

非线性光学二次谐波.预习报告

唐延宇, PB22030853, 20250330

实验目的

非线性光学所带来的倍频、和频、差频等技术在现代原子物理科研中地位举足轻重。本实验的目的即为理解非线性倍频的基本原理及转换效率的影响因素、掌握准相位匹配原理及其实现方法, 并分析倍频功率与基频功率的关系及温度调谐曲线。

实验原理

1. 二次谐波产生(SHG)基本机制

光场的感生极化场与所加电场存在如下关系

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E}_1 + \epsilon_0 \chi^{(2)} \mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 + \epsilon_0 \chi^{(3)} \mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 \mathbf{E}_3 + \cdots,$$

其中 $\chi^{(2)}$ 便是二阶极化张量, 只有在非中心对称介质中才会出现。因此, 我们一般用非线性系数 $d_{il} = \chi_{ijk}^{(2)}$ 来描述这种现象。对于光的倍频, 根据能量与动量守恒, 存在相位匹配条件:

$$\Delta k = k_{SH} - 2k_F = 0.$$

2. 准相位匹配(QPM)技术

准相位匹配技术通过周期性改变晶体中的极化方向来补偿倍频光与基频光在传播过程中的位相失配, 对于I型位相匹配, 其位相失配为 $\Delta k^I = k_{SHG} - k_F - \frac{2\pi}{\Lambda}$, 从而极化周期为

$$\Lambda = \frac{\lambda_F}{2(n_{SHG} - n_F)}.$$

倍频过程中有效非线性系数为

$$d_{\text{eff}} = \frac{2}{m\pi} d_{il} \quad (m = 1, 3, \cdots),$$

故而一阶准相位匹配效率最高。

3. 倍频功率与效率

- 高斯光泵浦下, 倍频功率可表达为:

$$P_{SH} = \frac{2\omega_F^2 d_{\text{eff}}^2 P_F^2 k_F L}{\pi n_F^2 n_{SH} \epsilon_0 c^3} \cdot h(B, \zeta), \quad \zeta = \frac{L}{b}, \quad b = \frac{2\pi n_F \omega_0^2}{\lambda_F} \quad \text{其中, } \omega_F, n_F, P_F, k_F \text{ 分别为基频}$$

- 倍频转换效率可定义为

$$\eta = \frac{P_{SH}}{P_F} \propto P_F \cdot L \quad \text{or} \quad \eta_{\text{norm}} = \frac{P_{SH}}{P_F^2 L}.$$

