



芯飞睿技术参数十问 系列

相位匹配角

相位匹配角

一、相位匹配是什么

相位匹配的物理实质就是使基频光在晶体中沿途各点激发的倍频光传播到出射面时，都具有相同的相位，这样可相互干涉增强，从而达到好的倍频效果。

二、相位匹配的约束条件是什么

为了实现非线性波长的有效转换，在非线性光学过程中需同时满足光子能量守恒和光子动量守恒。光子动量守恒 $\Delta k = k_3 - k_1 - k_2 = 0$ ，被称为“相位匹配”的约束条件。

三、相位匹配的分类有哪些

相位匹配的分类标准有以下四种，

①按照光波的偏振态可以划分为I类匹配和II类匹配，如果两束低频光的偏振态相同，则为I类匹配，如果两束低频光的偏振态正交，则为II类匹配；

②根据光波的方向，可以把相位匹配分为共线与非共线两种结构；

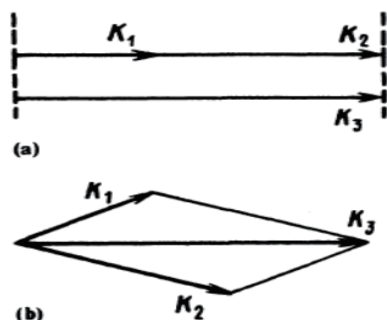


图 1. 共线或非共线三波相互作用相位匹配

③非线性单轴晶体的相位匹配类型可分为六种：

负单轴晶体($n_o > n_e$):

type I⁽⁻⁾ $k_{o1} + k_{o2} = k_{e3}(\theta)$ – “ooe”

type II⁽⁻⁾ $k_{e1}(\theta) + k_{e2} = k_{e3}(\theta)$ – “eoe”

type II⁽⁻⁾ $k_{o1} + k_{e2}(\theta) = k_{e3}(\theta)$ – “oeo”

正单轴晶体($n_e > n_o$):

type I⁽⁺⁾ $k_{e1}(\theta) + k_{e2}(\theta) = k_{o3}$ – “eeo”

type II⁽⁺⁾ $k_{o1} + k_{e2}(\theta) = k_{o3}$ – “oeo”

type II⁽⁺⁾ $k_{e1}(\theta) + k_{o2} = k_{o3}$ – “eoo”

(注: k 波传播矢量($k = 2\pi n/\lambda$); 晶体中的 θ 相位匹配角; o 普通极化, e 非凡极化; 1,2,3 的指标对应波长最长(1)、中(2)、最短(3)的波向量)

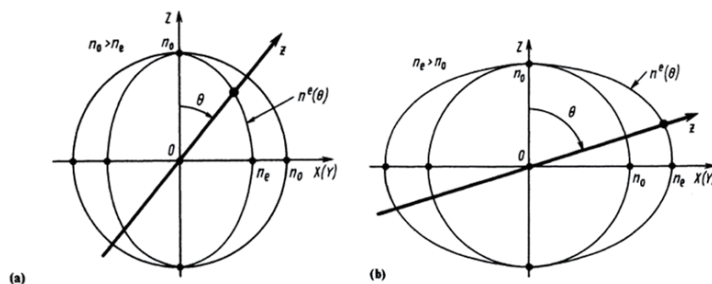


图 2. 在负(a)和正(b)单轴晶体中折射率与光传播方向和偏振(折射率面)的关系

④在双轴晶体中只有三种通用类型相位匹配发生: ss-f、sf-f 和 fs-f (第三指数对应较高的频率 ω_3); 我们将 ss-f 情况标记为 I 型相位匹配, sf-f 或 fs-f 情况标记为 II 型相位匹配。

四、相位匹配的方法有什么

相位匹配的方法主要有双折射相位匹配 (BPM) 和准相位匹配 (QPM) 这两种, 但 BPM 方法又有一些变形方法, 此处主要说临界相位匹配和非临界相位匹配这两种变形方法。下文对这四种方法简单介绍:

双折射相位匹配 (BPM) 是一种利用非线性晶体的双折射特性来实现非线性过程相位匹配的方法。对于 I 型相位匹配, 信号和闲频 (或生成倍频或和频的两个输入波) 具有相同的极化; 对于 II 型相位匹配, 这些波具有正交偏振态。

准相位匹配 (QPM) 是一种与非线性相互作用的相位匹配结果相似的方法, 特别是对于基于 $\chi^{(2)}$ 非线性的非线性频率转换。用具有空间调制非线性特性的材料代替了均匀非线性晶体材料。其方法本质上是允许在某些传播距离上的相位失配, 但在某些位置逆转(或破坏)非线性相互作用, 否则会在错误的转换方向上发生相互作用。

