

模拟高能空间环境对光学材料在1050埃到3000埃之间紫外透过率的影响

在辐照前和第一次在1.0兆电子伏而第二次在2.0兆电子伏用 10^{14} 电子/厘米²辐照之后从1050埃到3000埃范围测量了LiF、MgF₂、CaF₂、BaF₂、Al₂O₃和熔石英的透过率。当采用Al₂O₃使熔石英，二氢化铵磷酸盐(ADP)，方解石和Corning玻璃滤光片9—54和7—54屏蔽开直射电子束的时候，在2.0兆电子伏用 10^{14} 电子/厘米²作了类似的测量。电子能量和剂量相当于一年之后循环一次，近极轨道为1400公里在人造辐射带中可能迁到的那些。从这些测量判断，MgF₂、BaF₂和Al₂O₃具有在紫外的空间用途的最大潜力。

I 绪 言

最近几年光学材料在恶劣的空间环境中的特性具有很重要的意义。有时光学退化的术语用来说明为空间光学实验预想的和观测结果之间的差异。本文的目的是为了研究在经受高能电子辐照时紫外用的光学材料透过率的影响。辐照的总量是由一年的期间内在给定的轨道空间中可能迁到的值来决定。本文限制于在从1050埃到3000埃的波段内是透明的材料。

关于高能辐照对光学晶体和光学玻璃的影响，在固态物理的文献中早已发表了大量的文章是事实。然而辐照的剂量通常要比一年期间在地球轨道内所迁到的值大很多。使用大剂量是为了形成大量的晶体缺陷和色中心。同样，大多数文献被限制在2000埃以上的非真空范围。

在本文所研究的材料可分成二组。第一组是由LiF、MgF₂、CaF₂、BaF₂、Al₂O₃

和熔石英组成，它直接地放在高能电子束中。第二组是由熔石英、二氢化铵磷酸盐(ADP)方解石、Corning滤光片9—54和7—54组成，用Al₂O₃晶体屏蔽直射电子束。后来，主要辐射是由阻止兰宝石晶体中电子所引起的韧致辐射。

II 空间电子能量的分布

1962年7月在Johnston岛上400公里处Starfish爆炸(1.4兆吨)产生一个缓慢的衰减人工电子带，在大约1000公里处，电子能量分布近似裂变能谱(由裂变碎片引起 β -衰减)^[1]。随着时间的进展，通过散射改变了能谱。1968年1月由GSFC处理论研究实验室所作的一些计算表明，由Starfish形成的95%人工电子具有小于3兆电子伏和71%具有小于1兆电子伏的能量(一次循环近极轨道为1200公里)。因此通过能量在1—2兆电子伏范围的电子辐照来模拟人工电子带的影响是合理的，在1966年1月间一次循环近极轨道为1400公里，如果没有衰减，预计最高的流量是 10^{13} 电子厘米⁻²年⁻¹。

III 实验过程

透过率是在一个一米McPherson 225型单色仪的出射狭缝处测量的，这台单色仪采用一个Hinteregger型无窗口的氢光源。把样品架作成能在没有破坏真空下即可从出射光束放入又可拿出晶体。

列入表1的晶体在1.0兆电子伏时是用 10^{14} 电子/厘米²而后在2.0兆电子伏时用 10^{14} 电子/厘米²辐照。用每种能量的辐照

时间是30分。

由于电子辐照人造蓝宝石($a\text{-Al}_2\text{O}_3$)透过率的变化最小。为此它被用作列入表II中材料的电子屏蔽。6.4毫米厚的 Al_2O_3 晶体被放置在入射的2.0兆电子伏的电子束之间并受到辐照。在空间实验中这相当于利用蓝宝石屏蔽,以便阻止辐射带中大多数高能电子。在此情况主要辐射源将引起韧致辐射。总辐照来自在用2.0兆电子伏入射到蓝宝石窗口上的 10^{14} 电子/厘米²。对于列在表2的材料防护散射电子方面没有作过努力。

