



北京大学物理学院 李健通

非线性晶体中的二倍频与和频

吴熙楠

北京大学物理学院 学号: 1900011413*

(日期: 2023 年 3 月 5 日)

本实验中利用 $1.06\mu\text{m}$ 的 YAG 固体激光器和 KDP 倍频晶体对倍频现象进行了观察, 定量分析了相位匹配条件附近光强随着晶体角度的变化, 加深了对于相位匹配条件的认识. 实验中还对倍频的激光的波长进行了鉴定, 得到的波长确实为 $0.53\mu\text{m}$, 从而证实了得到绿色激光为倍频光.

关键词: 二倍频与和频; KDP 晶体; 相位匹配条件

* xinanwu@pku.edu.cn;

I. 引言

激光产生以后能产生的光强被极大提升了,这使得人们对于强光下光与物质相互作用的研究得以实现. 强光与物质相互作用中的一个效应是非线性效应,即会产生二倍频,三倍频,和频,差频等等效应,产生了许多应用. 本实验中便对于倍频现象进行观察以及对相位匹配条件进行定量分析,从而加深对于非线性效应的理解.

II. 理论

A. 非线性光学基础

激光与物质的非线性作用,可以写成极化强度矢量的表达式形式:

$$\vec{P} = \chi^{(1)} \vec{E} + \chi^{(2)} \vec{E} \vec{E} + \chi^{(3)} \vec{E} \vec{E} \vec{E} + \dots \quad (1)$$

当入射光的电场很小时,表达式1中的非线性项可以忽略,产生的偶极子实际上与电场成正比,这就是线性光学现象。但当入射光的电场较强时,非线性项不能再被忽略,因而可观测到产生的二次倍频、和频以及差频等现象,需要注意的是对于中心对称晶体或者各向同性晶体不会出现二阶非线性效应。但是想要观察到二阶非线性效应还需要满足波矢的相位匹配,如果相位匹配条件不满足,则非线性转换效率会变得很低无法观测到,在本次实验中我们使用的非线性晶体是 KTP(磷酸钛氧钾),利用角度调谐的方法调制相位匹配。

B. 相位匹配方法

极化强度与入射光强和非线性极化系数有关, 但与此同时, 相位匹配也对出射光强起着很大的作用.