其中第二种定义进行了归一化，可用来比较不同非线性

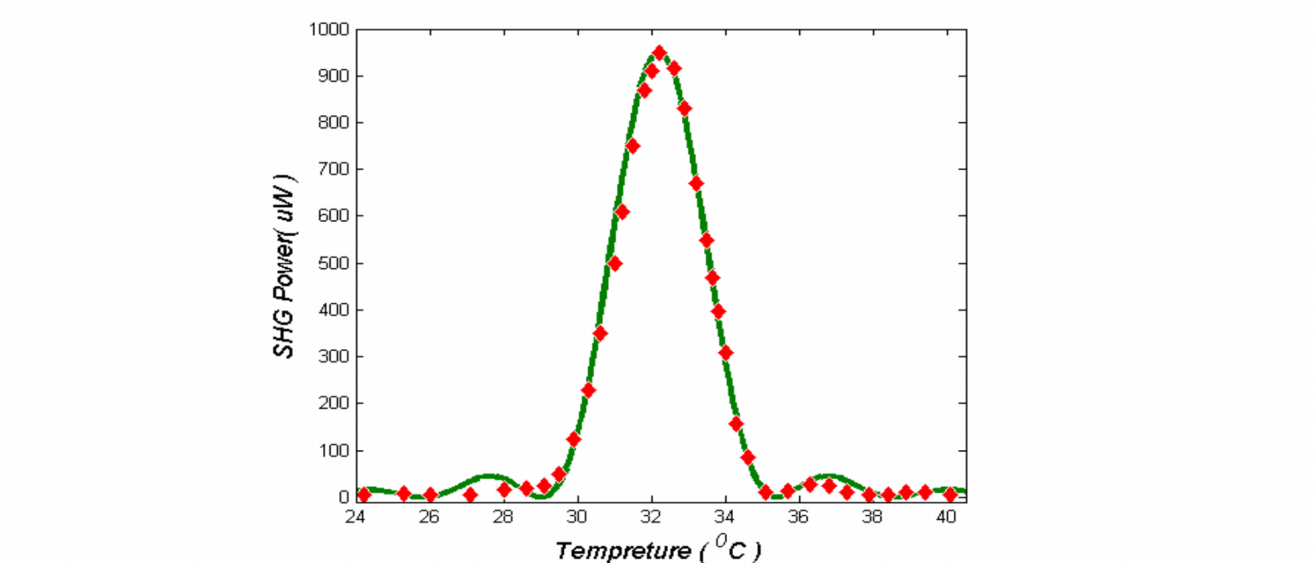
4. 温度调谐与带宽

- 温度接收带宽可写为

$$\Delta T_{\text{FWHM}} = \frac{0.4429\pi}{L} \left| \frac{\partial n_{SH}}{\partial T} \right|_{T=T_0} - \frac{\partial n_F}{\partial T} \Big|_{T=T_0} + \alpha(n_{SH} - n_F) \Big|^{-1}.$$

即为温度调谐曲线主峰的半

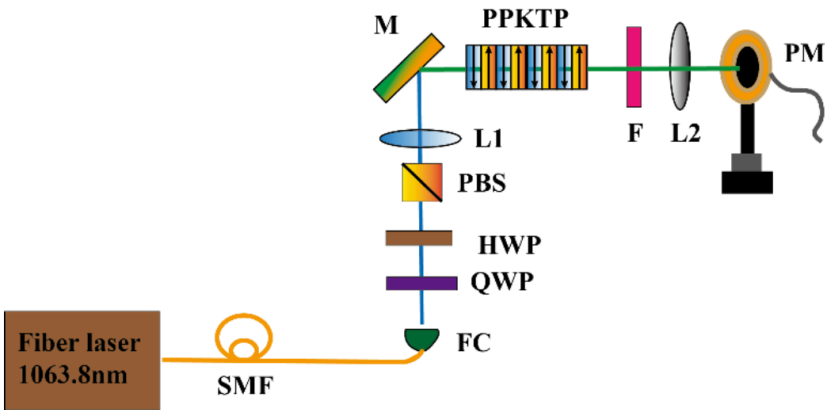
- 实验现象: 倍频功率随温度呈单峰曲线.



实验仪器

- 1064nm激光器
- 精密温度控制器
- 光功率计
- 光学元件(波片、透镜等)

实验步骤



1. 预热激光器与温控系统;
2. 调节波片, 改变入射光偏振, 使基频光功率最大化;
3. 调整晶体温度至倍频功率峰值;
4. 记录不同泵浦功率下的倍频功率;
5. 测量温度调谐曲线(倍频功率 vs. 温度).

非线性光学二次谐波产生实验

唐延宇* PB22030853

2025 年 4 月 7 日

摘要

本实验完成搭建了 1064 nm 光的倍频光路, 并测量了倍频功率随温度以及泵浦光功率的变化关系, 实现了对非线性光学效应的初步认识.

关键词: 非线性光学; 倍频; 准相位匹配

1 引言

1.1 实验目的

非线性光学所带来的倍频、和频、差频等技术在现代原子物理科研中地位举足轻重. 本实验的目的即为理解非线性倍频的基本原理及转换效率的影响因素、掌握准相位匹配原理及其实现方法, 并分析倍频功率与基频功率的关系及温度调谐曲线.

1.2 实验原理

二次谐波产生 (SHG) 基本机制 光场的感生极化场与所加电场存在如下关系

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E}_1 + \varepsilon_0 \chi^{(2)} \mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 + \varepsilon_0 \chi^{(3)} \mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 \mathbf{E}_3 + \cdots,$$

其中 $\chi^{(2)}$ 便是二阶极化张量, 只有在非中心对称介质中才会出现. 因此, 我们一般用非线性系数 $d_{il} = \chi_{ijk}^{(2)}$ 来描述这种现象. 对于光的倍频, 根据能量与动量守恒, 存在相位匹配条件:

$$\Delta k = k_{SH} - 2k_F = 0.$$

*近代物理系, 19942431972, yanyutang@mail.ustc.edu.cn

准相位匹配 (QPM) 技术 准相位匹配技术通过周期性改变晶体中的极化方向来补偿倍频光与基频光在传播过程中的位相失配, 对于 I 型位相匹配, 其位相失配为 $\Delta k^I = k_{SHG} - k_F - \frac{2\pi}{\Lambda^I}$, 从而极化周期为

$$\Lambda^I = \frac{\lambda_F}{2(n_{SHG} - n_F)}.$$

倍频过程中有效非线性系数为

$$d_{\text{eff}} = \frac{2}{m\pi} d_{il} \quad (m = 1, 2, 3, \dots),$$

故而一阶准相位匹配效率最高.