在辐照后几小时内作了所有透过率的测量。虽然视觉不能观察到萤光,但在所有辐照过的晶体中能把它探测出来,因此,在透过率的测量中对这种发射光进行了校准。

表1 光学材料的特性

晶体	a(埃)	b(毫米)	c(毫米)	d(埃)	e
LiF	1050	2.09		1050—1200, 黄色 和 1650— 2800	
MgF ₂	1130	1.51	90°	1200, 2600	无色
CaF ₂	1230	3.60		1900, 2250	紫色
BaF ₂	1335	1.10		2500	兰色
Al ₂ O ₃	1435	6.41	60°	2050, 2650, >2950	灰褐色
SiO ₂	1595	6.46		1650, 2150	无色

- a 紫外透过极限,
- b 厚度,
- c 双折射晶体 c 轴与电子束所成的角
- d 辐射所引起的吸收特点
- e 辐照后的颜色
- f 透过率随辐照增加

IV 由电子辐照引起的透过率变化

A 氟化锂

被测量的样品是一种 Harshow 化学公司制备的光学抛光过的,高纯度的合成晶体。辐照前和辐照后的透过率在图1给出,显然氟化锂是一种用在空间光学(在 高能辐照环境中)上差的备用品。即使晶体变成鲜黄色,但有一个保留着从1200埃到1650埃有一点儿透明的带子。对于在1216埃处重要的太阳氢赖曼 α 线来说,透过率从60%降低到2%。超过2800埃在3000埃*它就迅速增加到33%。

这些吸收特点通过几个小时加热到

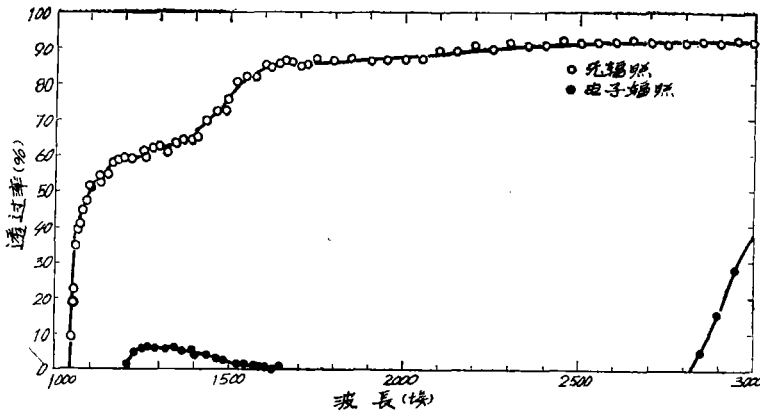


图1 在1.0兆电子伏和2.0兆电子伏用 10^{14} 电子/厘米²在辐照前和辐照后LiF的透过率

400°C就能消失掉。然而,现在要求在每个地球卫星上做到这点的能力实际上是受限制的。

* 关于在远紫外由辐射感应吸收特征的详细报导,参看Uchida等^[2]的论文

B 氟化镁

所用的样品是 Harshaw 化学公司生长的和光学抛光过的高纯晶体。只是在过去几年里 MgF_2 晶体在 1300 埃以下能透过,从图 2 可以看出在 1130 埃晶体开始透过,并且它在氢赖曼 α 处有 529 埃的透过率。在电子辐照下出现两个特殊的吸收带。最强的吸收带是在 2600 埃但是一个相当弱的吸收带明显是

