

# TIE-19 折射率温度系数

## 前言

光学玻璃的折射率随温度而变化,变化程度取决于玻璃类型和波长。折射率也会随着气压变化,因此下文我们区分“相对于真空的折射率”或“绝对折射率”,以及正常气压下的折射率,即“相对于普通空气的折射率”(相对折射率,袖珍目录中列出的所有值均为相对折射率)。检验证书中列出的折射率的标准测量温度为22°C [1]。考虑到玻璃的温度系数,可以计算-100°C至+140°C温度范围内从近紫外到近红外的任何波长的折射率变化。

各光学玻璃的数据表中列出了公式的常数 [2]。计算指定温度下的实际折射率通常并不容易,技术信息 TIE-29 [3] 中仅表示了绝对折射率温度系数的公式。

1. 基本原理 .....	1
2. 公式的推导和表征 .....	2
3. 光学玻璃的温度系数 .....	3
4. 非热性玻璃 .....	9
5. 文献 .....	10

本技术信息介绍了如何计算不同温度条件下的折射率。此外,还列出并阐述了光学玻璃的一些温度系数结果。光学系统中一些温度系数为负的特种玻璃有助于将温度变化引起的波前畸变保持在最低水平。这种玻璃被称为非热性玻璃。

## 1. 基本原理

玻璃相对于真空的折射率(绝对折射率)可以用 Sellmeier 公式 [4] 足够近似地描述为从近红外到可见光到近紫外光谱区域的波长的函数。

$$n_{abs}^2(\lambda) - 1 = a \cdot \frac{N}{V} \cdot f \cdot \frac{\lambda^2 \cdot \lambda_0^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \quad (1)$$

其中:

- $n_{abs}(\lambda)$  相对于真空的折射率
- $\lambda$  真空中电磁波的波长
- $a$  常数
- $N$  体积  $V$  中的平均振荡数
- $f$  平均振荡强度
- $\lambda_0$  电子振荡器在紫外范围的平均共振波长

对于某个选定的温度(例如室温),通过在此温度下拟合  $n_{abs}(\lambda)$  的测量数据可以确定此温度下的乘积  $a \cdot \frac{N}{V} \cdot f$  和  $\lambda_0$ 。该参数与温度无关。



## TIE-19 折射率温度系数

### 2. 公式的推导和表征

Sellmeier 函数 (1) 对温度求导, 将贡献可忽略不计的项省略简化之后, 可得到等式 (2)。某个特定玻璃类型的系数  $D_0, D_1, D_2, E_0, E_1$  和  $\lambda_{TK}$  可以通过拟合实验中获得的数据 [4] 来确定。

$$\frac{dn_{abs}(\lambda, T)}{dT} = \frac{n^2(\lambda, T_0) - 1}{2 \cdot n(\lambda, T_0)} \cdot \left( D_0 + 2 \cdot D_1 \cdot \Delta T + 3 \cdot D_2 \cdot \Delta T^2 + \frac{E_0 + 2 \cdot E_1 \cdot \Delta T}{\lambda^2 - \lambda_{TK}^2} \right) \quad (2)$$

其中:

- $T_0$  参考温度 (20 °C)
- $T$  温度 (°C)
- $\Delta T$  温度差  $T - T_0$
- $\lambda$  真空中电磁波的波长 ( $\mu\text{m}$ )
- $D_0, D_1, D_2, E_0, E_1$  和  $\lambda_{TK}$  常数, 取决于玻璃类型

光学玻璃袖珍目录中列出的折射率适用于  $0.10133 \cdot 10^6$  Pa 的气压。它们被称为相对折射率  $n_{rel}$ 。这些值可以充分的精确度用于等式 (2) 中的  $n(\lambda, T_0)$ 。

如果温度函数可闭合积分, 绝对折射率  $n_{abs}(\lambda, T_0)$  随温度差  $\Delta T$  的变化可从等式 (2) 导出:

$$\Delta n_{abs}(\lambda, T) = \frac{n^2(\lambda, T_0) - 1}{2 \cdot n(\lambda, T_0)} \cdot \left( D_0 \cdot \Delta T + D_1 \cdot \Delta T^2 + D_2 \cdot \Delta T^3 + \frac{E_0 \cdot \Delta T + E_1 \cdot \Delta T^2}{\lambda^2 - \lambda_{TK}^2} \right) \quad (3)$$

和

$$n_{abs}(\lambda, T) = n_{abs}(\lambda, T_0) + \Delta n_{abs}(\lambda, T) \quad (4)$$

因此, 就有了两个简单的闭合表达式用于计算绝对折射率温度系数:

$\frac{dn_{abs}(\lambda, T)}{dT}$  以及绝对折射率随温度的变化:  $\Delta n_{abs}(\lambda, T)$ 。

