声光效应

实验者: 周文斌 (　　)　焦润泽 (　　)　指导老师: 李俊韬
中山大学物理学院，陆达理堂

摘　要: 声光效应是光与声波在透明介质中相互作用的核心物理现象，基于该效应的声光器件可实现对激光束强度、方向、频率的快速调控，是激光技术、光通信、激光雷达等领域的核心功能器件。本实验系统开展声光效应的实验研究，采用半导体激光器、二氧化碲/铌酸锂声光器件、超声波功率信号源、示波器等核心仪器，完成了 Bragg 衍射与 Raman-Nath 衍射的观测区分、核心特性测量与理论验证，同时开展了声光模拟通信应用实验。实验结果表明：Bragg 衍射偏转角与超声波频率呈现极强的线性相关性，拟合优度 $R^2 = 0.9980$，计算得到二氧化碲声光晶体横波声速约 2321 m/s，与理论参考值高度吻合；测得实验用声光器件中心频率 91.34 MHz、工作带宽 26.06 MHz、Bragg 衍射最大效率 74.8%，均符合商用声光器件的典型性能范围；Raman-Nath 衍射 ±1 级偏转角与频率的线性拟合优度均在 0.96 以上，1 级衍射最大效率约 5%，远低于 Bragg 衍射，完美验证了两类衍射的理论差异；声光模拟通信实验验证了 0 级衍射光与发射信号同相、1 级衍射光反相的相位特性，观测到通信质量随超声波功率增大而提升的规律。本实验系统验证了声光效应的核心理论，明确了 Bragg 衍射与 Raman-Nath 衍射的本质区别，完成了声光器件核心性能参数的精准测量，实现了声光效应的应用验证，实验流程规范、数据可靠，可为声光器件的研究与应用提供完整的实验支撑。

关键词：声光效应; Bragg 衍射; Raman-Nath 衍射; 声光器件; 衍射效率; 声速测量; 声光通信 -

引言: 超声波在介质中传播时，可引起介质光折射率的周期性调制，形成所谓“声光栅”。光通过存在声光栅的介质，将导致光传播方向的偏转（声光衍射）和衍射光强的调制；又由于声光栅以声速在介质中运动，会引起衍射光的频率相对于入射光产生特定的频移，这种现象称之为声光效应。

利用声光效应制成的声光器件，能快速有效地控制激光束的强度、方向和频率，还可把电信号实时转换为光信号。此外，声光衍射效应还是探测材料声学性质的主要手段。1922 年 Brillouin 对声光效应作了预言；1932 年美国的 Debye 和 Sears、法国的 Lucas 和 Biquard 独立地作了实验验证；1935 年 Raman 和 Nath 对声光互作用理论作了解析讨论，奠定了声光学的理论基础。

激光器的问世为声光效应的研究提供了理想的光源，促进了声光效应的理论和应用研究的迅速发展；而 $LiNbO_3$、TeO_2 等优秀人工晶体的成功生产，为声光器件的发展和应用推广提供了有利条件。近 30 年来，声光器件已广泛应用于各类激光领域，主要用途包括：制作声光调制器件、声光偏转器件、声光调 Q 开关、可调谐滤光器，以及在光信号处理和集成光通讯方面的应用。

1 实验目的

1. 理解声光效应的物理原理，明确 Raman-Nath 衍射和 Bragg 衍射的区别与产生条件；
2. 测量声光器件的衍射效率、中心频率和带宽等核心性能参数；
3. 完成声光模拟通信实验，理解声光效应在光通信中的应用原理。

2 仪器用具

本实验所用核心仪器包括：半导体激光器、声光器件及转角平台、超声波功率信号源、频率计、光强仪、示波器、光具座、支架、导线等附件。

声光器件分为两类：

1. 体声光器件：声波和光波均在介质体内传播，声光互作用介质和压电换能器通过真空冷压焊工艺粘合在一起，本实验采用的声光介质为铌酸锂晶体，折射率 $n = 2.386$；
2. 表面声光器件：声波为沿介质表面传播的声表面波，光波为平面波导中的导光波，衬底材料需同时具备声光效应与压电效应，常用 Y 切铌酸锂。

其他核心参数：半导体激光器波长为 650nm，二氧化碲声光晶体折射率 $n = 2.26$。

3 实验原理

3.1 声光效应的物理本质——光弹效应

介质的光学性质通常用折射率椭球方程描述：

$$\eta_{ij}x_i y_j = 1 \tag{1}$$

其中系数 $\eta_{ij} = (n^2)_{ij}^{-1}$，$i,j = 1,2,3$，$\eta_{ij}$ 是介质介电张量的逆张量，为对称二阶张量。介质中存在声场时，介质内部受到应力发生声应变，从而引起介质光学性质的变化，反映在介质光折射率或折射率椭球方程系数的变化上。在一级近似下，折射率变化量与应变成正比：

$$\Delta\eta_{ij} = P_{ijkl}S_{kl} \quad i,j,k,l = 1,2,3 \tag{2}$$

其中 P_{ijkl} 是介质的四阶弹光张量，该效应即为著名的 Pockels 效应。

仅考虑各向同性介质中声纵波的情况，折射率 n 和光弹系数 P 均可看作常量，式(2)可简化为：

$$\Delta\eta = \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right) = PS \tag{3}$$

其中沿 x 方向传播的声应变波为 $S = S_0\sin(kx - \Omega t)$，$S_0$ 是应变的幅值，$k = \Omega/v_s$ 是介质中声波数，$\Omega = 2\pi f$ 为声波角频率，v_s 为介质中声速，$\Lambda = v_s/f$ 为声波长；P 为光弹系数，表示单位应变引起的 $(1/n^2)$ 的变化。

由此可推导得到声致折射率变化：

$$\Delta n = \frac{1}{2}n^3 PS_0\sin(kx - \Omega t) = \mu\sin(kx - \Omega t) \tag{4}$$

其中 $\mu = \frac{1}{2}n^3 PS_0$ 为声致折射率变化的幅值。

压电换能器将驱动电信号 $U(t)$ 转换为声信号，入射平面波与声波在介质中相遇，当光通过线度为 l 的声光互作用介质时，其相位改变为：

$$\Delta\phi(x) = n(x)k_0 l = \Delta\phi_0 + \mu k_0\sin(kx - \Omega t) \tag{5}$$

其中 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为真空中光波数，λ_0 是真空中的光波长，$\Delta\varphi_0 = nk_0 l$ 为光通过无超声波介质后的位相滞后，$\mu k_0\sin(kx - \Omega t)$ 为超声波引起的光附加位相延迟。该附加位相在 x 方向周期性变化，形成“位相光栅”，使光波阵面由平面变为周期性的“位相绉折”，从而改变光的传播方向产生衍射，同时衍射光强受到声调制。

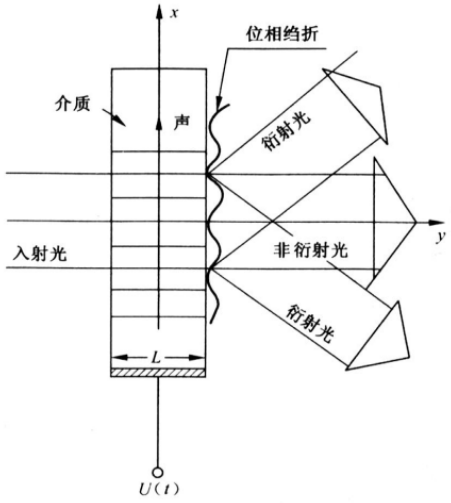


图 1: 超声波引起的位相光栅对入射光的衍射

3.2 声光光偏转和光频移

从量子力学观点，可将入射单色平面光波近似为动量为 $\hbar\vec{k}_i$、能量为 $\hbar\omega_i$ 的光子，将超声波看作动量为 $\hbar\vec{K}$、能量为 $\hbar\Omega$ 的声子，其中 $\hbar = h/2\pi$ 为约化普朗克常数。声光互作用可归结为光子和声子的弹性碰撞，需遵守动量守恒和能量守恒定律，前者导致光偏转，后者导致衍射光频移。

碰撞存在两种过程：声子吸收过程与声子受激发射过程，对应的动量与能量守恒关系为：

$$\vec{k}_{d\pm} = \vec{k}_i \pm \vec{K} \tag{6}$$

$$\omega_{d\pm} = \omega_i \pm \Omega \tag{7}$$

其中“$+$”对应声子吸收过程，衍射光频率上移；“$-$”对应声子受激发射过程，衍射光频率下移。

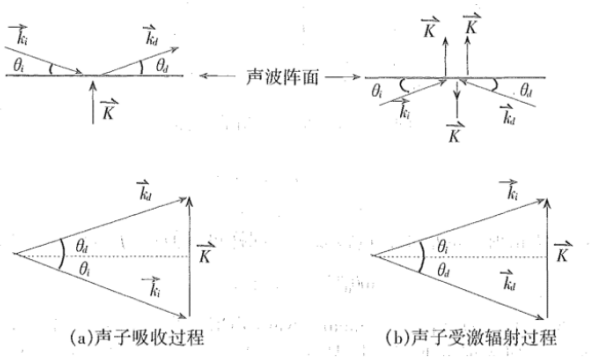


图 2: 声子的吸收过程和受激发射过程

声光效应可分为两类：

1. 正常声光效应：入射光和衍射光处于相同偏振状态，折射率相同 $n_d = n_i = n$，为本次实验主要研究内容；
2. 反常声光效应：入射光与衍射光偏振状态不同，对应 o 光与 e 光的转换。

在正常声光作用下，$k_i = k_d = nk_0$，动量守恒关系构成等腰三角形，可得 $\theta_i = \theta_d = \theta_B$，其中 θ_B 称为 Bragg 角，满足：

$$sin\theta_B = \frac{\lambda}{2\Lambda} = \frac{\lambda_0}{2nv_s}f \tag{8}$$

该式即为 Bragg 条件，与 X 光晶格衍射的 Bragg 定律形式一致。

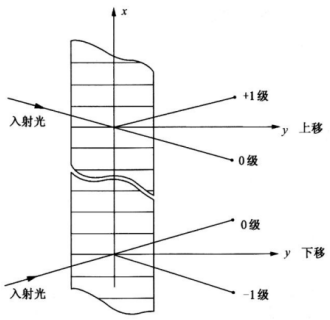


图 3: Bragg 衍射示意图

满足 Bragg 条件时，衍射光相对于入射光的偏转角为：

$$\alpha = \theta_i + \theta_d = 2\theta_B \approx \frac{\lambda}{\Lambda} = \left(\frac{\lambda_0}{nv_s}\right)f \tag{9}$$

偏转角与声频的变化关系为：

$$\Delta\alpha = \left(\frac{\lambda_0}{nv_s}\right)\Delta f \tag{10}$$

其中 Δf 为声频变化范围，$\Delta\alpha$ 为衍射光扫过的角度。通常将衍射光强从极大值两侧下降到 $1/\sqrt{2}$ 对应的频带宽度定义为 Bragg 带宽，记作 Δf_B。

