

AR 膜生产线的设计方案

公司背景：

无锡爱尔华公司成立于 2002 年九月，是由无锡市机械局、科技局和留日归国学者刘晓萌出资参股共同创建。公司原来业务是围绕太阳能电池相关生产设备以及一些电子产品的生产销售，目前全面进入真空镀膜设备的制造和研发。公司去年产值人民币 5 千万，今年将达到一个亿。主要产品围绕光电、太阳能等领域的设备和工艺，已有产品有太阳能电池板层压机、等离子刻蚀机、等离子化学气相沉积设备，正在为日企制造一条大面积高反连续镀膜生产线。其设备的质量档次达到或接近国外水平。

总经理刘晓萌曾在日本 Anelva 公司工作 5 年，长期从事真空设备的设计制作，具有丰富的经验。Anelva 公司从事真空设备的系统设计制造，在液晶、半导体、光电、磁头等行业生产设备的研制方面具有很高的建树。现 Anelva 公司已被佳能收购，以配合佳能公司研发液晶 8 代线。由于，刘晓萌个人在日本公司所积累的丰富技术素养、理念和人脉关系，使得爱尔华公司的设备制造水平起点相当高，走了一条技术、部件“外引内联、悟陈精新”的快速发展模式。

AR 的薄膜设计：

我们每天都可以看见薄膜进行光线干涉现象的实例，只是我们没

有认识到那么多而已。最好的例子就是水面上漂浮的油膜反射了太阳光而产生的彩虹色彩，肥皂泡反射光线也会发生类似的情况。

膜层厚度的变化也会提高或降低膜层的反射率。要理解这个现象，我们需要一直在头脑中坚持三个事实：第一是叠加原理；第二，就是光线在两种不同的透明介质的交界面时会发生反射的事实；第三，是光线在进入较密的光学介质时，会被压缩的事实。

根据叠加原理，当有两个或多个波存在时，合成波应当是所有波的代数和。这就是说，如果有两条具有相同频率或波长但相位不同的光波沿着相同的方向传播，当相位差（ $\Delta\phi$ ）在 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 之间的时候，两个波会发生相长干涉；当相位差在 $90^\circ \sim 270^\circ$ 之间的时候，两个波会发生相消干涉。

图1中就是光波干涉的四个示例。图1的最左侧一列是相位差为 90° 的两个波，接下来的一列的相位差是 135° ，最后两列的相位差都是 180° 。相位差决定了合成波的振幅高于或低于原始波。由于最左侧的两个波（A 和B）的相位差是 90° ，所以它们发生了相长干涉，最终波（C）的振幅比A 或B 都大。探测器（包括人眼）对光线强度的敏感度与振幅的平方成正比，所以我们可以利用相位差来实现增反射或减反射的目的。如果光波A和B是从薄膜/基片交界面上反射回来，光波C 就是一个增反射的例子。图1中第二列 $D + E = F$ 是一个波发

生部分相消干涉的例子。两个波相位差是 135° ，所以最终波F 的振幅比D 或E都小。第三列中是发生完全相消干涉的情况。这里的相位差是 180° 或半个波长。如果把G和H相加就得到了波长，这是一个零振幅的“波”。就是说，光波G和H 相互抵消了。如果这些光波在基片上反射时发生了这种干涉，就会得到一个完全的减反射，即完全没有反射发生。

如果光波G 和H 之间的相位差依然是 180° ，但是振幅不同，最终光波会怎么样呢？图1中最后一列光波J 和K 就是这种情况。根据叠加原理，我们把空间中每一点的振幅值简单加起来，就可以得到最终光波L。可以看出：虽然两个波的相位差是 180° ，但是发生的还是部分相消干涉。由此，如果要发生完全相消干涉，我们必须满足两个条件：1) 两个波的相位差必须是 180° ，2) 它们的振幅必须相等。如果它们的相位差是 180° ，但振幅只是非常接近而不是完全相等，两个光波产生的最终光波只是几乎但不会是完全等于零。同样，如果振幅相等，但相位差非常接近而不是等于 180° ，最终光波的振幅也只是几乎但不会完全等于零。如果我们讨论的两束光波在反射出玻璃基片的时候发生了干涉，那么最终发生的与白玻璃相比只是减反射，而不是完全的不反射。

