

光纤 Jones 矩阵的描述与测量

余荫铠，王誉晨

中山大学 物理学院，广州 510275

摘要：给出光的 Stokes 参量和光纤 Jones 矩阵的量子力学描述，并根据表象变换导出光的 Stokes 参量和光纤 Jones 矩阵的测量方法，并对其进行了检验和实践。

关键词：Stokes 参量，Jones 矩阵，表象变换，四元数，Poincaré 球

1 引言

要完备的描述光纤传输光的性质，除了需要研究光纤耦合损耗、传输损耗以及光在光纤中传播的相位变化之外，还需要研究光的偏振状态在光纤传输中的变化。对于线性光学近似，光纤对光的偏振状态的作用可以用一个 Jones 矩阵完备地描述。本文给出一种测量光纤 Jones 矩阵的方法，并在实验中做了一个应用案例。

测量光纤性质的前提是能做到较好的输入光耦合，降低耦合损耗。在实验中我们使用聚光耦合的办法获得了较好耦合效果，单模光纤耦合效率为 2.47 dB，测量过程见附录B，这保证了我们后续的测量过程可以获得较为明显的直接测量量。在光纤的实际应用中，对耦合效率的要求较高，但是在我们的测量实验中，目前的耦合效率完全足够。

光在光纤中传输自然会发生相位变化，该相位变化与光纤所受应力与温度等因素有关，基于对这种影响的测量，可以构造光纤传感器。这部分内容不是我们研究的重点，我们亦测量了相关结果，放在附录C中。

中山大学基础物理实验教学团队的实验讲义[1]中提供了测量光的 Stokes 参量的方法，在这个基础上我们进一步得出测量光纤 Jones 矩阵的方法。北京师范大学的一项本科生研究[2]给出了从量子力学视角简明地理解光的偏振态的方法，为本文的原理、工作描述提供了很大的参考。

我们的总体思路是测量输入光纤和光纤输出光的偏振状态来计算光纤的 Jones 矩阵。在2中我们介绍了光的偏振性的描述方法，这是后文工作

描述的基础；在3中我们介绍描述光纤偏振传输特性的方法；在4中我们给出测量光的 Stoke 参量的方法，并在实验中对该方法进行评估；在5中我们利用4的方法测量输入输出光纤的光的偏振状态，并计算光纤的 Jones 矩阵。

2 光的偏振性的描述

完全偏振光是光的自旋纯态。以光的两个相互垂直方向的电矢量的为表象，将电场的复振幅写为

$$|\psi\rangle = \begin{bmatrix} a_1 e^{i\varphi_1} \\ a_2 e^{i\varphi_2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

这称为 Jones 矢量，由于时间原点的任意性，定义相差一个任意一个相因子。对偏振有物理意义的是两个电矢量分量的相位差

$$\delta = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (2)$$

由1定义密度矩阵[3]

$$\rho \equiv |\psi\rangle\langle\psi| \quad (3)$$

将其分解为

$$\rho = \frac{1}{2}(S_0 I + S_1 \sigma_z + S_2 \sigma_x + S_3 \sigma_y) \quad (4)$$

其中 I 为单位矩阵， $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为 Pauli 矩阵。容易看出 S_0, S_1, S_2, S_3 为四个不完全独立的观测量，也即偏振光的四个量子数

$$S_0 = \text{tr}(\rho) = a_1^2 + a_2^2 \quad (5)$$

$$S_1 = \text{tr}(\rho\sigma_z) = a_1^2 - a_2^2 \quad (6)$$

$$S_2 = \text{tr}(\rho\sigma_x) = a_1 a_2 \cos \delta \quad (7)$$

$$S_3 = \text{tr}(\rho\sigma_y) = a_1 a_2 \sin \delta \quad (8)$$

这就是光的 Stokes 参量。记为

$$\tilde{\mathbf{S}} = [S_0 \quad S]^\top \quad (9)$$

$$\mathbf{S} = [S_1 \quad S_2 \quad S_3]^\top \quad (10)$$

对于完全偏振光，由

$$\text{tr}(\rho^2) = [\text{tr}(\rho)]^2 \quad (11)$$

可知

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (12)$$

同理对于部分偏振光

$$S_0^2 > S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (13)$$

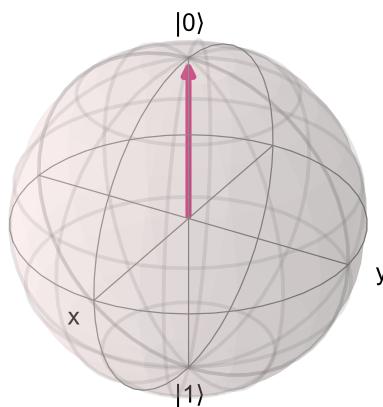


图 1 右旋圆偏振光 (RCP) 在 σ_y 表象 Bloch 球北极

在描述偏振时，通常将 S_0 归一化，从而完全偏振光的 (S_1, S_2, S_3) 落在一个单位球面上，称为 Poincaré 球。在 σ_y 表象下，它就是量子力学中的 Bloch 球。部分偏振光的 (S_1, S_2, S_3) 位于球内，也即混合态。Poincaré 球上方向相反的两个矢量就表示一对正交的偏振态。

