

文章编号: 1001-5078 (2006) 06-0469-06

冻融型光网络开关

曲小鹏, 刘 静

(中国科学院理化技术研究所, 北京 100080)

摘 要:文章提出了一种新概念型的借助于固-液相变对光信号实施调控的冻融型光开关, 相比于汽泡光开关, 它在提高时间响应特性及降低功耗方面具有优势。本文通过理论分析、热场模拟及原理性实验, 对冻融型光开关的可行性进行了论证, 结果表明基于该技术有望发展出光通讯领域内具有重要应用价值的器件。

关键词:冻融光开关; 光网络通信; 微/纳流体; 微/纳尺度相变传热; 折射率匹配液

中图分类号: TN915.02 O551.3 **文献标识码:** A

Freeze-thaw Optical Network Switch

QU Xiao-peng, LIU Jing

(Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: We proposed a new conceptual optical switch using phase change of refractive index matching liquid to manipulate the transmission of the optical signals. Compared with the well established vapor bubble based optical switch, the freeze-thaw switch has evident merits in realizing a rapid response and reducing energy consumption rate. The feasibility of the present optical switch was investigated from theoretical interpretation, numerical simulation and conceptual experimental validation. It was demonstrated that this freeze-thaw optical switch could be developed as a very promising device for future optical communication network.

Key words: freeze-thaw optical switch; optical network communication; micro/nano fluidics; micro/nano scale phase change heat transfer; refractive index matching liquid

1 引言

所谓光开关,是指在光网络通信中对光上下路信号和不同光路之间进行交叉互连的器件^[1],是光交叉互联(OXC)和光分插复用(OADM)技术中的核心部件。研制性能优良且成本低廉的光开关对光通信技术的发展具有重要意义。按不同工作原理分类,现有光开关技术一般包括:微机械光开关^[2]、电光开关^[3]、热光开关^[4-5]、喷墨气泡光开关^[6-7]、液晶光开关^[8]等。在各类技术中,热效应发挥作用的方式主要体现在如下几方面^[1]:(a)基于材料热光效应的波导光开关;(b)利用热致相变产生气泡的喷墨气泡光开关;(c)利用热驱动液体的热微管光开关;(d)利用热作为驱动力(如热胀效应)的MEMS光开关等。热学光开关由于加工工艺相对成

熟,适合阵列化和大规模生产,成本低,且易于集成,近年来受到了高度重视。

在现有热光开关器件中,利用相变原理实现光信号切换功能的主要是美国 Agilent 公司开发的喷墨气泡光开关技术^[6-7],该开关由交叉的光波导组成,其中,交叉处的微腔内填充有某种折射率匹配的液体,用以允许缺省条件下的无交换传输,同时该处还设置有微加热片,当有光路经过交叉点并需要交换时,电热片通电产热,在液体中生成微小气泡,于

基金项目:国家自然科学基金(50575219), (50325622)资助。

作者简介:曲小鹏(1980-),男,毕业于中国科学院理化技术研究所,获工学硕士学位,主要从事光网络开关中的微热学控制技术研究。

收稿日期:2005-10-11;修订日期:2005-11-14

是光线被气泡全反射到另一输出点,由此实现光路切换。该技术因无运动部件,可靠性较高,且对于光偏振相关损耗和偏振模色散均不敏感,其一经提出,立即引起产业界和学术界的重视。

然而,在气泡光开关中,实现光信号切换需将匹配液从室温加热至蒸发点,此温区通常较宽,因而加热功耗大,响应速度慢,且恶化了光通讯器件的热学状况。设想,若能借助于加热的逆向过程,即通过冷却促成匹配液出现冻结相变过程,则也有可能实现光信号的切换。为此,我们将固-液相变热控技术引入光开关领域中,提出了冻融型光开关技术^[9]。本文从理论和实验的角度对这一新颖技术进行初步的理论分析与试验研究。

2 冻融型光开关原理

由光学原理可知^[10],当光线由光密介质投射到光疏介质时,如果入射角大于临界角,则光线在界面发生全反射现象。冻融光开关正是利用了这一原理来对光信号进行切换。如图 1 所示,光线由光密介质(折射率为 n_1)入射到光疏介质(折射率为 n_2 ,且 $n_1 > n_2$),当入射角 θ_i 小于临界角 $\theta_c = \sin^{-1}(n_2/n_1)$ 时,入射光线会在界面同时发生反射和折射现象,当入射角大于或等于临界角时,光线则在界面发生全反射现象。

