



中华人民共和国国家标准

GB/T 26827—2011

波片相位延迟测量装置的校准方法

Calibration method for measurement equipment of wave plate phase retardation

2011-07-29 发布

2011-12-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 测量原理	2
5 校准方法	3
5.1 概述	3
5.2 校准装置	3
6 校准	3
6.1 绝对校准法	3
6.2 比较校准法	4
6.3 校准结果形式	5
附录 A (资料性附录) 校准装置的说明	6
A.1 基于激光频率分裂原理的波片相位延迟基准测量装置	6
A.2 标准波片	8
A.3 晶体石英最大双折射率 Δn_{λ} 计算用表 ($\Delta n_{\lambda} = n_e - n_o$ 为 24.8 °C 下由分析式得到的计算值)	8

前 言

本标准的附录 A 为资料性附录。

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由全国光学和光子学标准化技术委员会(SAC/TC 103)归口。

本标准主要起草单位：清华大学。

本标准主要起草人：张书练、刘维新、丁铭。

波片相位延迟测量装置的校准方法

1 范围

本标准规定了对波片相位延迟测量装置进行校准的术语和定义、测量原理、校准方法和校准。
本标准适用于对各种原理的波片相位延迟测量装置的精度进行校准。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准。然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GB/T 13962 光学仪器术语

GB/T 15313 激光术语

3 术语和定义

GB/T 13962、GB/T 15313 中确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

波片相位延迟测量装置 measurement equipment of wave plate phase retardation

采用各种原理对波片的相位延迟进行在线或非在线测量的光学系统。

3.2

波片相位延迟基准测量装置 benchmark measurement equipment of wave plate phase retardation

采用激光频率分裂原理对波片相位延迟进行测量的装置,用来标定波片的相位延迟,其测量结果是可以溯源到激光波长的基准值。波片相位延迟基准测量装置的详细说明参见 A.1。

3.3

波片相位延迟标准测量装置 standard measurement equipment of wave plate phase retardation

由波片相位延迟基准测量装置校准过的波片相位延迟测量装置,其对波片相位延迟的测量结果可以用来校准其他的波片相位延迟测量装置。

3.4

标准波片 standard wave plate

由波片相位延迟基准测量装置测定的波片。标准波片的详细说明参见 A.2。

3.5

激光频率分裂 laser frequency splitting

单模驻波氩氦激光器中,由于谐振腔内双折射的存在,一个激光纵模分裂成频率不同的两个模式同时振荡的现象。

3.6

模式跳变 mode jumping

当激光器两振荡模式之间存在较强的模式竞争,调节激光器的谐振腔长时,振荡的模式转为熄灭,熄灭的模式转为振荡的变化。

3.7

频差调谐 frequency difference tuning

调节激光器谐振腔长,激光器频率分裂产生的两正交偏振模式之间的频率差出现的周期性变化。

4 测量原理

根据激光原理,驻波激光器的纵模频率 ν_q 按式(1)计算:

$$\nu_q = \frac{c}{2nL}q \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中:

- c ——真空中光速,单位为毫米每秒(mm/s);
- n ——谐振腔内光路上平均折射率;
- L ——谐振腔长,单位为毫米(mm);
- q ——纵模级数,为数值很大的正整数。

而相邻级纵模 ν_q, ν_{q+1} 的频差即纵模间隔 Δ 按式(2)计算:

$$\Delta = \frac{c}{2nL} \quad \dots\dots\dots(2)$$

如图 1 所示,当在谐振腔内放入双折射元件时,激光器会形成长度不相等的两个物理腔长 nL 。对应的振荡纵模将发生分裂,原来每一个纵模变成偏振方向相互正交、频率不相等的两个纵模(频率)。同时,两个分裂模的偏振方向和双折射元件的两个本征方向一致。如图 2 所示,一个纵模分裂成的两个模 ν_q 和 ν'_q 称为同级分裂模,其频差为 $\Delta\nu$;而 ν'_{q-1} 和 ν_q 为相邻两个纵模都分裂后的两个相邻的分裂模,称为相邻级分裂模,其频差为 $\Delta\nu'$ 。并且相邻级分裂模的偏振态相互垂直,在图 2 中用实线和虚线表示, G 为激光增益曲线。