水平线偏振光 (HLP)、垂直线偏振光 (VLP)、 $+45^\circ$ 线偏振光 ($+45^\circ$ LP)、 -45° 线偏振光 (-45° LP)、右旋圆偏振光 (RCP)、左旋圆偏振光 (LCP) 的

Stokes 参量分别为

$$\begin{bmatrix} \tilde{S}_{HLP} & \tilde{S}_{VLP} & \tilde{S}_{+45LP} & \tilde{S}_{-45LP} & \tilde{S}_{RCP} & \tilde{S}_{LCP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

3 光纤的偏振传输特性的描述

光纤是一种线性光学元件。

线性光学元件对光的作用可以用 Jones 矩阵 J 描述

$$|\psi'\rangle = J |\psi\rangle \quad (15)$$

这个式子可以看作 Jones 矩阵的定义。对于无耗散 (或近似无耗散) 的线性光学元件， J 是酉矩阵。由于 Jones 矢量定义至可以乘任意相因子，于是单由 (15) 并不能唯一确定 J ，我们可以取规范条件

$$\det J = 1 \quad (16)$$

这一就完备地定义了 Jones 矩阵。由 (3)(15) 可以更新密度矩阵

$$\rho' = J^\dagger \rho J \quad (17)$$

下面直接根据定义 (15) 就可以写出几种常见的线性光学元件的 Jones 矩阵。水平方向的线偏振片

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

垂直方向的线偏振片

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$+45^\circ$ 方向的线偏振片

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

快轴沿水平方向的 $1/4$ 波片

$$\begin{bmatrix} e^{i\frac{\pi}{4}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\pi}{4}} \end{bmatrix} \quad (21)$$

如果测量通过线性光学元件后的光强，则为

$$P = \text{tr}\rho' = \text{tr}(J^\dagger J) \quad (22)$$

于是可以定义光强算符

$$\hat{P} = J^\dagger J \quad (23)$$

其本征值为对应纯态经过线性光学元件后的测量到的光强 P 。

此外，由定义(15)和(16)可知

$$J \in \text{SU}(2) \quad (24)$$

于是可以写出 J 的四元数表示

$$\rho = a_0 \mathbf{I} + i(a_1 \sigma_z + a_2 \sigma_x + a_3 \sigma_y) \quad (25)$$

其中

$$a_0^2 + a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 = 1 \quad (26)$$

用 (a_0, a_1, a_2, a_3) 亦可作为光纤的偏振传输特性的完备描述。

4 光的 Stokes 参量的测量

4.1 方法

由于完全偏振光是光强算符(22)的本征态，任意光的偏振特性作为完全偏振光纯态或混和态也是可以用光强算符的本征值作为量子数来描述的。下面我们定义四个光强算符

$$\hat{P}_x = J_{HL}^\dagger J_{HL} \quad (27)$$

$$\hat{P}_y = J_{VL}^\dagger J_{VL} \quad (28)$$

$$\hat{P}_{+45} = J_{+45L}^\dagger J_{+45L} \quad (29)$$

$$\hat{P}_R = \hat{P}_x J_{0\frac{pi}{4}}^\dagger J_{0\frac{pi}{4}} \quad (30)$$

有表象变换

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_{+45} \\ P_R \end{bmatrix} \quad (31)$$

于是，我们通过测量光通过水平线偏振片后的功率 P_x 、通过垂直线偏振片后的功率 P_y 、通过 $+45^\circ$ 线偏振片后的功率 P_{+45} 、通过水平偏振的功率 P_R

来计算 Stokes 参量。

4.2 验证

基于这种方法，我们对几种典型的完全偏振光的偏振特性进行了测量。

表 1 偏振光强 (P_x, P_y, P_{+45}, P_R) 下的几种典型的偏振光 (单位: W)

| 偏振光强表象 | VLP | HLP | $+45\text{LP}$ | LCP |
|-----------|---------|---------|----------------|---------|
| P_x | -0.007m | 0.8074m | 1.276m | 0.6538m |
| P_y | 1.478m | 0.5914μ | 1.1062m | 0.7106m |
| P_{+45} | 0.7252m | 0.369m | 2.304m | 0.7048m |
| P_R | 0.5692m | 0.3498m | 1.0832m | 1.194m |

表 2 偏振光强的测量不确定度 (单位: W)

| 偏振光强表象 | VLP | HLP | $+45\text{LP}$ | LCP |
|------------|---------|--------|----------------|---------|
| dP_x | 4μ | 0.012m | 0.008m | 0.0047m |
| dP_y | 0.0098m | 20μ | 0.0023m | 0.0043m |
| dP_{+45} | 0.0018m | 0.012m | 0.0185m | 0.0045m |
| dP_R | 0.0114m | 0.013m | 0.0565m | 0.0224m |