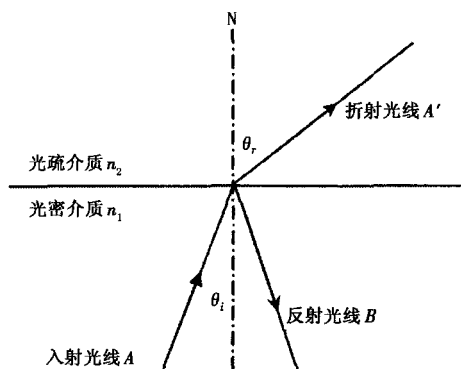


图 1 光线在界面发生折射及反射现象

针对不同的匹配液,当发生冻结相变后,其折射率可能变小也可能变大。这里仅分析前者情况。设该材料处于液体状态时,其折射率与光波导介质相匹配(折射率为 n_1 ,即图 1 中的光密介质),发生冻结相变后折射率降低为 n_2 (即图 1 中的光疏介质)。于是,当入射光线以大于临界角的角度入射到界面时,若液体未冻结,光线将以无损耗的方式透过液体并沿原路传输;而如果液体发生冻结,则光线在界面上发生全反射,从而改变自身的传输方向,由此即实现了对光信号的切换开关作用。

一个典型的冻融光开关结构主要由在硅基底上呈交叉结构的两段光波导组成,其交叉角由液体材料相变前后折射率变化的大小决定,应保证 $> 2\theta_c$ 。光波导材料一般为二氧化硅或其他聚合物。在两段光波导的交叉点设置有微槽道,其内填充有与固体光波导折射率相匹配的液体材料。在微槽道的上、下方设置有微型 Peltier 半导体制冷片。整个光开关结构可通过 MEMS 方法集成在硅基底上,并予以封装。当需要对光信号进行切换时,对 Peltier 制冷片通以正向电流,对匹配液实施冻结,若其冻结后折射率小于液态时的情况,则光信号在固体光波导与冻结液体光波导界面上发生全反射,而进入另一路光波导继续传输。相比于传统 MEMS 光开关和热光开关,冻融开关的正常工作温度范围较宽;若环境温度变化过大时,只需相应增减热电片的电流大小即可。低温环境中,制冷片则可施以反向电流加热来维持液体光波导的液相状态。而在高温状态下,需对制冷片施以较大的正向电流来冷冻液体光波导。

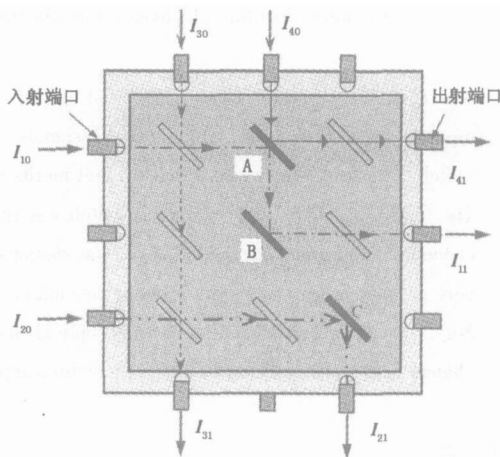


图 2 典型冻融型光开关阵列

采用平面光波导加工技术,还可将多个光开关单元集成为阵列。图 2 所示为 3×3 型冻融光开关阵列,由 9 个光开关单元组成,可以对来自两个方向六个端口的光信号进行切换。比如,来自 I_{10} 端口的光信号在 A 和 B 两开关单元处发生全反射切换后由端口 I_{11} 出射;来自 I_{20} 端口的光信号在 C 开关单元处全反射由 I_{21} 端口出射;而来自 I_{30} 端口的光信号没有被任何开关单元切换,通过三个光开关单元最终由端口 I_{31} 出射;来自 I_{40} 方向的光信号在 A 单元界面上发生全反射由 I_{41} 端口出射。这里, A 可灵活地同时对来自两个方向的光信号进行切换调节。

以上分析的对象为相变前后折射率变化较大的

液体材料,针对这类材料,临界角 θ_c 较小,为简化结构可将交叉光波导设计为十字交叉结构,入射角为 45° 。许多情况下,匹配液相变前后折射率变化并不大,所以临界角 θ_c 较大($\theta_c > 45^\circ$),此时,应取入射角大于临界角才可实现光开关功能。这类开关单元与入射角 θ_i 小于 45° 的光开关的不同之处在于,两列光波导并非成直角交叉状态,而成一定角度,且角度大小由匹配液性质决定。