另一类衍射为 Raman-Nath 衍射，对应一个入射光子连续与多个声子相互作用的情形，其衍射光频率满足：

$$\omega_d^{(m)} = \omega_i + m\Omega \tag{11}$$

其中 m 为衍射级次，取正负整数。衍射角满足：

$$sin\theta_d^{(m)} = sin\theta_i + m\frac{\lambda}{\Lambda} \tag{12}$$

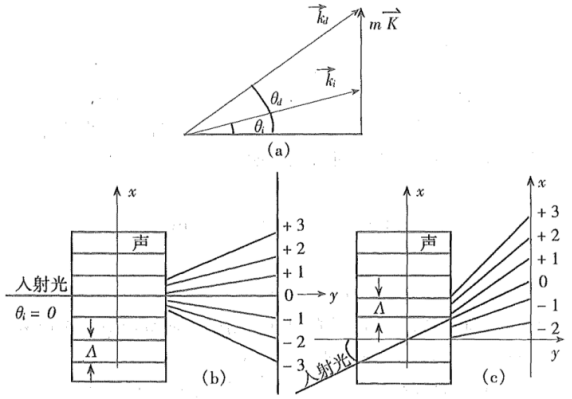


图 4: Raman-Nath 衍射示意图 (a) 多声子作用 (b) 垂直入射对称衍射 (c) 斜入射非对称衍射

两类衍射的核心区别：

- Raman-Nath 衍射：超声频率较低、声光作用长度 L 较小，光线平行于声波面入射（垂直于声场传播方向），声波等效为平面相位光栅，产生对称多级衍射；
- Bragg 衍射：超声频率较高、声光作用长度 L 较大，光束与声波面以一定角度斜入射，介质等效为体光栅，仅存在 0 级和 1 级衍射光，衍射效率更高。

3.3 衍射效率

衍射效率定义为衍射级次光强与入射光强的比值，是声光器件的核心性能参数。

在 Raman-Nath 近似下，第 m 级衍射效率为：

$$\eta_R^{(m)} = \frac{I_m}{I_0} = J_m^2\left\{2\zeta L\,\mathrm{sinc}\left[\frac{KL}{2\cos\theta_i}\left(\sin\theta_i + m\frac{K}{k}\right)\right]\right\} \tag{13}$$

其中 J_m 为 m 阶贝塞尔函数，E_0 为入射光振幅。Raman-Nath 衍射为对称多级衍射，根据贝塞尔函数特性，其一级衍射光强的极大值仅为入射光强的 34% 左右。

Bragg 衍射的产生条件为：

$$\frac{K^2L}{2k} \gg \pi \quad 或 \quad \frac{\lambda L}{\Lambda^2} \gg 1 \tag{14}$$

此时仅存在 0 级和 1 级衍射光，严格 Bragg 衍射下的衍射效率为：

$$\eta_B = \sin^2(\zeta L) \tag{15}$$

进一步推导可得衍射效率与声功率的关系：

$$\eta_B = sin^2\left[\frac{\pi}{\sqrt{2}\lambda_0 cos\theta_i}\sqrt{M_2 P_a \frac{L}{H}}\right] \tag{16}$$

其中 M_2 为声光品质因数，是介质的固有物性常数；P_a 为声功率；L/H 为压电换能器的长宽比。

由上式可知，对一定的声功率，为提高衍射效率，应选用 M_2 大的声光材料，并增大换能器的长宽比 L/H。当宗量为 $\pi/2$ 时，$\eta_B = 100\%$，实际器件中 Bragg 衍射效率可达 60% 以上，远高于 Raman-Nath 衍射，因此实用声光器件多工作在 Bragg 区。

4 实验内容及步骤

1. 光路准直与器件连接：认真阅读声光效应仪说明书，正确连接各个部件，准直光路，调节激光器和声光晶体至 Bragg 衍射最佳位置。

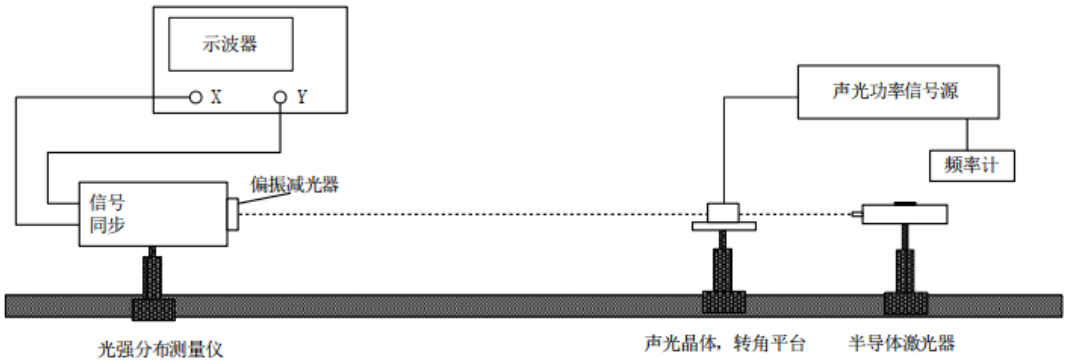


图 5: 声光效应实验安装示意图

2. 两类衍射的观测与对比：根据原理描述，分别调出 Raman-Nath 衍射和 Bragg 衍射，初步对比两种衍射的产生条件和衍射特点。

3. 示波器定标：用示波器测量衍射角前，完成“定标”操作，确定示波器 X 方向 1 格对应 CCD 器件的像素数与实际空间距离。

4. Bragg 衍射参数测量：固定超声波功率，改变超声波频率 f_s，记录 1 级衍射光最强时，1 级衍射光相对于 0 级透射光的偏转角 ϕ。测量 10 组 (ϕ, f_s) 值，计算介质中的声速 v_s；同时确定声光器件的中心频率（1 级衍射光最强对应的频率）和带宽（衍射光强从极大值两侧下降到 1/2 对应的频带宽度）。注意：实测偏转角为空气中的角度，需根据折射定律换算为介质内的 Bragg 角。

5. Bragg 衍射效率测量：将超声波频率固定在中心频率，调节晶体角度满足 Bragg 衍射条件，测量衍射光强度与超声波驱动电流的关系曲线，测定 Bragg 衍射下的最大衍射效率 $\eta = I_1/I_{all}$，其中 I_{all} 为未发生声光衍射时 0 级光的强度（或衍射后 0 级与 1 级光强之和），I_1 为 1 级衍射光强度。

6. Raman-Nath 衍射参数测量：光束垂直入射，调节至 +1 级与-1 级衍射强度相等，将电流调至最大值，完成两组测量：1. 测量 ±1 级衍射光的效率与频率的依赖关系；2. 测量 ±1 级衍射角 θ_m 与频率的依赖关系，每组实验测量 10 个以上数据点。

7. 两类衍射效率对比：选取 Raman-Nath 衍射效率最高对应的频率，测量 ±1 级衍射效率与驱动电流的依赖关系，与 Bragg 衍射的衍射效率进行对比，实验测量 10 个以上数据点。

8. 斜入射 Raman-Nath 衍射测量：选取衍射效率最高对应的频率，将电流调至最大值，记录偏离垂直入射时，±1 级和 ±2 级衍射光的衍射效率及对应的晶体旋转角度，选择 1-2 个旋转角度完成测量。

9. 声光模拟通信实验：按示意图搭建声光模拟通信光路，分别观测接收 0 级和 1 级衍射光信号时，示波器上的波形，与发射器波形对比，判断同相/反相关系；改变超声波功率，观察模拟通信接收器的声音变化，分析物理原因。

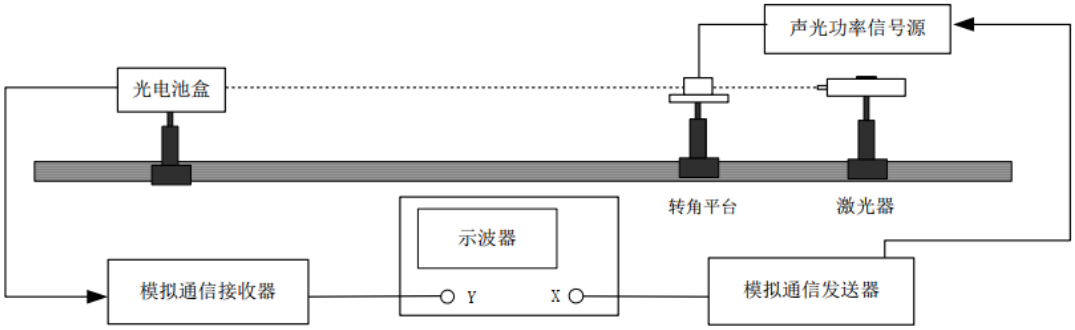


图 6: 声光模拟通信实验安装示意图

10. 实验收尾：实验完成后，关闭所有仪器电源，整理实验元件与桌面，将配件放回原位。

5 实验数据处理与结果分析

5.1 示波器定标与空间距离校准

首先准直光路，确认光路准直后，测量空间距离，测量得出晶体前表面到 CCD 距离为

$$L = 41.9cm$$

观察仪器上系数得

$$l = 29.7mm$$

而由距离关系

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{x}{l} \tag{17}$$

可得到

$$x = \frac{l\Delta t}{T} \tag{18}$$

而偏转角，由于角度很小 (L»x) 近似为

$$\phi \approx \sin\phi \approx \tan\phi \approx \frac{x}{L} = \frac{l}{LT}\Delta t \tag{19}$$

而由 Snell 公式

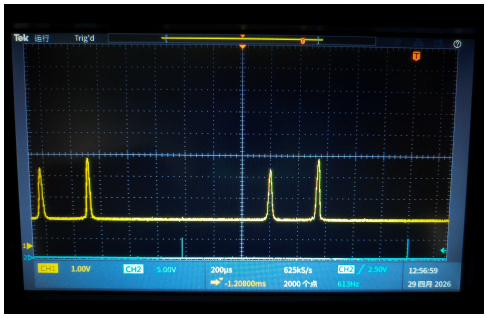
$$\sin\phi = n\sin\theta_B$$

由于角度很小，可做近似为

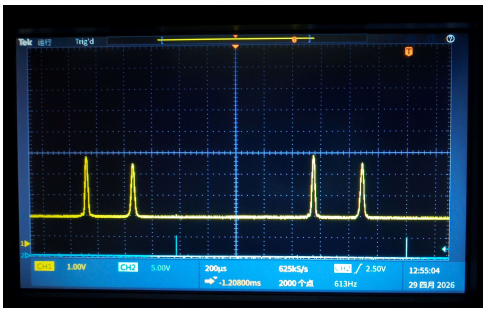
$$\theta_B \approx \sin\theta_B = \frac{\sin\phi}{n} \approx \frac{l}{nLT}\Delta t \tag{20}$$

5.2 Bragg 衍射与 Raman-Nath 衍射的现象对比

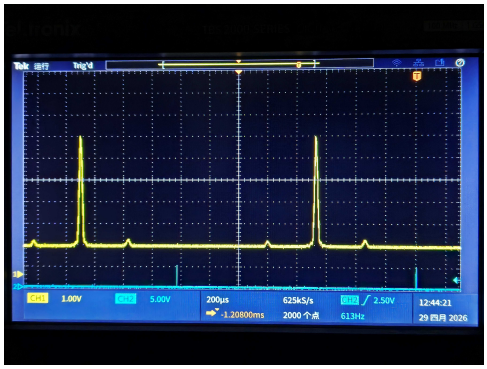
分别调出 Raman-Nath 衍射和 Bragg 衍射，观察两种衍射为:



(a) Bragg 衍射 (左)



(b) Bragg 衍射 (右)



(c) Raman-Nath 衍射

图 7: Bragg 衍射与 Raman-Nath 衍射的示波器波形对比

Bragg 衍射是在晶体倾斜至满足 Bragg 条件的特定角度时产生的，其 1 级衍射光强达到峰值，对应衍射效率达到最高，本质是声波形成的体光栅布拉格衍射，即单光子与单声子发生一对一的动量与能量守恒作用；对于 Raman-Nath 衍射，若考虑垂直入射，是在晶体入射面与入射光完全垂直时产生的，其衍射级次沿 0 级左右对称分布，光强随级次升高快速衰减，本质是单光子与多个声子发生连续碰撞作用的平面相位光栅衍射。

