



光电子技术(24)

通常也需要聚焦激光束。

倍频晶体的损伤阈值考虑

无论是腔内或是腔外应用，是否聚焦光束，聚焦多少倍？要考虑的因素主要是倍频晶体的损伤阈值。用功率密度表示，单位为 W/cm^2 。在不损伤晶体的前提下，基频光功率密度越高，倍频效率越高。



光电子技术(24)

§ 6.4 光学参量技术

光学参量技术是一种频率下转换技术，属二阶非线性效应。利用它可以将光频率扩展到红外波段。

光学参量技术包括光参量振荡和放大。

光参量振荡利用光学谐振腔和参量转换，将高频率的激光转换为低频率的激光。输出的参量振荡激光的频率和光束质量除受相位匹配条件限制外，还受谐振腔约束。

光参量放大利用参量转换将高频率激光转换为低频激光，激光频率和光束质量受相位匹配条件和泵浦激光束的质量约束。

一、光参量原理

光子技术(24)

光学参量仍属于三波耦合过程。一束高频泵浦激光，一束待振荡放大信号和产生的闲置光。

设平面波泵浦光频率为 $\omega_p = \omega_3$ ，复振幅为 $E_p(z)$ ；信号光频率为 $\omega_s = \omega_1$ ，复振幅为 $E_s(z)$ ；闲置光频率为 $\omega_i = \omega_2$ ，复振幅为 $E_i(z)$ 。分别用 $E_s(z)$ 、 $E_i(z)$ 和 $E_p(z)$ 替换三波耦合方程(B)中的 $E^{\omega 1}(z)$ 、 $E^{\omega 2}(z)$ 和 $E^{\omega 3}(z)$ ，则得参量过程的耦合波方程：

$$\begin{aligned}\frac{dE_s(z)}{dz} &= -i \frac{8\pi\omega_s^2 d}{k_s c^2} E_i^*(z) E_p(z) e^{i(k_p - k_i - k_s)z} \\ \frac{dE_i(z)}{dz} &= -i \frac{8\pi\omega_i^2 d}{k_i c^2} E_s^*(z) E_p(z) e^{i(k_p - k_i - k_s)z} \\ \frac{dE_p(z)}{dz} &= -i \frac{8\pi\omega_p^2 d}{k_p c^2} E_s(z) E_i(z) e^{i(k_i + k_s - k_p)z}\end{aligned}\quad (C)$$

光子技术(24)

将方程(C)中第一式对 z 微分，并用第二式的复共轭替换 $dE_i^*(z)/dz$ ，利用小信号近似，忽略泵浦光的变化，即 $dE_p(z)/dz = 0$ ，则可导出如下信号光满足的微分方程：

$$\frac{d^2 E_s(z)}{dz^2} - i\Delta k \frac{dE_s(z)}{dz} - \frac{8\pi\omega_s d}{n_s c} \frac{8\pi\omega_i d}{n_i c} |E_p(0)|^2 E_s(z) = 0$$

此齐次二阶常微分方程的解为：

$$E_s(z) = C_1 e^{s_1 z} + C_2 e^{s_2 z} \quad (D)$$

式中 C_1 、 C_2 为待定常数， $s_{1,2} = \frac{i\Delta k}{2} \pm g$ ， $g = \sqrt{\Gamma^2 - \Delta k^2/4}$ ，

$$\Gamma^2 = \frac{16\pi^2 \omega_s \omega_i d^2}{n_i n_s c^2} |E_p(0)|^2, \quad \Delta k = k_p - k_s - k_i$$

光电子技术(24)

利用边界条件: $E_s(z)|_{z=0} = E_s(0)$, $\frac{dE_s(z)}{dz}|_{z=0} = 0$

代入 (D) 式解得:

$$C_1 = \frac{E_s(0)}{2} \left(1 - \frac{i\Delta k}{2g}\right), \quad C_2 = \frac{E_s(0)}{2} \left(1 + \frac{i\Delta k}{2g}\right)$$

代入 (D) 式得参量放大信号为:

$$E_s(z) = E_s(0)e^{i\Delta k z/2} \left[\cosh(gz) - \frac{i\Delta k}{2g} \sinh(gz) \right] \quad (E)$$