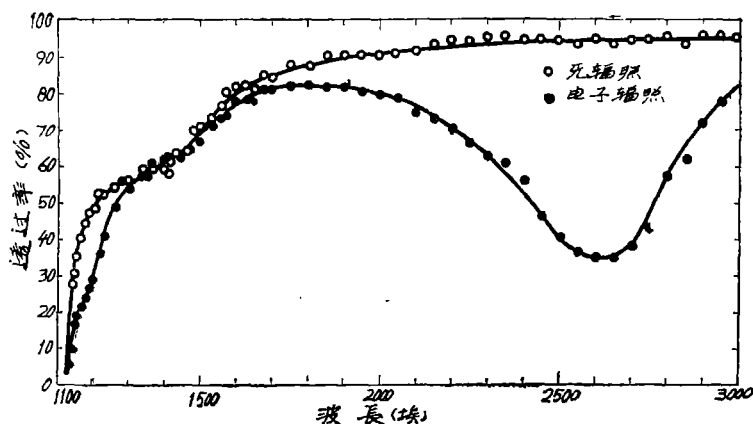


图 2 在 1.0 兆电子伏和在 2.0 兆电子伏用 10^{14} 电子/厘米² 辐照前和辐照后 MgF_2 的透过率

C 氟化钙

Harshaw 公司的这种合成晶体是在 GSFC 的光学车间抛光。在电子照射之下样品显现出很强的紫颜色。从图 3 的透过率曲

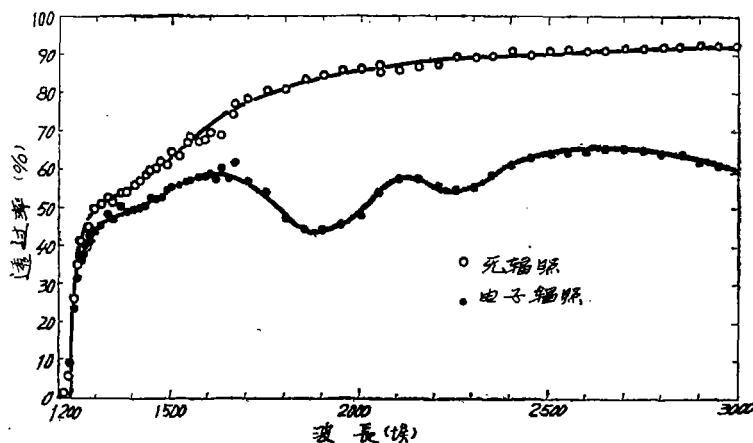


图 3 在 1.0 兆电子伏和 2.0 兆电子伏用 10^{14} 电子/厘米² 辐照前和辐照后 CaF_2 的透过率曲线

在 1200 埃处。在 2600 埃处的带是一个熟识的特征。*

甚至用在 1200 埃处这种弱的辐照感应的吸收特征,在赖曼 α 处的透过率仅由 52% 降到 36%。这当在同样辐照环境中 LiF 的透过率减少 30 倍相比时确实是适度的降低。

氟化镁有一个附带的优点,即它比 LiF 溶于水小得多 (0.013 克对 0.27 克/100 克水)。也要注意,在 1300 埃到 1600 埃范围观察到透过率不变。

线可以看出,在短波限附近辐照的影响不明显。向长波方向去吸收变化较大。两个明显的吸收特征出现在 1900 埃和 2250 埃。似乎是,当接近 3000 埃时出现另外的特征,它大概是在 3700 埃^[4] 处一个带。

* 关于从熔融结晶 MgF_2 性能的报导,参看 Duncanson 和 Stevenson^[3] 的论文。

氟化钡

这种晶体显现出很高的抗辐射性能，除图4中所看到在2500埃以上小量的吸收以外。氟化钡不仅可做滤光材料而且可用做真空紫外消色差透镜的低折射率的元件。

图4中的曲线与Messner和Smakula^[5]所作的在20℃通过3兆电子伏电子着色的BaF₂吸收的工作不一致。他们指出一个较大的吸收带在2000埃而只有一个较小的在2500埃。两种测量之间的矛盾原因是不理解的。