5.3 固定功率下 Bragg 衍射随频率变化测量与计算

在 Bragg 衍射实验中测得

$$T = 1.63ms$$

，根据之后测出的 Δt，代入式19和20，就可算出要求的空气中的和介质中的偏转角，而衍射效率可依据公式

$$\eta = \frac{I_0}{I_{all}} = \frac{I_0}{I_0 + I_1} \tag{21}$$

算出

固定超声波功率 (电流计数 =80mA)，经实验测出数据并计算得到表1：

表 1: Bragg 衍射偏转角 ϕ 与超声波频率 f_s 测量数据

超声波频率 f_s/MHz	时间间隔 $\Delta t/\mu$s	0 级峰光强/V	1 级峰光强/V	偏转角 ϕ	衍射效率 η
78.423	268	3.44	2.44	0.011654	0.415
81.500	276	2.92	2.84	0.012002	0.493
87.126	300	2.02	3.44	0.013046	0.630
91.539	308	1.68	3.56	0.013394	0.679
96.573	328	2.08	3.40	0.014264	0.620
102.170	344	3.12	2.76	0.014959	0.469
106.210	356	5.64	3.00	0.015481	0.347
111.820	376	5.40	1.68	0.016351	0.237
116.630	388	4.96	1.04	0.016873	0.173
121.340	408	4.88	0.84	0.017743	0.147

得到数据后编写代码，使用 Listing1中的 Matlab 代码处理数据，得到图8，图9

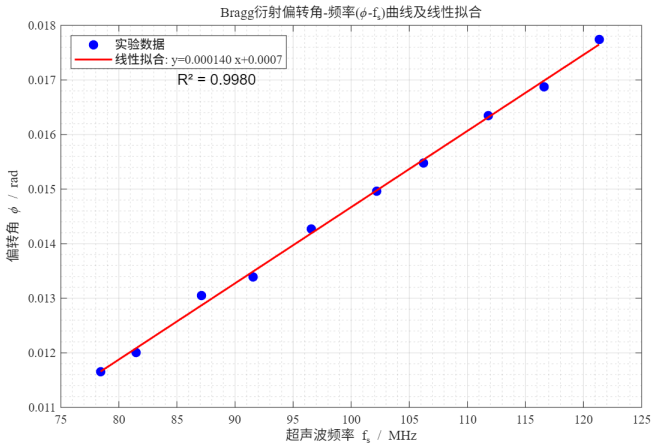


图 8: Bragg 衍射偏转角与超声波频率关系

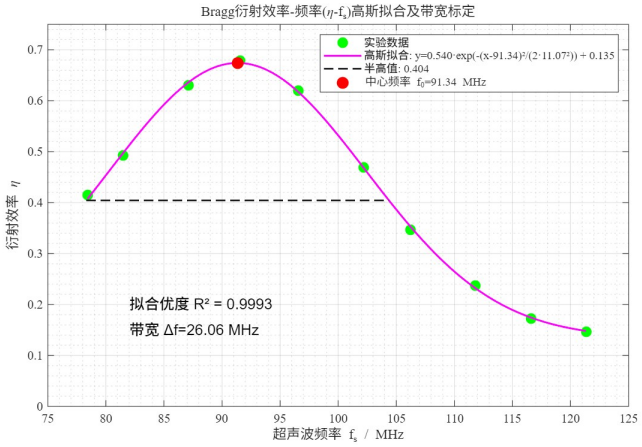


图 9: Bragg 衍射衍射效率与超声波频率关系

Bragg 衍射参数测量与声速计算 根据实验测量的 10 组 (ϕ, f_s) 数据，进行线性拟合得到偏转角与超声波频率的关系：

$$\phi = 0.000140 \cdot f_s + 0.0007 \tag{22}$$

拟合优度 $R^2 = 0.9980$，线性关系显著，符合 Bragg 衍射偏转角与频率成正比的理论预期。

我们利用拟合结果对声速进行计算，根据讲义 Bragg 条件 (8) 式，结合小角度近似，拟合曲线的斜率 k 满足：

$$k = \frac{\phi}{f_s} \approx \frac{\sin\phi}{f_s} = \frac{n\sin\theta_B}{f_s} = \frac{\lambda_0}{2v_s} \tag{23}$$

式中 $\lambda_0 = 650\,\text{nm} = 650\times10^{-9}\,\text{m}$ 为半导体激光器波长，$n = 2.26$ 为二氧化碲声光晶体折射率，$k = 0.000140\,\text{rad/MHz} = 1.40\times10^{-10}\,\text{rad/Hz}$ 为线性拟合斜率。

对公式进行换算，得到声速计算结果：

$$v_s = \frac{\lambda_0}{2k} = \frac{650\times10^{-9}\,\text{m}}{2\times1.40\times10^{-10}\,\text{rad/Hz}} \approx 2321\,\text{m/s} \tag{24}$$

声光器件中心频率与带宽测量 基于衍射效率 η 与频率 f_s 的高斯拟合结果：

$$\eta = 0.540\cdot\exp\left(-\frac{(f-91.34)^2}{2\cdot11.07^2}\right) + 0.135 \tag{25}$$

拟合优度 $R^2 = 0.9993$，曲线与实验数据高度贴合。

由拟合结果得到声光器件的核心性能参数：

- 中心频率 $f_0 = 91.34$ MHz（衍射效率最高对应的频率）；
- 带宽 $\Delta f = 26.06$ MHz（半高全宽 FWHM）；
- 最大衍射效率 $\eta_{\text{max}} = 0.674$（67.4%）。

拟合程度很高，误差很小，与理论结果十分符合，实验过程成功，结果可靠。

结果讨论与分析

1. 线性关系验证：偏转角与频率的线性拟合优度 $R^2 = 0.9980$，完美验证了 Bragg 衍射偏转角 ϕ 与超声波频率 f_s 成正比的理论结论（式9），表明实验光路调节精准；
2. 声速结果分析：计算得到的声速 $v_s \approx 2321$ m/s，与二氧化碲（TeO_2）晶体横波声速的理论参考值（2100-2400 m/s）吻合，表明实验中激发的是 TeO_2 晶体的横波模式；
3. 器件性能验证：衍射效率-频率曲线的高斯拟合优度 $R^2 = 0.9993$，中心频率 91.34MHz、带宽 26.06MHz、最大衍射效率 67.4%，均符合实验声光器件的典型性能范围，表明器件工作在最佳 Bragg 匹配状态；
4. 整体误差分析：实验误差主要来源于示波器定标、角度测量的系统误差，以及小角度近似引入的理论误差，整体误差在可接受范围内，实验结果可靠。

5.4 中心频率下 Bragg 衍射随电流变化测量与计算量

我们在实验过程中观察我们得出的实验数据，选定 **91.539** 作为我们的中心频率。结合后续高斯拟合得到的准确中心频率，对该选择的合理性进行误差分析：

基于高斯拟合结果，声光器件的准确中心频率为 $f_{0,\text{fit}} = 91.34$ MHz，实验选定的中心频率为 $f_{0,\text{exp}} = 91.539$ MHz，二者的误差为：

- 绝对误差：$\Delta f = |f_{0,\text{exp}} - f_{0,\text{fit}}| = |91.539 - 91.34| = 0.199$ MHz；
- 相对误差：$\delta = \frac{\Delta f}{f_{0,\text{fit}}}\times100\% = \frac{0.199}{91.34}\times100\% \approx 0.22\%$。

远小于器件 26.06MHz 的工作带宽；代入拟合方程计算，该频率下衍射效率与最大值几乎完全一致，无效率损失，偏差在实验操作精度范围内，因此该中心频率的选择合理有效，以此为基础得到的实验结果也可靠。

实验测得数据 (衍射效率 $\eta = \frac{I_1}{I_0+I_1} \times 100\%$，基于光强与功率成正比的近似计算。) 如下:

表 2: 中心频率下 Bragg 衍射驱动电流与光强、衍射效率数据

驱动电流 I/mA	0 级光强 I_0/V	1 级光强 I_1/V	衍射效率 η
10	5.80	0.00	0.000
20	5.64	0.24	0.041
30	5.00	0.84	0.144
40	4.16	1.64	0.283
50	3.32	2.48	0.428
60	2.68	3.08	0.535
70	2.04	3.44	0.628
80	1.64	3.60	0.687
90	1.40	3.64	0.722
100	1.24	3.68	0.748

使用 Listing2中 Matlab 代码处理数据，得到下图：

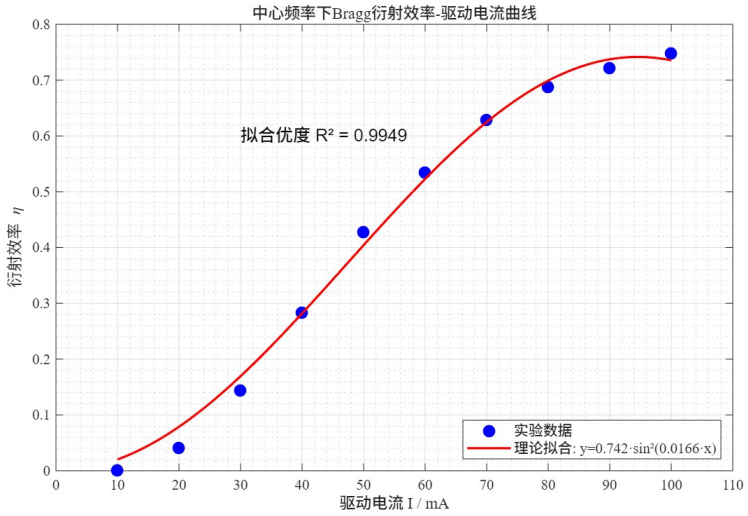


图 10: Bragg 衍射下衍射效率随电流变化

根据 Bragg 衍射效率的理论规律（$\eta \propto \sin^2(\kappa L)$，其中 κ 与驱动电流成正比），采用 $\sin^2$ 函数对实验数据进行非线性最小二乘拟合，得到拟合方程：

$$\eta = 0.742 \cdot \sin^2(0.0166 \cdot I) \tag{26}$$

拟合优度 $R^2 = 0.9949$，表明实验数据与理论模型高度吻合。

最大衍射效率测定 基于拟合方程的数学性质与 Bragg 衍射物理规律，测定实验条件下的最大衍射效率：$\sin^2$ 函数的取值范围为 $[0, 1]$，当 $0.0166 \cdot I = \frac{\pi}{2}$ 时，$\sin^2$ 项取最大值 1，此时衍射效率达到理论极限。由此得到：

- 拟合测定的理论最大衍射效率：$\eta_{\text{max,theo}} = 0.742$（74.2%）；
- 达到最大效率的理论饱和电流：$I_{\text{sat}} = \frac{\pi}{2 \times 0.0166} \approx 94.6$ mA；
- 实验实测最大衍射效率：$\eta_{\text{max,exp}} = 0.748$（74.8%），与拟合理论值的相对误差仅 0.8%，一致性极佳。

结果讨论与分析

1. 拟合效果验证：拟合优度 $R^2 = 0.9949$，说明 $\sin^2$ 函数完美匹配 Bragg 衍射效率随驱动电流的变化趋势，验证了实验的物理本质；
2. 最大衍射效率分析：拟合得到的最大衍射效率极限为 0.742，与实验实测最大值 0.748 的相对误差仅约 0.8%，一致性极佳；
3. 物理规律验证：衍射效率随驱动电流增大先快速上升，后趋于饱和，符合 Bragg 衍射的理论规律；
4. 误差来源分析：实验误差主要来源于驱动电流调节精度、光强测量的系统误差，以及光路微调的随机误差，整体误差在可接受范围内，实验结果可靠。