倍频功率与效率

- 高斯光泵浦下, 倍频功率可表达为:

$$P_{SH} = \frac{2\omega_F^2 d_{\text{eff}}^2 P_F^2 k_F L}{\pi n_F^2 n_{SH} \varepsilon_0 c^3} \cdot h(B, \zeta), \quad \zeta = \frac{L}{b}, \quad b = \frac{2\pi n_F \omega_0^2}{\lambda_F} \quad (1)$$

其中, ω_F, n_F, P_F, k_F 分别为基频光的角频率, 折射率, 功率以及波矢; d_{eff} 为有效非线性系数; n_{SH} 为倍频光在晶体中的折射率; L 为晶体长度, b 为光在晶体中瑞利长度的两倍, ζ 为归一化聚焦因子, B 为走离角参数. 可见, 倍频功率与基频功率平方成正比.

- 倍频转换效率可定义为

$$\eta = \frac{P_{SH}}{P_F} \propto P_F \cdot L \quad \text{or} \quad \eta_{\text{norm}} = \frac{P_{SH}}{P_F^2 L}.$$

其中第二种定义进行了归一化, 可用来比较不同非线性材料的倍频性能.

温度调谐与带宽

- 温度接收带宽可写为

$$\Delta T_{\text{FWHM}} = \frac{0.4429\pi}{L} \left| \frac{\partial n_{SH}}{\partial T} \right|_{T=T_0} - \frac{\partial n_F}{\partial T} \Big|_{T=T_0} + \alpha(n_{SH} - n_F) \Big|_{T=T_0}^{-1}.$$

即为温度调谐曲线主峰的半高全宽.

- 具体现象: 倍频功率随温度呈单峰曲线.

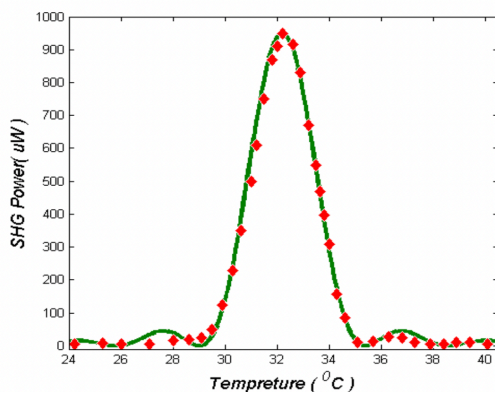


图 1: 倍频功率随温度变化曲线

2 实验仪器与步骤

2.1 实验仪器

实验中使用的主要仪器有：

- 1064nm 激光器
- 精密温度控制器
- 光功率计
- 光学元件(波片、透镜等)

2.2 实验步骤

实验所用光路图如图2所示, 大致步骤如下：

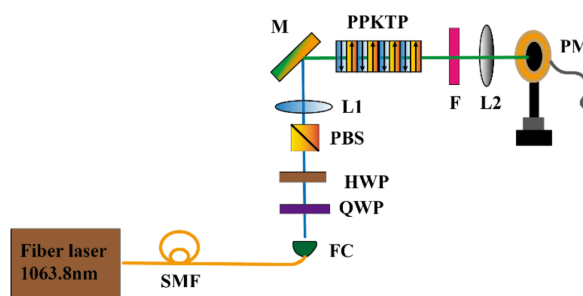


图 2: 实验光路

1. 预热激光器与温控系统;
2. 调节波片, 改变入射光偏振, 使基频光功率最大化;

3. 调整晶体温度至倍频功率峰值;
4. 记录不同泵浦功率下的倍频功率;
5. 测量温度调谐曲线(倍频功率 vs. 温度).

3 实验数据处理与分析

我们利用 Python 对实验得到的数据进行拟合处理, 得到了倍频激光功率与温度以及泵浦功率的关系, 结果分别如图3,4所示.