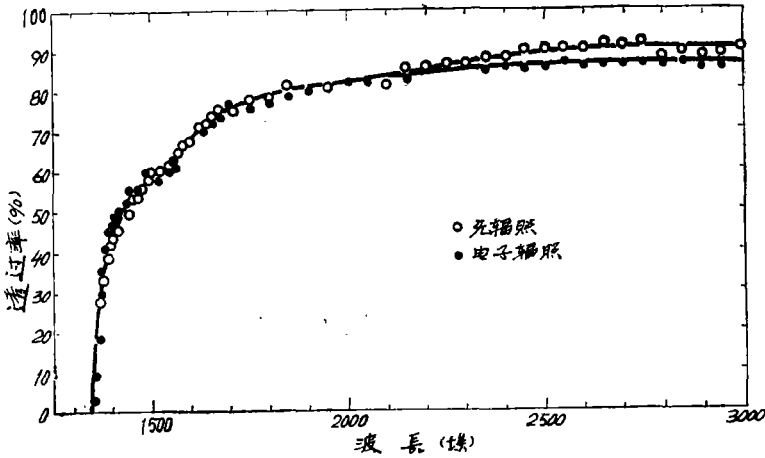


图4 在1.0兆电子伏和2.0兆电子伏用 10^{14} 电子/厘米²辐照前和辐照后BaF₂的透过率

E 兰宝石

在图5中为林德抛光的紫外人造兰宝石(a—Al₂O₃)的三种条件给出透过率曲线，对于这些情况所给出的曲线为：无辐照，在1.0兆电子伏 10^{14} 电子/厘米²加上在2.0兆电子伏 10^{14} 电子/厘米²，以及在1.0兆电子伏总计量 2×10^{14} 电子/厘米²和在2.0兆电子伏 7×10^{14} 电子/厘米²。仅观察到透过率的损失可能在2600埃和在2950埃处以外是小量减少。在2600埃弱的吸收和在2950埃以上透过率的轻微的减少与Levy^[6]报导在2550埃和3000埃被反应器辐照感应吸收一致。

表2 光学材料的特性

晶体	a(埃)	b(毫米)	c	d	e
SiO ₂ (corning)	1580	3.29	1900埃f	无	无色
SiO ₂ (Dynasil)	1590	2.04	1900埃f	无	无色
ADP	1780	2.99	0°	1900埃?	无色
Calcite	2030	2.25	45°	None	无色
Corning 9-54	2185	2.22	All		灰色
Corning 7-54	2270	3.02	All		黑色

- a 紫外透过极限
- b 厚度
- c 双折射晶体C轴与电子束所成的角
- d 辐射所引起的吸收特点。
- e 辐照后的颜色
- f 透过率随辐照增加

非常奇怪，没有观察到在6.06电子伏(2040埃)的明显强吸收带。在代替增加吸收的这种能量处观察到透过率随电子辐照增加而增加。这个现象透过率随辐照而增加是Levy^[6]在3到1电子伏较低的能量范围内观察到的。

从这些测量可以得出一个结论，即人造兰宝石能很好地抵抗高能电子辐照，正像在辐射带的较低范围内所迁到的一样。因此，假若兰宝石透过的短波限可以是允许的，Al₂O₃用作屏蔽对辐射损害敏感的光学材料将是有效的。人造兰宝石也可用作高折射率的元件并与BaF₂作为低折射率的元件组成消色差透镜用在1450埃到3000埃范围。

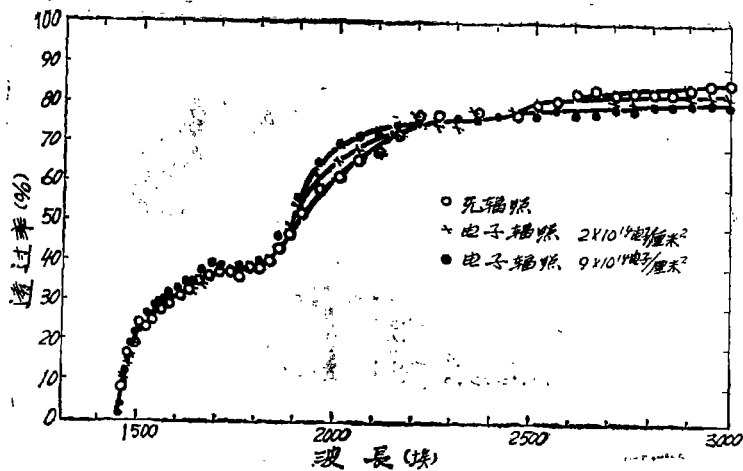


图5 在1.0兆电子伏和在2.0兆电子伏用 10^{14} 电子/厘米²辐照前后以及在1.0兆电子伏用 2×10^{14} 电子/厘米²和在2.0兆电子伏 7×10^{14} 电子/厘米²辐照后 Al_2O_3 的透过率

F 熔石英

看来 Al_2O_3 的样品在紫外用电子辐照相对地仍不受影响但稍微变成灰褐色，高纯度的熔石英样品（Dynasil 光学等级）仍然是完全透明而在3000埃以下透过率有很大的变化。这在图6上明显地看出。

