# 99．光波在反射与折射过程中偏振态发生了什么变化？

光是横波，因此有偏振现象。但自然光不是偏振光，这是因为自然光中沿各个方向振动的光波都存在，并且任何方向都没有优势。光在反射和折射过程中，偏振态会发生变化。自然光经过反射后常常显示偏振的特点。

太阳光及火焰等发出的光称为自然光，它不是偏振光，经过偏振片后，成为线偏振光。阳光经水面或其他物质反射后的光，常常是部分偏振光。

## 一、自然光与偏振光

光波是电磁波，它是纯横波，这是指传播过程中振动着的电矢量和磁矢量都与传播方向垂直，由于光在和物质相互作用时起主要作用的是电矢量，因此常以电矢量作为光波传播过程中的振动矢量代表。

自然光，即是指由太阳、火焰等自然光源直接发出来的光，并不显现横波的特性。

如图 1（a）所示，如果我们让太阳光垂直穿过一个圆形孔洞，在孔洞后面平行放一个屏幕，则屏幕上将出现一个圆形亮斑。在孔洞处放一个偏振片 A，如图 1（b）所示，则可看到屏幕上的亮斑亮度减弱。让偏振片 A 绕其中心轴旋转一周，屏幕上的亮斑亮度没有变化，这说明自然光不显示横波的特性，也可以说自然光是非偏振光。

图 1 白然光是非偏振光

A

P

（a）阳光通过孔洞照射屏幕

（b）在孔洞处放一个偏振片

在图 1 中，为什么加上偏振片 A 后，屏幕上的亮斑会变暗？又为什么偏振片旋转一周，亮斑的亮度不发生变化呢？这是由于光源中的光是大量原子或分子在发生能级跃迁时发出的，它们各自发出的光相互不关联，其振动方向也是各个方向都有，并没有任何一个方向占有优势，如图 2（a）所示。偏振片有一个特殊的“透振方向”，即图 2（b）中用虚线标注的 P 的方向，只有沿 P 方向振动的光波才能够穿过偏振片。自然光照射到偏振片上时，除了沿 P 方向振动的光波能够穿过、垂直于 P 方向的振动完全不能穿过以外，其余沿各个方向的振动都可以进行正交分解，其中沿 P 方向的振动分量能够穿过，而垂直于 P 方向的振动分量则不能够穿过，于是从偏振片通过后的光波中就只有沿 P 方向的振动了。由于可以认为自然光中沿各个方向的振动都相等，现在只允许沿 P 方向的振动通过，屏幕上的光的强度比起未通过偏振片前就减弱了一半，这就是亮斑变暗的原因。

图 2 自然光与偏振光的振动方向

A

P

（a）自然光中同时存在

向各个方向的振动

（b）偏振片有一个特殊的

“透振方向”

（c）后面加第二个偏振片

P

B

P

这就是说，偏振片 A 之前的光是自然光，或者说是非偏振光，偏振片 A 之后的光则是偏振光，也叫线偏振光。

在 A 的后面再加另一个偏振片 B，如图 2（c）所示，当 B 的透振方向与 A 相同时，屏幕上的光斑亮度不变，而当 B 的透振方向与 A 垂直时，屏幕上的光斑完全消失，称为消光。这说明经过偏振片 A 后的光是完全偏振光，即线偏振光。我们根据这两个偏振片所起的作用把偏振片 A 称为起偏器，偏振片 B 称为检偏器。

请注意：在这个实验里，A 之前的光是非偏振光，即自然光，而 A 之后的光则是完全偏振光，即线偏振光。如果 B 与 A 的透振方向既不重合也不垂直，那么通过 A 后的线偏振光可以沿 B 的透振方向进行正交分解，只有振动方向与 B 的透振方向相同的才能透过 B，因此屏幕上的光斑亮度要减弱，但不会完全消失。

中学物理教科书中说道：光的偏振现象并不罕见。除了从太阳、电灯等光源直接发出的光以外，我们通常看到的绝大部分光，都是不同程度的偏振光。自然光在玻璃、水面、木质桌面等表面反射时，反射光和折射光都是偏振光，入射角变化时偏振的程度也有所变化。