对于倍频功率随温度变化曲线的拟合, 我们采用了 $\text{sinc}(x) = \sin x/x$ 的非归一化定义, 最终拟合优度参数 $R^2 = 0.9967$, 说明拟合效果较好. 从图中可以看出, 峰中心大约在 $T = (23.83 \pm 0.05)^\circ\text{C}$ 附近, 此即为倍频晶体的最佳工作温度. 对于倍频功率随泵浦源功率变化曲线的拟合, 我们采用了二次函数拟合, 拟合优度 $R^2 = 0.9995$, 表明拟合效果非常好. 相比理论公式, 拟合结果出现了较大的 P_{SHG} 方向的截距平移, 猜测是由于光功率计测量不稳定, 或环境中存在杂散光, 以及光束质量仍可优化或晶体中存在损耗带来的.

本实验中, 倍频功率与温度的关系曲线可能存在一定误差, 这是由于在调节温度时, 环境温度存在变化, 可能对结果产生一定影响. 具体表现为, 在实验过程中, 当晶体的温度读数趋于稳定时, 倍频功率读数却存在一定程度的跳变.

4 思考题

1. 倍频功率的影响因素及与基频光功率的关系

根据式 (1), 倍频功率主要受相位匹配条件(准相位匹配周期)、光束聚焦条件(功率密度)、光学损耗(吸收、散射)等因素影响; 在理想相位匹配且无损耗情况下, 倍频功率与基频光功率的平方成正比.

2. I 类准相位匹配极化周期计算

根据公式

$$\Lambda^I = \frac{\lambda_F}{2(n_{SHG} - n_F)}$$

即可计算晶体的极化周期, 具体到 $780\text{ nm} \rightarrow 390\text{ nm}$, 查阅资料^[1]可知, 此时 $n_F = 1.85$, $n_{SHG} = 1.95$, 从而极化周期为

$$\Lambda^I = \frac{780\text{ nm}}{2(1.95 - 1.85)} = \frac{780\text{ nm}}{0.2} = 3.9\text{ }\mu\text{m}.$$

^[1][URL: Refractive Index Database](#)