相对于空气的折射率  $\frac{dn_{rel}(\lambda, T)}{dT}$  和  $\Delta n_{rel}(\lambda, T)$  可以通过以下公式计算:

$$n_{rel}(\lambda, T) = \frac{n_{abs}(\lambda, T)}{n_{air}(\lambda, T, p)} \quad (5)$$

和

$$\frac{dn_{abs}(\lambda, T)}{dT} = n_{air}(\lambda, T, p) \cdot \frac{dn_{rel}(\lambda, T)}{dT} + n_{rel}(\lambda, T) \cdot \frac{dn_{air}(\lambda, T, p)}{dT} \quad (6)$$

或

$$\frac{dn_{rel}(\lambda, T)}{dT} = \frac{\frac{dn_{abs}(\lambda, T)}{dT} - n_{rel}(\lambda, T) \cdot \frac{dn_{air}(\lambda, T, p)}{dT}}{n_{air}(\lambda, T, p)} \quad (7)$$

在 (6) 和 (7) 中,  $n_{rel}(\lambda, T_0)$  可以充分的精确度代替  $n_{rel}(\lambda, T)$ 。

$n_{air}(\lambda, T, p)$  和  $\frac{dn_{air}(\lambda, T, p)}{dT}$  的值可以良好的精确度通过 [4] 计算得到

$$n_{air}(\lambda, T, P) = 1 + \frac{n_{air}(\lambda, 15^\circ\text{C}, P_0) - 1}{\left(1 + 3.4785 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}} \cdot (T - 15^\circ\text{C})\right)} \cdot \frac{P}{P_0} \quad (8)$$

$$n_{air}(\lambda, 15^\circ\text{C}, P_0) = 1 + 10^{-8} \cdot$$

$$\left( 6432.8 + \frac{2949810 \frac{1}{\mu\text{m}^2} \cdot \lambda^2}{\left(146 \frac{1}{\mu\text{m}^2} \cdot \lambda^2 - 1\right)} + \frac{25540 \frac{1}{\mu\text{m}^2} \cdot \lambda^2}{\left(41 \frac{1}{\mu\text{m}^2} \cdot \lambda^2 - 1\right)} \right) \quad (9)$$

## TIE-19 折射率温度系数

$$\frac{dn_{air}(\lambda, T, P)}{dT} = -0.00367 \cdot \frac{n_{air}(\lambda, T, P) - 1}{1 + 0.00367 \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \cdot T} \quad (10)$$

其中:

- $P_0$  0.101325 · 10<sup>6</sup> Pa (常压, 单位 Pascal)
- $P$  空气压力
- $\lambda$  真空中电磁波的波长 (μm)
- $T$  温度 (°C)

通过6个玻璃特有的参数  $D_0, D_1, D_2, E_0, E_1$  和  $\lambda_{TK}$ , (相对真空的)绝对折射率的温度系数作为温度和波长的函数, 可以用等式(2)为每种玻璃类型计算得到。绝对折射率与20°C下的折射率相比的变化可以通过等式(3)计算得到。空气的相应折射率可通过(5)和(7)计算得到。

玻璃数据表 [2] 中列出了公式(2)和(3)的常数。这些常数适用于 -100°C 至 +140°C 的温度范围和 0.3650 μm 至 1.014 μm 的波长范围。数据表中的温度系数为指导值。

可应要求在上述温度和波长范围内对单个熔体进行测量, 精度优于  $\pm 5 \cdot 10^{-7}/\text{K}$ 。色散公式的常数可由这些测量数据计算得出, 并按要求列在各玻璃熔体的检验证书中。

### 3. 光学玻璃的温度系数

特定波长下的折射率变化程度因玻璃而异。表1列出了我们当前的产品系列, 按照 e 线(-546.1 nm)下 +20°C 至 +40°C 之间的相对温度系数分类。

这些值从 P-SF68 的  $+24.1 \cdot 10^{-6}/\text{K}$  到 N-PK51 的  $-6.7 \cdot 10^{-6}/\text{K}$  不等。

玻璃	$n_d$	$v_d$	折射率的相对温度系数 [+20/+40 deg. °C]		
			1060 nm	e 线	g 线
P-SF68	2.00520	21.00	15.20	24.10	36.50
SF11	1.78472	25.76	9.20	12.90	17.60
SF57	1.84666	23.83	7.60	12.50	18.90
SF57HTultra	1.84666	23.83	7.60	12.50	18.90
SF6	1.80518	25.43	6.80	11.10	16.20
SF6HT	1.80518	25.43	6.80	11.10	16.20
SF56A	1.78470	26.08	6.20	10.00	14.70
N-LASF40	1.83404	37.30	7.30	9.30	11.40
SF4	1.75520	27.58	5.70	9.20	13.30
P-LASF50	1.80860	40.46	7.10	8.90	10.60
N-LASF46B	1.90366	31.32	6.40	8.90	11.80
P-LASF51	1.81000	40.93	6.90	8.70	10.40
P-LASF47	1.80610	40.90	6.90	8.60	10.30
N-LAF33	1.78582	44.05	7.00	8.50	10.00