最突出的由辐射感应的特征是在2150埃

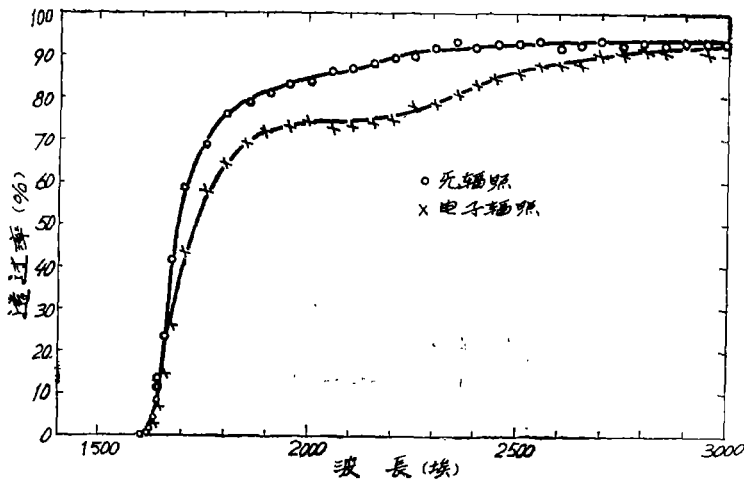


图6 在1.0兆电子伏和在2.0兆电子伏用 10^{14} 电子/厘米²辐照前和辐照后熔石英的透过率

V 电子屏蔽材料的透过率变化

从表1列出晶体所作测量推断，对于使

的C带。即使不太明显，能看到当波长低于1800埃时辐射的感应吸收系数增加。出现在1670埃之间并截止在1600埃处的吸收最大值是E带。Nelson和Weeks^[7]指出人造晶体石英更能防止C带的产生。然而在晶体石英或熔石英中E带的产生几乎都相同。

从这些测量明显看出，如果在高能电子环境中为了透过2800埃以下的波长企图利用熔石英要特别注意。

辐射较灵敏的元件屏蔽开高能电子来说，人造蓝宝石是最好的选择品。从表2列出的材料来说，6.4毫米厚的蓝宝石放置在2.0兆电子伏电子束和个别样品正在照射之间。在蓝宝石中2.0—兆电子伏电子的照射距离约

在3.7毫米，对各种样品的总计量由2.0兆电子伏用 10^{14} 电子/厘米² (入射在兰宝石上)

A 熔石英

作了两种高纯度样品的测量。这些样品是Corning7940和Dynasil 1850 埃。在图7和图8上的透过率曲线示出在1800—1950埃范围内，这种效应辐射之后有增加的某些形迹。接近测量的精确值也许并不真实。正因为它出现在两种样品上，所以是不可思议的。如果熔石英适当地屏蔽高能电子，它便可以用于空间中的紫外光学元件。