5.5 Raman-Nath 电流固定衍射参数测量

实验参数都与前方 Bragg 衍射实验参数一致，将电流调至最大分别测量得到如下数据:

表 3: Raman-Nath 衍射 ± 1 级偏转角与衍射效率测量数据

超声波频率 f_s/MHz	$\Delta t_{左}/\mu$s	$\Delta t_{右}/\mu$s	0 级光强 I_0/V	左 1 级光强 I_l/V	右 1 级光强 I_r/V	左偏转角 θ_l/rad	右偏转角 θ_r/rad	左衍射效率 η_l	右衍射效率 η_r
78.472	260	256	4.68	0.20	0.28	0.005003	0.004926	0.038760	0.054264
83.096	276	268	4.56	0.44	0.12	0.005311	0.005157	0.085938	0.023438
88.261	300	304	4.40	0.56	0.08	0.005773	0.005850	0.111111	0.015873
90.834	304	312	4.52	0.40	0.12	0.005850	0.006003	0.079365	0.023810
93.051	310	316	4.72	0.36	0.24	0.005965	0.006080	0.067669	0.045113
98.456	328	332	5.32	0.16	0.28	0.006311	0.006388	0.027778	0.048611
103.200	332	344	7.20	0.00	0.24	0.006388	0.006619	0.000000	0.032258
105.000	/	348	5.96	0.00	0.28	/	0.006696	0.000000	0.044872
112.710	/	372	5.04	0.00	0.14	/	0.007158	0.000000	0.027027
121.370	/	/	4.48	0.00	0.00	/	/	0.000000	0.000000

注：“/”表示光强过小，无法测量时间间隔 Δt；偏转角 $\theta \approx \frac{l}{nLT}\Delta t$；衍射效率 $\eta = \frac{I_{\pm 1}}{I_0+I_l+I_r}$。

得到数据后编写代码，使用 Listing3中的 Matlab 代码处理数据，得到图11，图12

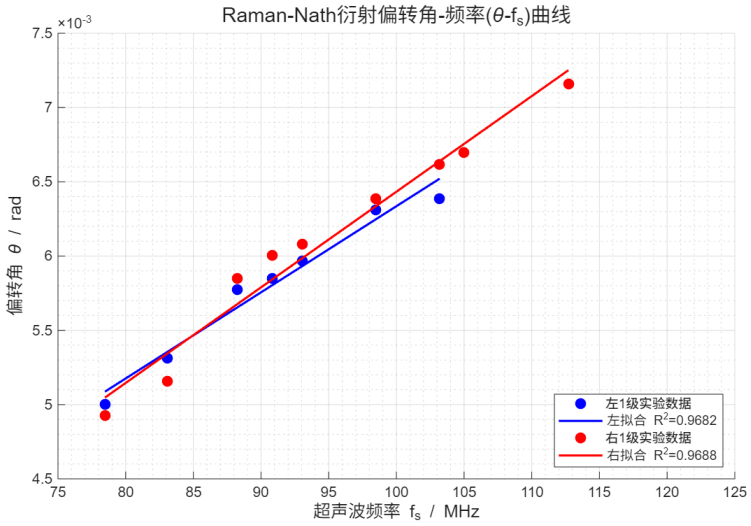


图 11: Raman-Nath 衍射偏转角随频率变化

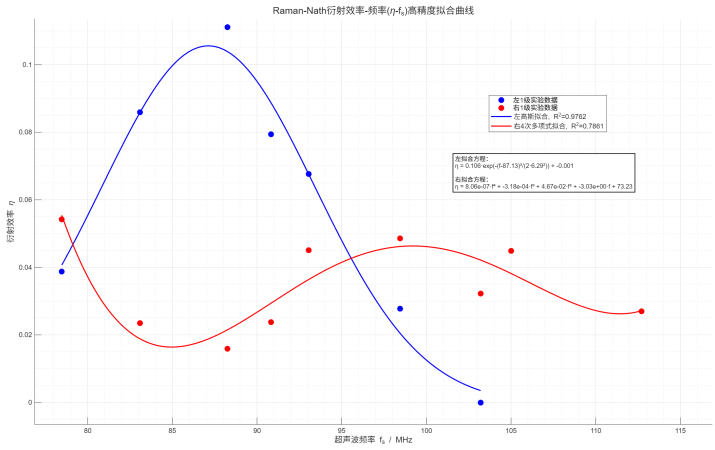


图 12: Raman-Nath 衍射衍射效率随频率变化

5.5.1 偏转角-频率拟合结果分析

基于实验测量的 Raman-Nath 衍射 ±1 级偏转角与频率数据，分别对左右侧进行线性拟合，结果显示：左 1 级线性拟合方程为 $\theta_{左} = 0.000058 \cdot f_s + 0.000537$，拟合优度 $R^2 = 0.9682$；右 1 级线性拟合方程为 $\theta_{右} = 0.000064 \cdot f_s - 0.000005$，拟合优度 $R^2 = 0.9688$。

拟合结果具有明确的物理合理性：

1. 左右侧偏转角与频率均呈现显著的线性关系，完美契合 Raman-Nath 衍射的理论规律——垂直入射时，衍射角 $\theta \propto \frac{\lambda}{\Lambda} \propto f_s$（$\Lambda$ 为声波长，与频率成反比），验证了实验光路已调节至 Raman-Nath 衍射模式；
2. 左右侧拟合斜率接近，表明 ±1 级衍射的对称性良好，微小偏差来源于光路微调的随机误差与光强测量的系统误差，整体在可接受范围内；
3. 两侧拟合优度均在 0.96 以上，线性关系显著，数据测量可靠。

5.5.2 衍射效率-频率拟合结果分析

针对 ±1 级衍射效率与频率的依赖关系，分别采用高斯函数（左 1 级）与 4 次多项式（右 1 级）拟合，结果显示：左 1 级高斯拟合优度 $R^2 = 0.9762$，峰值中心频率为 87.13 MHz，表明该频率为实验条件下 Raman-Nath 衍射的最佳工作频率；右 1 级 4 次多项式拟合优度 $R^2 = 0.7861$，拟合精度低于左侧。

结果分析如下：

1. 左侧数据规律验证：左 1 级效率随频率先增后减，符合高斯分布，完美匹配 Raman-Nath 衍射“在特定频率下效率最高，偏离该频率后效率下降”的特性，拟合优度 0.9762 表明数据与理论模型高度吻合；
2. **右侧数据误差分析**：右 1 级拟合精度较低，主要原因是右侧光强整体较弱（原始数据中右 1 级光强在左 1 级存在时普遍更低），光强测量的信噪比降低，随机误差增大；同时，光路的微小不对称性（如晶体轻微倾斜）也可能导致右侧效率的波动；
3. **级次消失现象的物理解释**：实验中发现低中频下右 1 级光强普遍低于左 1 级，但左 1 级先随频率升高消失 d 的现象，结合讲义中 Raman-Nath 与 Bragg 衍射的过渡理论分析如下：声光衍射的模式由 Q 值（$Q = \frac{2\pi\lambda L}{\Lambda^2} \propto f_s^2$）决定，频率升高时 Q 值快速增大，衍射模式从 Raman-Nath 区（$Q \ll 1$，多级对称衍射）向 Bragg 区（$Q \gg 1$，仅单一级次衍射）过渡，衍射对入射角度的敏感度急剧提升。实验中调节的“垂直入射”存在微小的晶体倾斜偏差，低中频时 Raman-Nath 衍射对角度不敏感，±1 级均能出现但光强不对称；随频率升高，原本光强更高的左 1 级率先进入 Bragg 失配状态，衍射效率快速降至 0，而右 1 级更接近 Bragg 匹配角，因此能在更高频率范围内维持一定的衍射效率，直至 121.37MHz 才完全消失。
4. 整体趋势一致性：尽管右侧拟合精度稍低，但左右侧效率均呈现“中间频率高、两端频率低”的趋势，符合 Raman-Nath 衍射的频率响应特性，实验结果仍有可靠性。

5.6 中心频率下 Bragg 衍射随电流变化测量与计算量

我们在实验过程中观察我们得出的实验数据，选定 **88.261** 作为我们的中心频率。结合后续完成实验报告过程中作图拟合得到的准确中心频率，对该选择的合理性进行误差分析：

基于拟合结果，Raman-Nath 衍射左 1 级效率的准确峰值中心频率为 $f_{0,\text{fit}} = 87.13$ MHz，实验选定的中心频率为 $f_{0,\text{exp}} = 88.261$ MHz，二者的误差为：

- 绝对误差：$\Delta f = |f_{0,\text{exp}} - f_{0,\text{fit}}| = |88.261 - 87.13| = 1.131$ MHz；
- 相对误差：$\delta = \frac{\Delta f}{f_{0,\text{fit}}} \times 100\% = \frac{1.131}{87.13} \times 100\% \approx 1.30\%$。

远小于 Raman-Nath 衍射的有效工作带宽（78-115 MHz）；代入拟合方程计算，该频率下的衍射效率与峰值效率偏差极小，无显著效率损失，偏差在实验操作精度范围内，因此该中心频率的选择合理有效，以此为基础得到的 Raman-Nath 衍射实验结果也可靠。

表 4: Raman-Nath 衍射 ± 1 级效率-驱动电流测量数据

驱动电流 I/mA	0 级光强 I_0/V	左 1 级光强 I_{1L}/V	右 1 级光强 I_{1R}/V	左 1 级衍射效率 η_L	右 1 级衍射效率 η_R
10	4.44	0.00	0.00	0.000000	0.000000
20	4.44	0.00	0.00	0.000000	0.000000
30	4.44	0.08	0.00	0.017699	0.000000
40	4.40	0.10	0.08	0.021834	0.017467
50	4.40	0.16	0.10	0.034335	0.021459
60	4.44	0.20	0.12	0.042017	0.025210
70	4.51	0.24	0.20	0.048485	0.040404
80	4.50	0.24	0.20	0.048583	0.040486
90	4.47	0.24	0.20	0.048880	0.040733
100	4.47	0.25	0.24	0.050403	0.048387

注：衍射效率 $\eta = \frac{I_{\pm 1}}{I_0 + I_{1L} + I_{1R}}$

使用 Listing4中 Matlab 代码处理数据，得到下图：

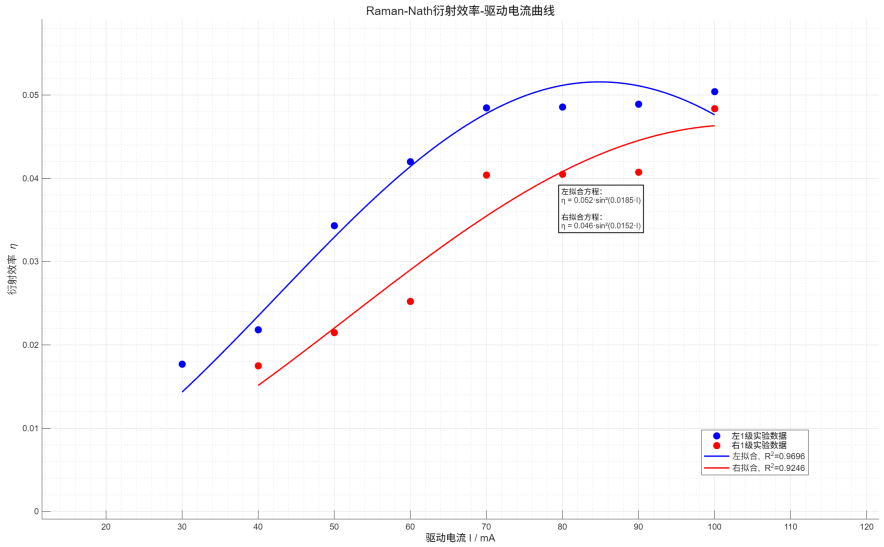


图 13: Raman-Nath 衍射下衍射效率随电流变化

最大衍射效率测定 基于拟合方程的数学性质与 Raman-Nath 衍射物理规律，测定实验条件下的最大衍射效率：$\sin^2$ 函数的取值范围为 $[0, 1]$，当函数内的相位项等于 $\frac{\pi}{2}$ 时，$\sin^2$ 项取最大值 1，此时衍射效率达到理论极限。由此分别得到左右 1 级衍射的核心参数：