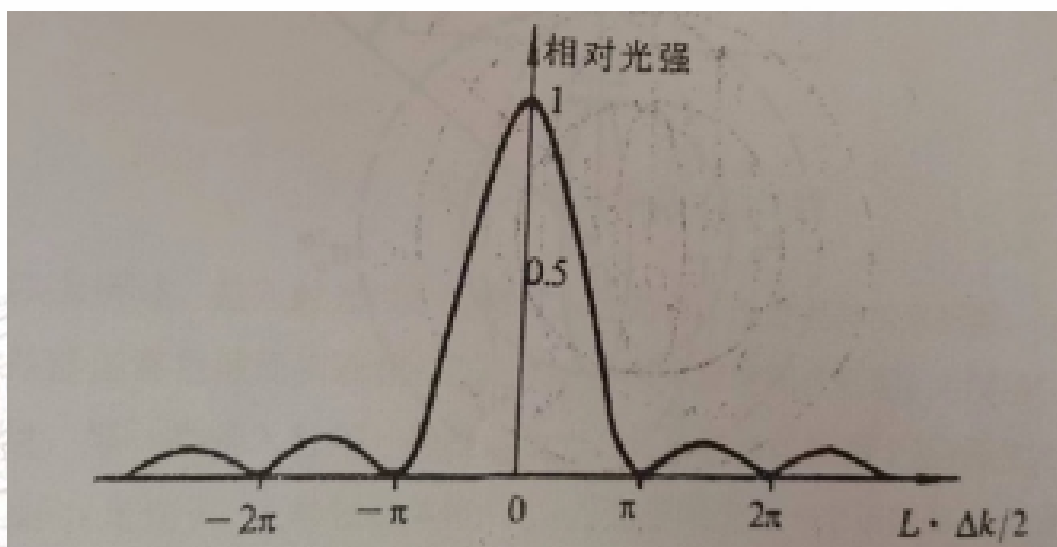


图 1: 倍频效率与 $\Delta kL/2$ 的关系

倍频转化效率推导可得: $\eta \propto \frac{\sin^2(\Delta kL/2)}{(\Delta kL/2)^2}$, 因而要获得最大的转换效率, 就要使 $\Delta kL/2 = 0$. 由于 $L > 0$, 因而要使得 $\Delta k = 0$, 即 $n^\omega = n^{2\omega}$, 即基频光与倍频光折射率相等的时候倍频光较强, 这称为相位匹配条件. 从物理上理解, 相位匹配条件就是让基频光在晶体中沿途个点激发的倍频光传播到出射面的时候具有同样的相位.

实现相位匹配条件的方法: 介质中一般存在正常色散效应, $n^{2\omega} - n^\omega$ 大约为 10^{-2} 量级. 而在各向异性介质中, 由于存在双折射, 可以利用不同偏振光之间的折射率关系, 实现相位匹配条件. 比如在负单轴晶体中, 折射率球面如图 2 所示, 在实线与虚线相交的地方即为基频光与倍频光折射率相等的地方. 所以光沿着与光轴成 θ_m 角度传播的时候, 基频光中 o 光的折射率可以和倍频光中 e 光的折射率相等, 从而实现相位匹配条件. θ_m 就称为相位匹配角. 在实验中往往就把晶体按特定方向切割, 使得晶面法向与光轴夹角即为相位匹配角.

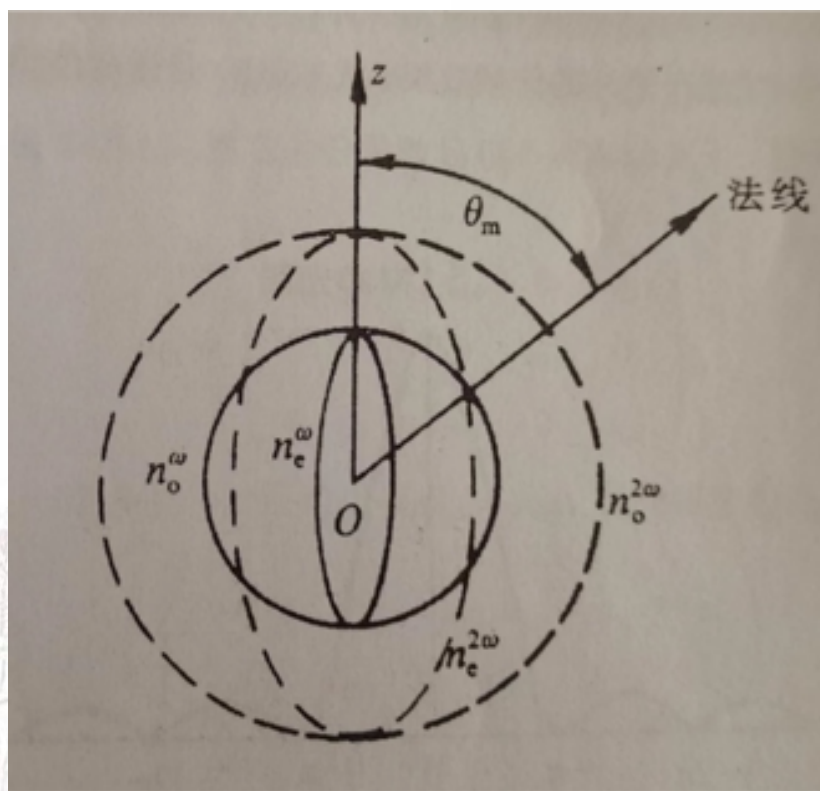


图 2: 负单轴晶体折射率球面示意图

相位匹配条件有两类. 第一类是入射同一种线偏振光, 然后负单轴晶体将两个基频 o 光光子转换成一个倍频的 e 光光子, 正单轴晶体将两个基频 e 光光子转换成一个倍频的 o 光光子. 第二类是将一个基频 e 光光子与一个基频 o 光光子转换为一个 e 光或者 o 光光子.