3 用于冻融型光开关的折射率匹配液

匹配液的选择主要基于如下考虑:(1)匹配液的光学性质(主要是折射率)应与固态光波导性质尽量匹配,以保证光信号无损耗透过匹配液进行传输;(2)匹配液的凝固点不能过低,否则实现匹配液冻结相变所需的能耗较高,且响应慢,因而不利于应用。

以下基于对几种匹配液的对比分析,初步筛选合适的工质液体。

(1)甲基双苯基室温硫化硅

NTT公司在开发热微管光开关时,从降低匹配液粘性并提高光开关响应速率的角度出发,以甲基双苯基室温硫化硅(dimethylphenylpolysiloxane)材料为基础开发出新型的匹配液材料^[11],这是一种无色透明液体,其折射率与光波导材料相匹配,25℃时折射系数为1.449,且热稳定性良好(热解温度为250℃),挥发性较低。该材料在热微管光开关应用中表现良好,但因液态温度范围(-100~250℃)较宽,凝固点在-100℃附近,不易用到冻融型光开关中。

(2)二甲基亚砷(又名DMSO)

该物质在常温下为无色透明液体,毒性极低,热稳定性好。该材料凝固点较高(约18℃),但其折射率为(1.47~1.48)与K9玻璃不匹配。为对比起见,本文也对其进行了实验。

(3)苯丁酮

苯丁酮的凝固点约11~13℃,折射率为1.5185~1.5205。这是一种具有刺激性,外观为无色或黄色的液体。苯丁酮有一定毒性,但考虑到其折射率匹配及凝固点较高的特点,本文的原理性试验中采用了该材料作为冻融型光开关中的匹配液。结果证明该材料在常温下冻结后呈现出白色不透明的固态,光信号在界面上发生反射,从而实现光开关功能。

在冻融型开关中,匹配液膜厚度过大时,冻融过程需较高能耗,且冻融交替作用会引起匹配液发生体积膨胀及收缩,从而可能对开关结构造成损伤。

而若液膜厚度过薄,则匹配液相变后并不一定能保证实现光信号的切换功能。理论和实验研究均表明,当光波在两种介质的界面发生全反射时,反射波并不是完全在界面处发生全反射,而是要进入第二种介质大约一个波长的深度后才沿反射光的方向反射回第一种介质,并且如果入射光为一束有限宽度的平行光时,反射波将沿界面产生一个位移,称为Goos-Hänchen位移^[12]。所以,设计冻融型光开关时,液膜厚度应至少为入射光波长的两倍。

4 冻融型光开关的原理性实验研究

为证实冻融型光开关原理,本文建立了如图3所示的实验台:采用玻璃钢薄板组成台架结构,并在其底部中央刻出正方形孔洞以安置棱镜单元,台架的三侧也分别钻出孔洞,用于固定半导体激光器和两个光敏电阻。实验架置于Peltier制冷片之上,棱镜与制冷片接触,其间涂敷硅油以增强换热效果。制冷片下部置于冷水中,以保证其热端散热。制冷片与外电路连接,通过调整其电流方向及大小,可灵活地控制棱镜的降温、升温过程。制冷片的供电采用WYK-302B₂型直流稳压电源(东方集团扬州金通电子有限公司生产)。

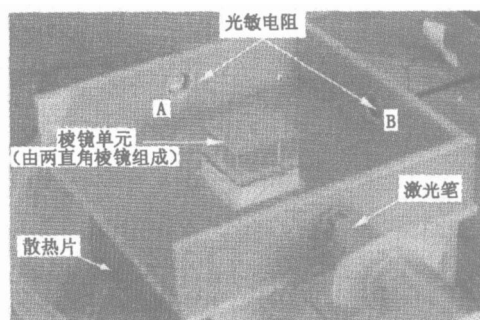


图3 冻融型光开关原理性实验台整体结构图

实验中采用光敏电阻作为光强传感元件。无光照时,其阻值很大;有光时,光敏电阻值则会随着光的强弱发生变化,由此可定性检测出激光束在匹配液处透射或反射后的光强大小。实验中所用光源为购置的红色半导体激光笔,该激光笔在白天室内正常光照条件下采用光敏电阻的测量表明,其功率输出相对稳定,能满足定性实验中较长时间内的稳定光源要求。