参量信号的单次增益为:

$$G = \left| \frac{E_s(L)}{E_s(0)} \right|^2 - 1 = \Gamma^2 \frac{\sinh^2(L\sqrt{\Gamma^2 - \Delta k^2/4})}{(\Gamma^2 - \Delta k^2/4)} \quad (F)$$

讨论: (1) 当相位匹配时, 即 $\Delta k = 0$, 增益 $G = \sinh^2(\Gamma L)$ 。增益随 L 增加。小 L 相当于参量放大, 而大 L 则相当于参量振荡。

光电子技术(24)

(2) 相位不匹配量受到限制, $|\Delta k| < 2\Gamma = \frac{8\pi dE_p(0)}{\sqrt{n_s n_i \lambda_i \lambda_s}}$

泵浦光场 $E_p(0)$ 越弱, 要求相位匹配条件越严格。

二、相位匹配条件(共线)

相位匹配条件 $\Delta k = 0$ 为: $\frac{n_p}{\lambda_p} = \frac{n_i}{\lambda_i} + \frac{n_s}{\lambda_s}$

能量守恒: $\omega_p = \omega_s + \omega_i \Rightarrow \frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i}$

所以, 相位匹配条件为: $n_p = \frac{\lambda_i n_s + \lambda_s n_i}{\lambda_s + \lambda_i}$

1、负单轴晶体的相位匹配

光电子技术(24)

(1) 一类相位匹配

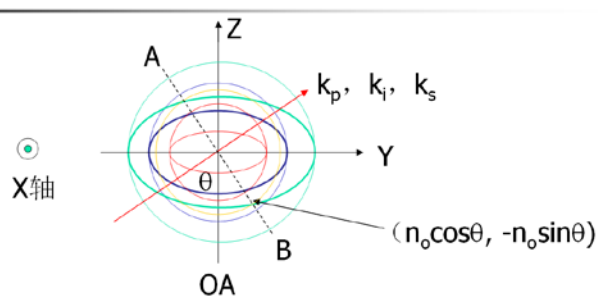
如图121所示, 当满足: $n_p^e \leq \frac{\lambda_i n_s^o + \lambda_s n_i^o}{\lambda_s + \lambda_i} = n_o$

可以实现 $e_p \rightarrow o_s + o_i$ 一类匹配。

泵浦e光的椭圆方程为: $\frac{z^2}{(n_p^e)^2} + \frac{y^2}{(n_p^o)^2} = 1$

代交点坐标: $y = n_o \cos \theta, \quad z = -n_o \sin \theta$ 入上式解得:

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{n_p^e}{n_o} \sqrt{\frac{(n_o)^2 - (n_p^o)^2}{(n_p^e)^2 - (n_p^o)^2}} \right]$$



$$\text{相位匹配条件: } n_p^e(\theta) = \frac{\lambda_i n_s^o + \lambda_s n_i^o}{\lambda_i + \lambda_s} = n_o$$

Fig.121 负单轴双折射晶体的泵浦、信号和闲置光的折射率椭球。

光电子技术(24)

式中
$$n_o = \frac{\lambda_i n_s^o + \lambda_s n_i^o}{\lambda_s + \lambda_i}$$

(2) 二类相位匹配

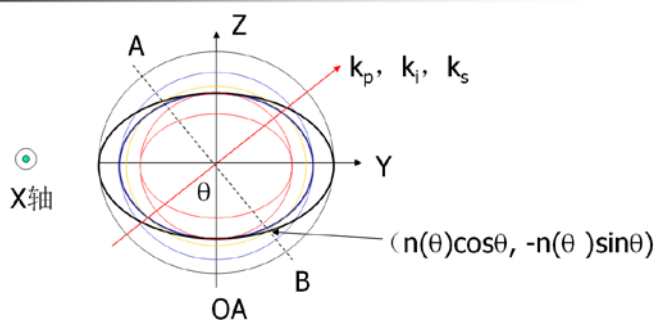
如图122所示, 当满足: $n_p^e \leq \max(\frac{\lambda_i n_s^o + \lambda_s n_i^e}{\lambda_i + \lambda_s}, \frac{\lambda_i n_s^e + \lambda_s n_i^o}{\lambda_i + \lambda_s})$

