 11 μm 时 3% 12 μm 时 4%	1.35, 1.35 0.001 0.004	优秀	Ge , 玻璃伤	优秀
NdF_3 (2000)	优秀	2.8 ~ 3.2 , 5.6 ~ 7.3 时, 5% ~ 10%	9 μm 时 2% 10 μm 时 4% 11 μm 时 5%		Ge 良	Ge , ZnS 剥落, 玻璃伤	剥落
YF_3 (2000)	良	LaF_3 的 1/2	10 μm 时 1% 11 μm 时 3% 12 μm 时 5%	1.37, 1.28 0.001 0.002	良	伤	良
ZrF_4 (1940)	优秀	无	10.6 μm 时 1% 11 μm 时 2% 12 μm 时 4%	1.40, 1.37 0.002 0.010	优秀	ZnS 伤	优秀

5. 新的成膜方法和材料

5.1. 利用等离子体的成膜方法

除了真空蒸发以外还有各种成膜方法。其中最受关注的就是利用等离子体的技术。被称为反应低电压离子喷镀（简称 PLVIP）的方法就是当等离子枪射出的低电压大电流的等离子碰到蒸镀物质时，根据其能量（根据场合可并用电子枪）使物质

蒸发，与等离子中的离子反应，在基板上形成薄膜。关于这方面的技术内容已有许多资料发表^[13-16]。这种蒸发源的性质上，要求蒸镀物质中带有导电性，例如 TiO_2 膜成膜时，可采用 Ti 、 TiO 和 Ti_3O_5 ^[17] 作为蒸发物质， ZrO_2 膜成膜时，可采用 Zr 和 ZrO 作为蒸发物质。其特点是成膜致密，并具有象表 3 所示那样的高折射率，膜不渗水，看不到波长漂移等。另外，据

有关文献资料报道，因为蒸镀物质不是稳定的氧化物，所以，如果不充分地把握蒸发条件，就会产生象图 3 和表 4 中所示

那样的紫外、短波长侧的透射率下降和激光损伤阈值下降^[18]。

表 3 利用各种成膜法得到的薄膜折射率

	SiO_2	Al_2O_3	ZrO_2	Ta_2O_5	TiO_2
反应性蒸镀 (基板 300 °C)	1.46	1.62	1.96	2.10	2.35 ~ 2.45
反应性离子喷镀 (基板 50 ~ 100 °C)	1.485	1.66	2.18	2.24	2.48 ~ 2.55
体料	1.458 熔融石英 1.544 单晶石英	1.755 ~ 1.772	2.17 ~ 2.20		2.605 ~ 2.901 金红石 2.488 ~ 2.561 锐钛矿

表 4 采用电子枪 (EB) 和 RLVIP 时的激光损伤阈值

金属氧化物	蒸发方法	损伤阈值		
		非损伤 (kW/cm^2)	损伤 (kW/cm^2)	EB/RLVIP
TiO_2	E. B.	1.7	1.9	0.94
	RLVIP	1.8	2.7	
Ta_2O_5	E. B.	7.3	8.5	2.1
	RLVIP	3.4	4.3	
ZrO_2	E. B.	14.4	15.0	2.8
	RLVIP	5.2	6.0	
HfO_2	E. B.	28.3	30.5	4.0
	RLVIP	7.0	9.1	
SiO_2	E. B.	>46		
	RLVIP	>46		

5.2. 溅射法

溅射法与真空法一样，很早以前就存在了。这种方法形成的膜致密，尤其是 ITO 等的透明导电膜时，能得到良好的特性，ITO 成膜形成中心。从材料方面来看，可以采用金属靶，氧化物烧结体靶。尤其是烧结体时，与靶密度和膜特性（导电率）

有关，要求具有更高密度的靶（体材料的 95%）。从对氧化物的良好光学特性和膜质的好坏来看，溅射法可用作部分光学薄膜生产。对于氟化物，也发表过利用离子束喷镀的研究报告^[19]。对于 MgF_2 和 CaF_2 ，虽然能获得表 5 中所示那样的数据，但一般由于成膜率低，不能批量生产，所以制