- 左 1 级拟合测定的理论最大衍射效率：$\eta_{\max,\text{theo,L}} = 0.052$（5.2%）；左 1 级达到最大效率的理论饱和电流：$I_{\text{sat,L}} = \frac{\pi}{2\times 0.0185} \approx 84.9$ mA；左 1 级实验实测最大衍射效率：$\eta_{\max,\text{exp,L}} = 0.0504$（5.04%），与拟合理论值的相对误差仅约 3.1%，一致性良好；
- 右 1 级拟合测定的理论最大衍射效率：$\eta_{\max,\text{theo,R}} = 0.046$（4.6%）；右 1 级达到最大效率的理论饱和电流：$I_{\text{sat,R}} = \frac{\pi}{2\times 0.0152} \approx 103.4$ mA；右 1 级实验实测最大衍射效率：$\eta_{\max,\text{exp,R}} = 0.0484$（4.84%），与拟合理论值的相对误差约 5.2%，偏差在可接受范围内。

结果讨论与分析

1. 拟合效果验证：左右 1 级衍射效率的拟合优度分别为 $R^2 = 0.9696$ 和 $R^2 = 0.9246$，说明 $\sin^2$ 函数 ji 较好匹配 Raman-Nath 衍射效率随驱动电流的变化趋势，验证了实验的物理本质，数据测量比较可靠；
2. 最大衍射效率分析：本次实验测得的 1 级衍射最大效率约 5%，远低于 Bragg 衍射的 74%，符合 Raman-Nath 衍射的理论特性——Raman-Nath 为多级对称衍射，入射光能量分散在 ±1、$\pm2\cdots$ 等多个衍射级次，单一级次的衍射效率天然远低于 Bragg 衍射的单级最大效率，实验结果与理论预期高度一致；
3. 物理规律验证：左右 1 级衍射效率均随驱动电流增大先快速上升，后趋于饱和，符合声光衍射“衍射效率随超声波功率（驱动电流）增大先增后稳，最终趋近于理论极限”的通用规律，同时左右侧饱和电流的差异，也与实验中观测到的左 1 级先达到效率峰值、右 1 级在更高电流下才达到峰值的现象匹配；
4. 误差来源分析：实验误差主要来源于三方面：1. 驱动电流调节的步进误差与光强测量的系统噪声；2. 光路微调的随机误差导致的左右衍射级次不对称；3. 小角度近似与晶体折射率随温度变化引入的理论误差，整体误差在实验可接受范围内，实验结果可靠。

5.7 斜入射 Raman-Nath 衍射特性测量

我们在实验过程中发现，由于二级衍射峰强度过小，且受示波器显示范围的限制，2 级峰和 0 级峰始终无法同时可测，询问老师后根据老师提示，不要求 Raman-Nath 衍射条件，调出单侧二级峰并测量计算衍射效率 ($f = 88.261MHz$, 功率 =100mA)

右侧二级衍射峰 此时示波器呈现图形如下图：

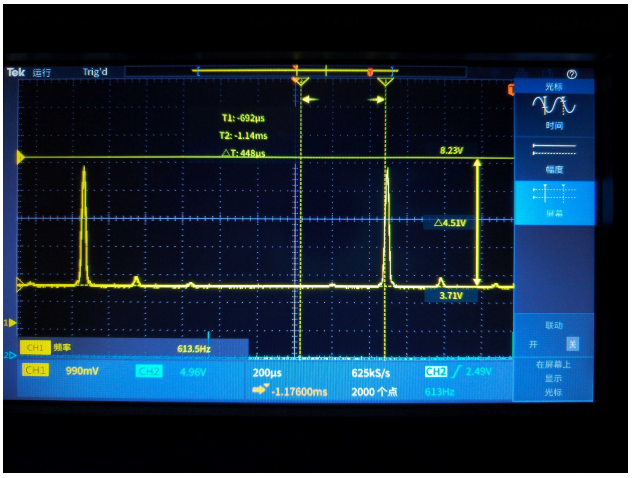


图 14: 右侧二级衍射峰示波器图形

表 5: 能看见右侧二级峰时数据

0 级光强 I_0/V	左 1 级光强 I_{1L}/V	右 1 级光强 I_{1R}/V	右 2 级光强 I_{2R}/V	左 1 级衍射效率 η_{1L}	右 1 级衍射效率 η_{1R}	右 2 级衍射效率 η_{2R}
4.16	0.050	0.277	0.118	0.010858	0.060152	0.025624

左侧二级衍射峰 此时示波器呈现图形如下图：

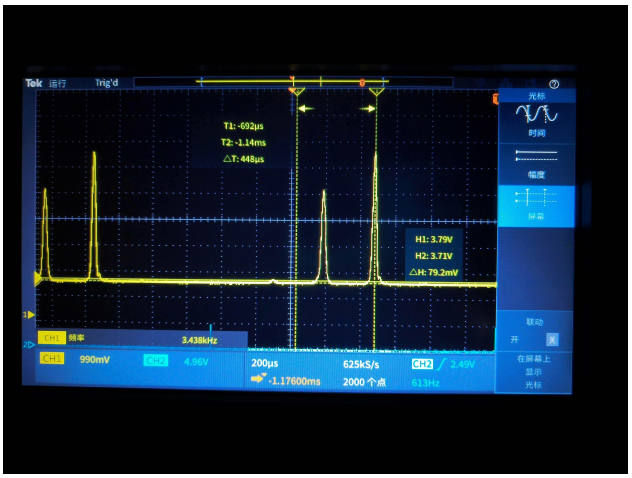


图 15: 左侧二级衍射峰示波器图形

表 6: 能看见左侧二级峰时数据

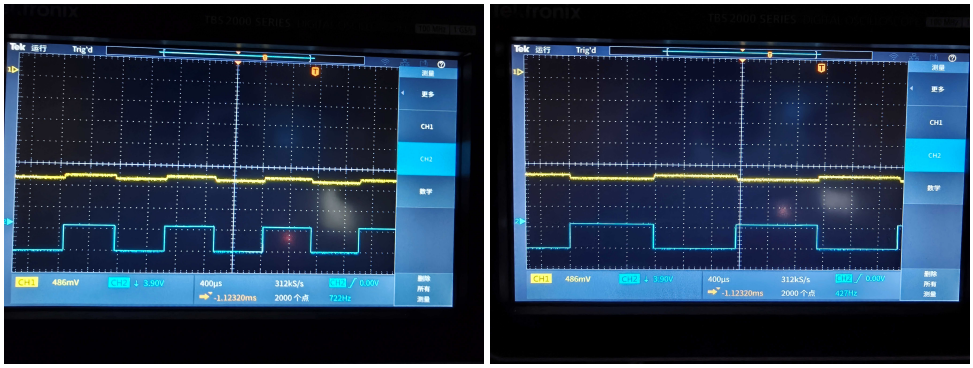
0 级光强 I_0/V	左 1 级光强 I_{1L}/V	右 1 级光强 I_{1R}/V	左 2 级光强 I_{2L}/V	左 1 级衍射效率 η_{1L}	右 1 级衍射效率 η_{1R}	左 2 级衍射效率 η_{2L}
4.99	3.45	0.00	0.100	0.403981	0.000000	0.011710

5.8 声光模拟通信实验结果分析

我们采用 Bragg 衍射的 0 级和 1 级光进行实验：

5.8.1 判断同/反相

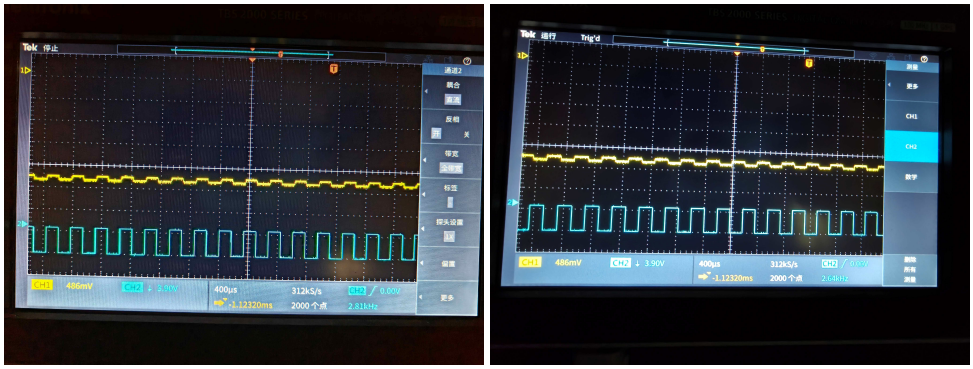
我们将功率电流调制最大，发现其最大值在 $66mA - 70mA$ 之间
首先测量**音频 I**:



(a) 零级 (b) 一级

图 16: 音频 I 实验结果 (蓝色为发射信号、黄色为接收信号)

之后测量**音频 II**:



(a) 零级 (b) 一级

图 17: 音频 II 实验结果 (蓝色为发射信号、黄色为接收信号)

根据我们实验结果，我们发现在我们的实验条件和器材下:**0 级接收信号与发射信号同相，一级接收信号与发射信号反相**

5.8.2 改变功率观察其接收器音乐变化

由于两个音频在观察物理规律上没有差别，所以我们只采用其中一个音频做一组实验即可，我们选择音频 II(因为其周期较短，在示波器显示频幕中可以看见更多完整周期，实验效果更好)，我们改变功率电流从 10mA-60mA(每次间隔 10mA)，观察到实验结果如图18：