玻璃	$n_d$	$v_d$	折射率的相对温度系数 [+20/+40 deg. °C]		
			1060 nm	e 线	g 线
N-LAF35	1.74330	49.40	7.10	8.40	9.60
LAFN7	1.74950	34.95	6.30	8.30	10.40
SF10	1.72825	28.41	5.30	8.10	11.60
SF1	1.71736	29.51	5.00	7.90	11.30
N-ZK7	1.50847	61.19	6.40	7.00	7.60
N-LASF46A	1.90366	31.32	4.70	7.00	9.80
N-LASF43	1.80610	40.61	5.00	6.50	8.10
SF5	1.67270	32.21	3.50	5.80	8.40
N-LASF45	1.80107	34.97	3.80	5.70	7.90
N-LASF45HT	1.80107	34.97	3.80	5.70	7.90

表1: 产品范围按照 e 线下 +20°C 和 +40°C 之间的相对温度系数分类。

→ ← | 返回索引

## TIE-19 折射率温度系数

玻璃	$n_d$	$v_d$	折射率的相对温度系数 [+20/+40 deg. °C]		
			1060 nm	e 线	g 线
N-KZFS5	1.65412	39.70	4.20	5.50	6.80
LASF35	2.02204	29.06	2.70	5.50	9.00
N-LAF34	1.77250	49.62	4.30	5.40	6.50
N-LASF41	1.83501	43.13	4.00	5.40	6.80
N-KZFS2	1.55836	54.01	4.70	5.30	5.90
N-LASF44	1.80420	46.50	4.00	5.30	6.50
N-SSK2	1.62229	53.27	4.30	5.20	6.10
N-LAF21	1.78800	47.49	3.90	5.10	6.20
N-LAK10	1.72003	50.62	4.20	5.10	6.10
N-BALF4	1.57956	53.87	4.20	5.10	6.00
N-LASF9	1.85025	32.17	2.90	5.10	7.70
N-LASF9HT	1.85025	32.17	2.90	5.10	7.70
N-LAK8	1.71300	53.83	4.10	5.00	5.80
N-LASF31A	1.88300	40.76	3.30	4.90	6.60
N-BAF10	1.67003	47.11	3.80	4.90	6.00
N-KZFS11	1.63775	42.41	3.50	4.60	5.70
F5	1.60342	38.03	3.00	4.60	6.20
SF2	1.64769	33.85	2.70	4.60	6.90
N-LAK33B	1.75500	52.30	3.50	4.50	5.40
N-SK2	1.60738	56.65	3.60	4.50	5.30
N-SK2HT	1.60738	56.65	3.60	4.50	5.30
F2	1.62004	36.37	2.70	4.40	6.30
F2HT	1.62004	36.37	2.70	4.40	6.30
N-BASF2	1.66446	36.00	2.90	4.40	6.20
N-BASF64	1.70400	39.38	2.80	4.30	5.90
N-LAF7	1.74950	34.82	2.60	4.30	6.30
K10	1.50137	56.41	3.60	4.20	4.90
N-LAK14	1.69680	55.41	3.20	4.00	4.70
N-KZFS8	1.72047	34.70	2.40	4.00	5.80
N-SF2	1.64769	33.82	2.60	4.00	5.90
N-BAK4	1.56883	55.98	3.10	3.90	4.70
N-BAK4HT	1.56883	55.98	3.10	3.90	4.70
N-LAK34	1.72916	54.50	3.00	3.80	4.60
P-SK58A	1.58913	61.15	3.20	3.80	4.40