无锡爱尔华科技有限公司

ELVA-TECH

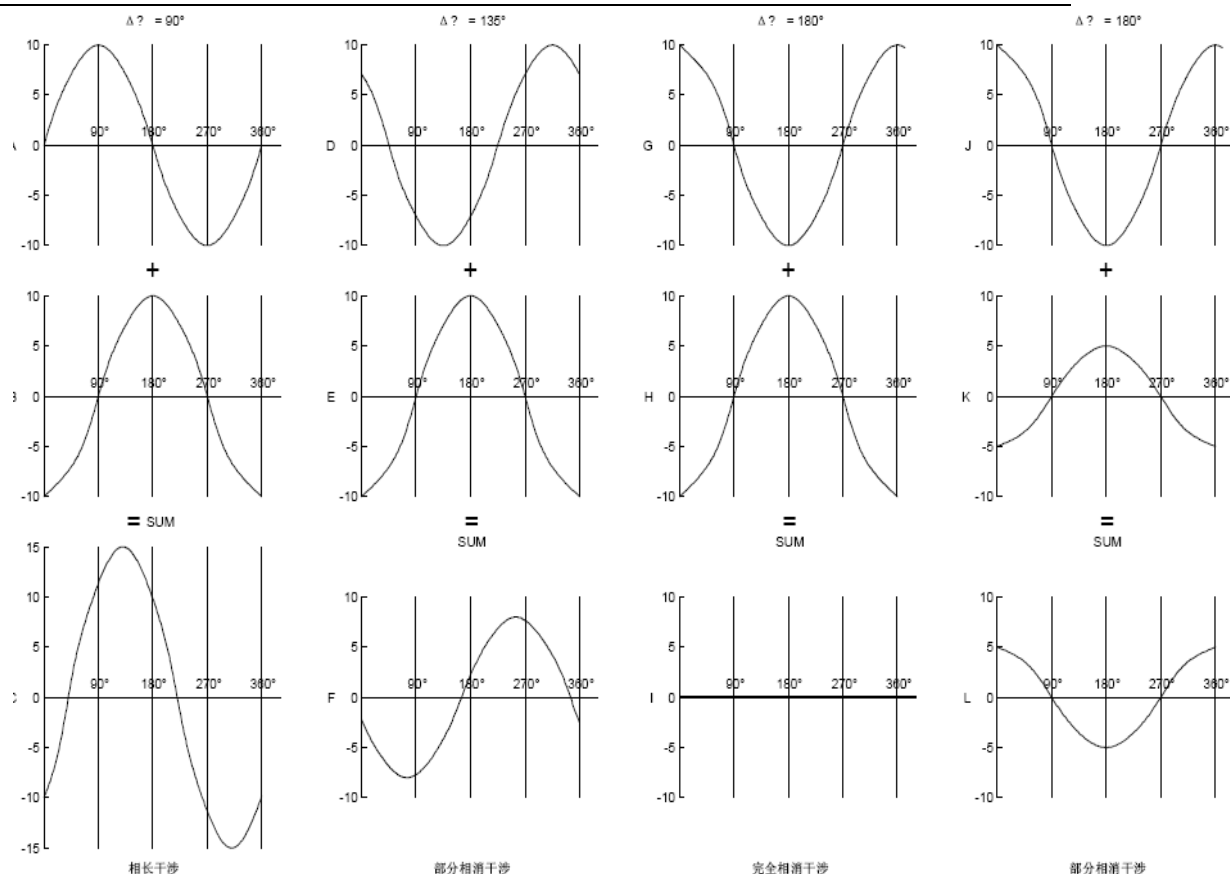


图1

光线在交界面上不仅会发生反射，还会发生折射。当光线穿过一种电介质（透明、非金属）进入另一种介质，一些光线会穿透它并进入第二种介质，同时也会有一部分会在交界面上发生反射。如果第二种介质的折射系数高于第一种，即 $n_2 > n_1$ （见图2中的“a”，光线从空气进入玻璃的示例），那么反射光线就会发生 180° 的相位变化。这就相当于光线多传播了额外的半个波长的距离。

另一方面，如果第二介质的折射系数低于第一介质的折射系数，即 $n_2 < n_1$ （见图2中的“b”，光线在玻璃/空气界面发生反射），那么反射光线就不会发生相位变化。

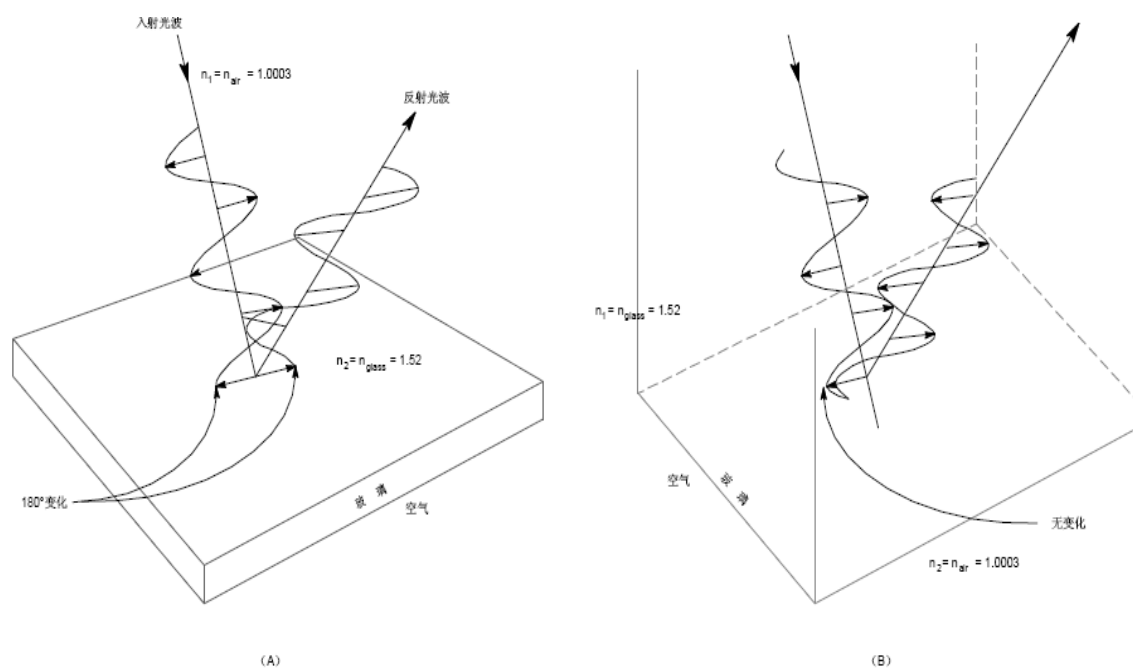


图2

光波从折射系数低的介质中进入折射系数高的介质的时候会被压缩。图3中就是假定光线从真空进入高光学密度介质中的情况。从图中很容易发现，光线在介质中的波长 λ_m 要比在真空中的波长短。由于必须知道这些波长发生缩短的薄膜的厚度，我们要用折射系数去除真空波长。例如，如果我们需要在550nm 处得到一个1/4 波长厚度的氧化硅SiO₂ ($n=1.45$)膜，首先需要用4 去除550来得到真空四分之一波长： $550/4 = 137.5$ ，即在真空中的四分之一波长为137.5nm。然后用SiO₂的折射系数1.45去除137.5，就可以得到波长压缩的“修正值”： $137.5/1.45 = 94.8\text{nm}$ 。所以，95nm 厚的SiO₂膜就是在550nm 处的真空波长的四分之一波长。在光学领域，这叫做550nm处的“四分

