

doi:10.3788/gzxb20184705.0516004

保偏光纤掺硼应力棒中掺硼量的模拟计算

雷晓飞¹, 蔡英洁¹, 涂峰², 刘书诚³, 石飞飞^{4,5},
冯术娟⁴, 张丽娟⁴, 刘礼华⁴, 赵霞⁴, 谢超英¹

(1 上海交通大学 材料科学与工程学院 电子材料与技术研究所, 上海 200240)

(2 华南理工大学 材料科学与工程学院 发光材料与器件重点实验室和光通信材料研究所, 广州 510640)

(3 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

(4 江苏法尔胜光电科技有限公司, 江苏 无锡 214433)

(5 天津大学 化工学院, 天津 300072)

摘 要: 基于结构性能定量关系研究思路, 把理化性质参量折射率和密度与物质结构参量摩尔折射度以及成分参量掺硼量联系起来, 构建了反映物质结构、成分与性质之间关系的数学模型, 模拟计算掺硼应力棒中掺硼量. 通过实验数据计算出了 B_2O_3 和 SiO_2 在掺硼应力棒中的摩尔折射度分别为 10.546 13 和 7.373 32. 对该数学模型和计算结果进行了验证, 掺硼量计算值与实测值的相对误差在 0.5% 以内, 表明该数学模型的精度高, 能够满足生产实践中掺硼应力棒中掺硼量的估算.

关键词: 光纤材料; 保偏光纤; 结构性能定量关系模拟; 掺硼量; 掺硼应力棒

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)05-0516004-6

Simulation of Boron Content in the Boron Doped Stress Application Preform for Polarization-maintaining Fiber

LEI Xiao-fei¹, CAI Ying-jie¹, TU Feng², LIU Shu-cheng³, SHI Fei-fei^{4,5},
FENG Shu-juan⁴, ZHANG Li-juan⁴, LIU Li-hua⁴, ZHAO Xia⁴, XIE Chao-ying¹
(1 *Institute of Electronic Materials and Technology, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

(2 *State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices and Institute of Optical Communication Materials, School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China*)

(3 *School of Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)
(4 *JiangSu Fasten Optoelectronics Technology Co., Ltd, Wuxi, Jiangsu 214433, China*)

(5 *School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: Based on research idea of Quantitative Structure-Property Relationship, parameters of physicochemical properties refractive index and density as well as the structure parameter molar refraction were correlated with the component parameter boron content, the relationship between material structure, composition and property was responded by a mathematical model to calculate the boron content of boron doped stress application preform. For boron doped stress application preform, molar refraction of B_2O_3 and SiO_2 was calculated by the experimental results are 10.546 13 and 7.373 32, respectively. The simulation model and calculated results were verified by experimental data. The relative errors of boron content between calculated values and measured values are within 0.5%. The results show that the precision of simulation model is high enough to meet the industrial production demand for

基金项目: 江苏省“双创计划”创新团队项目(No.2015032)资助

第一作者: 雷晓飞(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤材料组织与性能. Email: thunder-fly@sjtu.edu.cn

通讯作者: 谢超英(1961-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为功能材料组织与性能关系. Email: cyxie@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2017-10-30; 录用日期: 2018-02-02

<http://www.photon.ac.cn>

estimating the boron content of boron doped stress application preform.

Key words: Optical Fiber materials; Polarization-maintaining fiber; Simulation of Quantitative Structure-Property Relationship; Doped boron content; Boron doped stress application preform

OCIS Codes: 160.2750; 120.5710; 160.2290; 060.2310

0 引言

应力型保偏光纤的制备过程中掺硼量(即氧化硼的摩尔分数)是一个非常重要的参数,其对双折射度^[1-2]和偏振串音^[3]等光学特性都有一定的影响,工作人员在掺硼应力棒的制备过程中需要对掺硼量进行严格控制.生产过程中,虽然预先加入氧化硼的量已知,但由于硼在高温过程中很容易挥发^[4],使得工作人员无法获知生产出的应力棒中实际的掺硼量.通过物理和化学成分测试手段对制得的应力棒进行测试可以得到掺硼量这一参数,然而,物理测试手段测得的结果精度不高,而高精度的化学测试手段测试周期长,费用又过高,长期下来企业难以负担.在此背景下,应力型保偏光纤研发人员需要一种精度较高的数学模型来方便快捷的确定应力棒的掺硼量.