玻璃	$n_d$	$v_d$	折射率的相对温度系数 [+20/+40 deg. °C]		
			1060 nm	e 线	g 线
N-KZFS4	1.61336	44.49	2.70	3.70	4.70
N-KZFS4HT	1.61336	44.49	2.70	3.70	4.70
N-LAK9	1.69100	54.71	2.90	3.70	4.40
N-SK5	1.58913	61.27	3.20	3.70	4.30
P-SK60	1.61035	57.90	2.90	3.60	4.30
P-SK57	1.58700	59.60	2.90	3.60	4.30
N-F2	1.62005	36.43	2.10	3.50	5.10
N-BK10	1.49782	66.95	2.90	3.40	3.80
N-SF5	1.67271	32.25	1.80	3.40	5.50
N-SF15	1.69892	30.20	1.60	3.40	5.80
N-BAF52	1.60863	46.60	2.30	3.30	4.30
N-BAF4	1.60568	43.72	2.20	3.30	4.50
N-SSK5	1.65844	50.88	2.20	3.20	4.20
N-SK11	1.56384	60.80	2.60	3.20	3.80
N-LAK22	1.65113	55.89	2.40	3.10	3.90
N-SK14	1.60311	60.60	2.40	3.10	3.70
肖特 N-BK7®	1.51680	64.17	2.40	3.00	3.50
N-BK7HT	1.51680	64.17	2.40	3.00	3.50
N-PSK3	1.55232	63.46	2.50	3.00	3.50
N-BAF51	1.65224	44.96	1.70	2.90	4.10
LLF1	1.54814	45.75	1.90	2.90	3.90
N-BALF5	1.54739	53.63	2.10	2.90	3.70
N-SSK8	1.61773	49.83	2.00	2.90	3.90
N-SK4	1.61272	58.63	2.10	2.80	3.40
N-SF8	1.68894	31.31	0.90	2.60	4.80
N-BAK1	1.57250	57.55	1.80	2.50	3.20
N-SF11	1.78472	25.68	0.10	2.40	5.60
N-SF66	1.92286	20.88	-0.50	2.40	7.30
N-SK16	1.62041	60.32	1.70	2.30	2.90
N-SF57	1.84666	23.78	-0.50	2.20	6.00
N-SF57HT	1.84666	23.78	-0.50	2.20	6.00
N-SF57HTUltra	1.84666	23.78	-0.50	2.20	6.00

→ ← | [返回索引](#)

表1: 产品范围按照e 线下 +20°C 和 +40°C 之间的相对温度系数分类。

## TIE-19 折射率温度系数

玻璃	$n_d$	$v_d$	折射率的相对温度系数 [+20/+40 deg. °C]		
			1060 nm	e 线	g 线
N-K5	1.52249	59.48	1.40	2.10	2.70
LF5HTi	1.58144	40.89	0.80	2.00	3.40
LF5	1.58144	40.85	0.80	2.00	3.40
N-KF9	1.52346	51.54	0.90	1.80	2.60
N-SF1	1.71736	29.62	0.00	1.80	4.20
P-LAK35	1.69350	53.20	0.80	1.70	2.60
N-BAK2	1.53996	59.71	1.00	1.70	2.30
K7	1.51112	60.41	0.90	1.60	2.20
P-SF8	1.68893	31.25	-0.30	1.50	3.70
N-SF10	1.72828	28.53	-0.50	1.50	4.10
N-SF6	1.80518	25.36	-0.80	1.50	4.80
N-SF6HT	1.80518	25.36	-0.80	1.50	4.80
N-SF6HTultra	1.80518	25.36	-0.80	1.50	4.80
N-SF4	1.75513	27.38	-0.70	1.40	4.20
N-SF14	1.76182	26.53	-1.10	1.10	4.10
N-LAF2	1.74397	44.85	-0.10	1.00	2.30
N-LAK21	1.64049	60.10	0.50	1.00	1.60
N-LAK7	1.65160	58.52	0.00	0.70	1.30
N-LAK12	1.67790	55.20	-1.20	-0.40	0.30
N-FK5	1.48749	70.41	-1.40	-1.00	-0.60
N-PSK53A	1.61800	63.39	-2.90	-2.40	-1.80
N-FK51A	1.48656	84.47	-6.00	-5.70	-5.30
N-FK58	1.45600	90.90	-6.50	-6.20	-5.90
N-PK52A	1.49700	81.61	-6.70	-6.40	-6.00
N-PK51	1.52855	76.98	-7.10	-6.70	-6.40

表1: 列出了我们当前的产品系列,按照 e 线(~546.1 nm)下 +20°C 至 +40°C 之间的相对温度系数分类。

图1至图4表示了不同波长和不同玻璃的折射率温度系数(左侧为绝对值,右侧为相对值)随温度的变化。可以看到,相对温度系数的曲线形状与绝对温度系数不同。原因在于空气温度系数的影响。一般来说,与较长波长相比,在较短波长下温度对折射率的影响要高得多。在高色散玻璃中,温度系数的这种“分散”更明显。