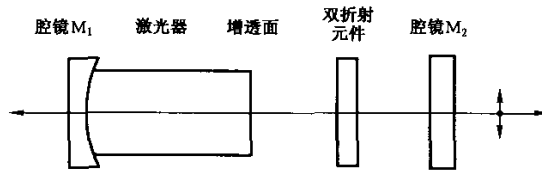


图 1 激光谐振腔内放入双折射元件产生频率分裂示意图

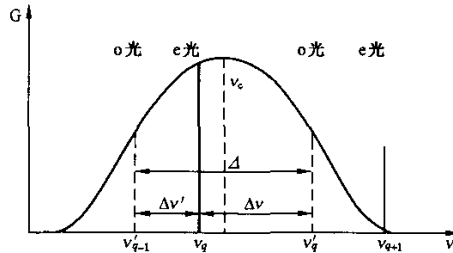


图 2 双折射元件引起的激光频率分裂和调谐激光腔长测量分裂频差大小

设放入腔内的双折射元件引起 o 光和 e 光的光程差为 δ ,则分裂模的频差 $\Delta\nu$ 按式(3)计算:

$$\Delta\nu = \frac{\nu}{L} \delta = \nu'_q - \nu_q \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中:

- ν ——激光频率,单位为赫兹(Hz)。

若放入腔内的双折射元件是波片,则将式(3)与激光纵模间隔式(2)相比,并根据波长频率关系 $c = \lambda \cdot \nu$,而波片的相位延迟与光程差满足 $\Phi = 2\pi \cdot \delta / \lambda$ (λ 为波片工作波长),则得到波片的相位延迟表示为弧度值或角度值按式(4)计算:

$$\Phi = \frac{\Delta\nu}{\Delta} \pi = \frac{\Delta\nu}{\Delta} \times 180^\circ \quad \dots\dots\dots(4)$$

并且,波片相位延迟式的等同量——光程差 δ 按式(5)计算:

$$\delta = \frac{\Delta\nu}{\Delta} \frac{\lambda}{2} \dots\dots\dots(5)$$

从式(4)和式(5)可以看出由频率分裂原理测量得到的波片相位延迟与激光器的谐振腔长无显式关系,只要测得分裂出的频差 $\Delta\nu$ 及纵模间隔 Δ ,即可得到波片的相位延迟量 Φ 。其中 $\Delta\nu$ 和 Δ 可以通过测量两正交模式形成的光拍的频率得到。基于频率分裂原理测量波片相位延迟的装置是基准测量装置。

5 校准方法

5.1 概述

校准方法可以分为绝对校准法和比较校准法,这两种方法都是静态校准。

5.1.1 绝对校准法

用波片相位延迟基准测量装置测量一组标准波片的相位延迟,测量结果作为该标准波片的基准值。将同一组标准波片放入待校准的波片相位延迟测量装置,以标准波片的基准值为基准,按技术要求和操作步骤对待校准装置的输出值进行校准。

5.1.2 比较校准法

将一组不同相位延迟的波片放入波片相位延迟标准测量装置进行测量,然后将同一组波片依次放入待校准波片相位延迟测量装置中,对待校准波片相位延迟测量装置进行校准。

5.2 校准装置

校准装置主要包括波片相位延迟基准测量装置和标准波片。

6 校准

6.1 绝对校准法

6.1.1 环境条件

应在下列条件下进行校准:

- a) 温度: $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- b) 相对湿度: 小于 60%。