结构性能定量关系(Quantitative Structure-Property Relationship, QSPR)是一种定量描述和研究化合物结构和性质之间关系的研究方法.它根据物质结构决定性质,物质性质反映结构的基本原理,探寻物质结构与性质之间的内在定量关系.QSPR研究的要点是从化合物的结构出发来建立某种数学模型,然后运用这种模型去预测化合物的性质.一旦建立了可靠的 QSPR 模型,仅需要分子的结构信息,就可以用它来预测尚未制得的化合物的各种性质^[5-6].

本文基于 QSPR 研究思路,把理化性质参量折射率 n 和密度 d 与物质结构参量摩尔折射度 R_D 以及成分参量掺硼量 x 联系起来,构建了反映物质结构、成分与性质之间关系的数学模型,得到一种具有普适性的计算掺杂物质摩尔分数的方法.通过实验数据验证了模拟工作,其精度能够满足生产实践中对掺硼应力棒性质的预估,为企业工作节省大量人力物力,在某种程度上补充了国内外该方向研究的缺失.

1 模拟计算的理论基础

摩尔折射度是分子中的电子云(主要是外层价电子)在光照射下相对于分子骨架的相对运动的表现,它可作为分子中度量电子极化率的物理参数.因此组成该材料的“分子”中原子数愈多、摩尔体积愈大,“分子”间的相互作用愈弱、分子堆积愈稀疏,“分子”越易被极化,则其摩尔折射度值越大^[7].

物质的光学折射率、摩尔折射度以及密度之间的关系可用 Lorentz-Lorenz 公式^[8]表达为

$$R_D = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{M}{d} \quad (1)$$

式中, R_D 为物质摩尔折射度, n 为物质折射率, M 为物质摩尔质量, d 为密度.通过测量与计算物质的密度 d 和摩尔折射度 R_D , 计算得到折射率 n 为

$$n = \sqrt{\frac{1 + 2R_D/(M/d)}{1 - R_D/(M/d)}} \quad (2)$$

式(2)既可以用于计算有机物的光学折射率,也可以用来计算气态、液态和无机物等多种类型物质的折射率^[9].因此 Lorentz-Lorenz 公式可以适用于保偏光纤掺硼石英应力棒($(1-x)\text{SiO}_2 + x\text{B}_2\text{O}_3$)的成分~折射率的模拟计算.

当已知 B_2O_3 在掺硼应力棒中的摩尔分数 x , 则应力棒的摩尔质量 M 可通过式(3)计算得到

$$M = x \cdot M_{\text{B}_2\text{O}_3} + (1-x) \cdot M_{\text{SiO}_2} \quad (3)$$

根据摩尔折射度的可加和性^[10], 则应力棒的摩尔折射度 R_D 可通过式(4)计算得到

$$R_D = x \cdot R_D^{\text{B}_2\text{O}_3} + (1-x) \cdot R_D^{\text{SiO}_2} = (R_D^{\text{B}_2\text{O}_3} - R_D^{\text{SiO}_2}) \cdot x + R_D^{\text{SiO}_2} \quad (4)$$

根据式(1)、(3)和(4)得

$$\frac{n^2 - 1}{d \cdot (n^2 + 2)} \cdot [(M_{\text{B}_2\text{O}_3} - M_{\text{SiO}_2}) \cdot x + M_{\text{SiO}_2}] = (R_D^{\text{B}_2\text{O}_3} - R_D^{\text{SiO}_2}) \cdot x + R_D^{\text{SiO}_2} \quad (5)$$