之一波光学厚度”或者“QWOT”。

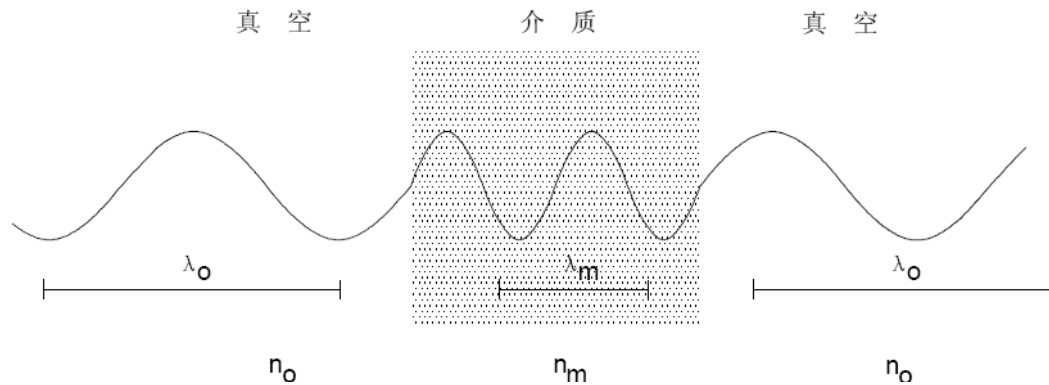


图3

利用光线的这三种性能，我们就可以设计出几乎所有需要指标的薄膜。例如：假设是前面给定的情况，我们需要设计一种SiO₂膜，在尽可能地削弱在550nm 处的反射。在图4中的空气/薄膜交界面上，一部分光线被反射回来，同时还有一部分在薄膜中发生折射。光线#1 是反射光线，由于它是从大气($n = 1.0003$)进入到SiO₂ ($n = 1.45$)，所以会发生180° 的相位变化。折射光线自身也会在薄膜玻璃交界面上会有一部分发生反射、另一部分发生折射。同样，由于SiO₂的折射系数大约是1.45小于玻璃的折射系数1.52，也是从低折射系数介质进入高折射系数介质，所以第二条反射光线（即光线#2）由于也会发生一次180° 的相位变换。

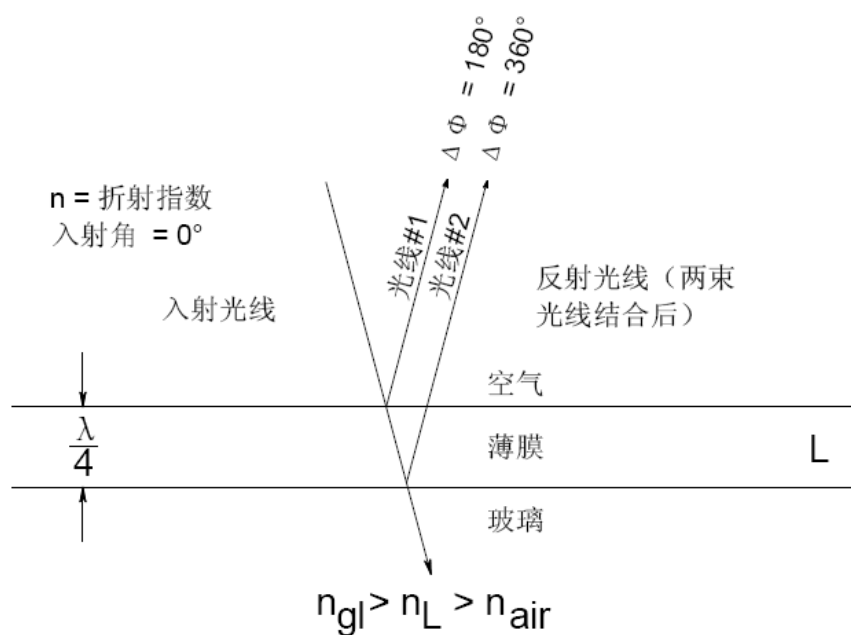


图4

	在指数交界处的 相位变化	光学路径长度造成 的相位变化	总相位变化	相对于光线#1 的相位变化
光线#1	180°	0°	180°	0°
光线#2	180°	180°	360°	180°

表1

因此，除了光线#2 多传播了一个额外的距离之外，两条反射光线之间还存在着相位差。额外的距离为两倍的膜厚（这里假定入射角等于或接近为零）。如果我们将膜层厚度调整到 $1/4$ 波长，那么光线#2就会比光线#1多传播 $1/4 + 1/4 = 1/2$ 个波长。 $1/2$ 波长相当于 180° 的相位差，所以光线#2一共发生了 360° 的相位差（ 180° 发生在膜/玻璃接触面，另外 180° 为附加的路径长度）。由于光线#1 仅在反射时发生了 180° 的相位变化，所以如果膜层厚度是 95nm ，则在我们