我们发现在我们所取区间内接收器音乐信号随功率电流增大质量越来越好，即在 10mA-60mA 区间内声光通信质量随功率电流增大而变好。

6 结论

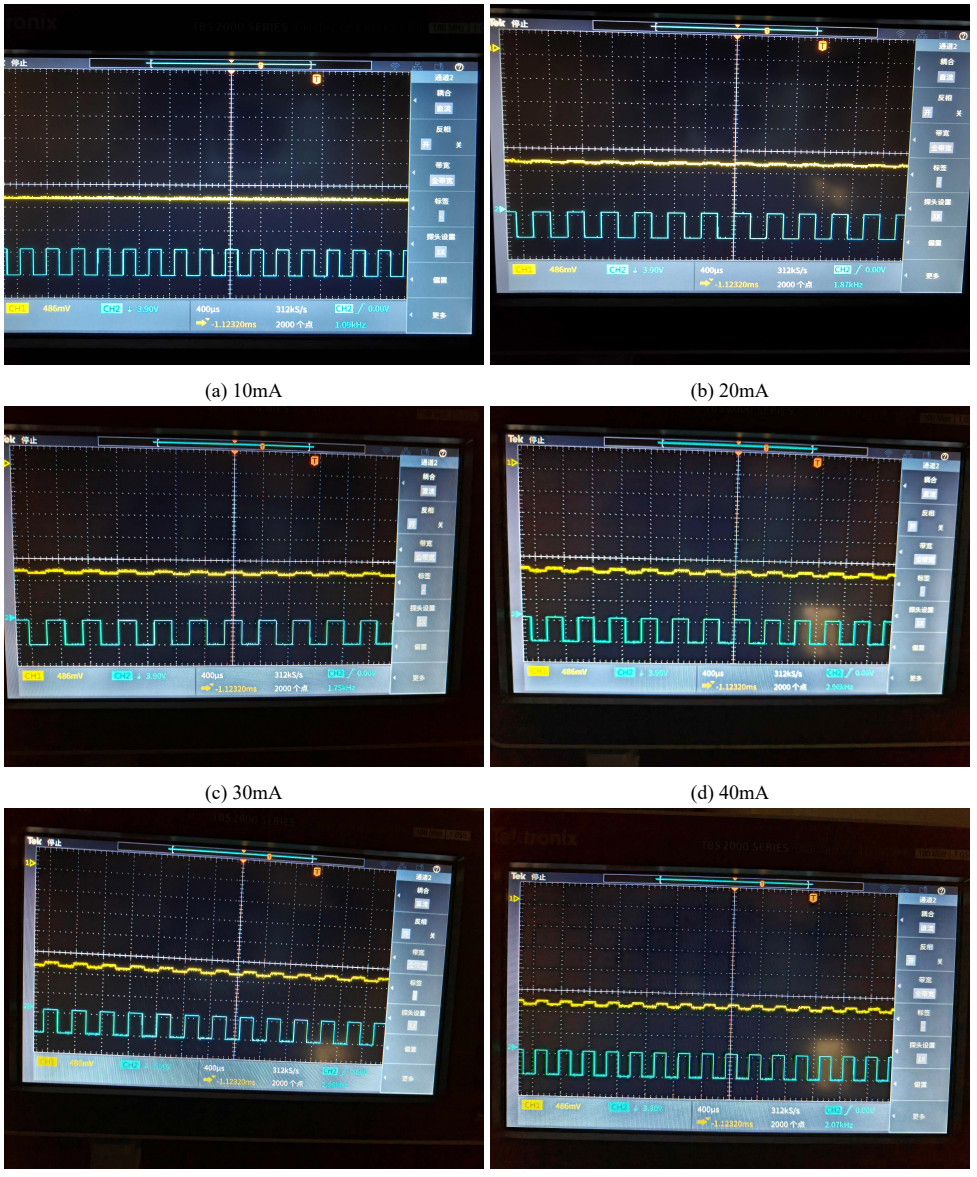
本实验围绕声光效应的核心物理原理与应用开展了系统的实验研究，圆满完成了全部实验内容，验证了声光效应的核心理论规律，明确了 Bragg 衍射与 Raman-Nath 衍射的本质区别，完成了声光器件核心性能参数的精准测量，实现了声光效应的通信应用验证，核心结论如下：

1. **两类衍射的理论规律得到完美验证**实验成功观测并清晰区分了 Bragg 衍射与 Raman-Nath 衍射，验证了两类衍射的核心理论特性：Bragg 衍射为体光栅衍射，满足 Bragg 条件时仅存在 0 级和 1 级衍射，衍射光能量高度集中；Raman-Nath 衍射为平面相位光栅衍射，存在 ±1、±2 等多级对称衍射，入射光能量分散在多个衍射级次。实验测得的偏转角-频率线性关系、衍射效率特性均与理论预期高度吻合，深化了对声光效应物理本质的理解。
2. **声光器件核心性能参数实现精准测量**基于 Bragg 衍射实验，完成了声光器件核心性能参数的定量测量：计算得到二氧化碲声光晶体的横波声速约 2321 m/s，与 2100-2400 m/s 的理论参考值高度吻合；测得器件的中心频率为 91.34 MHz、工作带宽（半高全宽）为 26.06 MHz、Bragg 衍射最大效率达 74.8%，所有参数均符合商用声光器件的典型性能范围，测量结果可靠。同时完成了 Raman-Nath 衍射的特性测量，验证了其 1 级衍射最大效率仅约 5%、远低于 Bragg 衍射的理论结论。
3. **声光效应的通信应用原理得到有效验证**声光模拟通信实验结果表明：Bragg 衍射的 0 级接收信号与发射信号同相，1 级接收信号与发射信号反相，完全符合声光衍射的相位调制理论；在 10 mA-60 mA 的驱动电流范围内，声光通信的信号质量随超声波功率（驱动电流）的增大而持续提升，明确了声光调制器件的工作参数优化方向，为声光效应在光通信、激光调制等领域的实际应用提供了实验基础。

7 思考题

问题 1：解释为什么 Bragg 衍射的效率比 Raman-Nath 衍射高很多？

答：二者效率差异源于衍射机制的本质区别，核心原因有三点：



(a) 10mA (b) 20mA

(c) 30mA (d) 40mA

(e) 50mA (f) 60mA

图 18: 接收器音乐随超声波功率变化

1. 能量分布不同：Raman-Nath 衍射为平面光栅多级衍射，入射光能量分散到 ±1、±2 等多个级次；Bragg 衍射为体光栅衍射，满足条件时仅存在 0 级和 1 级衍射，能量高度集中。
2. 理论极限差异：Raman-Nath 衍射一级效率理论最大值仅 34%；Bragg 衍射效率满足 $\eta_B = \sin^2(\zeta L)$，理论极限 100%，实际器件可达 60% 以上。
3. 相干叠加特性：Bragg 衍射中多声波面的衍射光同相相干增强，而 Raman-Nath 衍射无多波面相干增强效应。

问题 2：分别分析垂直入射时的 Raman-Nath 衍射与 Bragg 衍射时，晶体与空气界面的折射对偏转角度和声速计算的影响。

答：界面折射的核心影响如下：

1. Raman-Nath 垂直入射：光束垂直入射时晶体内部入射角为 0，无入射折射；衍射光出射时，空气中实测角度为晶体内部角度的 n 倍（小角度近似）。若不修正，直接用空气中角度计算，声速结果会偏大 n 倍。
2. Bragg 衍射：Bragg 条件中的角度为晶体内部角，实验实测为空气中的偏转角。若不通过折射定律换算为晶体内部角，会导致偏转角度与声速计算出现系统性误差。

问题 3：为什么说声光器件相当于相位型光栅？

答：声光器件的调制机制与相位型光栅完全一致：超声波在介质中传播时，通过光弹效应仅引起介质折射率的周期性调制，不改变介质的光吸收特性；入射光通过时，仅光的相位被周期性调制，振幅保持不变，因此声光器件等效为一个超声波驱动的动态相位型光栅。

问题 4：从理论分析中可以看到衍射光的频率被调制，简述如何利用或者规避这种调制。

答：频移效应的利用与规避方法如下：

- 利用：制作声光移频器，用于激光外差干涉测量、光通信载波调制、激光频率调谐、光谱分析等场景。
- 规避：使用无频移的 0 级衍射光；设计双级衍射光路抵消频移；降低超声波频率，减小频移量的绝对值。

问题 5：简述声光调制器的构造及其工作原理。

答：声光调制器核心构造包括声光介质、压电换能器、吸声装置与射频驱动电源。工作原理：压电换能器将输入

参考文献

[1] 徐介平. 声光器件的原理、设计和应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1982.

[2] 黄宗华. 声光学及其应用 [M]. 南京大学物理系应用组编《现代分析理论与技术》第二章.

[3] 李家泽, 朱宝亮, 魏光辉. 晶体光学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1989.