6.1.2 测量装置

波片相位延迟基准测量装置,一组标准波片。

6.1.3 校准步骤

6.1.3.1 准备工作

开启波片相位延迟基准测量装置和待校准波片相位延迟测量装置,预热时间不少于 30 min。

清洗好标准波片,并在实验室恒定温度下平衡 1 h 以上。

6.1.3.2 测量标准波片基准值

6.1.3.2.1 点通光标准波片测量

将待测标准波片放入波片相位延迟基准测量装置中,使其通光口径位于光路中,并按要求调整波片的快慢轴方向。

按操作步骤测量标准波片的相位延迟,反复测量五次,取算术平均值,作为该标准波片相位延迟基准值。最后记录每个标准波片的基准值。

6.1.3.2.2 面通光标准波片测量

面通光标准波片需要给出整个通光面上的相位延迟平均值作为实际值。测量时选择通光口径范围内五个测量点,其分布如图 3 所示。移动波片相位延迟基准测量装置中波片架的导轨,使五个测量点依次位于激光路径上,按 6.1.3.2.1 给出的测量标准波片步骤,对每个测量点测量五次,取算术平均值作为该测量点的相位延迟。重复上述过程,直到五个测量点测量完毕。求五个测量点的算术平均值,作为

该面透光标准波片相位延迟的实际值。最后记录每个标准波片的测量值。

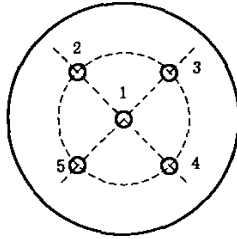


图3 面透光波片的五个测量点示意图

6.1.3.3 不同波长下标准波片相位延迟折算

如果待校准的波片相位延迟测量装置工作波长同样为 632.8 nm,则不需要进行不同波长下波片相位延迟转换;否则查晶体石英材料在待校准波片测量装置工作波长下和同样温度条件下的最大双折射率,按式(6)将标准波片的相位延迟基准值转换成待校准波片测量装置工作波长下的相位延迟量:

$$N_c + \frac{\Phi_c}{2\pi} = \frac{n'_e - n'_o}{n_e - n_o} \frac{\lambda}{\lambda'} \left(N_s + \frac{\Phi_s}{2\pi} \right) = \frac{\Delta n' \lambda}{\Delta n \lambda'} \left(N_s + \frac{\Phi_s}{2\pi} \right) \dots\dots\dots (6)$$

式中:

- N_s ——标准波片级次;
- Φ_s ——标准波片的相位延迟,单位为弧度;
- λ ——632.8 nm 工作波长,单位为纳米(nm);
- λ' ——待校准波片测量装置工作工作波长,单位为纳米(nm);

$n_e, n_o, \Delta n$ ——632.8 nm 波长下晶体石英的主折射率和最大双折射率;

$n'_e, n'_o, \Delta n'$ ——待校准波片测量装置工作工作波长下晶体石英的主折射率和最大双折射率。

得到 N_c 为折算后波片级次,对应于计算值整数部分, Φ_c 为折算后相位延迟,对应于计算值的小数部分。对于查波片的最大双折射率时波长或温度值不一致的情况,可以采用线性插值法求得新波长下的最大双折射率。晶体石英在不同波长下的最大双折射率 Δn_s 见 A.3。

6.1.3.4 用待校准波片装置测量标准波片相位延迟

将校准后的一组标准波片依次放入待校准波片相位延迟测量装置中测量,其操作流程按照测量装置说明书进行。每个标准波片测量五次,取算术平均值作为测量结果 Φ_m ,并记录。

6.1.3.5 数据处理

将待校准波片相位延迟测量装置测得的标准波片相位延迟 Φ_m 同波片相位延迟基准测量装置测量得到折算后的相位延迟 Φ_c 相减,其差值为待校准波片测量装置的示值误差。记录一组校准波片(分别编号为 1,2,...,j,...,n)校准时得到的 $\Phi_{m(j)}$ 和 $\Phi_{c(j)}$ 值,并以 $\Phi_{c(j)}$ 为横坐标,以 $\Phi_{m(j)}$ 为纵坐标,依次计算区间 $[\Phi_{c(j-1)}, \Phi_{c(j)}]$ 内的三次样条插值函数,可以得到整个测量区间上的拟合公式,即作为待校准波片装置的校准公式。校准过的波片测量装置测量的波片相位延迟处于校准点区间内时,可以将测量值代入校准公式得到实际值。对于响应曲线为线性的测量装置,还可以由校准公式计算其线性度。