选择的550nm 波长处，光线#2就会与光线#1发生相消干涉。这两条光线在相位上的变化汇总在表1中。

当然，在其他的波长处将会发生不同的干涉效应。例如，95nm 厚的膜对波长为275nm 的波来说只是半波的长度，所以就会产生一个全波长的相位差或路径差、即相长干涉。从图5可以看出，反射的数量随波长的变化而变化，在550nm 处达到最低的反射率。所以我们说膜层被“调谐”成550nm 处的减反射膜。

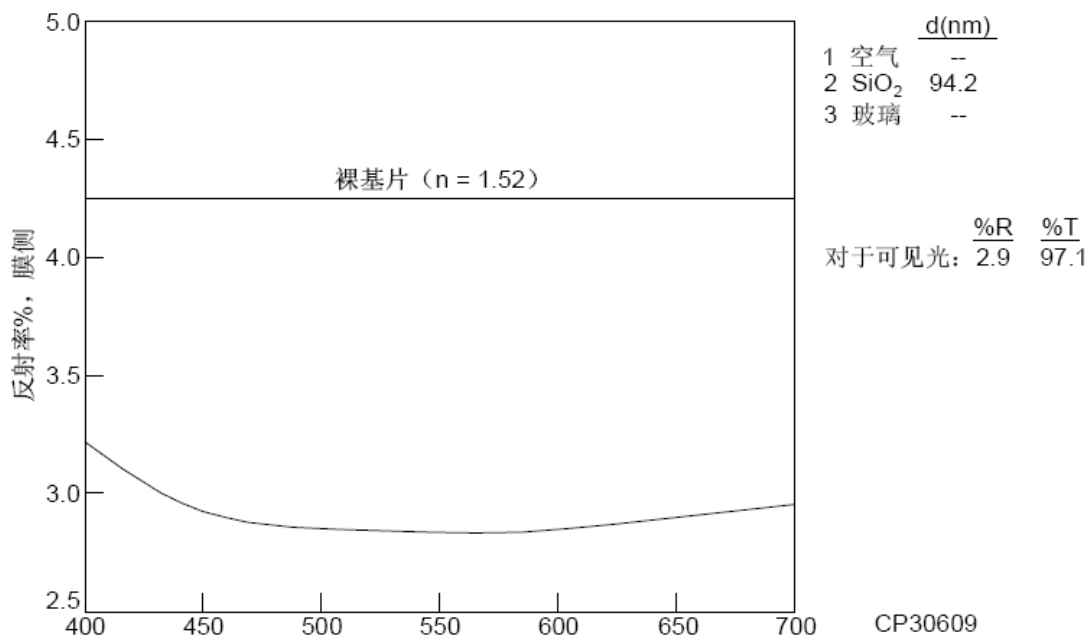


图5

如果膜厚超过95nm，那么最小反射率就会移向红区、即更长波长的方向。如果降低膜厚，则最小反射率或“调谐”出的波长就会向比较短的波长方向移动。在“调谐”膜层的颜色的时候这一点非常重要。

图6中是“调谐”到大约440nm, 550nm 和650nm 的膜层反射率曲线。从某种意义上说, 反射的颜色与“调谐的”波长正好“相反”。这就是说, 要将膜层“调谐”到440nm 的最薄程度, 需要一个比更长的波长还多的余量, 所以膜层看起来略微呈红色或橙红色。如果要将波长“调谐”到650nm, 颜色余量则为较短的波长, 所以反射光线看起来应当略微呈蓝色。在550nm 的最小值处, 反射颜色是蓝色和红色光线的中和, 所以用我们的眼睛看起来略微呈紫色。由于SiO₂的折射系数($n = 1.45$)非常接近于玻璃($n = 1.52$), 所以这种效应非常轻, 但是对于折射系数与玻璃差异相当大的电介质材料来说, 这种颜色的效应要显著得多。

入射角随着入射光线渐渐远离法线（垂直于基片，或0° 入射角）而增大，颜色或性能曲线就会向较短的波长方向移动。由于光线在膜层中所传播的路径会随着入射角的增大而提高，所以反射率最小值应当表现为向红区移动。不过，关键点不是由于光线在膜层中传播路径的增加所造成的总相位的变化，而是反射光波之间在所有交界面处的相位差。举一个非常简单的例子：基片上的单层薄膜（图6）。当光线从法线入射的时候（与薄膜表面的夹角为90° ），如果低折射系数的薄膜的光学厚度是特定波长的1/4，那么从表面上反射回来的光线与从第二表面上反射回来的光线之间就会产生180° 的相位差。这样就最终形成了一个相消干涉，即膜层在该波长处达到了一个最小的反