式中 $M_{\text{B}_2\text{O}_3} = 69.618$, $M_{\text{SiO}_2} = 60.08$.若能够确定掺硼应力棒的摩尔折射度 R_D , 即确定 B_2O_3 和 SiO_2 的摩尔折

射度 $R_D^{B_2O_3}$ 和 $R_D^{SiO_2}$ 的值,则折射率 n 、密度 d 、以及掺硼量 x 三者只需已知两者,另外一个物理量就能求出,这样就避免了大量的人力物力来进行测试.由于折射率 n 和密度 d 很容易测得,所以通过测试这两个参量,利用式(5)就可计算出实际掺硼量.

由此可见,模拟工作的关键是确定掺硼石英应力棒的摩尔折射度 R_D ,即确定 B_2O_3 和 SiO_2 的摩尔折射度 $R_D^{B_2O_3}$ 和 $R_D^{SiO_2}$ 的值,并且需要对建模式(5)的模拟精度进行验证.

2 摩尔折射度 $R_D^{SiO_2}$ 确定

化学键贡献法^[11-12]是考虑到邻近原子的影响,将化合物中不同性质的化学键作为基础进行加和计算的一种 QSPR 重要研究方法,可以用来计算物质的摩尔折射度.在模拟工作中本文采取化学键贡献法来计算应力棒中各成分的摩尔折射度.

SiO_2 在掺硼应力棒中的存在形式通常为四面体架状结构,如图 1(a)所示,所以 1 mol SiO_2 中含有 4 mol Si-O 键.纯 B_2O_3 是由许多硼氧三角体即 $[BO_3]$ 单元通过共用氧原子部分有序连接而成的网络结构,其中以硼氧相间的六元环 $[B_3O_6]$ 占优势,硼的配位数为 3,如图 1(b)所示,所以 1 mol B_2O_3 中含有 6 mol B-O 键.

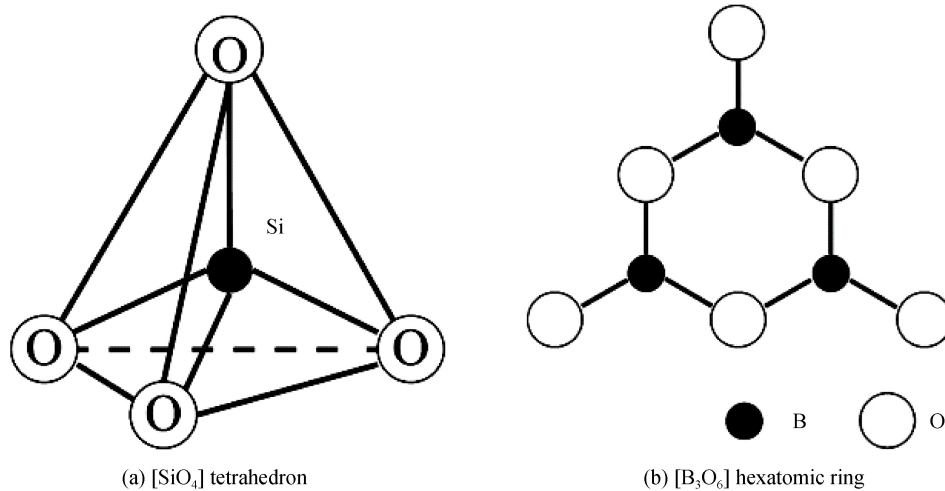


图 1 $[SiO_4]$ 四面体和 $[B_3O_6]$ 六元环结构

Fig.1 Structure diagrams of $[SiO_4]$ tetrahedron and $[B_3O_6]$ hexatomic ring

表 1 为查阅不同文献^[9, 13-17]得到的 Si-O 和 B-O 化学键摩尔折射度的值,以及通过化学键贡献法分别计算得到的 SiO_2 和 B_2O_3 摩尔折射度的值.