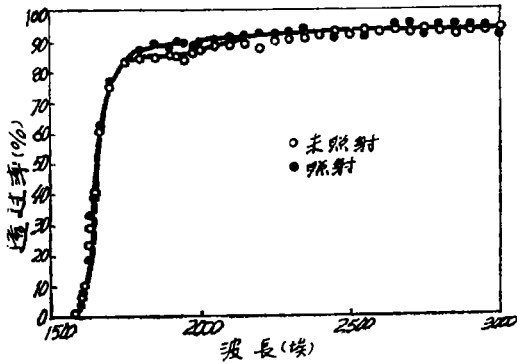


图7 由2.0兆电子伏(入射在兰宝石上)用 10^{14} 电子/厘米² 照射前、后，Corning7940 和 熔石英的透过率曲线

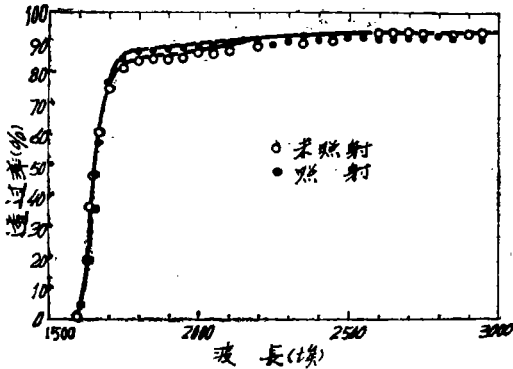


图8 由2.0兆电子伏(入射在兰宝石上)用 10^{14} 电子/厘米² 照射前、后，Dynasil1850 埃 和 熔石英的透过率曲线

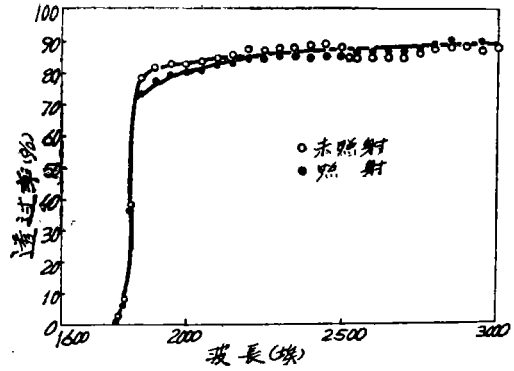


图9 由2.0兆电子伏(入射在兰宝石上)用 10^{14} 电子/厘米² 照射前、后，二氢铵磷酸盐晶体透过率曲线

B 二氢铵磷酸盐(ADP)

Harshaw 化学公司进行二氢铵磷酸盐晶体生长并抛光。在1800埃处晶体有很尖锐的紫外截止，并且在辐射之后它显示出透过率不变。(如图9所示)在1850埃到2050埃间有很少量的辐射产生吸收是有可能的。但是，得出结论：对在3000埃以下空间光学用途来说ADP是有效的。

企图应用这种相当吸湿的，并对热冲击也敏感的晶体，碰到一些难题。例如，在电子照射之后，晶体受热在所碰到的边缘上产生裂缝并越过表面。

C 方解石

Harshaw 化学公司对这光学性质很高的晶体进行了抛光。在图10的透过率曲线上没有看到辐射产生的吸收。因此得出一个结论：适当地屏蔽电子的方解石是适合于空间应用。

D Corning 9—54

这是普通Vycor (7910)，一种含硅成份很高的玻璃，在辐照之后用肉眼看到它变成灰色。从图11能够看到在低于3000埃处透过率受到强烈地影响。因此，对于它在空间延长使用寿命应当慎重。