射率。对于所有其它波长来说，被抵消的光波干涉就比较少（直到完全相长），所以最终得到的反射率也就比较高。这一点也适用于与表面夹角大于90度的光线。

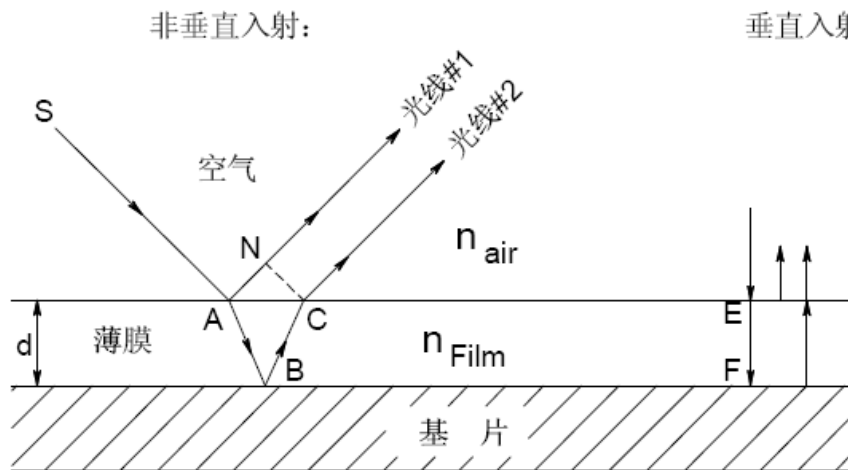


图6

在图6中，如果光线以任何非垂直的角度入射，从基片表面反射回来的光线（光线ABC）所传播的路径都要比光线EFE（垂直反射）长。记住无论是从薄膜还是从基片表面反射的光线都是在同一个平面的同一点进行观察。两条光线（从空气/薄膜交界面处反射出来的波前、即光线AN 和从膜面上的点C 穿出的光线）在观察平面中平行传播之前，反射光线在点N 处已经传播了长度为AN 的一段距离。如果要计算出这个角度上的光程长度差，就必须用光线ABC 的光程减去AN，再与光线EFE进行比较。我们会发现，随着入射角的增加，对于1/4波长厚度的薄膜来说，光程差实际上是降低了。

这就是说，在这个新的角度上，这个薄膜可以被看作是在较短波

长处的 $1/4$ 光波光学厚度（QWOT）。在这个角度上，较短波长的光将会产生 180° 的相位差，即为完全相消干涉。同时，由于不再代表原来发生干涉的波长的QWOT，所以干涉量相对于原始波长也减少了。因此，在原始波长处的反射率就会降低，而最小反射率也就会随着入射角的增加而逐渐向较短的波长方向迁移。如图7所示，这种效应在大约 30° 之前非常薄弱。但是对于 45° 的入射角来说，反射率最小值的迁移就变得非常明显了。从图7中也很容易看出，膜层的减反射率也显著下降了。

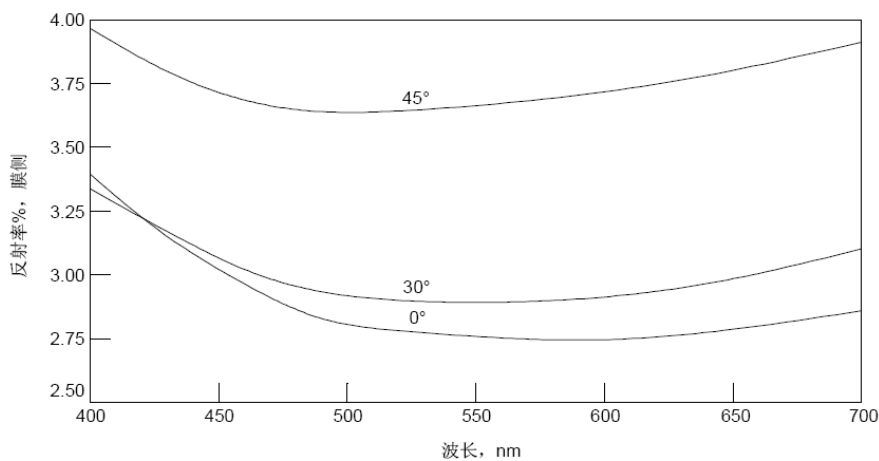


图7

对于减反射膜（AR）来说，有两个关键性的指标：反射率和带宽。显然反射率越宽，膜层的性能就越好。AR膜的带宽是指膜层将反射率降低到任意最小值处的波长范围。例如，如果规定膜层应当在 $400\sim 700\text{nm}$ 的范围内将玻璃侧的反射率降低到1%以下，那么这就同时规定了膜层的减反射率和带宽。要降低玻璃基片的反射率，我们通常

采用的膜系是：先在玻璃上一层沉积高折射系数材料，然后再沉积低折射系数的SiO₂（图8）。图中，“H”或高折射系数材料可以是任何折射系数大于基片或低折射系数材料的电介质材料（例ZrSiO_x，它的折射系数在550nm 处大约是1.76）。光线#1和光线#2的反射情况与前文相同（它们各自产生了180° 和360° 的相位差）。但是由于光线#3的反射光线是进入低折射系数材料，所以它不会在“H”/基片交界面上发生相位变化。不过，由于它两次通过了两个1/4波长的膜厚（ $1/4 + 1/4 + 1/4 + 1/4 = 1$ ），所以它相对于光线#1也多传播了一个整波长（360°）。因为它与光线#1之间存在180° 的相位差，所以它与光线#1发生了相消干涉。而它与光线#2则发生了相长干涉（见表2）。

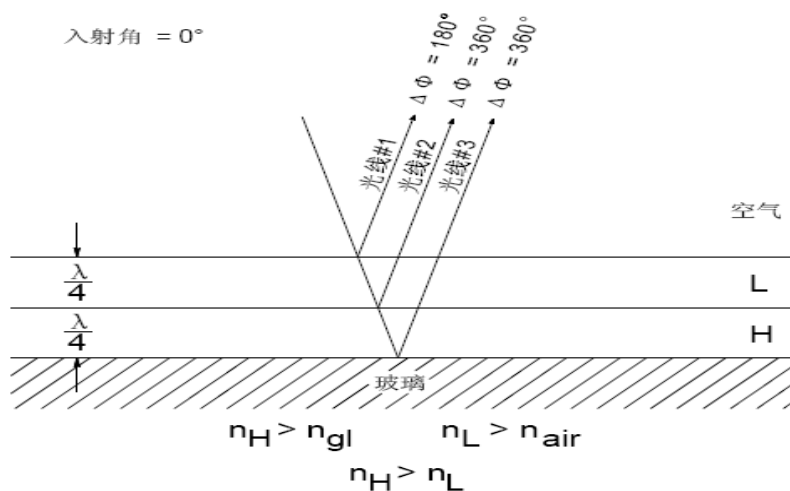


图8

无锡爱尔华科技有限公司

ELVA-TECH

	在指数交接面 处的相位变化	由于光学路径长度造成 的相位变化	总相位变 化	相对于光线#1 的相位变化
光线#1	180°	0°	180°	0°
光线#2	180°	180°	360°	180°
光线#3	0°	360°	360°	180°