表 1 文献中 Si-O 和 B-O 化学键的摩尔折射度以及化学键贡献法计算得到的 SiO_2 和 B_2O_3 的摩尔折射度

Table 1 Molar refraction of Si-O and B-O bonds according to some literatures and calculated compound molar refraction of SiO_2 and B_2O_3

Bond	Bond molar refraction	Compound	Compound molarrefraction
Si-O	1.75 ^[13]	SiO_2	7
	1.8 ^[14]		7.2
	1.83 ^[15]		7.32
	1.8575 ^[9]		7.43
B-O	1.613 ^[16]	B_2O_3	9.678
	1.63 ^[17]		9.78

首先,通过实验测试数据,对表 1 中化学键贡献法计算得到的 SiO_2 摩尔折射度进行验证.用法尔胜泓昇提供的实测纯石英折射率 $n=1.457$,密度 $d=2.205\ 189\ g/cm^3$,将表 1 中 SiO_2 的摩尔折射度数据代入式(1),计算得到折射率 n ,将计算结果分别与实际测量值 1.457 进行比较,得到的误差分析结果见表 2.

由表 2 可见,通过化学键贡献法计算得到的 SiO_2 的摩尔折射度与实测值误差比较小,选取其中相对误差最小的值 7.43 作为 SiO_2 的摩尔折射度.由此, SiO_2 的摩尔折射度得到了验证和确定,即 $R_D^{SiO_2}=7.43$.由于实验测试纯氧化硼的折射率难度较大,所以 B_2O_3 的摩尔折射度需要设计实验进行进一步的验证与确定.

表 2 SiO₂ 摩尔折射度的误差分析Table 2 Error analysis of the SiO₂ molar refraction

$R_D^{SiO_2}$	Calculated refractive index	Absolute error (Δ)	Relative error(δ)/%
7	1.427 341	0.029 659	2.035633
7.2	1.441 383	0.015 617	1.071 869
7.32	1.449 877	0.007 123	0.488 903
7.43	1.457 709	0.000 709	0.048 649

3 摩尔折射度 $R_D^{B_2O_3}$ 确定

3.1 掺硼应力棒全元素化学分析结果

对法尔胜泓昇提供的五根掺硼应力棒(分别标号 1, 2, 3, 4, 5)进行全元素分析, 委托国家建筑材料测试中心测试, 测得 B₂O₃ 的数据结果为质量分数的形式, 将其转化为摩尔分数的形式, 见表 3。

表 3 五根掺硼应力棒的折射率、密度和全元素分析结果

Table 3 Refractive index, density and total-elemental analysis of five boron-doped stress application preforms

Sample	Refractive index	Density/(g · cm ⁻³)	Mass fraction of B ₂ O ₃ /%	Mole fraction of B ₂ O ₃ /%
1	1.447 8	2.056 849 6	26.82	24.029
2	1.448 2	2.044 904 8	28.87	25.720 8
3	1.448 1	2.043 548 5	29.05	25.930 3
4	1.448 4	2.066 502 1	24.28	21.516 7
5	1.450 6	2.086 623 0	22.10	19.303 7

将各个样品归一化为 100 g, 按照全元素分析检测报告中各个成分的质量分数计算得到相应成分的质量, 则 B₂O₃ 的摩尔分数可通过式(6)计算得到

$$x(B_2O_3) = \frac{m(B_2O_3)}{M(B_2O_3)} \left/ \left(\frac{m(B_2O_3)}{M(B_2O_3)} + \frac{m(SiO_2)}{M(SiO_2)} + \frac{m(CaO)}{M(CaO)} + \frac{m(MgO)}{M(MgO)} + \frac{m(Na_2O)}{M(Na_2O)} + \frac{m(P_2O_5)}{M(P_2O_5)} + \frac{m(F)}{M(F)} \right) \right. \quad (6)$$

3.2 掺硼应力棒折射率、密度测试

折射率测试在 Photon Kinetics 公司生产的光纤预制棒分析仪 PK2600 上进行, 利用细光束偏转原理, 在不破坏样品的前提下, 测试过程简便快速, 测试结果精确度较高。