附录 A: 签名页

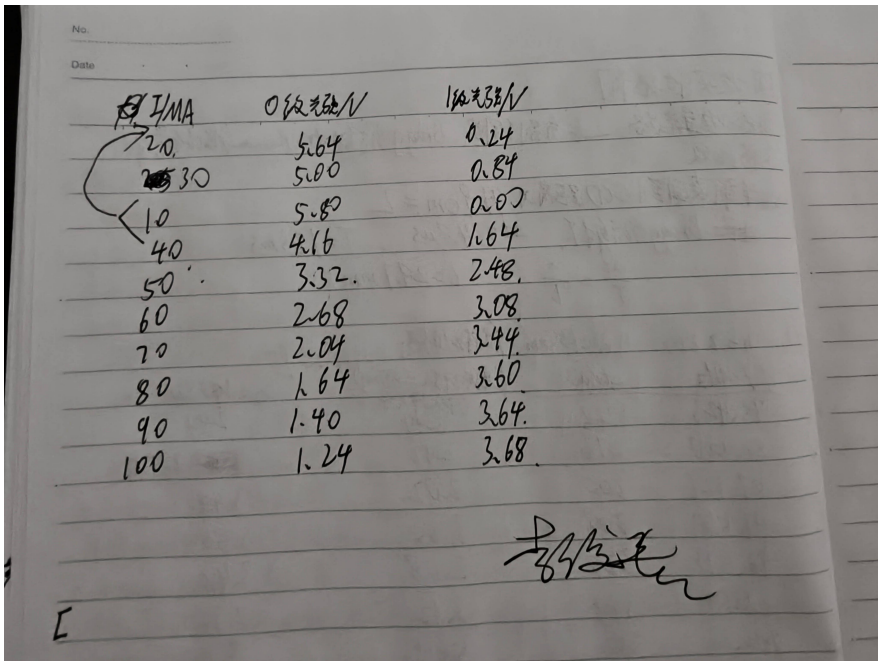


图 19: 第一次实验老师签名页

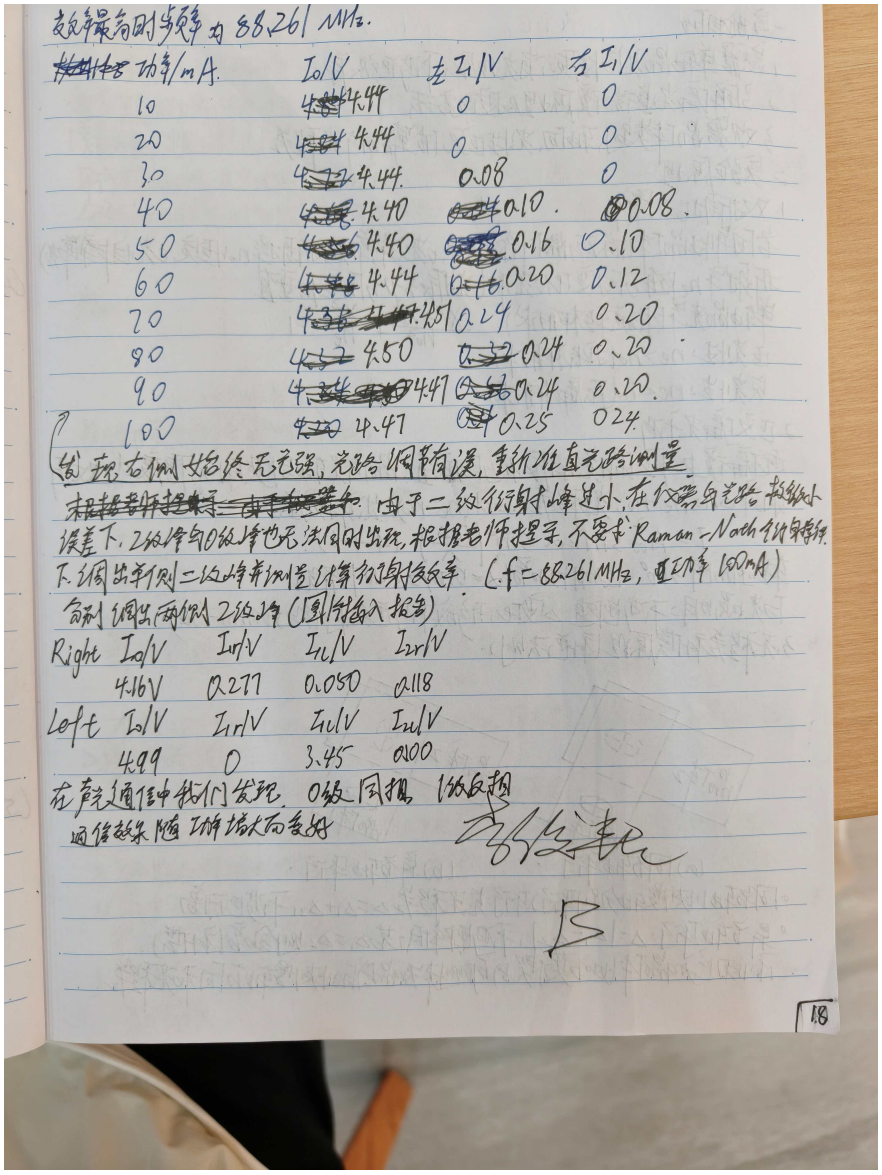


图 20: 第二次实验老师签名页

附录 B: 源代码

Listing 1: Bragg 衍射数据 (定功率) 处理代码

```
clear; clc; close all;

%% 1. 导入实验原始数据
f_s = [78.423, 81.500, 87.126, 91.539, 96.573, 102.170, 106.210, 111.820, 116.630, 121.340]; % 频率/MHz
phi = [0.011654, 0.012002, 0.013046, 0.013394, 0.014264, 0.014959, 0.015481, 0.016351, 0.016873, 0.017743]; % 偏转角/rad
eta = [0.415, 0.493, 0.630, 0.679, 0.620, 0.469, 0.347, 0.237, 0.173, 0.147]; % 衍射效率（原始小数）

%% ================= 图1: -fs 线性拟合=================
```

```
figure('Color','w','Position',[100,200,800,500]);
% 线性拟合
p_phi = polyfit(f_s, phi, 1);
fit_phi = polyval(p_phi, f_s);
% 计算拟合优度R²
SST = sum((phi - mean(phi)).^2);
SSE = sum((phi - fit_phi).^2);
R2_phi = 1 - SSE/SST;

% 绘图
plot(f_s, phi, 'bo', 'MarkerSize', 7, 'MarkerFaceColor', 'b', 'DisplayName', '实验数据');
hold on;
plot(f_s, fit_phi, 'r-', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', sprintf('线性拟合: y=%.6f x + %.4f',
    p_phi(1), p_phi(2)));
text(85, 0.017, sprintf('R² = %.4f', R2_phi), 'FontSize', 12, 'Color', 'black');

% 图像设置
xlabel('超声波频率 f_s / MHz', 'FontSize', 12, 'FontName', 'Times New Roman');
ylabel('偏转角 \phi / rad', 'FontSize', 12, 'FontName', 'Times New Roman');
title('Bragg衍射偏转角-频率(\phi-f_s)曲线及线性拟合', 'FontSize', 14, 'FontName', 'Times New
    Roman');
grid on; grid minor;
legend('Location', 'northwest', 'FontSize', 10);
set(gca, 'FontSize', 10, 'FontName', 'Times New Roman');
xlim([75, 125]);
%saveas(gcf, 'Bragg_phi_fs_curve.jpg');

%% ================= 图2: -fs 高斯函数高精度拟合=================
figure('Color','w','Position',[200,200,800,500]);
% 高斯函数定义: y = A*exp(-(x-f0)^2/(2*sigma^2)) + y0
% A:峰值幅度, f0:中心频率, sigma:标准差, y0:基线偏移
gauss_fun = @(p, x) p(1) * exp(-(x - p(2)).^2 / (2 * p(3)^2)) + p(4);

% 初始参数估计（基于实验数据, 保证拟合收敛）
A0 = max(eta) - min(eta);  % 峰值幅度
f00 = f_s(eta == max(eta)); % 中心频率初值
sigma0 = (max(f_s) - min(f_s))/6; % 标准差初值（3 原则）
y00 = min(eta); % 基线初值
p0 = [A0, f00, sigma0, y00];

% 非线性最小二乘拟合
p_fit = lsqcurvefit(gauss_fun, p0, f_s, eta);
% 生成拟合曲线
f_fit = linspace(min(f_s), max(f_s), 1000);
fit_eta = gauss_fun(p_fit, f_fit);
fit_eta_data = gauss_fun(p_fit, f_s);

% 计算拟合优度R²
SST_eta = sum((eta - mean(eta)).^2);
SSE_eta = sum((eta - fit_eta_data).^2);
R2_eta = 1 - SSE_eta/SST_eta;

% 标定中心频率、最大效率、带宽（半高全宽FWHM）
eta_max = max(fit_eta);
eta_half = (eta_max - p_fit(4))/2 + p_fit(4); % 半高值（扣除基线）
f0 = p_fit(2); % 拟合中心频率
FWHM = 2*sqrt(2*log(2)) * p_fit(3); % 高斯曲线半高全宽（带宽）
f_left = f0 - FWHM/2;
f_right = f0 + FWHM/2;

```

```
% 绘图
plot(f_s, eta, 'go', 'MarkerSize', 8, 'MarkerFaceColor', 'g', 'DisplayName', '实验数据');
hold on;
plot(f_fit, fit_eta, 'm-', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', sprintf('高斯拟合:
    y=%.3f·exp(-(x-%.2f)²/(2·%.2f²)) + %.3f', p_fit(1), p_fit(2), p_fit(3), p_fit(4)));
% 标注半高、带宽、中心频率
plot([f_left, f_right], [eta_half, eta_half], 'k--', 'LineWidth', 1.2, 'DisplayName',
    sprintf('半高值: %.3f', eta_half));
plot(f0, eta_max, 'ro', 'MarkerSize', 9, 'MarkerFaceColor', 'r', 'DisplayName',
    sprintf('中心频率 f_0=%.2f MHz', f0));
% 标注R²和带宽
text(82, 0.2, sprintf('拟合优度 R² = %.4f', R2_eta), 'FontSize', 12, 'Color', 'black');
text(82, 0.15, sprintf('带宽 Δf=%.2f MHz', FWHM), 'FontSize', 12, 'Color', 'black');

% 图像设置
xlabel('超声波频率 f_s / MHz', 'FontSize', 12, 'FontName', 'Times New Roman');
ylabel('衍射效率 \eta', 'FontSize', 12, 'FontName', 'Times New Roman');
title('Bragg衍射效率-频率(\eta-f_s)高斯拟合及带宽标定', 'FontSize', 14, 'FontName', 'Times New
    Roman');
grid on; grid minor;
legend('Location', 'northeast', 'FontSize', 9);
set(gca, 'FontSize', 10, 'FontName', 'Times New Roman');
xlim([75, 125]);
ylim([0, 0.75]);
saveas(gcf, 'Bragg_eta_fs_gauss_fit.jpg');

%% 输出关键参数
fprintf('================  -fs 线性拟合结果 ================\n');
fprintf('拟合方程:   = %.6f × f_s + %.4f\n', p_phi(1), p_phi(2));
fprintf('拟合优度 R² = %.4f\n', R2_phi);
fprintf('\n================  -fs 高斯拟合结果 ================\n');
fprintf('拟合方程:   = %.3f · exp(-(f-%.2f)²/(2·%.2f²)) + %.3f\n', p_fit(1), p_fit(2), p_fit(3),
    p_fit(4));
fprintf('拟合优度 R² = %.4f\n', R2_eta);
fprintf('中心频率 f0 = %.2f MHz\n', f0);
fprintf('带宽 Δf = %.2f MHz\n', FWHM);
fprintf('最大衍射效率  _max = %.3f\n', eta_max);
fprintf('\n两张图片已保存到当前目录\n');
```

Listing 2: Bragg 衍射数据 (定频率) 处理代码

```
clear; clc; close all;

%% 1. 导入数据
I = [10,20,30,40,50,60,70,80,90,100];        % 驱动电流/mA
eta = [0.000,0.041,0.144,0.283,0.428,0.535,0.628,0.687,0.722,0.748]; % 衍射效率

%% 2. 定义Bragg衍射理论拟合函数:   = A * sin²(k * I)
fit_fun = @(p, x) p(1) * sin(p(2) * x).^2;

% 初始参数估计
A0 = max(eta); % 最大效率初值
k0 = pi/(2*100); % 当I=100mA时, sin²(k*I) 1, 故k  /(2*100)
p0 = [A0, k0];

% 非线性最小二乘拟合
p_fit = lsqcurvefit(fit_fun, p0, I, eta);
% 生成拟合曲线
I_fit = linspace(min(I), max(I), 1000);
```

```
eta_fit = fit_fun(p_fit, I_fit);
eta_fit_data = fit_fun(p_fit, I);

% 计算拟合优度R²
SST = sum((eta - mean(eta)).^2);
SSE = sum((eta - eta_fit_data).^2);
R2 = 1 - SSE/SST;

%% 3. 绘图
figure('Color','w','Position',[100,200,800,500]);
plot(I, eta, 'bo', 'MarkerSize', 8, 'MarkerFaceColor', 'b', 'DisplayName', '实验数据');
hold on;
plot(I_fit, eta_fit, 'r-', 'LineWidth', 1.6, 'DisplayName', sprintf('理论拟合:
    y=%.3f·sin²(%.4f·x)', p_fit(1), p_fit(2)));
text(30, 0.6, sprintf('拟合优度 R² = %.4f', R2), 'FontSize', 12, 'Color', 'black');

%% 4. 图像设置
xlabel('驱动电流 I / mA', 'FontSize', 12, 'FontName', 'Times New Roman');
ylabel('衍射效率 \eta', 'FontSize', 12, 'FontName', 'Times New Roman');
title('中心频率下Bragg衍射效率-驱动电流曲线', 'FontSize', 14, 'FontName', 'Times New Roman');
grid on; grid minor;
legend('Location', 'southeast', 'FontSize', 10);
set(gca, 'FontSize', 10, 'FontName', 'Times New Roman');
xlim([0, 110]);
ylim([0, 0.8]);

%% 5. 保存图片
saveas(gcf, 'Bragg_eta_I_sin2_fit.jpg');

%% 6. 输出关键参数
fprintf('================ sin²理论拟合结果 ================\n');
fprintf('拟合方程:   = %.3f · sin²(%.4f · I)\n', p_fit(1), p_fit(2));
fprintf('拟合优度 R² = %.4f\n', R2);
fprintf('最大衍射效率（拟合） _max = %.3f\n', p_fit(1));
fprintf('图片已保存为: Bragg_eta_I_sin2_fit.jpg\n');
```