表2

现在，在这三条光波中，由于光线#1 是“原始”入射光线的反射部分，所以它的振幅最大。而光线#2反射的是进入低折射系数材料的折射光线（振幅较小），所以它的振幅要比光线#1小。同理，由于光线#3经过了两次反射，只是进入高折射系数材料的光波的反射部分（已经被削弱），所以它的振幅最小。所以，相位相同的光线#2和光线#3相互叠加，最后的振幅非常接近光线#1的振幅。因此，它们可以很近似地抵消光线#1——不是完全，而是接近。三条光线相互抵消的程度决定于为膜系以及基片所选择的材料。

这种配置叫做“g H L a”（玻璃、高折射系数材料、低折射系数材料和空气）1/4光波膜系，或者“V-coat”。一般来说，它的降低折射率的效果要比单层膜的效果好。

我们也可以通过调整我们在镀膜中所使用的材料的膜层厚度来提高AR 膜的带宽（这里称为停止波段）。这个过程叫做“优化”，最好利用能模拟计算不同波长的反射率的计算机来进行这个工作。

图9中就是采用了SiO₂和TiO₂的四层减反射（AR）优化膜系。它不再只是某一特定波长的1/4波厚度，而是在经过调整后，可以在整个可见光波段内都得到很低的反射率。