→ ← | 返回索引

## TIE-19 折射率温度系数

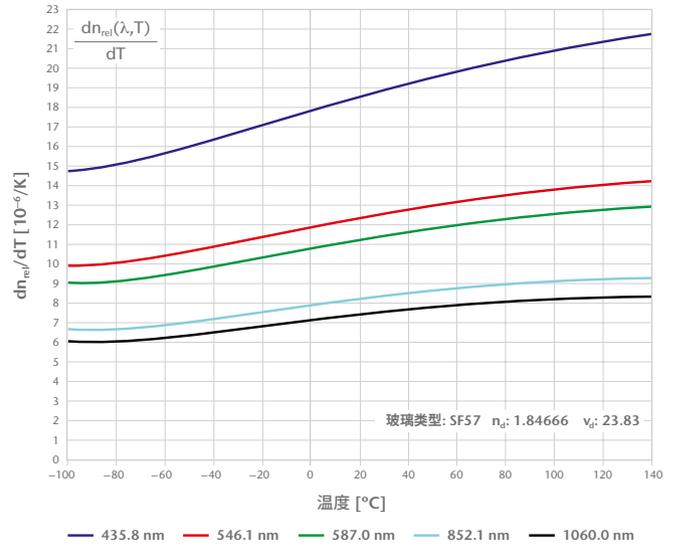
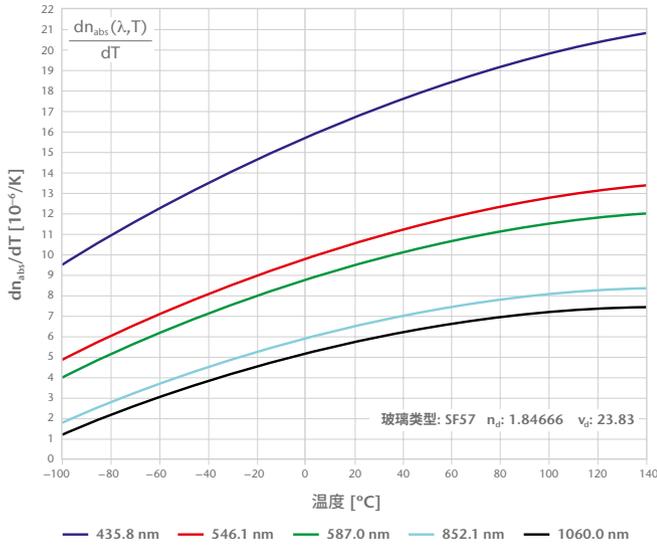


图1: 不同波长下 SF57 的绝对(左图)和相对(右图)折射率的温度系数。

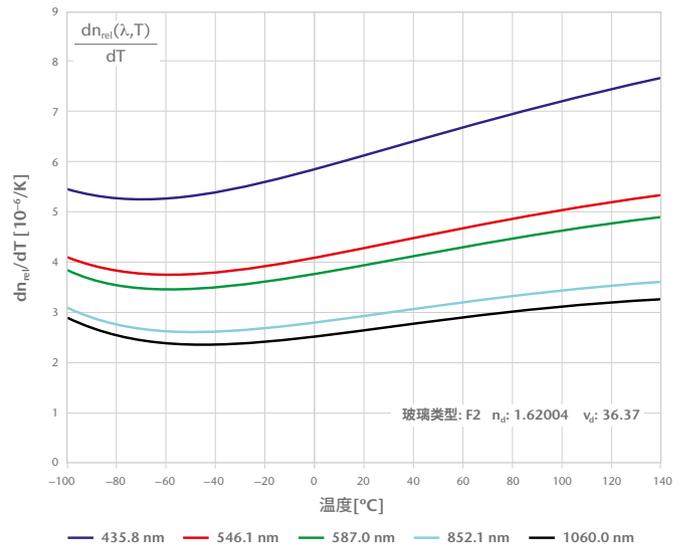
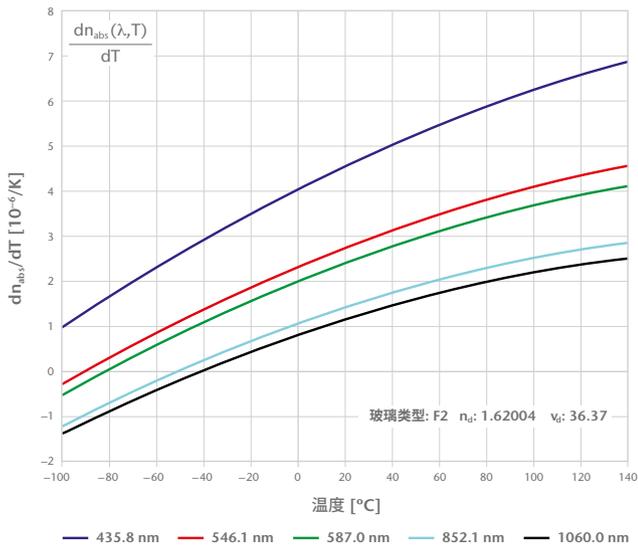