本实验中采用两个直角棱镜(TRAP-20B,购自北京创思工贸有限公司)作为一组单元构成光开关的核心,其直角边 $A=B=20.0\text{mm}$,棱镜高 $C=20.0\text{mm}$,棱镜直角角度精度为 $90^\circ \pm 3'$,端面垂直度为 $2'$,材料为K9玻璃,折射率在632.8nm时为1.51467。将两

个棱镜的斜边端面相对固定,两斜面之间的距离为 1~2mm,组成类似正方体结构(图 3)。两棱镜间的缝隙则充填匹配液,当发生相变后起反射膜的作用,由此实现光路的切换。实验中,由来自光源(激光笔)的激光信号垂直入射到直角棱镜的直角边端面,当两直角棱镜间隙内的匹配液为液态时,光信号穿过液膜后透射在图 3 中所示的光敏电阻 A 上,其光强大小由该光敏电阻测量记录。当间隙内的液膜被冻结后,其光学折射率发生变化,光信号在斜端面与冻结液膜的界面处发生全反射,光信号经过全反射后成 90 偏转射向光敏电阻 B,从而记录光强。

实验中,我们还将一枚 T 型热电偶置于棱镜斜端面之间,以监测液膜温度的变化。以上光敏电阻及液膜温度等参数的测量,均通过 Agilent 34970A 数据采集仪实现。

5 实验结果及讨论

(1) 匹配液为二甲基亚砜情形

在冻融实验中,虽然二甲基亚砜液膜发生相变,但激光信号并未因此在棱镜与液膜界面上发生全反射,这表现为光敏电阻 B 未能测到明显的电阻值变化,与此同时,光敏电阻 A 的阻值会因冻结液膜的散射有所变化。整个实验表明,二甲基亚砜的相变过程并未实现对光信号传输方向的切换作用,说明该材料不适合作为光开关的匹配液。

(2) 匹配液为苯丁酮情形

苯丁酮与 K9 玻璃折射率匹配(1.5185~1.5205),并且该材料具有相变点较高的优点,在室温附近即可发生相变,而沸点则较高为 228~230。为考察苯丁酮的降温动力学过程,本文进行了两次降温与升温循环试验。苯丁酮体积取为 0.1 ml, Peltier 制冷片通以恒定电流 1.5A,两次降温时间分别为 2min 和 2.5min。从图 4 降温曲线中的温度突跳处可看出,实验中所采用的苯丁酮样品,其相变点 11~13 之间。

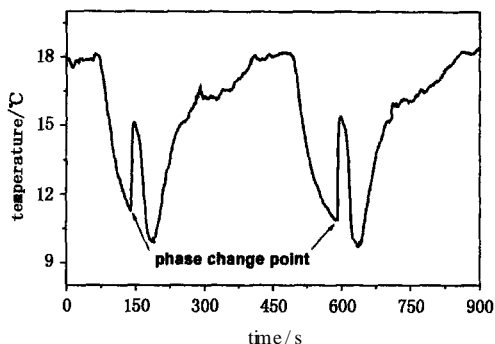


图 4 苯丁酮降温动力学曲线

图 5 给出了 A、B 两光敏电阻随温度曲线的变化情况。从中可以看出,随着苯丁酮冻结及融化过程的进行,透射到 A 和 B 上的光强变化总是呈相反趋势。投射到光敏电阻 A 上的光强先降低后升高(对应光敏电阻值先增大后减小),而投射到光敏电阻 B 上的光强先升高后降低(即光敏电阻值先降低后增大)。表明光信号在此过程中完成了一次切换作用。对于 A 光敏传感器而言,当温度降低,液膜实现相变后,透射过液膜到达该处的光强降低到最低,而当液膜复温恢复成液态后,透射的光强重新恢复变化前的强度。而若对比光敏电阻 B 与温度的响应关系,也可以看出,当液膜实现相变后,反射到光敏电阻 B 上的光强达到最大,而当液膜复温恢复液相后,光敏电阻 B 的阻值又恢复到了折射前的水平。以上试验结果表明,光信号在液膜的冷冻复温过程中完成了一次传输方向的切换。