III. 实验装置

实验示意图如上图所示. 1 为 YAG 固体激光器, 产生 1060nm 红外激光, 其倍频后为 530nm 绿光激光. 2 为电源以及冷却系统. 3 为倍频拉杆, 杆推进去的时候会把倍频晶体加入到光路中, 从而产生 530nm 绿光. 4 为 KDP 二倍频负单轴晶体, 已经按一定角度切好, 光垂直于入射晶体表面的时候基本达到相位匹配条件, 实验中通过改

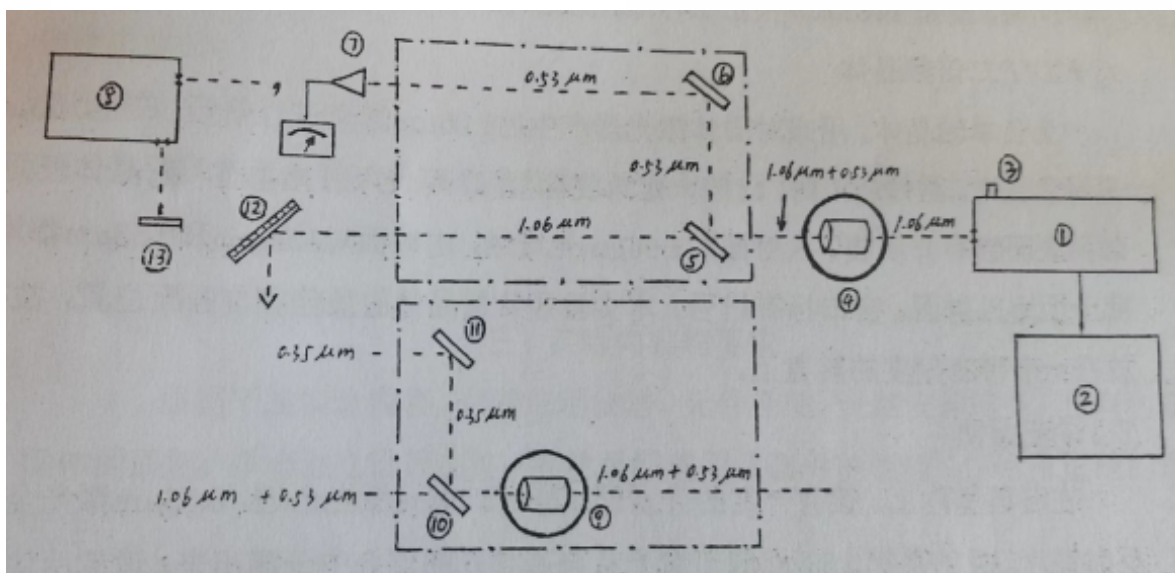


图 3: 实验装置示意图

变这块晶体的方向来观察相位匹配条件的影响; 晶体两面镀有膜, 入射面对 $1.06\mu m$ 增透, 出射面对 $1.06\mu m$ 和 $0.53\mu m$ 均增透. 5, 6 为反射镜, 对 $1.06\mu m$ 全透, 对 $0.53\mu m$ 全返, 用于分离出 $0.53\mu m$ 激光. 7 为功率计. 8 为单色仪, 用于对可见和紫外光进行波长鉴定. 9 为 KDP 三倍频负单轴晶体, 对 $1.06\mu m$ 和 $0.53\mu m$ 的光进行合频, 产生 $0.35\mu m$ 的紫外光. 10, 11 为反射镜, 对 $1.06\mu m, 0.53\mu m$ 全透, 对 $0.35\mu m$ 全返, 用于分离出 $0.35\mu m$ 激光. 12 为散射片, 终止激光. 13 为白纸屏, 用于观察绿色激光强弱.