密度测试采用浮沉法在精度为万分之一的电子天平上进行, 分别测量掺硼应力棒的质量 m_0 以及将其悬挂于水中后电子天平的读数 m , 根据受力分析和阿基米德原理, 所测掺硼应力棒的密度 d 可由式(7)计算得到(见表 3)。

$$d = d_{水} \cdot \frac{m_0}{m_0 - m} \quad (7)$$

3.3 摩尔折射度 $R_D^{B_2O_3}$ 确定

将表 3 中 1 号和 2 号样品的数据分别代入式(5)得到一组二元一次方程组, 可以看到只有 $R_D^{SiO_2}$ 和 $R_D^{B_2O_3}$ 是待确定项, 通过求解联立方程组得 $R_D^{SiO_2}$ 和 $R_D^{B_2O_3}$, 用 Matlab 计算得到: $R_D^{B_2O_3} = 10.554 09$, $R_D^{SiO_2} = 7.370 8$ 。

4 掺硼应力棒结构成分性能关系的验证与讨论

以 Matlab 计算得到的 $R_D^{SiO_2}$ 和 $R_D^{B_2O_3}$ 为已知项, 对其他掺硼应力棒样品的掺硼量进行计算, 将计算结果与实测值进行比较, 通过误差分析对式(5)的精度进行评估与验证。

1) 将 2 号和 3 号两个样品的数据代入式(5)进行联立得到两个二元一次方程, 用 Matlab 计算得 $R_D^{B_2O_3} = 10.483 43$, $R_D^{SiO_2} = 7.395 27$ 。

以此为已知量, 对 1 号样品的掺硼量进行计算, 得 $x = 0.228 091$, 即计算得到 1 号样品的掺硼量为 22.805 29 %, 与表 3 实际测得的值 24.029 % 相比, $\Delta = 0.012 237 1$, $\delta = 5.093 %$ 。

2) 以 3.3 节中的计算结果 $R_D^{B_2O_3} = 10.554 09$, $R_D^{SiO_2} = 7.370 8$ 为已知量, 对 3 号样品的掺硼量进行计算,

得到 $x=0.2592\ 004$,即计算得到 3 号样品的掺硼量为 25.920 04%,与表 3 实际测得的值 25.930 3% 相比, $\Delta=0.000\ 102\ 6$, $\delta=0.039\ 57\%$ 。

3)将 1 号和 3 号两个样品的数据代入式(5)进行联立得到两个二元一次方程,用 Matlab 计算得到: $R_D^{B_2O_3}=10.546\ 13$, $R_D^{SiO_2}=7.373\ 32$ 。

以此为已知量,对 2 号样品的掺硼量进行计算,得到 $x=0.257\ 3$,即计算得到 2 号样品的掺硼量为 25.73%,与表 3 实际测得的值 25.720 8% 相比, $\Delta=0.000\ 092$, $\delta=0.035\ 77\%$ 。

在对式(5)进行验证的过程中发现,2)和 3)组合形式的相对误差分别只有 0.039 57%和 0.035 77%。其中 3)的组合形式得到的相对误差要更低一些,说明该组合形式计算得到的 B_2O_3 和 SiO_2 的摩尔折射度精度较高,即 $R_D^{B_2O_3}=10.546\ 13$, $R_D^{SiO_2}=7.373\ 32$ 。

为了进一步验证计算结果,以 $R_D^{B_2O_3}=10.546\ 13$, $R_D^{SiO_2}=7.373\ 32$ 为已知量,对 4 号样品的掺硼量进行计算,得到 $x=0.214\ 7$,即计算得到 4 号样品的掺硼量为 21.47%,与表 3 实际测得的值 21.516 7% 相比, $\Delta=0.000\ 467$, $\delta=0.217\ 04\%$,相对误差比较低。