我们使用半导体激光器加起偏器制作水平偏振光 (HLP)、垂直偏振光 (VLP)、 $+45^\circ$ 偏振光 ($+45\text{LP}$)、左旋圆偏振光 (LCP)。使用检偏器五次测量光通过水平线偏振片后的功率 P_x 、通过垂直线偏振片后的功率 P_y 、通过 $+45^\circ$ 线偏振片后的功率 P_{+45} 、通过水平偏振的功率 P_R ，并取平均值，结果如表1、表2所示。

表 3 Stokes 参量测量结果

| | Stokes 表象 | VLP | HLP | $+45\text{LP}$ | LCP |
|--------|-----------|--------|--------|----------------|--------|
| 理论值 | S0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | S1 | -1.000 | 1.00 | 0.000 | 0.000 |
| | S2 | 0.000 | 0.00 | 1.000 | 0.000 |
| | S3 | 0.000 | 0.0000 | 0.000 | -1.000 |
| | Stokes 表象 | VLP | HLP | $+45\text{LP}$ | LCP |
| 实测平均值 | S0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | S1 | -1.000 | 1.00 | 0.071 | -0.042 |
| | S2 | -0.019 | -0.09 | 0.934 | 0.033 |
| | S3 | 0.23 | 0.13 | 0.09 | -0.75 |
| | Stokes 表象 | VLP | HLP | $+45\text{LP}$ | LCP |
| 测量不确定度 | S1 | 0.007 | 0.03 | 0.006 | 0.007 |
| | S2 | 0.003 | 0.03 | 0.008 | 0.006 |
| | S3 | 0.02 | 0.04 | 0.05 | 0.02 |

表1、表2结合(31)可以计算它们的 Stokes 参量，如表3。

我们的测量结果虽然接近理论值，但是表3表明测量平均值和理论值的偏差还是稍大于预期的测量不确定度。这是因为我们这里的不确定度只

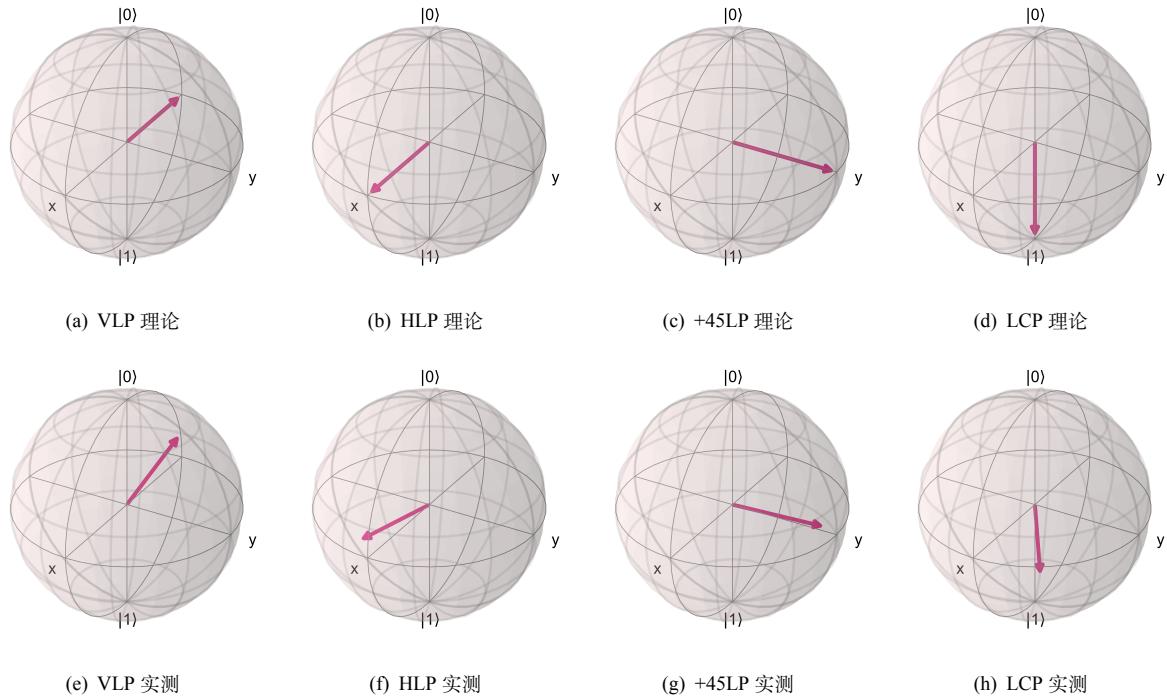


图 2 Poincaré 球表象下的测量结果

是由多次测量给出的统计误差，而没有考虑到测量过程中存在的系统误差，比如检偏器的角度的系统误差等。

尤其是 S_3 的不确定度要比其他几个量要大一些，这是因为我们在实验室所用的 1/4 波片的相移不精确等于 $\pi/2$ ，我们在使用它构造圆偏振光的时候就发现了这一点，用 1/4 波片构造出的圆偏振光的最大线偏振分量与最小线偏振分量相差约 10%。