实验中先测定二倍频实验中相位匹配条件的影响, 然后对倍频激光波长值进行标定.

光路搭建的时候, 出于方便, 应当在 YAG 激光器倍频拉杆产生 $0.53\mu m$ 可见绿光下进行. 光路搭建好之后, 中间部分就不再随意移动, 搬动拉杆使得激光器换至 $1.06\mu m$ 红外波段.

IV. 结果与分析

V. 结论

本实验中对相位匹配条件进行了定量测量, 在相位匹配角附近倍频光光强会随着小的角度偏移而大幅下降, 从而对相位匹配进行了验证. 实验中还利用单色仪对倍频后的激光波长进行了测量, 测量值为 $\lambda_{2\omega} = (530.48 \pm 0.10)nm$, 为 $1.06\mu m$ 激光波长的一半, 从而证实了其为倍频激光. 通过本实验, 加深了对于非线性效应的理解以及更加熟悉了搭光路的过程, 为以后进行类似的实验做了准备.

VI. 思考题

1. 欲获得 $0.35\mu m$ 的紫外激光, 为何采用 $1.06\mu m$ 和 $0.53\mu m$ 和频的方法, 而不是用对 $1.06\mu m$ 光直接三倍频的方法?

答: 因为三倍频的倍频效率要比两束光和频的效率要低很多, 因而如果直接三倍频光可能会很弱以至于探测不到.

2. 为满足三倍频晶体对输入光的偏振态的要求, 如何判定 $1.06\mu m$ 和 $0.53\mu m$ 两种光的偏振方向?

答: 利用一个偏振片, 对进入合频晶体前和从晶体出射的光偏振情况进行比较; 晶体要调到相位匹配角. 绿光应当只有一个偏振态, 红外光可能两个偏振的光都有. 如果红外光只有一个偏振态, 则若偏振片转动至某个角度的时候进入晶体前的光中既看不到绿光也用相纸检测不到红外光, 则两个光的偏振相同; 如果看不到红外光和看不到绿光的情形中偏振片相差 90° , 则两个光的偏振态不同. 如果红外光两个偏振态都有, 则比较进入晶体前和从晶体出射的光的偏振态. 如果红外光中和绿光相同偏振的光减弱了, 则合频所用的两光的偏振相同; 如果红外光中和绿光不同偏振的光减弱了, 则合频所用的两光的偏振不同.

3. 如何知道本实验的倍频为第二类相位匹配?

答: 利用一个偏振片, 对进入倍频晶体前和从晶体出射的光偏振情况进行比较; 晶体要调到相位匹配角. 红外光中应该是 o 光和 e 光都有, 而出射绿光应该只有一种偏振态. 如果经过晶体后, 红外光中和出射绿光相同偏振以及不同偏振的光都减弱了, 则倍频所用的两光的偏振不同, 为第二类相位匹配; 如果经过晶体后, 红外光中和绿光不同偏振的光明显减弱了, 而和绿光相同偏振的光相对而言没有明显减弱, 则合频所用的两光的偏振相同, 为第一类相位匹配条件.

4. 在用纸板接收 $0.35\mu\text{m}$ 的紫外激光的时候, 会看到有紫光和弱的绿光, 这紫光是不是就是紫外激光? 紫光和绿光各是什么原因产生的? 用单色仪能测量紫光波长吗? 为什么?

答: 紫光应该不是紫外激光, 可能是紫外光激发纸板上分子或灰尘产生的荧光; 绿光可能也有荧光的成分, 也可能是没被完全滤掉的绿色激光. 单色仪可以确定紫光波长, 但可能由于其太弱而使得信号太弱, 探测不到.

VII. 致谢

感谢我的合作伙伴杨轩同学, 他的工作是不可或缺的; 感谢耐心的胡小永指导老师对我们的巨大帮助。

[1] 北京大学物理学院光学所, 激光实验, 第二版, 北京: 北京大学物理学院, 2023.