6.2 比较校准法

将上述绝对校准法校准过的波片相位延迟标准测量装置作为传递标准,可以对一般的工业用波片相位延迟测量装置进行比较法校准。

比较校准法试验条件和校准步骤见 6.1,其中作为测量值传递的波片可以选用一组相位延迟各不相同的普通波片。将待测波片放入波片相位延迟标准测量装置,按使用说明测量其相位延迟,得到五次测量结果取算术平均值作为基准值。然后将波片放入待校准波片相位延迟测量装置测量,取五次测量结果的平均值。如果波片相位延迟标准测量装置的工作波长和待校准波片相位延迟测量装置工作波长不一致,需要采用 6.1.3.3 所述方法,对传递波片的延迟量进行折算后再进行比较。所得的结果可以采

用 6.1.3.5 的方法进行数据处理。

6.3 校准结果形式

校准过程中,波片相位延迟基准测量装置和待校准波片相位延迟测量装置对单个波片的测量结果可以按表 1 记录。

表 1

波片相位延迟 测量装置	系统不 确定度	单个波片相位延迟多次测量值/(°) (测量次序)					测量平 均值	标准差 (1 σ)	测量温 度/°C
		1	2	3	4	5			
波片相位延迟基准 测量装置									
待校准波片相位延迟 测量装置									

对于测量一组标准波片,对待校准波片相位延迟测量装置的多个测量值进行校准的情况,可以按表 2 记录。

表 2

波片相位延迟测 量装置	测量时温 度/°C	不同标准波片测量结果的平均值/(°)(波片编号)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
波片相位延迟基准 测量装置													
待校准波片相位延迟 测量装置													

附录 A
(资料性附录)
校准装置的说明

A.1 基于激光频率分裂原理的波片相位延迟基准测量装置

A.1.1 系统组成

波片相位延迟基准测量装置基于激光频率分裂原理,主要包括以下部分(见图 A.1):

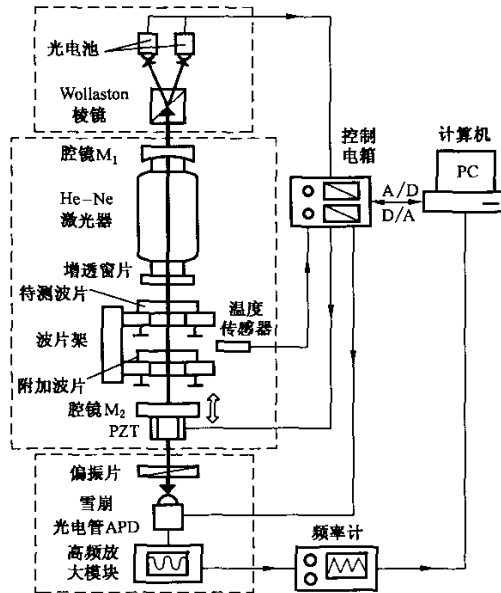


图 A.1 波片相位延迟基准测量装置示意图

a) 光学测量单元

由激光增益管和一个独立反射镜组成的半外腔氦氖激光器构成。其中独立反射镜由压电陶瓷驱动。放置待测波片和附加波片的两个波片架安装在 X、Y 两维导轨上,置于增益管和独立反射镜之间。波片架工作表面与光束垂直,并以激光器一个偏振方向为轴,沿另一个与之正交的偏振方向旋转至使其面法线与光线成夹角 θ 约为 $15'$ 。

b) 光强探测单元

包括一个渥拉斯顿棱镜和两个光电探测器。激光器一端输出光经渥拉斯顿棱镜后按正交偏振态分成两束,分别由两个光电探测器接收其光强信号。

c) 频差测量单元

主要由一个偏振片,光电探测器和高频放大模块组成。激光另一端输出光经过通光方向与波片快慢轴方向成 45° 角放置的偏振片后产生光拍,由光电探测器接收拍频信号,并输入高频放大模块中进行处理,放大后的信号输入频率计读出频差值。

d) 数据采集和程序控制部分

包括控制电箱和计算机。控制电箱接收光强探测信号,并将计算机给出的电压信号放大后驱动压电陶瓷;计算机通过数据采集端口记录激光光强,给出压电陶瓷控制信号,并控制整个波片测量流程,实现自动测量。为检测波片测量时的温度,在波片架附近安装有温度传感器(PT100)测量环境温度。