作光学多层膜时不太采用这种方法。

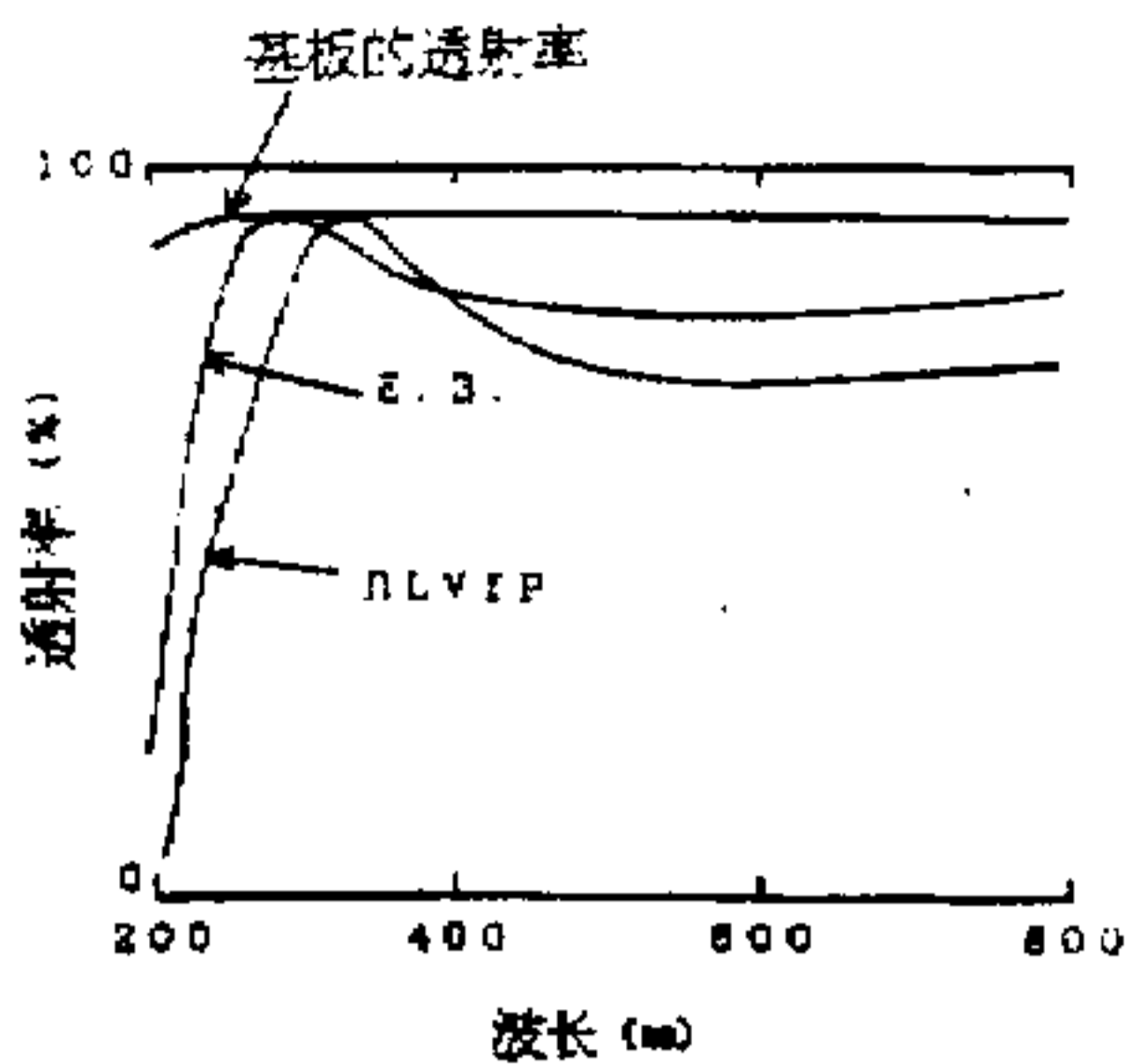


图3 利用 E. B. 及 RLVIP 法蒸发的 ZrO_2 薄膜的透射率

5.3. 离子加速法

离子加速法 (IAD) 始于七十年代, 在

实际应用中又进行了各种改进。有关材料方面的研究比较少。如图4所示, 对于 CeO_2 薄膜进行了离子能量变化时的研究^[20] 和 ZrO_2 薄膜的比较研究^[21], 以及在先前塑料用材料一节中所阐述的研究。