以 $R_D^{B_2O_3}=10.546\ 13$, $R_D^{SiO_2}=7.373\ 32$ 为已知量,对 5 号样品的掺硼量进行计算,得到 $x=0.192\ 17$,即计算得到 4 号样品的掺硼量为 19.217%,与表 3 实际测得的值 19.303 7% 相比, $\Delta=0.000\ 867$, $\delta=0.449\ 14\%$,相对误差比较低。

实验测试数据计算得到 SiO_2 的摩尔折射度 7.373 32 与表 2 中验证的 SiO_2 摩尔折射度 7.43 很接近,绝对误差和相对误差分别为 $\Delta=0.056\ 68$, $\delta=0.769\%$ 。说明第 2 节中采取化学键贡献法计算 SiO_2 的摩尔折射度的计算思路是正确的。

计算得到的 B_2O_3 摩尔折射度与采取化学键贡献法计算出的结果(见表 1)有一定的差距,需要考虑其他因素对 B_2O_3 摩尔折射度的影响,加以修正。由于掺硼应力棒中 B_2O_3 的含量相比 SiO_2 的含量要低得多,导致 B_2O_3 在掺硼应力棒中并不全部都是由图 1 纯氧化硼中硼氧相间的六元环 $[B_3O_6]$ 的结构形式组成,其中产生了大量的 $[BO_4]$ 结构,使其能够很好地融入硅氧网络结构^[18]。假设 B_2O_3 的存在形式全部是由 $[BO_4]$ 结构组成,B 的配位数为 4,则 1 mol B_2O_3 中将含有 8 mol B-O 键。而实际掺硼应力棒中是由 $[B_3O_6]$ 和 $[BO_4]$ 结构共同组成的,所以实际掺硼应力棒中 1 mol B_2O_3 含有 6 - 8 mol B-O 键,这也说明化学键贡献法中 1 mol B_2O_3 中含有 6 mol B-O 键这个假设并不完全成立。以 B-O 键的摩尔折射度为 1.613 为例,掺硼应力棒中 B_2O_3 的摩尔折射度在 9.678~12.904 之间,而计算结果值 10.546 13 正好在这个范围内,这从另一角度也恰好说明了化学键贡献法在掺硼应力棒成分折射度的计算中是可行的。

5 结论

本文基于 QSPR 研究思路,建立了一种计算保偏光纤掺硼应力棒中掺硼量的数学模型,通过实验数据计算出了 B_2O_3 和 SiO_2 在掺硼应力棒中的摩尔折射度分别为 10.546 13 和 7.373 32,并对该数学模型和计算值进行了验证。结果表明该数学模型的精度高,能够满足生产实践中掺硼应力棒中掺硼量的估算。在实际生产过程中,只需测试出应力棒的折射率和密度,使用该数学模型即可求出该应力棒的掺硼量,方便了企业工作人员在科研生产过程中对掺硼量这一重要参数进行调控,能够为企业节省大量的人力和物力。

参考文献

- [1] TAJIMA K, SASAKI Y. Transmission loss of a 125 μ m diameter PANDA fiber with circular stress-applying parts[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(4): 674-679.
- [2] WEN Jian-xiang, XIAO Tian-peng, BIAN Jin-liang, et al. Fabrication and characteristic research of a diameter polarization maintaining fiber at 1550 nm operation wavelength[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(Sup1): 31-34. 文建湘,萧天鹏,卞进良,等. 1550nm 工作波长新颖结构细径偏振保持光纤的制备及性能研究[J]. 光子学报, 2007, 36(Sup1): 31-34.
- [3] JI Min-ning. Boron-doped content and band-width of W-tunnel ing optical fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(1): 52-56. 季敏宁. W-型单模单偏振光纤中的硼掺杂和带宽[J]. 中国激光, 2002, 29(1): 52-56.
- [4] LIU Xiao-qing, HE Feng, FANG Yu, et al. Technical researches on volatilization reduction of B_2O_3 in borosilicate glasses[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2013, 35(5): 13-17. 刘小青,何峰,房玉,等. 硼酸盐玻璃中减少 B_2O_3 挥发的工艺研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(5): 13-17.