这里的“偏振的程度”该如何理解呢？这需要引入部分偏振光的概念，这是一种介于自然光和线偏振光之间的状态，图 3（a）是它的振动分布的情况，沿各个方向的振动都存在，但沿各个方向的振动强度不相同，而是沿某个方向的振动最强，垂直于该方向上的振动最弱。如图 3（b）所示，让部分偏振光通过偏振片 B（检偏器），当 B 绕其中心轴转动一周的过程中，屏幕上的光斑亮度要发生周期性变化，当 B 的透振方向处于某个方向时光斑亮度最亮，设其强度为 *I*极大，而在与其垂直的方向上亮度最暗，其强度为 *I*极小，但最暗时并不发生消光现象，即 *I*极小 ≠ 0。

图 3 部分偏振光

（a）部分偏振光的振动分布

（b）让部分偏振光通过检偏器

B

P

部分偏振

B

P

部分偏振

定义偏振度

*P* =

其中的分母（*I*极大 + *I*极小）就是两个相互垂直的分量的强度之和，而其分子（*I*极大 − *I*极小）实际是它不受检偏器转动角度影响的那部分的强度，它们的比值就是一个描述部分偏振光的偏振程度的物理量。当 *I*极小 = 0 时，它就是线偏振光，这时偏振度 *P* = 1；当 *I*极大 = *I*极小 时，它就是自然光，这时偏振度 *P* = 0。因此 *P* 是介于 1 与 0 之间的一个纯数字，它的值越大，表示该光波的偏振程度越高；反之，它的值越接近于 0，表示该光波越接近自然光。教科书上说“我们通常看到的绝大部分光，都是不同程度的偏振光”，指的就是偏振度不同的部分偏振光。

## 三、反射与折射过程中光的偏振态的变化

光从一种介质射向另一种介质时，在它们的界面处要发生反射和折射。如图 4 所示，设入射光为 AO，反射光为 OB，折射光为 OC。先建立坐标系：沿入射面并与入射光线在同一平面内的直线为 *x* 轴，*y* 轴垂直于入射面（即垂直于图示的平面），沿法线方向为 *z* 轴。并为每一束光取一局部的直角坐标系：沿光束传播方向为 *k*、在入射面内垂直于传播方向为 *p*、垂直于入射面为 *s*（图中用圆点表示垂直于纸面向外），都按右手螺旋法则规定正方向。设入射光 AO 是自然光，把它的振动电矢量 *E* 分解到相互垂直的 *p* 和 *s* 两个方向上，对入射的自然光 AO 而言，*p* 分量和 *s* 分量相等，即 *E*1p = *E*1s。

图 4 光的反射与折射

B

*p*1ʹ

*s*1ʹ

*p*1

*s*1

*k*1

*i*1

*k*1ʹ

*i*1ʹ

*p*2

*s*2

*k*2

*i*2

*x*

*z*

*n*1

*n*2

A

C

反射光 OB 和折射光 OC 的振动电矢量 *E* 的 *p* 分量 *E*1pʹ、*E*2p，s 分量 *E*1sʹ、*E*2s，分别满足下面的菲涅耳反射折射公式：

其中①③两式为反射公式，②④两式为折射公式。不难看出，不论反射光线或是折射光线，其 *p* 分量只与入射光线中的 *p* 分量有关，*s* 分量只与入射光线中的 *s* 分量有关，两个分量的振动是相互独立的。

下面我们讨论光强反射率和光强折射率。光的强度 *I* 是平均能流密度，在同种介质中传播时，它正比于电矢量振幅的平方，在不同种介质中传播时，还与折射率 *n* 有关，即 *I* ∝ *n*| *E* |2，光强反射率定义 *R* = ，光强透射率定义 *T* = 。

由于 *p* 分量与 *s* 分量是相互独立的，因此我们分别讨论 *p* 分量与 *s* 分量的光强反射率。

*p* 分量的光强反射率 *R*p = = （）2；

*s* 分量的光强反射率 *R*s = = （）2。

由于折射角 *i*2 与入射角 *i*1 有确定的关系 = ，在两种介质一定，即 *n*1 和 *n*2 都确定的情况下，光强反射率和光强透射率都只是入射角 *i*1 的函数。为了简单，我们下面只讨论光强反射率，其实，根据能量守恒，除了反射的部分以外，其余部分都折射了，只要知道了光强反射率，光强透射率也就不难想象出来了。