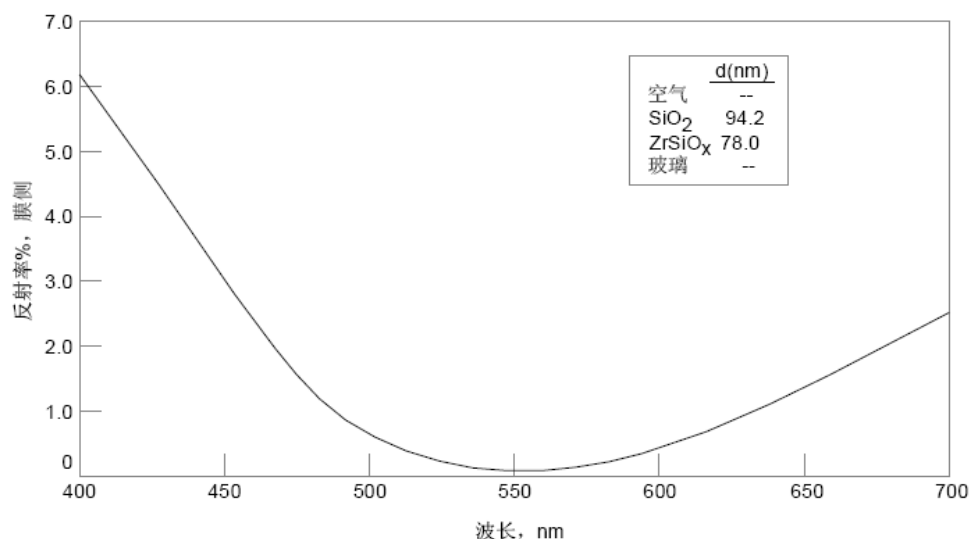


图9

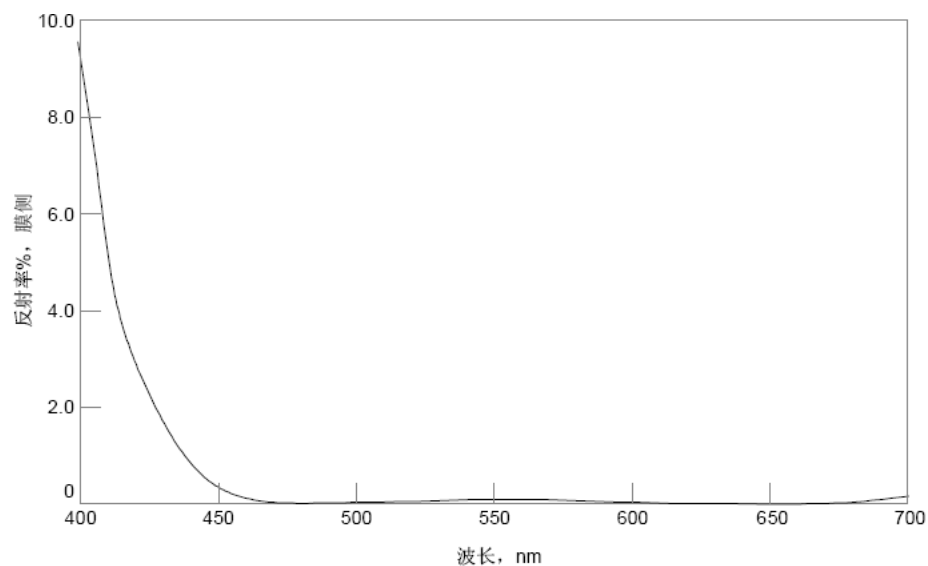


图10

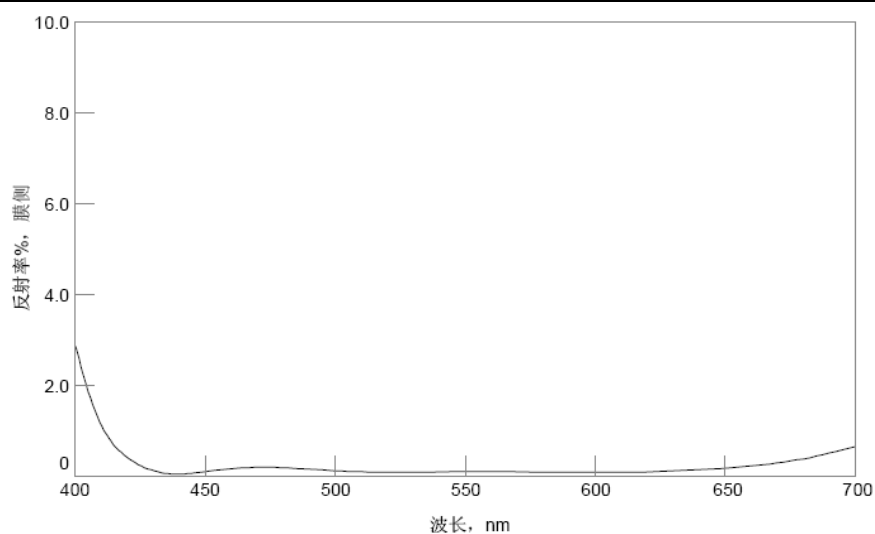


图11

通常,保持相同的薄膜材料,如果我们在膜系中增加更多的膜层,就可以得到更低的反射率。在图11中就是相对于图10中的四层AR 膜,再增加一对“H L”膜层的效果。随着膜层从4层增加到6层,可以发现反射率在下降,特别是在400~450Å的区域。

减反射膜 (AR) 的结构为:

6 层的AR膜: 玻璃/ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

厚度范围 (nm): 9~13/30~40/50~80/1~15/22~40/80~90

AR 宽度范围: <0.6%, 430~680nm

项目实施方案:

- 1) 根据我们所掌握的成熟技术，从均匀性在 $\pm 3\%$ 及产能保证角度；
采用立式双面12室连续镀膜线，基架尺寸为1.7*1.8m, 大板直接可
加装1.3*1.5m*2片玻璃；加装14*16寸的基片，则可加装12片，双
面则是24片。室体材料选用20mm~25mm厚的304不锈钢。设备可单
面镀，也可双面一次成膜；根据客户选型而定。本生产线的设计
尺寸为1.50m $\times$ 1.30m，设计节拍时间为4~5分钟。
- 2) 为了保证沉积速率和膜层质量，SiO₂采用Si中频磁控反应溅射沉
积；TiO₂采用非完全氧化的TiO_x靶直流脉冲溅射。在SiO₂沉积工艺
中可选STEC流量计与中频电源闭环控气，也可采用压电阀闭环控
气。
- 3) 传动系统也有变频电机和伺服电机两种可选，相对来说，伺服电
机的精度较高，但成本较高。
- 4) 在布气方面，我们将采用二进制分段布气，利于均匀性的控制；
可选用PEM。
- 5) 电气控制方面，我们将采用国际流行的PC+PLC闭环控制；设置自
动控制、远程控制模式，提高控制精度。

6) 采用配方控制理论，提高系统适应性。

7) 主要设备自行设计加工，关键设备采取进口，提高系统可靠性。

设备配置：

1. 简介

本生产线采用磁控溅射原理生产减反射率特种镀膜玻璃。运用光学原理，利用氧气作为反应气体，氩气作为保护气体沉积绝缘 TiO_2 和 SiO_2 膜，在玻璃基板上沉积宽带增透减反膜。

2. 本生产线的突出特点：

- 1) 幅面大、利用率高、透过率高
- 2) 可以稳定低沉积绝缘材料、无阳极消失现象
- 3) 膜层结合力强、理化实验效果好
- 4) 均匀性好，工艺稳定
- 5) 高速生产节拍：4~5min/2p
- 6) 按国际同类产品的惯例，由PC+PLC自动控制，高度智能化
- 7) 组态画面控制，生产过程自动化
- 8) 系统故障由计算机寻址、诊断、显示、报警
- 9) 在线调整工艺参数、专家系统、数据库完成配方
- 10) 传动稳定、故障率低、扩容简便

3. 基本设计资料

无锡爱尔华科技有限公司

ELVA-TECH

- 1) 基片：浮法玻璃（生产20天之内）
- 2) 基片幅面：1500mm×1300mm×2~10mm
- 3) 溅射阴极放电参数： 电压：300~500V；电流：10~80A（直冷式）
- 4) 生产能力（环境湿度<65%）：生产最快节拍4~5分钟/片
- 5) 真空性能指标：（环境湿度<65%）
- 6) 工艺室极限真空（首次、连续抽空12小时）： $2.7 \times 10^{-3} \text{Pa}$
($2 \times 10^{-5} \text{Torr.}$)
- 7) 工作真空： $2 \times 10^{-1} \text{Pa} \sim 5 \times 10^{-2} \text{Pa}$ ($1.5 \times 10^{-3} \text{Torr.} \sim 4 \times 10^{-4} \text{Torr.}$)
- 8) 压升率（漏率）： 0.067Pa/min ($5 \times 10^{-4} \text{mmHg/min}$)

4. 设备清单及数量

- | | |
|------------------|-----|
| 1) 上片架 | 1个 |
| 2) 进端锁室 | 1个 |
| 3) 进端缓冲室 | 1个 |
| 4) 真空工艺镀膜室 | 4个 |
| 5) 隔离过渡室 | 3个 |
| 8) 出端真空缓冲室 | 1个 |
| 9) 出端锁室 | 1个 |
| 10) 狭缝阀 | 12个 |
| 11) 下片台 | 1个 |
| 12) 质量流量计 | 8个 |
| 13) 压电阀 | 2套 |
| 14) 光谱分析仪 | 4套 |
| 15) 按工艺要求配置的真空系统 | |
| a) 旋片泵 | 5台 |
| b) 罗茨泵 | 5台 |
| c) 分子泵 | 17台 |
| d) 气动蝶阀DN-100 | 4个 |
| e) 气动蝶阀DN-150 | 12个 |
| f) 气动蝶阀DN-250 | 17个 |