在实验中可以标定这些系统偏差 [2]，从而修改表象变换 (31) 的表达式，以消除系统偏差。

5 光纤的 Jones 矩阵的测量

5.1 方法

由 (4)(17)(25) 可以得到线性方程

$$K(\tilde{S}, \tilde{S}') \tilde{a} = 0 \quad (32)$$

其中

$$\begin{aligned} K(\tilde{S}, \tilde{S}') &= \\ &\begin{bmatrix} 0 & S'_1 - S_1 & S'_2 - S_2 & S'_3 - S_3 \\ S'_1 - S_1 & 0 & -S'_3 - S_3 & S'_2 + S_2 \\ S'_2 - S_2 & S'_3 + S_3 & 0 & -S'_1 - S_1 \\ S'_3 - S_3 & S'_2 - S_2 & S'_1 + S_1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (33)$$

注意到系数矩阵 $K(\tilde{S}, \tilde{S}')$ 的秩为 2，故无法直接由线性方程组 (32) 求解出光纤的 Jones 矩阵四元数 \tilde{a} 。

我们需要考虑采用拟合的办法。测量 N 次 (\tilde{S}, \tilde{S}') ，构造成本函数为

$$\sum_{\alpha}^N \left| K(\tilde{S}_{\alpha}, \tilde{S}'_{\alpha}) \tilde{a} \right|^2 \quad (34)$$

优化 \tilde{a} 使得成本函数最小，即得到 \tilde{a} 的拟合值，这等价于求解

$$M = \sum_{\alpha}^N K^T(\tilde{S}_{\alpha}, \tilde{S}'_{\alpha}) K(\tilde{S}_{\alpha}, \tilde{S}'_{\alpha}) \tilde{a} \quad (35)$$

的最小的特征值的特征向量。

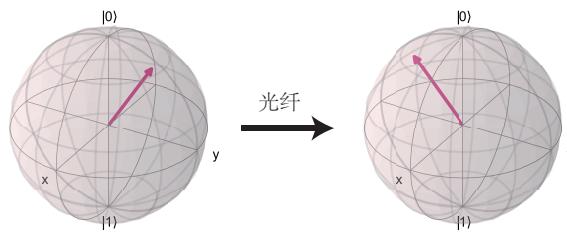


图 3 经过光纤前后的 Poincaré 球

5.2 结果

由于我们只测量了一组 $K(\tilde{S}, \tilde{S}')$ 的值，故无法解出 Jones 矩阵四元数 \tilde{a} 或者 Jones 矩阵 J 。

表 4 经过光纤前后的光的 Stokes 参量

| | | | | |
|-----|---|--------|--------|------|
| 入射光 | 1 | -1.000 | -0.019 | 0.23 |
| 出射光 | 1 | -0.372 | -0.836 | 0.45 |

于是这里我们只给出测量结果 $K(\tilde{S}, \tilde{S}')$ 。如表4和图3所示。

参考文献

- [1] 沈韩, 等. 中山大学物理学院基础物理实验讲义: 实验 C6 光纤光学实验[Z]. 2022.
- [2] 赖煜成, 胡新元, 吴家毅, 等. 旋转波片法测量 Stokes 参量与 Jones 矩阵[J]. 大学物理, 2022, 41(3): 7.
- [3] SAKURAI J J. 现代量子力学[M]. 现代量子力学, 2006.

A 实验信息记录

A.1 基本信息

| | |
|--------------|-------------------------|
| 实验室房间号：108 | 实验人姓名（学号）：余荫铠（20343078） |
| 实验桌桌号：108A07 | 合作者姓名（学号）：王誉晨（20343059） |

A.2 实验环境

| | | |
|------------------------|-------|-------|
| 第一次实验（2022年4月13日星期三下午） | 室温：22 | 湿度：74 |
| 第一次实验（2022年4月27日星期三下午） | 室温：24 | 湿度：85 |
| 第一次实验（2022年5月7日星期六下午） | 室温：24 | 湿度：84 |

A.3 仪器设备

| | |
|---------------|------------------------|
| 光纤信息实验系统 | SGQ-3 |
| He-Ne 激光器 | GY-10 |
| 手持式光功率与能量计及探头 | PM100D |
| 多模光纤 | 62.5/125 μm |
| 少模光纤 | 9/125 μm |
| 单模光纤 | 4/125 μm |
| 波片 | 1/4 λ @633nm |
| 偏振片 | 三个 |
| 光纤耦合调整架 | 一个 |