可以实现二类匹配 $e_p \rightarrow o_s + e_i$ or $e_p \rightarrow o_i + e_s$

此时的相位匹配角不能给出解析解, 必须用数字求解。

代交点坐标 $(n(\theta)\cos\theta, -n(\theta)\sin\theta)$ 入泵浦光椭圆方程得:

$$[n_p^e(\theta)]^2 \left[\frac{\cos^2 \theta}{(n_p^o)^2} + \frac{\sin^2 \theta}{(n_p^e)^2} \right] = 1 \quad (a)$$



相位匹配条件:
$$n_p^e(\theta) = \frac{\lambda_i n_s^e(\theta) + \lambda_s n_i^o}{\lambda_i + \lambda_s} = n(\theta)$$

Fig.122 负单轴双折射晶体的泵浦、信号和闲置光的折射率椭球。

光电子技术(24)

信号光椭圆方程:
$$\begin{cases} [n_s^e(\theta)]^2 \left[\frac{\cos^2 \theta}{(n_s^0)^2} + \frac{\sin^2 \theta}{(n_s^e)^2} \right] = 1 \\ n_p^e(\theta) = \frac{\lambda_s n_i^0 + \lambda_i n_s^e(\theta)}{\lambda_s + \lambda_i} \end{cases} \quad (b)$$

或闲置光椭圆方程:
$$\begin{cases} [n_i^e(\theta)]^2 \left[\frac{\cos^2 \theta}{(n_i^0)^2} + \frac{\sin^2 \theta}{(n_i^e)^2} \right] = 1 \\ n_p^e(\theta) = \frac{\lambda_s n_i^e(\theta) + \lambda_i n_s^0}{\lambda_s + \lambda_i} \end{cases} \quad (c)$$

数值求解(a)(b)或(a)(c)则可获得匹配角。

2、正单轴晶体的相位匹配

光电子技术(24)

(1) 一类相位匹配

如图123所示, 当满足:
$$n_p^o \leq \frac{\lambda_i n_s^e + \lambda_s n_i^e}{\lambda_s + \lambda_i}$$

可以实现一类相位匹配 $o_p \rightarrow e_i + e_s$

但此情况的相位匹配角不能给出解析解, 只能用数字求解如下三方程:

$$n_p^o = \frac{\lambda_s n_i^e(\theta) + \lambda_i n_s^e(\theta)}{\lambda_s + \lambda_i}$$

$$[n_s^e(\theta)]^2 \left[\frac{\cos^2 \theta}{(n_s^0)^2} + \frac{\sin^2 \theta}{(n_s^e)^2} \right] = 1$$

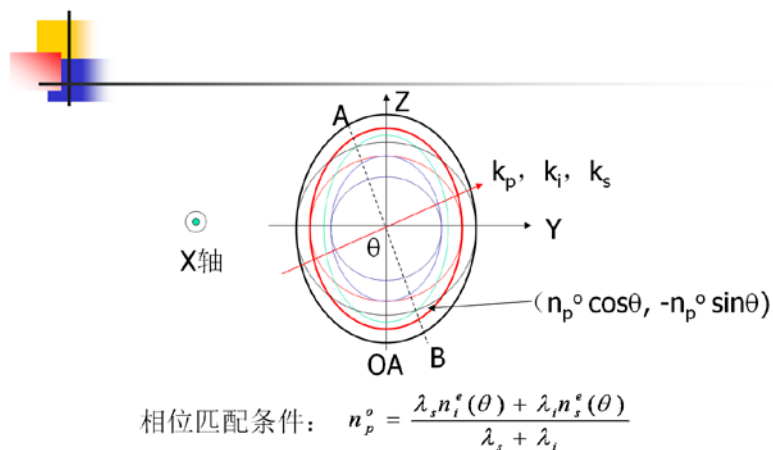


Fig.123 正单轴双折射晶体的泵浦、信号和闲置光的折射率椭球。

光电子技术(24)

$$[n_i^e(\theta)]^2 \left[\frac{\cos^2 \theta}{(n_i^o)^2} + \frac{\sin^2 \theta}{(n_i^e)^2} \right] = 1$$