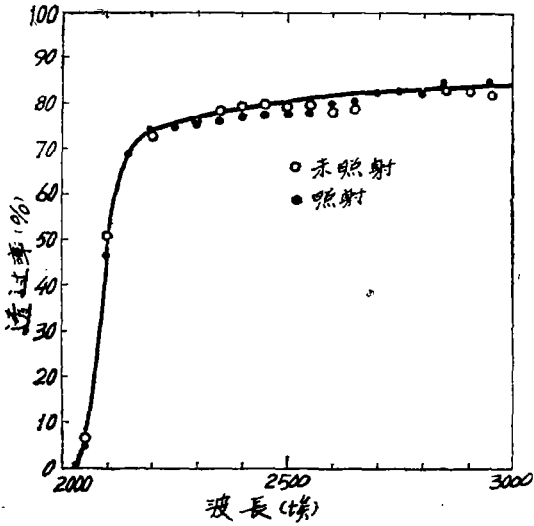


图10 由2.0兆电子伏(入射在兰宝石屏蔽上)用 10^{14} 电子/厘米² 照射前、后, 方解石透过率曲线

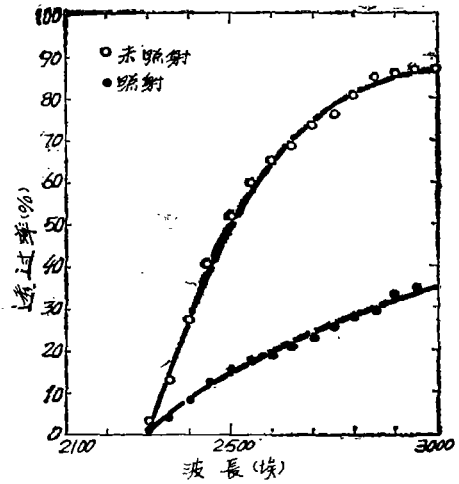


图12 由2.0兆电子伏(入射在兰宝石屏蔽上),用 10^{14} 电子/厘米² 照射前、后, Corning 7—54透过率曲线

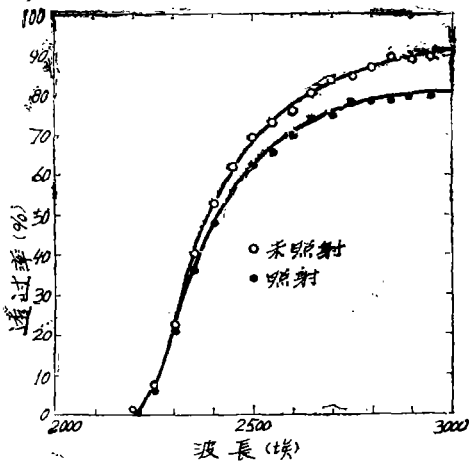


图11 由2.0兆电子伏(入射在兰宝石屏蔽上)用 10^{14} 电子/厘米² 照射前、后, Corning 9—54 透过率曲线

E Corning 7—54

从图12可以看到,这种普通的,黑的紫外透过玻璃在辐射环境中透过率迅速下降。自从知道Corning玻璃(9863),由于暴露在强烈地紫外照射时而变黑以来,明显看出,这是用于空间光学较差的材料。

VI 结 论

本文的目的是研究高能量电子环境对许多在1050—3000埃范围内能透过的光学材料的透过率影响。如果这些材料是受到同样的辐射剂量,选择最好地适用于空间用途的材料是可能的。

列在表I中材料, MgF_2 、 BaF_2 和 Al_2O_3 看来具有空间用途的最大潜力。 MgF_2 由于在氢软曼 α 线有很高的透过率以及它的双折射证明 MgF_2 是特别有价值的。实际上,偏振镜有利于在真空中采用 MgF_2 [8]。

BaF_2 和人造兰宝石或许可用作一种消色差的元件。然而,在它的时候必须注意操作。Malitson 等人 [9,10] 的最近工作表明,不仅有辐射对透过率的影响,而且也有对折射率的影响。偏巧,对大多数紫外透过材料的折射率是了解的不够。

除Corning玻璃9—54和7—54之外,所有材料采取使其屏蔽开空间的直接的电子辐照的适当预防措施,看来是适于空间的应用。双折射的二氢化铵磷酸盐(ADP)和方解石晶体也可用作紫外偏振镜。

参考文献

1. W. N. Hess. J. Geophys. Res. 68, 667, 1963.
 2. Y. Uchida, R. Kato, and E. Matsui, J. Quant Spectry. Radiative Transfer 2, 589 (1962)
 3. A. Duncanson and R. W. Stevenson, Proc. Phys. Soc. 4. E. Mollwo, Nachr. Gesell. Wiss. Göttingen 6, 79 (1934) (London) 72.
 5. D. Messner and A. Smakula, Phys. Rev. 120, 1162 (1960)
 6. P. W. Levy, Phys. Rev. 123, 1226 (1961)
 7. C. M. Nelson and R. A. Weeks, J. Appl. Phys. 32, 883 (1961)
 8. W. C. Johnson, Jr., Rev. Sci. Instr. 35, 1375 (1964)
 9. I. H. Malitson and M. J. Dodge, J. Opt. Soc. Am. 55, 1583 (1965)
 10. I. H. Malitson and M. J. Dodge, Natl. Bur. Std. Rept. No. (8943) (August 1965)
- 译自“Applied Optics” 1966, Vol. 5, P937,
(王宝书、王哲译 琦玮校)

(上接第62页)

受烧结温度的影响。在 400℃ 以下烧结的薄膜产生色彩，在 500—600℃ 范围内烧结的薄膜成为透明。烧结温度在 600℃ 时得到的薄膜表面电阻率为最小，透过率为最大。

3) 实验性地探讨了烧结温度为 600℃ 时 $\text{Sn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 蒸镀烧结薄膜的特性和基板及烧结时间的关系，得出基板温度为 150℃ 烧结时间为 30 分钟时制成的薄膜，其透过率可达 80% 以上，表面电阻率的温度系数满足 MIL-R-10, 509F 特性 D 以及 G 的试验结果。

4) 测定 $\text{Sn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 的蒸镀薄膜的霍尔系数。求出了载流子浓度和迁移率，得出比较准确的数值

5) $\text{Sn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 透明薄膜的构成物质是 SnO_2 (氧化锡) 格子常数 a 以及 c 分别为 $a = 4.72$ 埃、 $c = 3.21$ 埃，这和文献上的数值大体一致。

译自《应用物理》 Vol. 44 No. 7.

P742 (44)

[马元龙译 王书岩校]