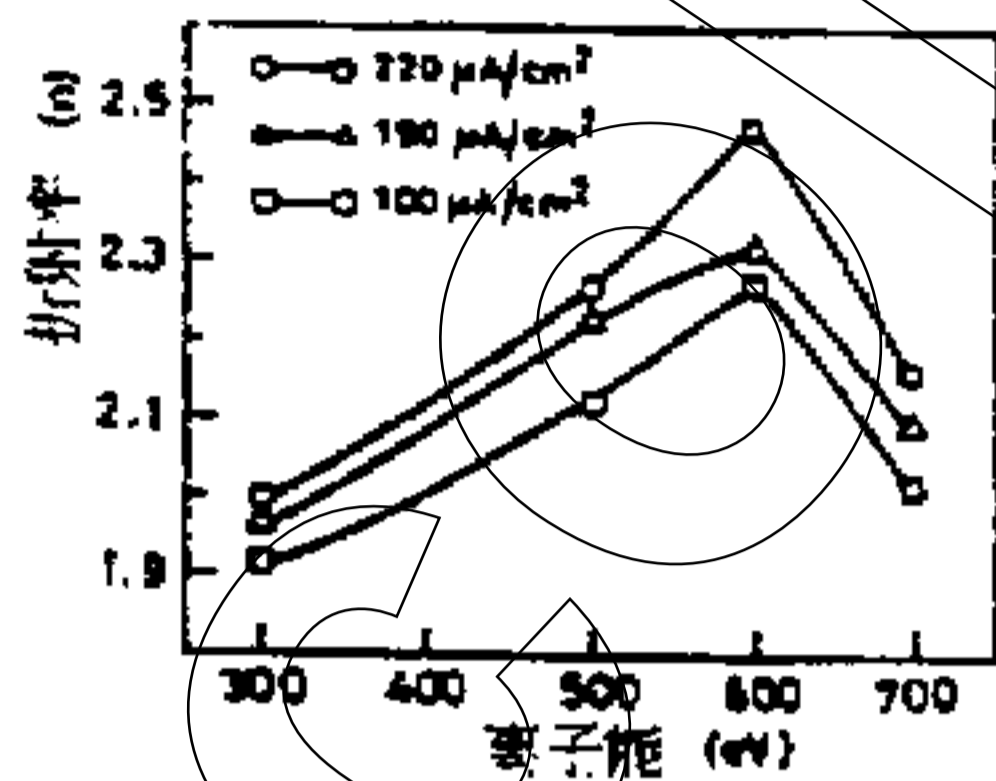


图4 IAD 的离子能量和 CeO_2 薄膜的折射率

表5 离子束喷镀 MgF_2 薄膜和 CaF_2 薄膜

膜种	导入气体	射束电压	蒸发率	物理膜厚	折射率		吸收系数 $\times 10^{-4}$	压缩应力 kpsi	表面粗度 A rms	
		V	A/min	nm	633 nm	633 nm				
MgF_2	O_2	600	21	469	1.40		1	36	4	
		800	28	321	1.42		6	33	3	
		1000	23	383	1.41	0.01	21	45	3	
		1000	20	3360	1.43		35	70	15	
		600	18	414	1.41		1	51	2	
		800	28	407	1.41	0.01	1	56	4	
		1000	22	434	1.42	0.01	1	72	2	
		1000	19	3330	1.42		1	60	10	
		CF_4	1000	21	327	1.40	0.01	52	67	4
		CF_4	1000	27	2550	1.40	-0.02	22	55	15
CaF_2	O_2	1000	26	467	1.42		6	58	3	
		0	708	262	1.38		1	-23	2	
		600	22	490	1.56	-0.01	3	126	2	
		1000	29	430	1.46		4	136	4	
		600	17	274	1.47	-0.01	4	126	15	
O_2	1000	24	470	1.47	-0.01	2	155	13		
	0	890	266	1.21	-0.07	2	0	4		

5.4. 其它技术

激光熔蚀法^[22,23]与溅射法一样,是一种获取高质量膜的方法。这种方法就是从装置外部向靶照射数 ns 左右的脉冲激光,使之气化、蒸发。靶的组成可全部反映在膜上,这也是激光熔蚀法的一个特点。一般,光学薄膜不能得到任意的折射率,必需时,只有采用共蒸发的特殊方法,希望将来能解决这个问题。