A.1.2 基本方法

调节激光器腔长,根据波片产生频差大小不同,会出现三种情况,采用不同的计算:

频率分裂直接法:如果放入谐振腔内的波片产生频率分裂量约大于 40 MHz,调谐激光腔长时在出光带宽内始终有两个模式振荡。此时,首先测量同级分裂模 ν_q 和 ν'_q 形成的拍频 $\Delta\nu$;然后沿腔长缩短方向改变腔长,测量相邻级分裂模 ν_q 和 ν_{q-1} 形成的拍频 $\Delta\nu'$ 。则根据 $\Delta = \Delta\nu + \Delta\nu'$,代入式 $\Phi = \frac{\Delta\nu}{\Delta}\pi$ 得到的波片相位延迟 Φ 按式(A.1)计算:

$$\Phi = \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu + \Delta\nu'}\pi = \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu + \Delta\nu'} \times 180^\circ \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

附加波片偏置法:如果放入谐振腔的半/全波片产生频率分裂量约为 20 MHz ~ 40 MHz,激光腔长调谐过程中激光会出现模式跳变现象,处于模式竞争状态的两分裂模没有共存区。可以首先在谐振腔内放入已知快轴方向的附加波片(非半/全波片,如可以是四分之一波片),采用频率分裂直测法测量其相位延迟 Φ_0 ;再将待测半/全波片放入腔内并使其快轴方向与附加波片的快轴方向平行,测得共同作用下的相位延迟 Φ_1 ;最后,共同作用下的相位延迟减去附加波片的相位延迟可以得到待测波片的相位延迟 Φ 按式(A.2)计算:

$$\Phi = \Phi_1 - \Phi_0 + \pi = \Phi_1 - \Phi_0 + 180^\circ \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

纵模间隔比较法:如果半/全波片产生的频率分裂量小于 20 MHz,则调谐激光腔长时两分裂模中会只有一个模式始终振荡。但激光器在双纵模状态时,相邻三个纵模形成的两个模间隔并不等于空腔时的纵模间隔 Δ ,而是其中一个为 $\Delta_1 = \Delta + \Delta\nu$,另一个为 $\Delta_2 = \Delta - \Delta\nu$ 。代入式 $\Phi = \frac{\Delta\nu}{\Delta}\pi$,可以得到波片的相位延迟 Φ 按式(A.3)计算:

$$\Phi = \frac{2\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2}\pi = \frac{2\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2} \times 180^\circ \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

A.1.3 测量步骤

测量过程由计算机程序自动控制,步骤如下:

- a) 首先采用纵模间隔比较法测量未放入待测波片时由激光腔内自身的残余应力等双折射造成的相位延迟,并作为波片相位延迟基准测量装置零点误差 $\Delta\Phi$ 记录。
- b) 将待测波片放入波片相位延迟基准测量装置的波片架上,其通光口径位于光路中,且快慢轴平行于激光偏振方向。
- c) 调谐激光器腔长,并记录 o 光和 e 光的光强调谐曲线。如果没有出现模式跳变现象,则测量先后两个等光强点上两振荡模式的频差 ν_1 和 ν_2 ,相加后按以下两种情况进行判断:
 第一种情况:若相加结果约为一倍纵模间隔大小,则用频率分裂直测法代入式(A.1)计算波片的相位延迟 Φ ;
 第二种情况:若相加结果约为两倍纵模间隔大小,则用纵模间隔比较法代入式(A.3)计算波片相位延迟。
- d) 如果步骤 c) 中出现模式跳变现象,则将附加波片按步骤 b) 的方法放入激光谐振腔,使附加波片的快轴平行于待测波片的快轴方向,采用附加波片偏置法代入式(A.2)计算波片相位延迟 Φ 。
- e) 测量控制程序自动判定得到的波片测量值 Φ ,并补偿系统误差。