图2: 不同波长下 F2 的绝对(左图)和相对(右图)折射率的温度系数。

→ ← | 返回索引

## TIE-19 折射率温度系数

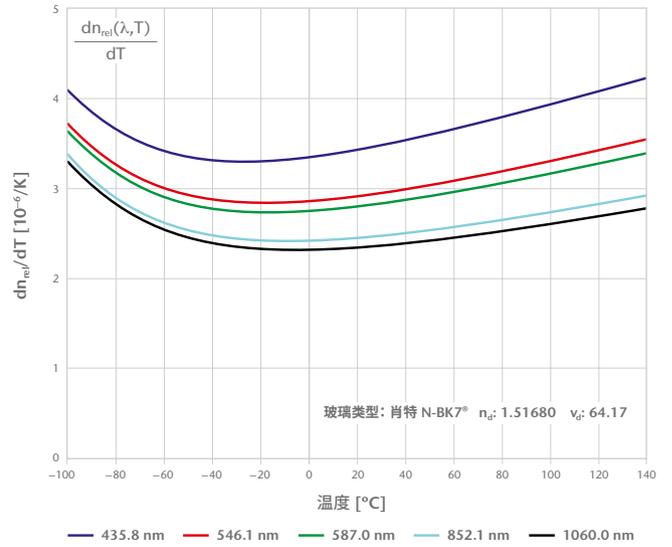
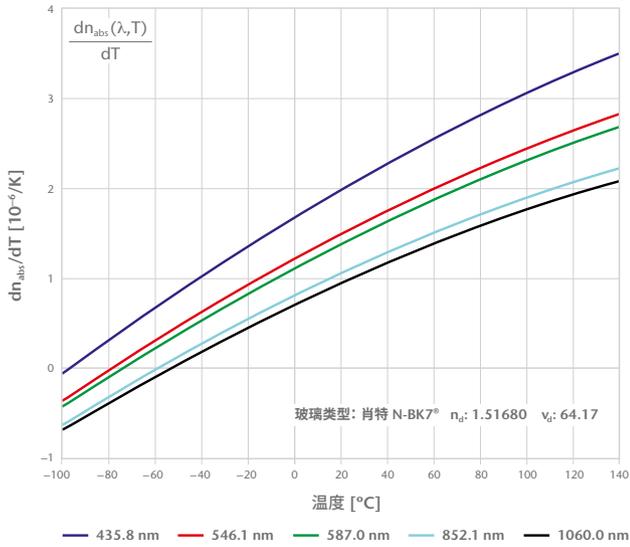


图3: 不同波长下肖特 N-BK7<sup>®</sup> 的绝对(左图)和相对(右图)折射率的温度系数。

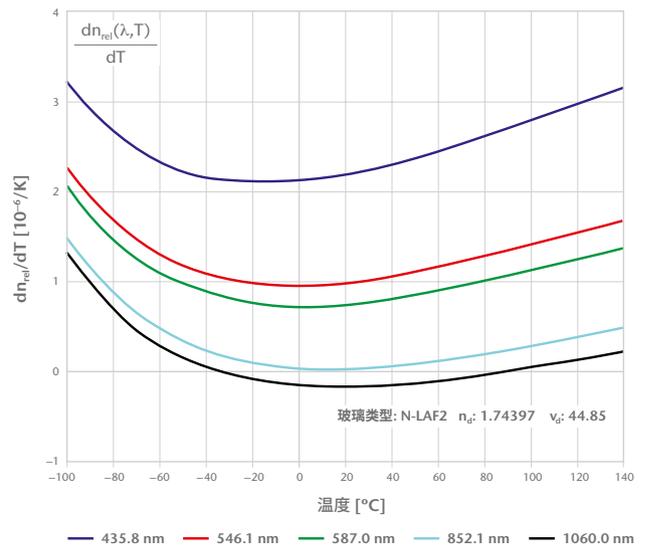
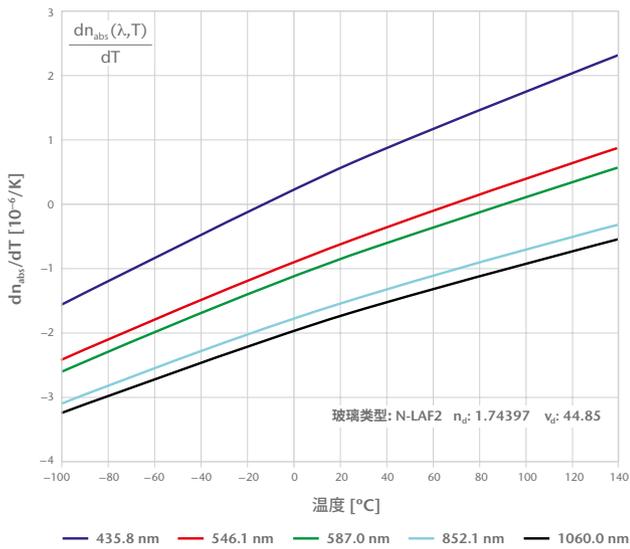


图4: 不同波长下 N-LAF2 的绝对(左图)和相对(右图)折射率的温度系数。

→ ← | 返回索引



## TIE-19 折射率温度系数

图5将上述示例合并在一个图中,更好地表现出不同玻璃的不同温度系数。很多时候,更容易的方法是将折射率绝对值作为温度的函数。图6表示了上述玻璃类型的相对折射率随温度的变化。