B 光纤耦合

直接测量激光器的输出光功率，其结果较为稳定

$$P_0 = 3.18 \text{ mW} \quad (36)$$

可以用光纤输出的光功率 P_1 近似表示耦合进光纤的有效光功率。耦合效率定义为

$$\eta = -10 \log \frac{P_1}{P_2} (\text{dB}) \quad (37)$$

η 的大小表征耦合过程的功率损耗， η 越小则说明耦合效果越好。

表 5 光纤耦合效率

| 耦合方式 | 光纤类型 | 输出光功率 (W) | 耦合效率 (dB) |
|------|------|-------------|-----------|
| 直接耦合 | 多模 | 16.4 μ | 22.9 |
| | 少模 | 0.520 μ | 37.86 |
| | 单模 | 0.144 μ | 43.4 |
| 聚光耦合 | 多模 | 2.93 m | 0.356 |
| | 少模 | 2.78 m | 0.584 |
| | 单模 | 1.80 m | 2.47 |

在我们的实验中，我们的耦合效率测量结果如表5所示。

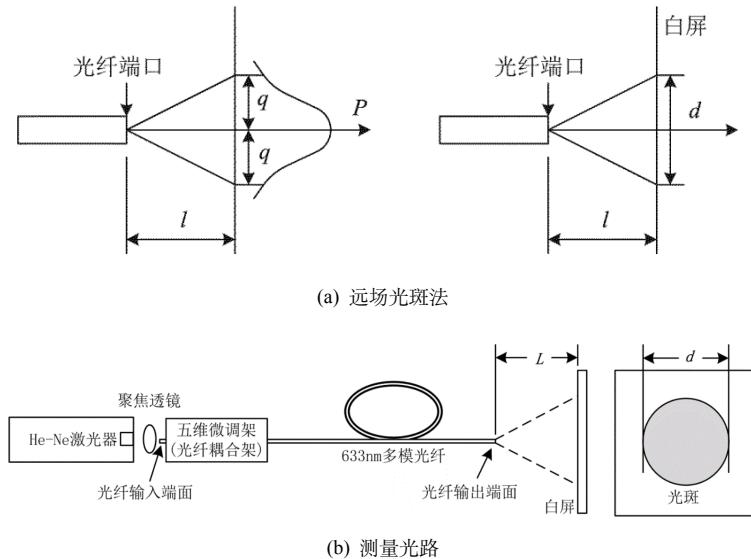


图 4 数值孔径测量示意图

我们使用远场光斑法测量光纤的数值孔径，如图4所示。光强下降到最大值的5%处的半张角的正弦值即为光纤的数值孔径，有

$$NA_{\max} = \frac{q}{\sqrt{l^2 + q^2}} = \frac{k}{\sqrt{4 + k^2}} \quad (38)$$

其中

$$k = \frac{d}{l} \quad (39)$$

表 6 数值孔径测量数据表

| | 远场距离 (cm) | 7 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
|------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 多模光纤 | 光斑上界高度 (cm) | 19.5 | 21.7 | 23.3 | 25.1 | 27.1 | 28.6 | 30.2 | 31.1 |
| | 光斑下界高度 (cm) | 15.6 | 15.7 | 14.5 | 13.2 | 11.8 | 10.7 | 9.5 | 8.3 |
| 少模光纤 | 远场距离 (cm) | 50 | 45 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 |
| | 光斑上界高度 (cm) | 27.5 | 26.5 | 25.9 | 25.4 | 24.4 | 23.4 | 22.6 | 21.5 |
| 单模光纤 | 光斑下界高度 (cm) | 14.2 | 14.5 | 14.7 | 15 | 15.5 | 15.9 | 16.2 | 16.5 |
| | 远场距离 (cm) | 50 | 45 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 |
| | 光斑上界高度 (cm) | 26 | 24.4 | 23.4 | 23.7 | 22.8 | 22.2 | 21.6 | 21 |
| | 光斑下界高度 (cm) | 14 | 13.8 | 13.4 | 14.6 | 15.6 | 15.2 | 15.5 | 16.1 |

直接测量的结果显示在表6中，据此求出 $d \sim l$ 的离散测量值，并正比例拟合得到斜率 k 。如图5所示，这里采用的不是线性拟合而是正比例拟合，因为这里定义的间接测量值为 $k = \frac{d}{l}$ 而非 $k = \frac{dd}{dl}$ 。由于人眼对光斑边界的界定有较大的不确定性，因此需要通过在不同的远场距离多次测量以拟合出这一结果。拟合结果为多模 $k = 0.58825 \pm 0.00008$ ，少模 $k = 0.282 \pm 0.007$ ，少模 $k = 0.251 \pm 0.008$ ，由此可以代入(38)计算各光纤的数值孔径，如表7所示。

表 7 数值孔径计算值

| 光纤类型 | 数值孔径 | 相对不确定度 |
|------|-----------------------|---------|
| 多模 | 0.28217 ± 0.00005 | 0.0054% |
| 少模 | 0.140 ± 0.002 | 1.2% |
| 模单 | 0.125 ± 0.002 | 1.5% |