除了这些方法以外,还有利用溶胶-凝胶法制作 SiO_2 膜的例子^[24]和利用等离子 CVD 法制作抗反射膜的例子^[25]等,详细情况另文介绍。

6. 以前材料的新开展

以前,高折射材料用的蒸发物质是 TiO_2 、 Ta_2O_5 。其中,因为 TiO_2 蒸发使之在真空槽内熔融,发生分解反应,生成 O_2 。如图 5 所示,变成氧少的 Ti_4O_7 、 Ti_3O_5 ^[26]。因为氧少的 Ti 化合物熔点低,导电性增加,所以也可采用低阻抗加热和 RLVIP 法。据有关文献报道,这些低级氧化物可以稳定蒸发时的光学特性^[27]。因为可以大幅度地缩短熔融 TiO_2 的过程时间,所以被广泛地采用。但是,如果采用氧不太少的组成物,例如 TiO 等,那么一般的反应性蒸发时则容易引起吸收^[28],所以可采用 Ti_3O_5 的组成物。特别是八十年代以后,利用 Ti_3O_5 熔融品的材料成为蒸发用材料的主流。

Ta_2O_5 如果放在真空中进行熔融,就会产生分解,但不会变成 Ta_2O_5 以外的氧化物,形成金属 Ta,在 $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{Pa}$ 左右的真空中达到平衡。因此,作为蒸发用材料,最有效的就是利用预先达到平衡的 Ta_2O_5 和 Ta 的混合物。