下面图 5 分别是从空气到玻璃和从玻璃到空气两种情况下的光强反射率 *R* 随入射角 *i*1 变化的图像。

入射角

1.0

0.8

0.6

0.4

0.2

0

0°

30°

60°

90°

0.04

0.15

*R*s

*R*p

（a）从空气到玻璃（*n* = 1.50）的光强反射率

（b）从玻璃（*n* = 1.54）到空气的光强反射率

图 5 光强反射率随入射角的变化曲线

入射角

1.0

0.8

0.6

0.4

0.2

0

0°

30°

60°

90°

0.04

*R*p

*i*C

全反射

*i*B

*i*B

*R*s

*R*

从上面的图像可以看出：

（1）随入射角 *i* 的增大，光强反射率的 *s* 分量 *R*s 总是单调地增大，而 *p* 分量 *R*p 则先是减小，至某一位置时减至零而后再增大。使光强反射率的 *p* 分量减小至零的入射角 *i*B 称为布儒斯特角。

一般情况下，光强反射率的 *s* 分量 *R*s 和 *p* 分量 *R*p 不相等，并且 *R*s 大于 *R*p，如果入射光是自然光，则一般情况下反射光和折射光都是部分偏振光，反射光中 *s* 分量大于 *p* 分量，而折射光中 *s* 分量小于 *p* 分量。在特殊情况下，即 *i*1 = *i*B（入射角等于布儒斯特角）时，反射光中只有 *p* 分量，是线偏振光（或说完全偏振光），因此布儒斯特角又称为全偏振角。不论入射角如何，折射光永远是 *s* 分量大于 *p* 分量的部分偏振光，但在入射角等于布儒斯特角时，折射光的偏振度最高，例如光从空气射到玻璃，经过一次反射，透射光的偏振度可以达到 8% 虽然通过一次玻璃反射后的透射光偏振度最多只能达到 8%，但可以通过多次玻璃的反射，逐步提高透射光的偏振度，光线每通过一次空气与玻璃的界面，且入射角等于布儒斯特角时，*s* 分量有大约 15% 被反射掉，而 *p* 分量则 100% 透过，经过多层玻璃片透射出来的光，可以近似认为全部是沿 *p* 方向振动的偏振光。

（2）当光从光疏介质射向光密介质（如从空气射向玻璃），入射角 *i*→90°（掠入射）时，或当光从光密介质射向光疏介质（如从玻璃射向空气），入射角 *i*→*i*C（全反射的临界角）时，光强反射率的 *p* 分量和 *s* 分量都急剧地增大到 100%，相应地透射率则减至零。

下面我们计算两种简单的情况。

1．正入射时的光强反射率

正入射即垂直界面入射，此时 *i*1 = *i*2 = 0，*R*p = *R*s =（）2，仍以光从空气射入玻璃为例，*n*1 = 1.0，*n*2 = 1.5，则 *R*p = *R*s = 0.04 = 4%，即 *p* 分量和 *s* 分量各有 4% 的光被反射回来，相应地，透射的占 96%。从玻璃射向空气，结果相同，也是有 4% 被反射。

2．计算布儒斯特角

根据菲涅耳反射公式①，*E*1pʹ = *E*1p，要使 *E*1pʹ = 0，

则有

*n*2cos*i*1 − *n*1cos*i*2 = 0 ⑤

根据折射定律，有

*n*1sin*i*1 = *n*2sin*i*2 ⑥

联立解⑤⑥两式，得 sin2*i*1 = ，此时 *i*1 的值即为布儒斯特角 *i*B。

当光从空气（*n*1 = 1.00）射向玻璃（*n*2 = 1.50）时，*i*B = 56.31°；当光从玻璃（*n*1 = 1.54）射向空气（*n*2 = 1.00）时，*i*B = 33.0°。