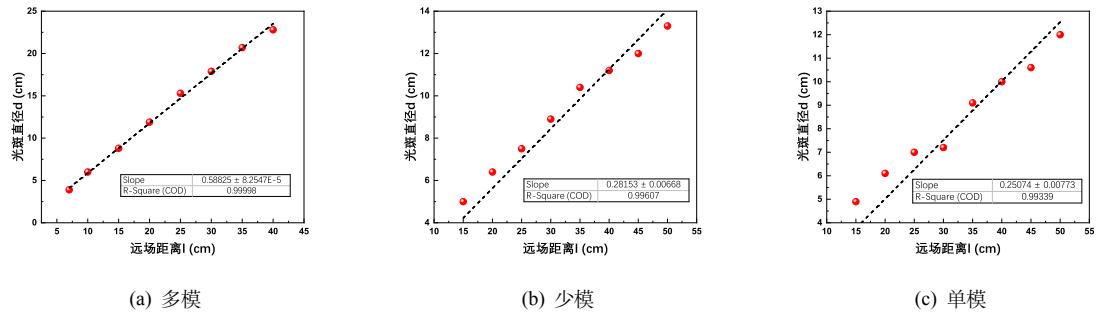


图 5 数值孔径测量 k 的拟合结果

表7显示数值孔径：多模 > 少模 > 单模。

C 光纤传感器

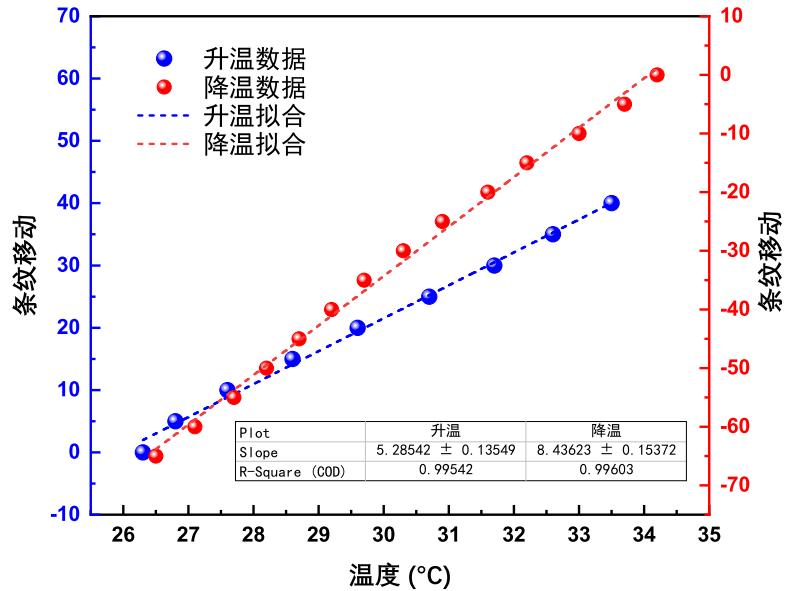


图 6 马赫-曾德干涉条纹随温度的移动

由图7以及图??可见，本实验所用的装置不适合用来做传感器，因为这里显示的光纤光程随温度或者应力的变化非单值性过强，正变化和反变化的灵敏度相差较大。

D 偏振光强测量数据

E 光纤传输的偏振状态变化

F 非保偏激光器

单模光的线偏振分量随时间的变化如图8所示。

G 思考题解答

题 1. 比较、评估两种耦合方法的耦合效率。

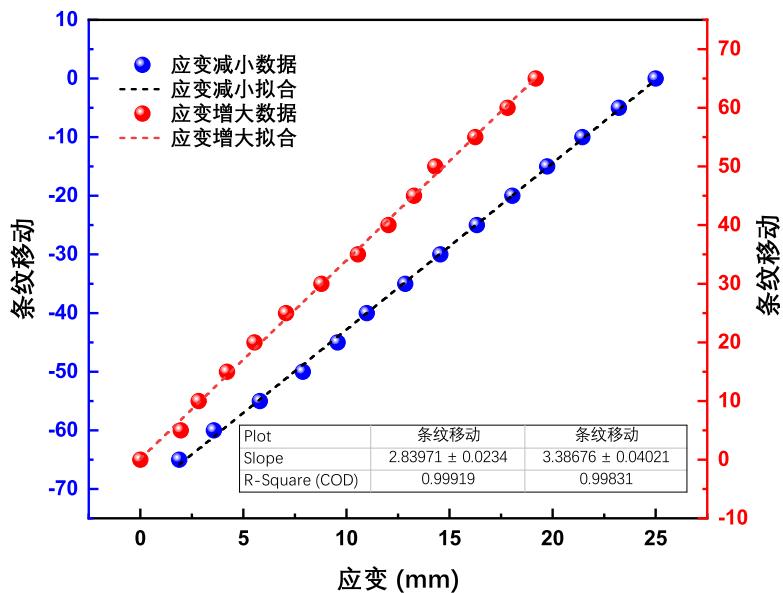


图 7 马赫-曾德干涉条纹随应变的移动

表 8 偏振光功率测量原始数据 (单位: W)