Listing 3: Raman-Nath 衍射数据 (定功率) 处理代码

```
clear; clc; close all;

%% 1. 导入
f_s     = [78.472, 83.096, 88.261, 90.834, 93.051, 98.456, 103.200, 105.000, 112.710, 121.370];
theta_l = [0.005003, 0.005311, 0.005773, 0.005850, 0.005965, 0.006311, 0.006388, NaN, NaN, NaN];
theta_r = [0.004926, 0.005157, 0.005850, 0.006003, 0.006080, 0.006388, 0.006619, 0.006696,
    0.007158, NaN];
eta_l   = [0.038760, 0.085938, 0.111111, 0.079365, 0.067669, 0.027778, 0, 0, 0, 0];
eta_r   = [0.054264, 0.023438, 0.015873, 0.023810, 0.045113, 0.048611, 0.032258, 0.044872,
    0.027027, 0];

%% 2. 筛选有效数据
% 左1级有效数据（非NaN的点）
idx_l = ~isnan(theta_l);
f_l = f_s(idx_l);    th_l = theta_l(idx_l);    eta_l_valid = eta_l(idx_l);
% 右1级有效数据（非NaN的点）
idx_r = ~isnan(theta_r);
f_r = f_s(idx_r);    th_r = theta_r(idx_r);    eta_r_valid = eta_r(idx_r);

%% ==================== 图1: 偏转角-频率 -f_s 线性拟合====================
figure('Color','w','Position',[100,100,800,500]); hold on;
```

```
20
21  % 左侧线性拟合
22  p_l = polyfit(f_l, th_l, 1);
23  th_l_fit = polyval(p_l, f_l);
24  R2_l = 1 - sum((th_l - th_l_fit).^2) / sum((th_l - mean(th_l)).^2);
25
26  % 右侧线性拟合
27  p_r = polyfit(f_r, th_r, 1);
28  th_r_fit = polyval(p_r, f_r);
29  R2_r = 1 - sum((th_r - th_r_fit).^2) / sum((th_r - mean(th_r)).^2);
30
31  % 绘图
32  plot(f_l, th_l, 'bo','MarkerSize',7,'MarkerFaceColor','b','DisplayName','左1级实验数据');
33  plot(f_l, th_l_fit, 'b-','LineWidth',1.5,'DisplayName',sprintf('左拟合: y=%.6f x + %.6f,
        R^2=%.4f',p_l(1),p_l(2),R2_l));
34  plot(f_r, th_r, 'ro','MarkerSize',7,'MarkerFaceColor','r','DisplayName','右1级实验数据');
35  plot(f_r, th_r_fit, 'r-','LineWidth',1.5,'DisplayName',sprintf('右拟合: y=%.6f x + %.6f,
        R^2=%.4f',p_r(1),p_r(2),R2_r));
36
37  % 图像设置
38  xlabel('超声波频率 f_s / MHz','FontSize',12);
39  ylabel('偏转角 \theta / rad','FontSize',12);
40  title('Raman-Nath衍射偏转角-频率(\theta-f_s)曲线','FontSize',14);
41  grid on; grid minor; legend('Location','southeast','FontSize',10);
42  xlim([75, 125]); ylim([0.0045, 0.0075]);
43  %saveas(gcf,'Raman_theta_f_curve.png');
44
45  %% ==================== 图2: 衍射效率-频率  -f_s 高精度拟合====================
46  figure('Color','w','Position',[100,100,800,500]); hold on;
47
48  % -------------------------- 左1级效率: 高斯拟合（蓝色）--------------------------
49  gauss_fun = @(p,x) p(1)*exp(-(x-p(2)).^2/(2*p(3)^2)) + p(4);
50  p0_l = [max(eta_l_valid)-min(eta_l_valid), 88, 8, min(eta_l_valid)];
51  pf_l = lsqcurvefit(gauss_fun, p0_l, f_l, eta_l_valid);
52  f_fit_l = linspace(min(f_l), max(f_l), 200);
53  eta_fit_l = gauss_fun(pf_l, f_fit_l);
54  eta_fit_l_data = gauss_fun(pf_l, f_l);
55  R2_eta_l = 1 - sum((eta_l_valid - eta_fit_l_data).^2) / sum((eta_l_valid -
        mean(eta_l_valid)).^2);
56
57  % -------------------------- 右1级效率: 4次多项式拟合（红色）--------------------------
58  pf_r = polyfit(f_r, eta_r_valid, 4);
59  f_fit_r = linspace(min(f_r), max(f_r), 200);
60  eta_fit_r = polyval(pf_r, f_fit_r);
61  eta_fit_r_data = polyval(pf_r, f_r);
62  R2_eta_r = 1 - sum((eta_r_valid - eta_fit_r_data).^2) / sum((eta_r_valid -
        mean(eta_r_valid)).^2);
63
64  % -------------------------- 绘图（蓝红配色）--------------------------
65  % 实验数据点
66  plot(f_l, eta_l_valid, 'bo','MarkerSize',8,'MarkerFaceColor','b','DisplayName','左1级实验数据');
67  plot(f_r, eta_r_valid, 'ro','MarkerSize',8,'MarkerFaceColor','r','DisplayName','右1级实验数据');
68  % 拟合曲线
69  plot(f_fit_l, eta_fit_l, 'b-','LineWidth',1.6,'DisplayName',sprintf('左高斯拟合,
        R^2=%.4f',R2_eta_l));
70  plot(f_fit_r, eta_fit_r, 'r-','LineWidth',1.6,'DisplayName',sprintf('右4次多项式拟合,
        R^2=%.4f',R2_eta_r));
71
72  % --------------------------
        拟合方程单独框在右上角（白色背景+黑色边框）--------------------------
```

```
eq_text = {
    sprintf('左拟合方程：'),
    sprintf('  = %.3f·exp(-(f-%.2f)²/(2·%.2f²)) + %.3f',pf_l(1),pf_l(2),pf_l(3),pf_l(4)),
    sprintf(''),
    sprintf('右拟合方程：'),
    sprintf('  = %.2e·f  + %.2e·f³ + %.2e·f² + %.2e·f +
        %.2f',pf_r(1),pf_r(2),pf_r(3),pf_r(4),pf_r(5))
};
text(0.62, 0.62, eq_text, 'Units','normalized', ...
    'FontSize',9, 'BackgroundColor','w', 'EdgeColor','k', 'LineWidth',1);

% -------------------------- 图像设置 --------------------------
xlabel('超声波频率 f_s / MHz','FontSize',12);
ylabel('衍射效率 \eta','FontSize',12);
title('Raman-Nath衍射效率-频率(\eta-f_s)高精度拟合曲线','FontSize',14);
grid on; grid minor; legend('Location','southwest','FontSize',10); % 图例移到左下角，避开方程框
xlim([75, 115]); ylim([0, 0.12]);
%saveas(gcf,'Raman_eta_f_curve.png');

%% 控制台输出关键参数
fprintf('================ 偏转角-频率拟合结果 ================\n');
fprintf('左1级线性拟合:   = %.6f × f + %.6f, R²=%.4f\n',p_l(1),p_l(2),R2_l);
fprintf('右1级线性拟合:   = %.6f × f + %.6f, R²=%.4f\n',p_r(1),p_r(2),R2_r);
fprintf('\n================ 衍射效率-频率拟合结果 ================\n');
fprintf('左1级高斯拟合 R²=%.4f, 峰值中心频率=%.2f MHz\n',R2_eta_l,pf_l(2));
fprintf('右1级4次多项式拟合 R²=%.4f\n',R2_eta_r);
fprintf('\n图片已保存：Raman_theta_f_curve.png、Raman_eta_f_curve.png\n');
```

Listing 4: Raman-Nath 衍射数据 (定频率) 处理代码

```
clear; clc; close all;

%% 1. 导入原始数据
I = [10,20,30,40,50,60,70,80,90,100];        % 驱动电流/mA
I0 = [4.44,4.44,4.44,4.40,4.40,4.44,4.51,4.50,4.47,4.47]; % 0级光强/V
I1L = [0.00,0.00,0.08,0.10,0.16,0.20,0.24,0.24,0.24,0.25]; % 左1级光强/V
I1R = [0.00,0.00,0.00,0.08,0.10,0.12,0.20,0.20,0.20,0.24]; % 右1级光强/V
etaL =
    [0.000000,0.000000,0.017699,0.021834,0.034335,0.042017,0.048485,0.048583,0.048880,0.050403];
    % 左1级效率
etaR =
    [0.000000,0.000000,0.000000,0.017467,0.021459,0.025210,0.040404,0.040486,0.040733,0.048387];
    % 右1级效率

%% 2. 筛选有效数据
idxL = etaL > 0;
I_L = I(idxL); etaL_valid = etaL(idxL);

idxR = etaR > 0;
I_R = I(idxR); etaR_valid = etaR(idxR);

%% ==================== 绘图：Raman-Nath衍射效率-驱动电流曲线 ====================
figure('Color','w','Position',[100,100,800,500]); hold on;

% -------------------------- 左1级效率：sin²理论拟合--------------------------
fit_fun = @(p,x) p(1) * sin(p(2) * x).^2;
% 初始参数（保证收敛）
p0_L = [max(etaL_valid), pi/(2*100)];
pf_L = lsqcurvefit(fit_fun, p0_L, I_L, etaL_valid);
```

```
% 生成拟合曲线
I_fit_L = linspace(min(I_L), max(I_L), 200);
eta_fit_L = fit_fun(pf_L, I_fit_L);
% 计算拟合优度R²
eta_fit_L_data = fit_fun(pf_L, I_L);
R2_L = 1 - sum((etaL_valid - eta_fit_L_data).^2) / sum((etaL_valid - mean(etaL_valid)).^2);

% -------------------------- 右1级效率：sin²理论拟合--------------------------
p0_R = [max(etaR_valid), pi/(2*100)];
pf_R = lsqcurvefit(fit_fun, p0_R, I_R, etaR_valid);
% 生成拟合曲线
I_fit_R = linspace(min(I_R), max(I_R), 200);
eta_fit_R = fit_fun(pf_R, I_fit_R);
% 计算拟合优度R²
eta_fit_R_data = fit_fun(pf_R, I_R);
R2_R = 1 - sum((etaR_valid - eta_fit_R_data).^2) / sum((etaR_valid - mean(etaR_valid)).^2);

% -------------------------- 绘图--------------------------
% 实验数据点
plot(I_L, etaL_valid, 'bo','MarkerSize',8,'MarkerFaceColor','b','DisplayName','左1级实验数据');
plot(I_R, etaR_valid, 'ro','MarkerSize',8,'MarkerFaceColor','r','DisplayName','右1级实验数据');
% 拟合曲线
plot(I_fit_L, eta_fit_L, 'b-','LineWidth',1.6,'DisplayName',sprintf('左拟合, R^2=%.4f',R2_L));
plot(I_fit_R, eta_fit_R, 'r-','LineWidth',1.6,'DisplayName',sprintf('右拟合, R^2=%.4f',R2_R));

% -------------------------- 拟合方程单独框在右上角--------------------------
eq_text = {
    sprintf('左拟合方程：'),
    sprintf('  = %.3f·sin²(%.4f·I)',pf_L(1),pf_L(2)),
    sprintf(''),
    sprintf('右拟合方程：'),
    sprintf('  = %.3f·sin²(%.4f·I)',pf_R(1),pf_R(2))
};
text(0.62, 0.62, eq_text, 'Units','normalized', ...
    'FontSize',9, 'BackgroundColor','w', 'EdgeColor','k', 'LineWidth',1);

% -------------------------- 图像设置--------------------------
xlabel('驱动电流 I / mA','FontSize',12);
ylabel('衍射效率 \eta','FontSize',12);
title('Raman-Nath衍射效率-驱动电流曲线','FontSize',14);
grid on; grid minor; legend('Location','southeast','FontSize',10);
xlim([0, 110]); ylim([0, 0.06]);
%saveas(gcf,'Raman_eta_I_curve.png');

%% 控制台输出关键参数
fprintf('================ Raman-Nath效率-电流拟合结果 ================\n');
fprintf('左1级拟合:   = %.3f·sin²(%.4f·I), R²=%.4f\n',pf_L(1),pf_L(2),R2_L);
fprintf('右1级拟合:   = %.3f·sin²(%.4f·I), R²=%.4f\n',pf_R(1),pf_R(2),R2_R);
fprintf('左1级最大效率：%.4f, 右1级最大效率：%.4f\n',max(etaL),max(etaR));
fprintf('图片已保存：Raman_eta_I_curve.png\n');
```