可以看到,温度升高20°C时,SF57在587纳米下的折射率变化了 $2.3 \cdot 10^{-4}$ 。此外,图中还包含 N-PK51 的温度变化曲线。这种玻璃在整个温度范围内具有负温度系数。

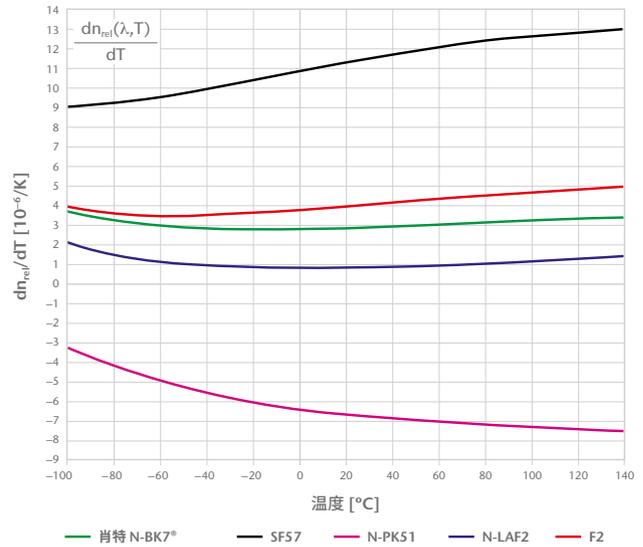
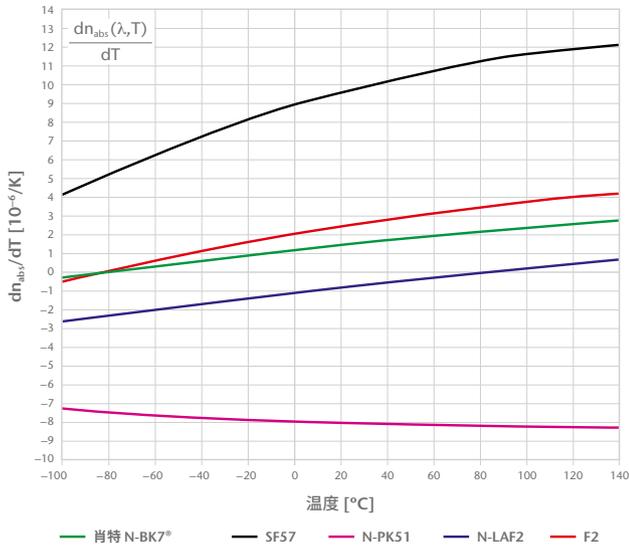


图5: 587纳米波长下不同玻璃类型的绝对(左图)和相对(右图)折射率的温度系数对比。

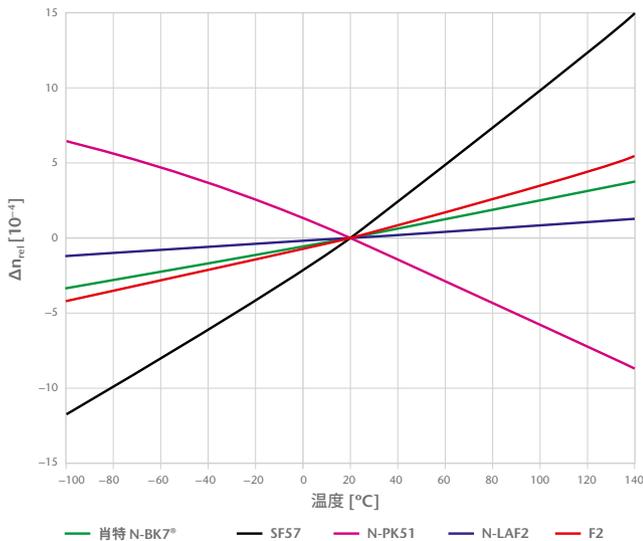


图6: 在587纳米下一些不同玻璃类型的相对折射率(20°C时的目录值)随温度的变化。

→ ← | [返回索引](#)



## TIE-19 折射率温度系数

### 4. 非热性玻璃

在特定条件中,光学系统处于不断变化的不均匀温度情况下,由于光程长度和折射率随温度变化,可能会出现波前畸变。

在光学系统处于不断变化的不均匀温度环境的情况下,由于光程长度和折射率随温度变化,可能会出现波前畸变。

为了补偿这类影响,因玻璃的不均匀热膨胀而产生的波前畸变效应可以通过折射率随温度的变化得到补偿,这一点非常重要。光学玻璃的热膨胀系数始终为正,这意味着需要具有负温度系数的光学玻璃来补偿波前的热效应。这可以用以下等式表示:

$$G = \alpha \cdot (n_{rel}(\lambda, T) - 1) + \frac{dn_{rel}(\lambda, T)}{dT} \quad (10)$$