无锡爱尔华科技有限公司

ELVA-TECH

16) 电控系统	
a) 阴极电源	2+6套
中频交流	6套
直流脉冲	2套
b) 真空系统控制柜	1个
c) 传动系统控制柜	1个
d) 加热柜	1个
e) 中央控制柜 (配PC、PLC、UPS电源各一台)	1个
f) 生产线系统的电线、电缆	1套
g) 关键按钮及接触器 (日本或瑞士生产)	1套
h) 组态软件	1套
17) 溅射阴极	12对
18) 各种真空测量控制光学仪器、仪表等	全套
19) 主线水冷系统	全套
20) 主线动力气动系统	全套
21) 真空继电器及仪表	全套
22) 传动系统	
a) 减速机	11台
b) 普通电机	4台
c) 变频电机	7台
d) 变频器	7台
23) 传动轴、导向装置、轴承、胶圈、链轮及真空动密封等	
24) 真空密封圈、电极绝缘件、观察窗、标准件及抽气充气装置等	
25) 靶材:	
a) 钛99.99%	12套
b) 硅99.99%	12套
26) 载片架	20个
27) 在线透过率测试仪	1套
28) 离线透过率测试仪	1套

4. 电源:

- 1) 容量: 500KVA
- 2) 电压: 380V, 三相四线 (3, N)
- 3) 频率: 50Hz
- 4) 耗量: 250KW~350KW

5. 冷却水水源:

- 1) 阴极单独使用闭环水冷却; 真空泵直接用循环水冷却 (经

过滤)

2) 水源:

硬度: $<35\text{mgCaCO}_3 / \text{L}$ ($<6\sim 8\text{dH}$)

水质: $\text{pH}=7$, 且过滤无泥沙等有害物质

压力: $0.3\sim 0.4\text{MPa}$

耗量: $50\text{T} / \text{h}$

磁性物质: 无

电导率: $<800\ \mu\text{s} / \text{cm}$

氧含量: $8\sim 9\text{mg} / \text{L}$

二氧化碳含量: $<5\text{mg} / \text{L}$

最高温度: 30°C

温度变化 ΔT : 10°C

6. 纯水水源:

压力: $0.2\sim 0.3\text{MPa}$

耗量: $8\text{T} / \text{h}$

电导率: $<2\ \mu\text{s} / \text{cm}$

无氯

经紫外线照射

7. 压缩空气:

压力: $0.5\sim 0.7\text{MPa}$

耗量: $3\text{m}^3 / \text{h}$ (连续工作)

无锡爱尔华科技有限公司

ELVA-TECH

微粒尺寸: $<5\ \mu\text{m}$

微粒含量: $<5\text{mg} / \text{m}^3$

露点: max. $+2^{\circ}\text{C}$

含油量: $1\sim5\text{mg} / \text{m}^3$

8. 工作气体:

1) 气体纯度: 氩气99.999%

氧气99.999%

2) 气体耗量: 氩气 $\leq 100\text{L} / \text{h}$

氧气 $\leq 100\text{L} / \text{h}$

9. 环境要求:

1) 镀膜机及环境温度 $5\sim38^{\circ}\text{C}$; 湿度 $<80\%$

2) 电控系统: 温度 $15\sim28^{\circ}\text{C}$; 湿度 $<65\%$ (电控系统需空调)

主要设备预算

注: 可行性报告中的预算, 可能会由于汇率、涨降价及不可预测因素细节处略有变动

设备名称	数量	预算(万元)
上片架	1个	0.5
进端锁室	1个	40
进端缓冲室	1个	40
真空工艺镀膜室	6个	300
隔离过渡室	2个	80
出端真空缓冲室	1个	40
出端锁室	1个	40
狭缝阀	6个	120
质量流量计	24个	24
压电阀 (备选)	6套	27
旋片泵	3台	60
罗茨泵	5台	23
分子泵	10台	400
干泵泵组	2台	170

无 锡 爱 尔 华 科 技 有 限 公 司

ELVA-TECH

气动蝶阀DN-100	4个	2
气动蝶阀DN-150	12个	6
气动蝶阀DN-250	17个	15
电控系统		
阴极电源		
中频交流	6套	1200
直流脉冲	6套	150
靶材:		
TiOx	12套	7
Si 99.99%	12套	8
气体:		
氧气99.999%	2瓶	0.25
氩气99.999%	2瓶	0.25
专用电缆	300米	10
真空系统控制柜	1个	5
传动系统控制柜	1个	3.5
温控仪表	4	1.5
加热器	8	5
中央控制柜（配PC、PLC、UPS电源各一台）	1个	2.5
PC	1台	1.5
PLC	1台	8
UPS	1台	0.5
生产线系统的电线、电缆	1套	5
关键按钮及接触器（日本或瑞士生产）	1套	2
组态软件+控制软件	1套	20
溅射阴极	12	40
各种真空测量控制光学仪器、仪表等	全套	5
真空继电器及仪表	全套	10
传动系统		
减速机	12台	3
普通电机	6台	1
变频电机	6台	5
变频器	6台	2
传动轴、导向装置、轴承、胶圈、链轮及真空动密封等		15
真空密封圈、电极绝缘件、观察窗、标准件及抽气充气装置等		15
载片架	20个	5

总计：2816.5 万元

无锡爱尔华科技有限公司

ELVA-TECH

设备草图