| | | | | | | |
|---------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| VLP | Px | -5.00E-09 | -5.00E-09 | -5.00E-09 | -5.00E-09 | -1.50E-08 |
| | Py | 1.48E-03 | 1.46E-03 | 1.49E-03 | 1.48E-03 | 1.48E-03 |
| | P+45 | 7.22E-04 | 7.25E-04 | 7.27E-04 | 7.25E-04 | 7.27E-04 |
| | PR | 5.67E-04 | 5.70E-04 | 5.69E-04 | 5.52E-04 | 5.88E-04 |
| HLP | Px | 8.11E-04 | 8.09E-04 | 7.85E-04 | 8.11E-04 | 8.21E-04 |
| | Py | 6.02E-07 | 5.74E-07 | 6.14E-07 | 5.95E-07 | 5.72E-07 |
| | P+45 | 3.53E-04 | 3.74E-04 | 3.88E-04 | 3.62E-04 | 3.68E-04 |
| | PR | 3.43E-04 | 3.64E-04 | 3.58E-04 | 3.27E-04 | 3.57E-04 |
| +45LP | Px | 1.27E-03 | 1.28E-03 | 1.27E-03 | 1.29E-03 | 1.27E-03 |
| | Py | 1.10E-03 | 1.11E-03 | 1.11E-03 | 1.11E-03 | 1.11E-03 |
| | P+45 | 2.31E-03 | 2.32E-03 | 2.27E-03 | 2.30E-03 | 2.32E-03 |
| | PR | 1.06E-03 | 1.18E-03 | 1.01E-03 | 1.07E-03 | 1.10E-03 |
| LCP | Px | 6.57E-04 | 6.45E-04 | 6.53E-04 | 6.56E-04 | 6.58E-04 |
| | Py | 7.08E-04 | 7.19E-04 | 7.10E-04 | 7.07E-04 | 7.09E-04 |
| | P+45 | 7.08E-04 | 7.03E-04 | 7.00E-04 | 7.01E-04 | 7.12E-04 |
| | PR | 1.23E-03 | 1.20E-03 | 1.16E-03 | 1.19E-03 | 1.19E-03 |
| VLP 过光纤 | Px | 7.01E-05 | 6.26E-05 | 6.24E-05 | 6.23E-05 | 6.69E-05 |
| | Py | 1.34E-04 | 1.44E-04 | 1.37E-04 | 1.44E-04 | 1.49E-04 |
| | P+45 | 1.35E-05 | 1.82E-05 | 1.71E-05 | 1.80E-05 | 1.80E-05 |
| | PR | 5.49E-05 | 5.07E-05 | 5.03E-05 | 6.88E-05 | 5.79E-05 |

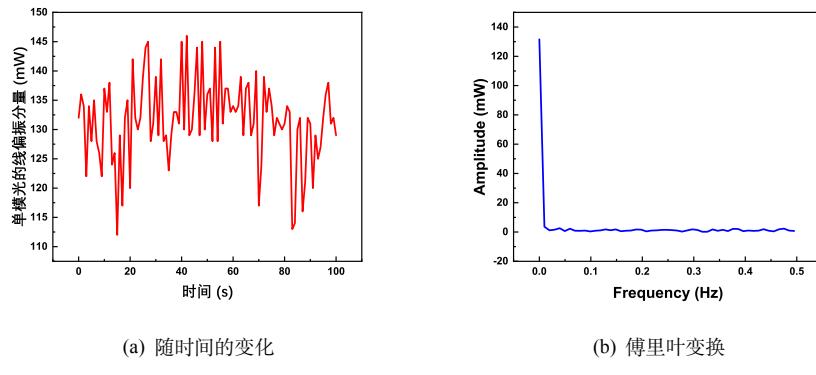


图 8 单模光的线偏振分量随时间的变化

实验中直接耦合的耦合效率远小于加入聚光器件后的耦合效率。前者输出光强只有后者的千分之几。

两种耦合方法分别是：直接耦合和用聚焦透镜耦合。由于实验中激光器与入射孔之间存在较大的距离，激光束呈现小角度发散，光能分布在一个较大的区域。直接耦合会导致部分光未能进入光纤输入端面，从而导致光能损耗较大，耦合效率较小；而采用聚焦透镜可以将发散的光重新汇聚到一个小角度区域内，再在焦平面进入输入端面，有效利用了输入光。

题2. 计算耦合效率（结果用 dB 表示），对自己的工作进行评估。

在实验中我们使用聚光耦合的办法获得了较好耦合效果，单模光纤耦合效率为 2.47 dB，测量过程见附录B，这保证了我们后续的测量过程可以获得较为明显的直接测量量。在光纤的实际应用中，对耦合效率的要求较高，但是在我们的测量实验中，目前的耦合效率完全足够。

题3.以你实验后的认识写下单模、多模光纤之间的区别。

单模光纤在现有实验条件下可以达到的耦合效率更低，数值孔径较小，传输的光功率较弱；而多模光纤能达到的耦合效率更大，数值孔径较大，传输的光功率较强。寡模光纤则介于两者之间。