临界相位匹配 (Critical Phase Matching), 又称角度相位匹配 (Angle Phase Matching), 是一种对双折射晶体中某些非线性过程 (通常是非线性频率转换) 进行相位匹配的方法。相互作用光束与折射率椭球的轴线成一定的角度。在几乎所有的情况下, 沿折射率椭球的一个轴 (普通光束) 有一个或两个波线偏振, 而另一个或两个波在另两个轴所跨的平面 (特殊光束) 上以某种可变的角度的偏振。传播角度的调整会影响异常光束的折射率 (称为异常折射率), 而普通光束的折射率保持不变。对于某些角度位置, 可以实现相位匹配, 即相位失配消失。

非临界相位匹配，有时也称为温度相位匹配或90°相位匹配，是一种对非线性过程(通常是非线性频率转换，如倍频或参量放大)进行相位匹配的方法。相互作用的光束排成一行，使它们沿着非线性双折射晶体的某一轴传播。通过调节晶体温度，使相位失配最小化。

五、相位匹配角是什么

相位匹配角是指在晶体中基频光相对于晶体光轴z方向的夹角，而不是与入射面法线的夹角。

六、计算单轴相位匹配角的坐标轴系是如何建立的

单轴晶体主轴可以垂直于xy平面上任意选择，为方便起见，选择Y轴方向使给定的波法线方向位于yoz平面，Z轴为光轴方向，K是在相位匹配条件下的传播矢量，使基频光为o光，倍频光为e光， θ 的角度为波矢K与Z轴的夹角， ϕ 的角度为波矢K在xoy面上的投影与X轴夹角。

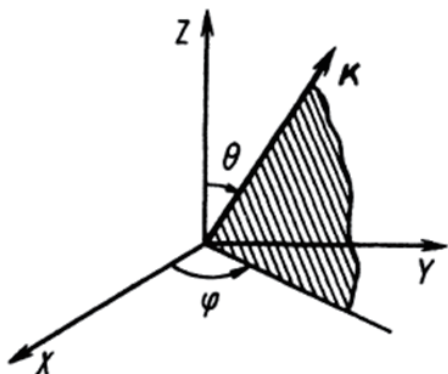


图 3. 单轴晶体坐标系

七、单轴相位匹配角是怎么计算的

单轴非线性晶体的色散特性仅由角 θ 决定。因此，要找到单轴晶体中的相位匹配方向，只要确定三波相互作用下对应的相位匹配角 θ_{pm} 。

表1给出了 θ_{pm}^{ooe} ， θ_{pm}^{oeo} ， θ_{pm}^{eoo} 的精确解析表达式，以及 θ_{pm}^{eoe} ， θ_{pm}^{oee} ， θ_{pm}^{eeo} 的近似表达式(测定精度 $\sim 0.1^\circ$ - 0.2°)。相位匹配与方位角 ϕ 无关，即在顶角为 $2\theta_{pm}$ 的圆锥表面上实现。同时，非线性转换过程的效率由 θ_{pm} 和 ϕ 决定。表1中的表达式可以推广到非共线相位匹配。

负单轴晶体	正单轴晶体
$\tan^2 \theta_{pm}^{ooe} = (1-U)/(W-1)$	$\tan^2 \theta_{pm}^{eeo} \cong (1-U)/(W-S)$
$\tan^2 \theta_{pm}^{oeo} \cong (1-U)/(W-R)$	$\tan^2 \theta_{pm}^{eoe} = (1-V)/(V-Y)$
$\tan^2 \theta_{pm}^{eoe} \cong (1-U)/(W-Q)$	$\tan^2 \theta_{pm}^{eeo} = (1-T)/(T-Z)$

$$U = (A+B)^2/C^2; W = (A+B)^2/F^2; R = (A+B)^2/(D+B)^2; \epsilon$$

$$Q = (A+B)^2/(A+E)^2; S = (A+B)^2/(D+E)^2; V = B^2/(C-A)^2; \epsilon$$

$$Y = B^2/E^2; T = A^2/(C-B)^2; Z = A^2/D^2 \epsilon$$

$$A = n_{o1}/\lambda_1; B = n_{o2}/\lambda_2; C = n_{o3}/\lambda_3 \epsilon$$

$$D = n_{e1}/\lambda_1; E = n_{e2}/\lambda_2; F = n_{e3}/\lambda_3 \epsilon$$

表 1. 计算单轴晶体中相位匹配角的公式

八、常见的几种晶体的相位匹配角

此文在这里给出了一些常见晶体的相位匹配角（表2）和BBO I类相位匹配角曲线（图4）。

晶体	$\lambda/\mu\text{m}$	n_o	n_e	θ_m
铌酸锂	1.06	2.321	2.15	87°
	0.53	2.32	2.23	
碘酸锂	1.06	1.86	1.719	$29^\circ 30'$
	0.53	1.901	1.75	
DKDP	1.06	1.495	1.455	$30^\circ 57'$
	0.53	1.507	1.467	
BBO	1.06	1.543	1.655	$22^\circ 47'$
	0.53	1.556	1.674	