- [5] SUN Fei-fei, LEI Le-cheng, ZHU Jing-ke. Research progress of solubility prediction through quantitative structure-property relationship[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, **34**(5): 1215-1219.
孙飞飞, 雷乐成, 朱京科. 定量结构-性质关系在化合物溶解度预测中的研究进展[J]. 化工进展, 2015, **34**(5): 1215-1219.
- [6] ZHANG Yin-yan, PAN Yong. Forecasting the points of the hydrocarbons based on the analysis of the quantitative structure-property relationship[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, **15**(6): 126-131.
张尹炎, 潘勇. 基于 QSPR 方法的烃类物质苯胺点预测[J]. 安全与环境学报, 2015, **15**(6): 126-131.
- [7] CHENG Da-hai, WU Chuan, DONG Hong, *et al.* The molar refraction estimation of silanes and siloxanes by atom contribution method[J]. *Journal of Hangzhou Normal University(Natural Science Edition)*, 2013, **12**(5): 395-403.
程大海, 伍川, 董红, 等. 原子贡献法估算硅烷及硅氧烷的摩尔折射度[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2013, **12**(5): 395-403.
- [8] ZHANG Jian-liang, NIE Qiu-hua, XU Tie-feng, *et al.* Third-order nonlinear properties of $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ glass[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(Sup1): 211-214.
章健良, 聂秋华, 徐铁峰, 等. $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ 玻璃的三阶非线性研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(Sup1): 211-214.
- [9] STELSON A W. Urban aerosol refractive index prediction by partial molar refraction approach[J]. *Environmental Science and Technology*, 1990, **24**(11): 1676-1679.
- [10] HU Ming-peng, WU Shi-bin, GONG Xiu-ming, *et al.* Research on refractive index fluid for the test of fused silica[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 136-142.
胡明鹏, 吴时彬, 龚秀明, 等. 熔石英玻璃材料测试用折射液配制技术研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(2): 136-142.
- [11] SHANG Li-kun, DENG Jian-guo, DENG Zhi-hua, *et al.* Molar refraction calculation of polysiloxane molecule with functional group and design of molecular structure[J]. *New Chemical Materials*, 2016, **44**(1): 208-210.
尚丽坤, 邓建国, 邓志华, 等. 功能基聚硅氧烷摩尔折射度的计算与分子结构设计[J]. 化工新型材料, 2016, **44**(1): 208-210.
- [12] CHU Jiou-rong, XU Chuan-xiang. Calculating and applying of refractive index of optical polymers[J]. *New Chemical Materials*, 2001, **29**(6): 23-25.
储九荣, 徐传襄. 光学高分子材料折射率的计算及应用[J]. 化工新型材料, 2001, **29**(6): 23-25.
- [13] WARRICK E L. The Application of bond refractions to organo-silicon chemistry[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1946, **68**(12): 2455-2459.
- [14] VOGEL A I, CRESSWELL W T, LEICESTER J. Bond refractions for tin, silicon, lead, germanium and mercury compounds[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1954, **58**(2): 174-177.
- [15] SAYRE R. The molar refraction of liquid organosilicon compounds[J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 1964, **9**(1): 146-153.
- [16] SAYRE R. Molar refraction, extension of the Eisenlohr-Denbigh system of correlation to liquid organotin compounds[J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2002, **6**(4): 244-251.
- [17] WEMPLE S H, PINNOW D A, RICH T C, *et al.* Binary $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ glass system: Refractive index behavior and energy gap considerations[J]. *Journal of Applied Physics*, 1973, **44**(12): 5432-5437.
- [18] HE Feng, FANG Yu, LIU Jia, *et al.* Effect of B_2O_3 on structure and properties of borosilicate glass[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2012, **34**(2): 1-4.
何峰, 房玉, 刘佳, 等. B_2O_3 对硼硅酸盐玻璃结构和性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2012, **34**(2): 1-4.