A.1.4 误差分析和系统性能指标

对规定置信度的不确定度 X_α 按式(A.4)计算:

$$X_\alpha = t\sqrt{e_r^2 + e_a^2 + e_\lambda^2 + e_j^2 + e_i^2} \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

式中:

- e_r ——补偿系统零点误差后的残差;
- e_a ——补偿波片面法线绕波片快轴旋转后的残差;

- e_λ ——激光波长偏离中心波长引起的不确定系统误差；
- e_f ——激光频差调谐引入的随机误差；
- e_i ——附加波片偏置法测量时两波片快轴夹角造成的不确定系统误差,其他测量方法时为零；
- t ——对于规定置信度与测量次数 n 按学生分布的置信系数；
- n ——测量次数。

为满足校准其他波片相位延迟测量装置的要求,波片相位延迟基准测量装置需要满足如下要求:

- a) 开机后系统稳定时间不少于 30 min；
- b) 单次测量时间不超过 30 s；
- c) 激光器残余应力等造成的零输出相位误差小于 0.05° ；
- d) 测量分辨率达到 $10''$ 以上；
- e) 测量不确定度:对多级波片优于 $\lambda/10\ 000$,对零级波片优于 $\lambda/20\ 000$ 。

A.2 标准波片

标准波片由晶体石英制成,石英材料制作采用 GB 7895—2008 规定的质量要求检验。加工波片时应保证晶体光轴平行于波片表面,偏差小于 0.1° 。

标准石英波片的加工满足:直径为 $15_{-0.1}^0$ mm,厚度为 d 约为 1 mm 的多级波片,厚度不同对应相位延迟不同;两表面平行度容限 $< 2''$;表面平面度的容限 $< \lambda/16$ (波长为 $\lambda = 632.8$ nm),且表面镀 632.8 nm 波长下的减反膜,透过率优于 99.5%。

为避免装夹时产生应力,标准波片采用与其尺寸相匹配的金属盒封装。金属盒内表面贴弹性塑料膜片将波片和金属隔离,以减小封装产生的附加应力并防止波片滑动。按通光口径的大小,标准波片分为点通光标准波片和面通光标准波片,其中点通光标准波片的金属盒开直径为 2 mm 的圆形通光孔,以确定校准时前后两次测量对应标准波片同一个点;面通光标准波片在金属盒表面开直径为 10 mm 的通光孔,适用于宽光束波片测量装置的校准。同时根据晶体生长取向和波片加工时切割方向给出波片快轴方向,用竖线标记于标准波片金属盒外侧。

校准时标准波片应给出测量结果,其各项指标包括:

- a) 标称波长 λ :采用波片相位延迟基准测量装置测量标准波片,标称波长为 632.8 nm；
- b) 多级波片级数 N_s :一般采用螺旋测微器测出的波片厚度可以折算出,并可以保证精确到 0.5 级；
- c) 波片相位延迟基准值 Φ_s :采用波片相位延迟基准测量装置测得的标准波片精度应优于 $\lambda/10\ 000$ (对应于多级波片)；
- d) 校准时波片温度值 T_s :在标准波片测量结果中同时给出附近环境温度值,其测量精度优于 0.04°C 。

A.3 晶体石英最大双折射率 Δn_s 计算用表 ($\Delta n_s = n_e - n_o$ 为 24.8°C 下由分析式得到的计算值)

晶体石英最大双折射率 Δn_s 计算见表 A.1。

表 A.1

波长/ μm	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
Δn_s	0.021 4	0.013 0	0.011 1	0.010 3	0.009 8	0.009 6	0.009 4
波长/ μm	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.80	0.90
Δn_s	0.009 2	0.009 2	0.009 1	0.009 0	0.009 0	0.008 9	0.008 8

表 A.1 (续)

波长/ μm	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60
Δn_s	0.008 8	0.008 7	0.008 7	0.008 6	0.008 5	0.008 5	0.008 4
波长/ μm	1.70	1.80	1.90	2.00	2.10	2.20	2.30
Δn_s	0.008 4	0.008 3	0.008 2	0.008 1	0.008 1	0.008 0	0.007 9
波长/ μm	2.40	2.50	2.60				
Δn_s	0.007 8	0.007 7	0.007 6				