表2. 相位匹配角

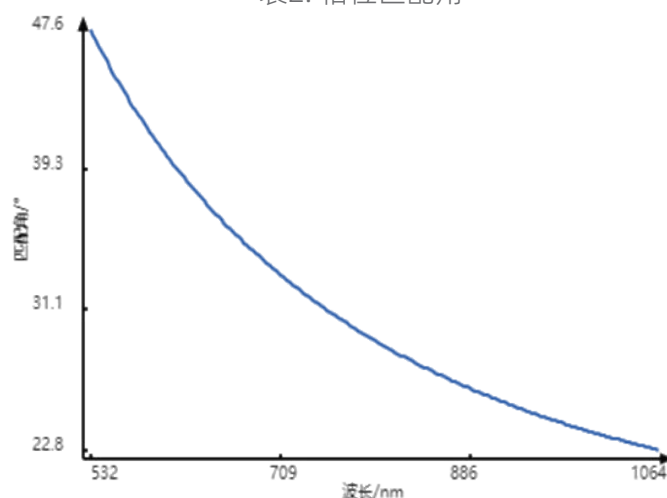


图 4. BBO (o+o $\rightarrow$ e) 相位匹配角曲线



九、如何加工出准确的材料相位匹配角

在上文中我们有介绍相位匹配角的概念，相位匹配角是指在晶体中基频光相对于晶体光轴 z 方向的夹角，而不是与入射面法线的夹角。为了减少反射损失和便于调节，实验中一般希望让基频光正入射晶体表面，如下图所示。所以加工倍频晶体时，必须按一定方向切割晶体，以使晶体法线方向和光轴方向成 θ_m 。此处需要注意的是得选好晶体的相位匹配角，对于一些晶体来说它的相位匹配角并不是唯一的，以KDP晶体为例来说明。KDP晶体为负单轴晶体，相互作用有I类匹配 $o+o \rightarrow e$ 和II类匹配 $o+e \rightarrow e$ ，两种匹配方式对应的相位匹配角分别为 $\theta_m=41.2^\circ$ 和 $\theta_m=59.1^\circ$ 。

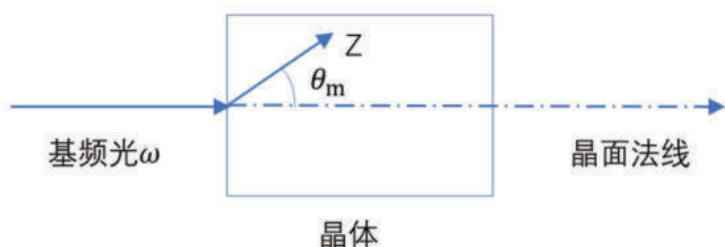


图 5. 非线性晶体的切割

十、用户如何选择具有合适相位匹配角的材料

在上文中也提到了一些晶体的相位匹配角不唯一，那在这样的情况下我们该如何选择出合适的相位匹配角呢？我们一般根据调谐范围、增益带宽、转换效率、有效非线性系数等参数来选择合适的材料和相位匹配角。简单举KDP和BBO来说明。上文说到KDP不同相互作用对应的相位匹配角不同，通常在应用中会选用II类匹配的相位匹配角，因为KDP的I类有效非线性系数 $d_{\text{eff}}^{\text{I}}=0.3\text{pm/V}$ ($\Phi=45^\circ$) 小于II类有效非线性系数 $d_{\text{eff}}^{\text{II}}=0.4\text{pm/V}$ ($\Phi=0$)；BBO的I类相位匹配因其宽调谐范围、宽增益带宽、高转换效率被广泛应用于光参量啁啾脉冲放大（OPCPA），II类相位匹配的窄带宽激光可满足化学、农业、医药、电信等领域的光谱测量装置对可调谐窄带激光光源的需求。

参考文献

- [1]<http://www.crl-photonics.com/Content/691121.html>
- [2]https://www.rp-photonics.com/phase_matching.html
- [3]https://www.rp-photonics.com/critical_phase_matching.html
- [4]https://www.rp-photonics.com/noncritical_phase_matching.html
- [5]<https://max.book118.com/html/2018/0329/159256906.shtml>
- [6]https://www.rp-photonics.com/quasi_phase_matching.html
- [7]Phase Matching of SHG (wavequanta.com)-BBO、KDP、KBBF、BIBI、LBO相位匹配角计算器
- [8]郭晓杨, 冷雨欣, 许毅, 等. 光参量放大相位匹配角度的计算[J]. 中国激光, 2015, 42(8).
- [9]Dmitriev V G, Gurzadyan G G, Nikogosyan D N. Handbook of nonlinear optical crystals[M]. Springer, 2013.



有什么问题请联系我们的
技术工程师，在线为
您解答



了解更多资讯，请关
注我们的公众号--上海
芯飞睿科技有限公司