此外,虽然有人也提出了几种稀土类复合氧化物作为中间折射率材料,但关于

稀土类元素对水的稳定性方面还存在着意见分歧,不能下最后结论。

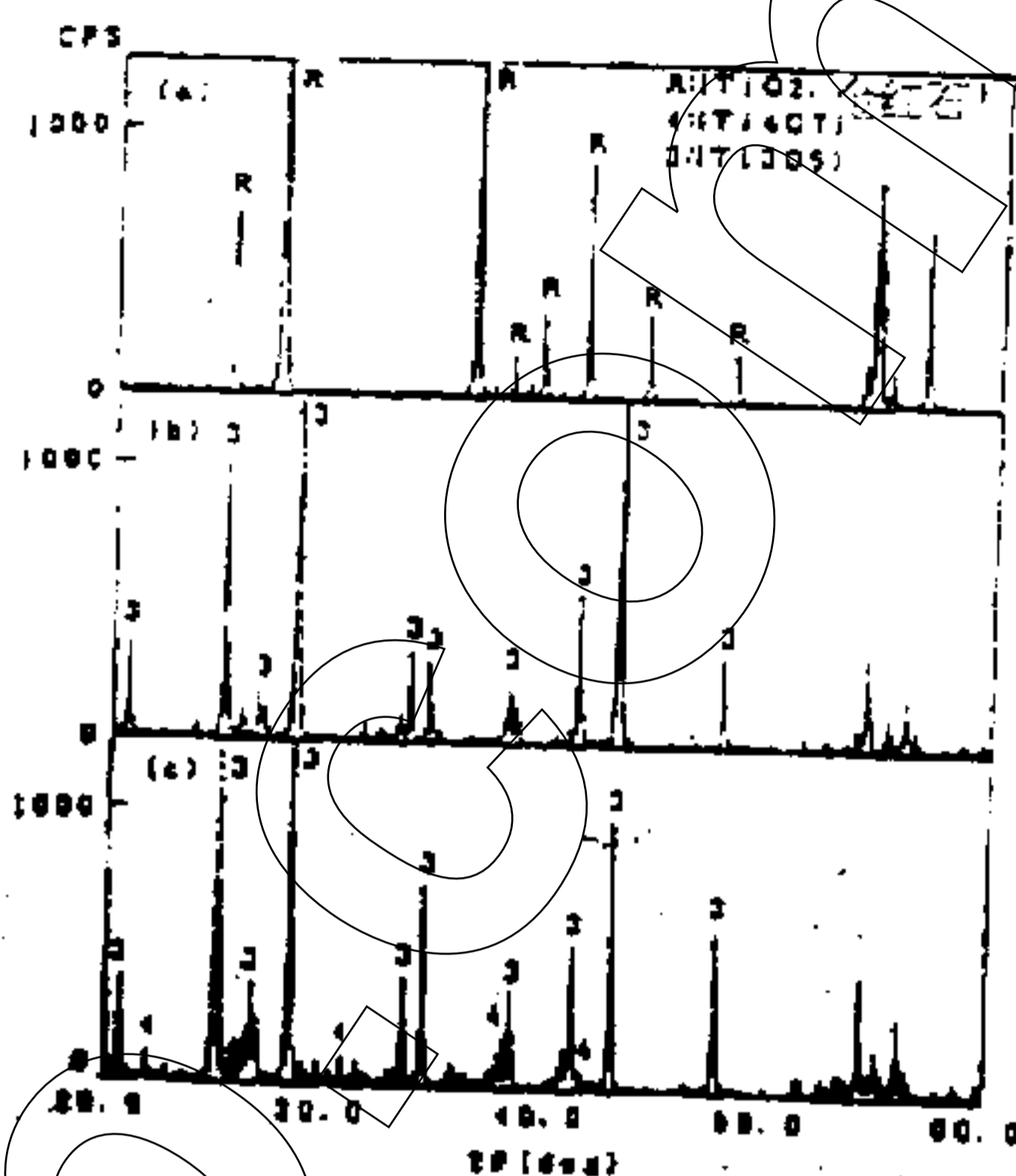


图 5 TiO_2 、 Ti_3O_5 及蒸发残渣的 X 线衍射图

7. 新装置和蒸发用材料

最近,利用 ITO 膜的液晶显示器颇受注目,是一种发展非常快的薄膜装置。主要是采用溅射法生产,主要课题是提高如前所述那样的靶密度。另外,蒸发方法虽然在特性方面不如溅射法,但可以利用生产和成本低这一点。

溅射用的靶和蒸发用的晶片有所不同。蒸发用的 ITO 晶片一般含 SnO_2 量为 5% (重量),比溅射靶的 10% 少。另外,由于升华,如果蒸发面上有不均匀的单晶粒,这一部分的升华速度就变慢,有时会产生针状的突起。因而,应尽量使原材料的粒子均匀,一定要选择烧结时也不会产生异常粒子那样的粘合剂和氛围。当然,与溅射法一样,蒸发过程中注意不要把晶片弄断。

最近,ITO 蒸发材料的课题是材料的回收再利用。从事这方面工作的人员一直

都认为 In_2O_3 的价格非常高, 有必要进行再处理。近来由于对重复循环、节省资源呼声的提高, 加速了这项工作的进展。

8. 结束语

以上, 以真空蒸发法为中心介绍了最

近使用的光学薄膜用材料。有关薄膜材料方面的公开发表的数据比较少, 但并不意味着数据本身少, 大部分数据都成为各公司生产技术上的技巧。本文中虽然新奇的内容少, 但许多技术资料都收录在参考文献中, 供有关人员参考。