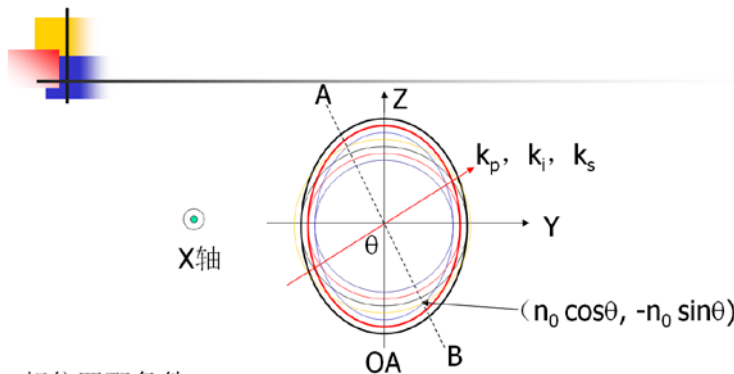
(2) 二类相位匹配

如图124所示, 当满足: $n_p^o \leq \max\left(\frac{\lambda_s n_i^e + \lambda_i n_s^o}{\lambda_s + \lambda_i}, \frac{\lambda_s n_i^o + \lambda_i n_s^e}{\lambda_s + \lambda_i}\right)$

时, 能够实现二类匹配 $o_p \rightarrow o_s + e_i, or, o_p \rightarrow e_s + o_i$

$o_p \rightarrow o_s + e_i$, 相位匹配条件:

$$n_p^o = \frac{\lambda_s n_i^e(\theta) + \lambda_i n_s^o}{\lambda_s + \lambda_i} \rightarrow n_i^e(\theta) = n_p^o + \frac{\lambda_i}{\lambda_s} (n_p^o - n_s^o) = n_0$$



相位匹配条件:

$$n_p^o = \frac{\lambda_s n_i^e(\theta) + \lambda_i n_s^o}{\lambda_s + \lambda_i} \rightarrow n_i^e(\theta) = n_p^o + \frac{\lambda_i}{\lambda_s} (n_p^o - n_s^o) = n_0$$

Fig.124 正单轴双折射晶体的泵浦、信号和闲置光的折射率椭球。

光电子技术(24)

将交点坐标 $(n_0 \cos \theta, -n_0 \sin \theta)$ 代入闲置光椭圆方程:

$$\frac{y^2}{(n_i^o)^2} + \frac{z^2}{(n_i^e)^2} = 1$$

解得相位匹配角:
$$\theta = \sin^{-1} \sqrt{\left| \frac{1}{(n_0)^2} - \frac{1}{(n_i^o)^2} \right| / \left| \frac{1}{(n_i^e)^2} - \frac{1}{(n_i^o)^2} \right|}$$

类似地, $o_p \rightarrow e_s + o_i$ 相位匹配条件:

$$n_p^o = \frac{\lambda_s n_i^o + \lambda_i n_s^e(\theta)}{\lambda_s + \lambda_i} \rightarrow n_s^e(\theta) = n_p^o + \frac{\lambda_s}{\lambda_i} (n_p^o - n_s^o) = n_0$$

将交点坐标 $(n_0 \cos \theta, -n_0 \sin \theta)$ 代入信号光椭圆方程:



光电子技术(24)

$$\frac{y^2}{(n_s^o)^2} + \frac{z^2}{(n_s^e)^2} = 1$$

§ 6.5 光学参量放大 (OPA)

光参量放大器由一块相位匹配的非线性晶体组成。

一、参量放大晶体设计

1、非线性晶体的选择

根据 (E) 式, 当满足相位匹配条件 $\Delta k=0$ 时, 参量放大增益为:



光电子技术(24)

$$G = \sinh^2(\Gamma L)$$

所以, 要选择 Γ 参数大的晶体, 而 Γ 正比于有效非线性系数 d , 所以要选高非线性系数的晶体。目前主要有 **BBO**, **KDP** 和 **LBO**

2、晶体匹配角与切割角

根据晶体类型确定匹配类型, 利用晶体色散关系计算出对所要求的泵浦和信号光波长的相位匹配角, 并切割晶体使泵浦、信号光近垂直入射。

3、晶体长度计算

当波矢方向不垂直光轴时, **e** 光的光线 (能量) 方向会偏离波矢方向, 称 **e** 光线与波矢之间的夹角为 **离散角**, 记为 α 。则特征长度为:

$$L_c = D/\alpha$$

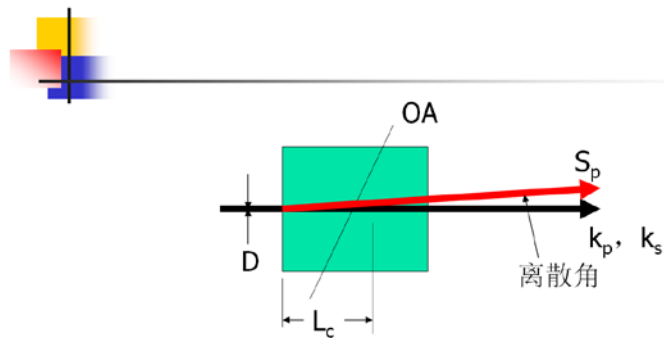


Fig.125 离散效应决定的晶体特征长度

光电子技术(24)

晶体长度通常取特征长度

二、参量放大器

共线参量放大器的结构如图126所示。通过偏振耦合器将泵浦光和信号(宽光谱)光共线耦合进晶体。然后,微调节晶体的角度,使相位匹配条件得到满足。出射端的泵浦、信号和闲置光可通过偏振和二色元件分离。

§ 6.6 光学参量振荡 (OPO)

光参量振荡是要实现信号光的相干放大,如同普通激光器中的受激辐射放大一样,从而获得高效率转换。

一、谐振腔设计

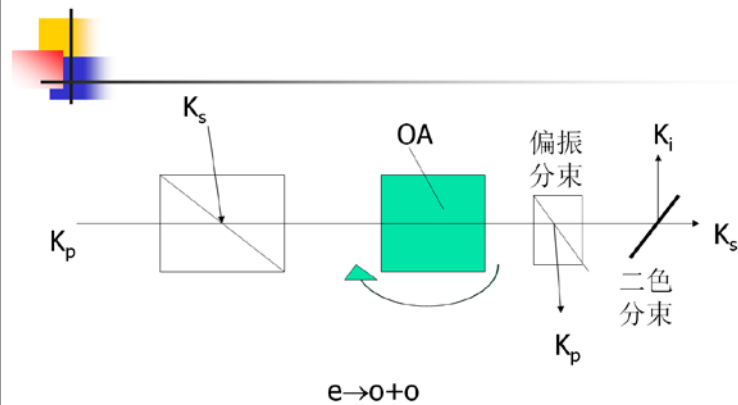


Fig.126 参量放大器结构

光电子技术(24)

腔长仍要满足相干迭加条件: $2L = m\lambda_s$

对于飞秒脉冲泵浦, 还要求实现同步泵浦放大。即要求振荡器中参量信号光脉冲的往返周期等于泵浦飞秒脉冲的重复周期, 保证每个泵浦脉冲能与参量信号脉冲在晶体上相遇。

二、参量晶体设计

与参量放大中的设计过程类似。

选择晶体类型, 计算相位匹配角, 按余角切割。表面镀膜等



光电子技术(24)

三、参量振荡器结构

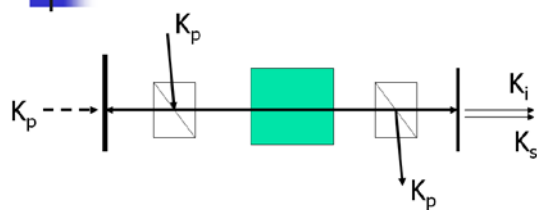
参量振荡器结构如图127所示。注意在参量振荡器中通常不需要设置信号光，而是利用晶体的自发辐射作为信号光。原则上，晶体能自发辐射任何波长的微弱光，当振荡器的增益足够时，就能放大满足相位匹配条件的微弱初始自发辐射。输出受激放大的激光。

1、单振荡参量振荡器

指谐振腔只对信号或闲置光之一提供增益放大、振荡。注意在振荡器中信号和闲置光没必要区分。



光电子技术(17)



$$e \rightarrow o + o$$

Fig.127 共线结构光学参量振荡器





复习要点

- 1、光学参量技术属于几阶非线性过程？光学参量的目的？
- 2、光学参量放大和振荡的异同？
- 3、光学参量过程的相位匹配如何实现，正、负单轴晶体能够实现哪种类型的相位匹配？
- 4、参量振荡、放大器的结构？



作业24

- 1、导出正单轴晶体二类相位匹配的相位匹配角公式？
- 2、光学参量过程与光学倍频过程的异同？