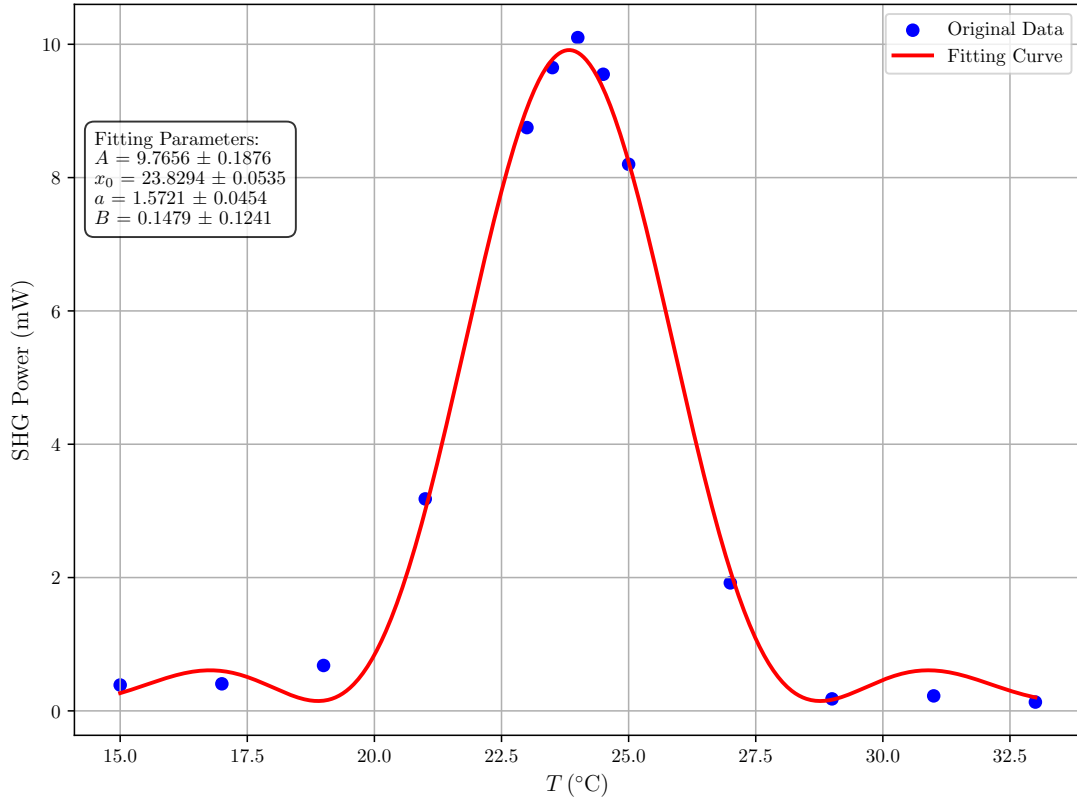


图 3: $P_{SH} = A \text{sinc}^2\left(\frac{T-x_0}{a}\right) + B$, $R^2 = 0.9967$

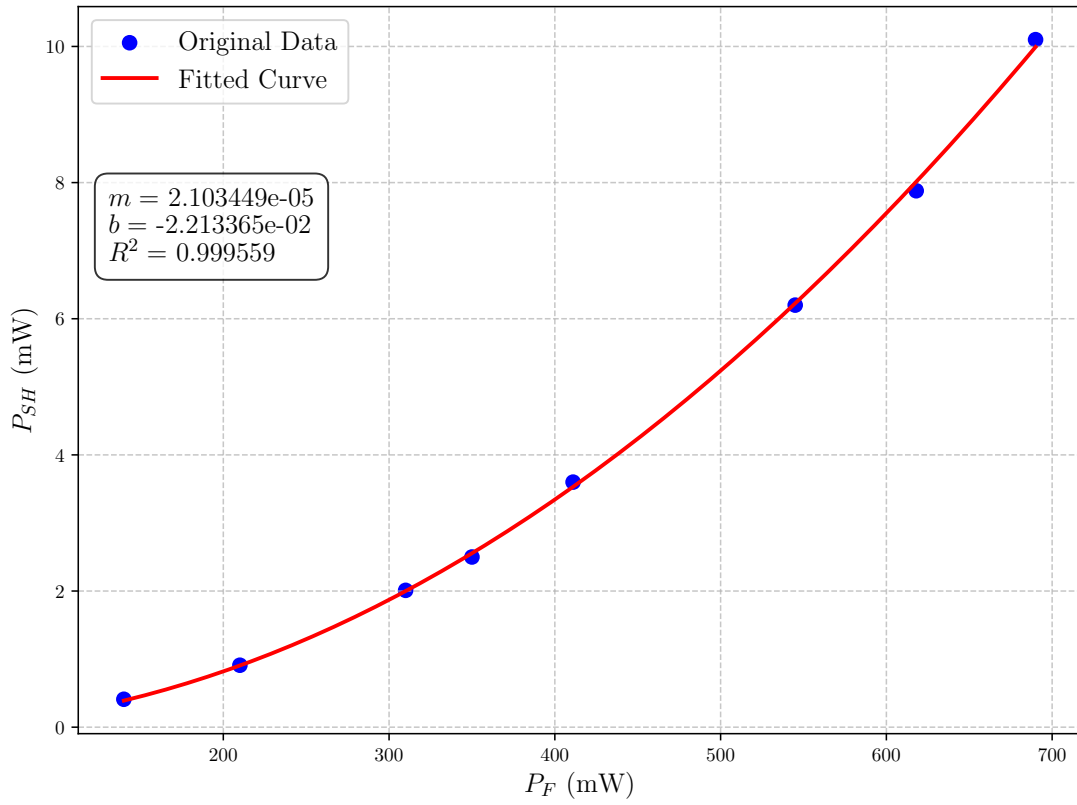


图 4: $P_{SH} = mP_F^2 + b$

3. 倍频功率与温度的关系

温度通过热光效应改变晶体的折射率, 进而通过改变 Δk 导致相位失配, 从而影响倍频功率. 倍频功率随温度以 sinc^2 形式变化. 具体测量温度带宽时, 需要固定泵浦光频率等其他变量, 然后改变温度, 绘出倍频功率随温度变化的曲线, 再拟合之后取曲线的半高全宽即得.

4. 提升单次通过倍频转换效率的方法

主要可通过如下手段提高转换效率:

- 优化相位匹配: 调整温度或极化周期;
- 增加晶体长度 (需平衡走离效应);
- 提高基频光功率密度 (如聚焦光束, 避免损伤晶体);
- 使用高非线性系数材料 (如 PPKTP);
- 准相位匹配设计: 利用周期性极化提升有效非线性系数;
- 优化光束质量: 减少波前畸变, 提高模式匹配.

参考文献

- [1] 中国科学技术大学物理实验教学中心. 非线性光学二次谐波产生实验讲义. url: <http://pems.ustc.edu.cn/>