参 考 文 献

- 1) 公開特許公報: 特開昭 50 28702.
- 2) T. Higaki, S. Kaho and K. Nomura: "Ion assisted deposition of dielectric thin film on plastic substrate," Proc. 12th Symp on ISIAT 89 Tokyo (1989) pp. 421-424.
- 3) 相川勝明: "イオンアシスト蒸着法によるシリカ膜の特性", 旭硝子研究報告, 39 (1989) 227-234.
- 4) 新技術事業団: "「紫外レーザー用高耐カ光学薄膜の製造技術」の開発に成功", 新技術事業団報, No. 584 (1992) 1-5.
- 5) M.L. Scott: "A review of UV coating material properties," NBS Spec. Publ. 668 (1985) 329.
- 6) P. Gu and J. Tang: "Excimer laser reflectors," Proc. SPIE, 1166, Polym. Consider. for Opt. Syst. II (1989) 533-541.
- 7) 植田豊一: "紫外レーザー用光学素子", 光学, 17 (1988) 628-634.
- 8) 西岡 一, 河角孝行, 植田豊一, 宅間 宏: "紫外光学薄膜の損傷機構", 電気学会・量子デバイス研究会資料, OQD-92 (1992) 61-70.
- 9) 弓削洋二: "光學用新素材の研究動向", 電気・情報関連学会連合大会講演論文集 (1992) pp. 2. 93-2. 96.
- 10) 公開特許公報: 特開昭 64 8032.
- 11) I.Y. Milev, S.S. Dimov, D.V. Terziev, J.I. Juglanova, L.B. Todorova and A.B. Galkova: "Laser induced damage threshold measurements of optical dielectric coatings at $\lambda=1.06\mu\text{m}$," J. Appl. Phys., 70 (1991) 4057-4060.
- 12) S.F. Pellicori and E. Colton: "Fluoride compounds for IR coatings," Thin Solid Films, 209 (1992) 109-115.
- 13) H.K. Pulker, M. Buhler and R. Horn: "Optical films deposited by a reactive ion plating process," Proc. SPIE, 478, Opt. Thin Films III: New Developments (1986) 110-114.
- 14) K.H. Guenther: "Recent advances in reactive low voltage ion plating deposition," Proc. SPIE, 1123, Opt. Thin Films III: New Developments (1990) 29-38.
- 15) K. Benge, C.R. Ottermann, O. Anderson, U. Jeschkowski, M. Laube and R. Feile: "Investigations of TiO_2 films deposited by different techniques," Thin Solid Films, 187 (1991) 279-285.
- 16) 清本上道: "最新の直流放電プラズマ技術とその応用", 電気学会プラズマ研究会資料, EP-89, No. 84, 86-88 (1989) 35-43.
- 17) K. Balasubramanian, X.F. Han and K.H. Guenther: "Comparative study of titanium dioxide thin films produced by electron-beam evaporation and by reactive low-voltage ion plating," Appl. Opt., 32 (1993) 5594-5600.
- 18) R. Chow, C.J. Stolz, F. Rainey and G.E. Loomis: "Laser-induced damage threshold comparison of reactive low voltage ion plating and e beam coatings," US. IXPL Rep. UCRL-JC-108716 (1991) p. 14.
- 19) M.F. DeJong, H.J. Proulx, C.K. Carniglia and T. Bell: "Ion beam sputtered MgF_2 and CaF_2 thin films," Am. Soc. Test Mater., 1098 (1989) 366-376.
- 20) M.S. Al-Rohayee, B.N. Rao and S. Mohan: "Influence of substrate temperature on the properties of oxygen ion assisted deposited CeO_2 films," J. Appl. Phys., 71 (1992) 2381-2386.
- 21) G. Yang and Z. Fengfei: "Comparison between classical and ion assisted deposition on ZrO_2 layer for optical coating," Proc. SPIE, 1168, Current Dev. in Opt. Eng. and Comput. Opt. (1989) 402-407.
- 22) 小野守康, 仲田清和, 小菅茂義: "CO₂ レーザー蒸着法によるアルミ+窒素膜の作成", 溶接学会論文集, 10 (1992) 525-532.
- 23) E. Fogarasy, A. Stanui, C. Fuchs and J.P. Stoquet: "Deposition of SiO₂ by reactive excimer laser ablation from a SiO₂ target," Appl. Surface Sci., 46 (1990) 195-199.
- 24) Y. Katayama, E. Anjo and T. Kawaguchi: "Characterization of SiO₂ films on glass substrate by sputter and vacuum deposition methods," J. Non-Cryst. Solids, 147 and 148 (1992) 437-441.
- 25) 松生秀正, 才村和幸, 盛田幹作: "プラズマ CVD による反射防止膜の作成と評価", 愛知県工業技術センター報告, No. 28 (1992) 79-82.
- 26) S. Ogura and T. Aoki: "Stable starting materials of tantalum pentoxide and titanium dioxide," Proc. SPIE, 1782, Thin Films for Opt. Syst. (1992) 335-341.
- 27) H.K. Pulker, G. Paesold and E. Ritter: "Refractive indices of TiO_2 films produced by reactive evaporation of various titanium-oxygen phases," Appl. Opt., 15 (1976) 2986-2991.
- 28) K.N. Rao, S. Mohan, M.S. Hegde and T.V. Balasubramanian: "Chemical composition of electron beam evaporated TiO_2 films," J. Vac. Sci. Technol. A, 11 (1993) 394-397.

译自《光学》V. 24 N. 2 1995年

江涛译