$\alpha$  是玻璃的热膨胀系数,  $n_{rel}(\lambda, T)$  是所建议波长下的折射率。热光学常数  $G$  的值应尽可能低。

$G$  值接近零的玻璃称为非热性玻璃。表2说明并非所有具有负温度系数的玻璃都是优异的非热性玻璃。

具有负温度系数的光学玻璃包括N-LAK12, N-PSK53A, N-FK5, N-FK51A, N-PK52A, N-FK58 和 N-PK51。但只有 N-PK51, N-FK58, N-PK52A 和 N-FK51A

玻璃	$n_e$	折射率的相对温度系数 [+20/+40 deg. °C], e 线 [10 <sup>-6</sup> K]	alpha -30/70 [10 <sup>-6</sup> K]	G [10 <sup>-6</sup> K]
N-PK51	1.53019	-6.70	12.35	-0.15
N-FK58	1.45600	-6.20	13.67	0.03
N-PK52A	1.49845	-6.40	13.01	0.08
N-FK51A	1.48794	-5.70	12.74	0.52
N-FK5	1.48914	-1.00	9.2	3.50
N-PSK53A	1.62033	-2.40	9.56	3.53
N-LAK12	1.68083	-0.40	7.6	4.77
肖特 N-BK7®	1.51872	3.00	7.1	6.68
N-LAF2	1.74791	1.00	8.06	7.03
F2	1.62408	4.40	8.2	9.52
SF57	1.85504	12.50	8.3	19.60

表2: 光学玻璃及其热光学常数  $G$ 。

## TIE-19 折射率温度系数

图7表示了 N-PK51 的温度系数。可以看到,从  $-100^{\circ}\text{C}$  到  $+140^{\circ}\text{C}$  的整个温度范围内,这些值为负值。

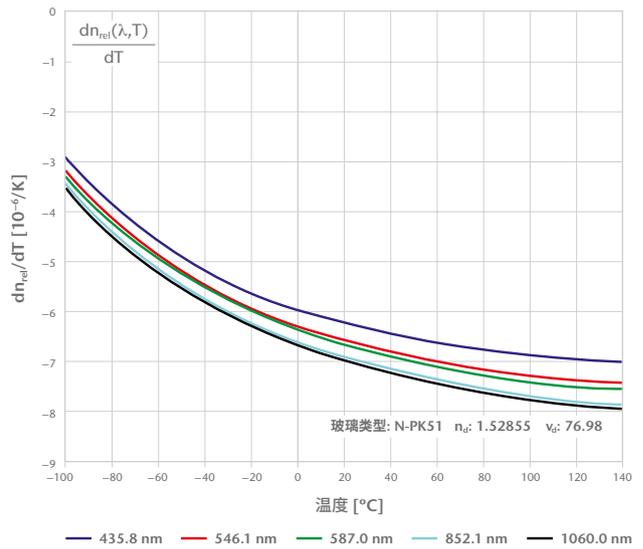
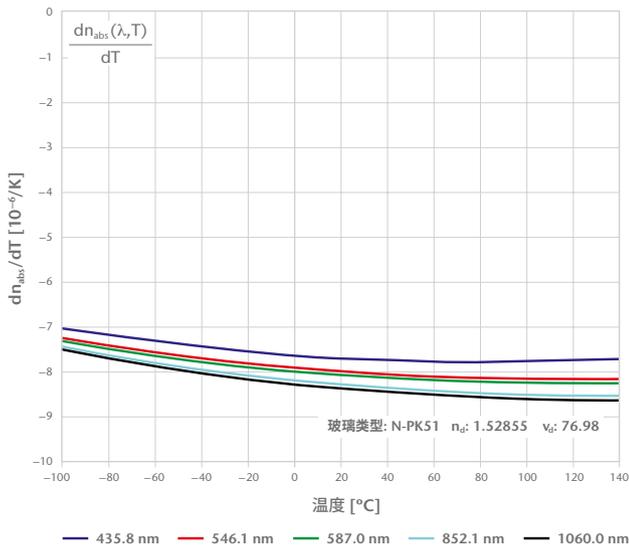


图7: 不同波长下 N-PK51 的绝对(左图)和相对(右图)折射率的温度系数。

### 5. 文献

- [1] SCHOTT Optical Glass Pocket Catalog 2016
- [2] Data Sheets Optical Glasses from SCHOTT
- [3] SCHOTT Technical Information TIE-29 “Refractive index and dispersion”
- [4] “The properties of optical glass”, Bach, Neuroth (Eds.), Springer 1998

← | 返回索引

更多相关信息请联系:

[schott.com](http://schott.com)

肖特(上海)精密材料和设备国际贸易有限公司, 上海市虹梅路1801号凯科国际大厦301室  
电话 +86 (0)21 33678000, 传真 +86 (0)21 33678080/33678886, [info.china@schott.com](mailto:info.china@schott.com)

**SCHOTT**  
glass made of ideas