题4.查阅资料，了解几种光纤传感器的类型，简述工作原理。

根据被外界信号调制的光波物理特征参量的变化情况，光纤传感器可分为强度调制型光纤传感器、相位调制型光纤传感器、频率调制型光纤传感器、波长调制型光纤传感器以及偏振态调制型光纤传感器等5种。

□ 强度调制型光纤传感器。强度调制是光纤传感中相对简单且使用广泛的调制方法。其基本原理为：被测参量对光纤中传输光进行调制使光强发生改变，然后通过检测光强的变化（即解调）实现对待测参量的测量。强度调制型光纤传感器大多基于反射式强度调制。这类传感器结构简单、成本低、容易实现，但容易受光源强度波动的影响。

□ 频率调制型光纤传感器。光频率调制，是指被测参量对光纤中传输光的频率进行调制，通过频率偏移来检测出被测参量。目前，频率调制型光纤传感器大多用于测量位移和速度。

□ 波长调制型光纤传感器。被测量的信号通过选频、滤波等方式来改变传输光的波长，这类调制方式称为光波长调制。传统的光波长调制光纤传感器有基于游标效应的级联光纤 Fabry-Perot 干涉仪温度传感器。虽然该传感器的测温范围小($20 \sim 25$ °)，但其巨大的灵敏度使其能够满足某些特殊要求，如一些需要精确温度控制的科学仪器。光源和频谱分析器的性能极大影响了光纤波长探测技术。近年来迅速发展起来的光纤光栅传感器，则拓展了功能型光波长调制传感器的应用范围。

题5. (选做) 你能自己设计一种光纤传感器吗, 写出传感量的工作原理。

湿度传感器：利用 M-Z 干涉仪，将其中一根光纤的一段替换为与外界连通的空气管。空气湿度变化时，折射率相应改变，干涉条纹随之移动。

题 6. 实验步骤 1 和 2 的实验结果与 (16) 式对比，分析误差产生的原因。

见正文。

题 7. 检索资料，说明保偏激光如何稳定输出光的偏振状态。

保偏激光器多为光纤激光器。光纤激光器以其结构简单紧凑、体积小、工作稳定可靠、无须调试、光束质量好、易于集成等特点一直被人们认为是固体激光技术实用化的最佳选择。保偏光纤是在单模光纤纤芯的两侧加上足够的应力使光纤在截面上的两互相垂直方向上产生大的传播常数差，也即高的双折射，从而实现其保偏性能。它是研制军用光纤陀螺及其他相干光传感器的优选元件。保偏光纤主要结构有：熊猫型光纤、领结型光纤、椭圆包层型光纤、椭圆芯光纤等。其中熊猫型保偏光纤因具备诸多优点而深得用户青睐。人们通常采用保偏光纤和附加的偏振器件共同作用或者在光纤上刻蚀布拉格光栅作为偏振选择元件的手段来实现保偏光纤激光器。

H 原始数据与教师签名

Figure 9 consists of four handwritten pages of experimental data and signatures from a teacher. The data is organized into tables and sections:

- Page 1 (Top Left):**
 - Section 1: "光纤 Jones 矩阵的测量" (Measurement of the Jones Matrix of an Optical Fiber). Includes a table for fiber parameters: $L = 300 \text{ m}$, $\Delta n = 0.005$, $n_1 = 1.45$, $n_2 = 1.46$.
 - Section 2: "前向光路校准" (Forward Path Calibration) with a table showing θ values for various fiber segments.
 - Section 3: "载波波长调节" (Carrier Wavelength Adjustment) with a table for λ values.
 - Section 4: "数据记录" (Data Record) with a table for P_x, P_y, P_{x2}, P_{y2} values.
 - Section 5: "实验结果" (Experimental Results) with a table for P_x, P_y, P_{x2}, P_{y2} values.
 - Section 6: "结论" (Conclusion) with a table for P_x, P_y, P_{x2}, P_{y2} values.
 - Section 7: "教师签名" (Teacher's Signature) with a handwritten signature.
- Page 2 (Top Right):**
 - Section 1: "光纤波长校准" (Wavelength Calibration) with a table for λ values.
 - Section 2: "实验报告和结论" (Report and Conclusion) with a table for P_x, P_y, P_{x2}, P_{y2} values.
 - Section 3: "教师签名" (Teacher's Signature) with a handwritten signature.
- Page 3 (Bottom Left):**
 - Section 1: "实验报告" (Report) with a table for P_x, P_y, P_{x2}, P_{y2} values.
 - Section 2: "教师签名" (Teacher's Signature) with a handwritten signature.
- Page 4 (Bottom Right):**
 - Section 1: "实验报告" (Report) with a table for P_x, P_y, P_{x2}, P_{y2} values.
 - Section 2: "教师签名" (Teacher's Signature) with a handwritten signature.

图 9 原始数据与教师签名