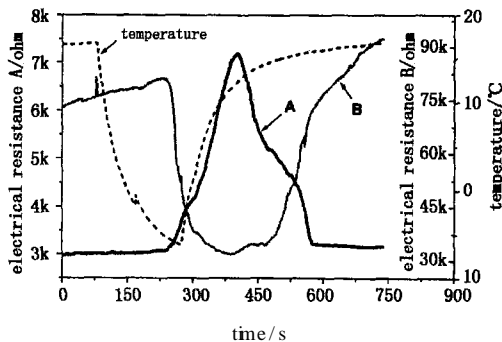


图 5 A、B 两光敏传感器电阻值随温度变化的趋势比较

在切换时间方面,因为实验中采用的液膜尺寸较厚,且制冷片与液膜之间的传热作用也未加强化,因此冻融型光开关的切换速度较慢,此微型化且优化传热结构其开关响应时间会显著缩短。这实际上为今后器件的实用化发展提供了大的空间。与以往建立的基于将室温液体升温至汽化的汽泡光开关相比,以在室温附近即可冻结或融化的液体作为匹配液的冻融开关的能耗可望得到显著降低,而同时其响应速度则可大大加快。

总之,液膜在冷冻与复温的过程中,可以对投射到其界面上的光信号进行切换,单一的液膜与制冷片配合即可实现 1×2 光开关功能。

6 冻融开关热响应过程数值模拟及分析

为深入认识制约冻融型光开关中热响应速度的机理,本文进一步从传热学角度对之进行了理论分析。为简单起见,近似认为匹配液在制冷片的对称降温作用下,其内的传热问题为二维。为此,取冻融光开关中匹配液的剖面为图 6,进行降温过程分析。

假设微槽道长 1mm,截面尺寸为 10 μ m \times 20 μ m。图 6 中间部分为折射率匹配液,在折射率匹配液的上下两方分别设置一片 Peltier 制冷片,匹配液的左右两侧为聚合物材料固体光波导。在上下制冷片的散热端分别设置一层硅包层结构,硅导热系数高,可以起到很好的散热作用。图 6 中,器件的宽度为 90 μ m,硅包层和硅衬底的厚度分别为 5 μ m。

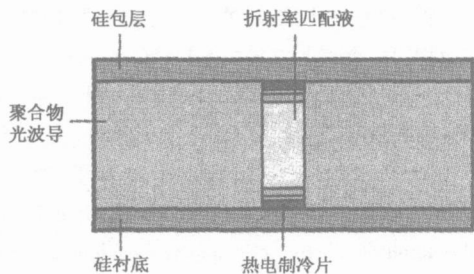


图 6 冻融光开关剖面示意图

设定硅衬底为等温边界条件 ($T = 300\text{K}$),左右边界与包层上边界均为对流边界条件,与室温环境 ($T = 300\text{K}$)间的对流换热系数为 $h = 5\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

Peltier 制冷片在制冷的同时在热端产生热量,数值模拟中将其简化为夹层结构,且制冷端和散热端之间的结构假设为绝热层。冷热端材料均为铜,制冷功率为 60mW,散热功率为 70mW。设定制冷片宽度为 10 μ m,散热端和制冷端厚度各为 2 μ m,绝热层厚度 1 μ m。

对上述复杂结构的相变传热问题采用 Fluent 6.0 软件进行模拟,各物性参数如表 1,2 所示。

表 1 光开关各部分物性参数

材料种类	密度 (kg/m^3)	热容 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)	导热系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)
铜	8978	381	387.6
绝热层	600	800	0.001
硅	2330	700	140
聚合物 (EMMA)	1200	1500	0.2

表 2 计算中所采用匹配液物性参数

匹配液	密度 (kg/m^3)	热容 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)	导热系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	粘性系数 ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)	相变潜热 (J/kg)	凝固点 (K)
水	1000	4200	0.6	1.0×10^{-3}	3.33×10^5	273
苯	875	1759	0.16	6.0×10^{-4}	3.94×10^5	278.5

(1) 匹配液为水的情形

以有代表性的水作为匹配液进行的模拟表明,在降温过程中,两个制冷片对其间的水实现了较好的冷冻,并且上端的硅包层和下面的硅衬底起到了

良好的散热作用。当 $t = 6\text{s}$ 时,水的中间线位置开始实现相变,此时中间线处的温度如图 7 所示;由于相变的持续,水中间部分温度基本维持在 273K,而两侧近壁面处温度略高。到达 $t = 8\text{s}$ 时,由水中间线温度分布曲线可看出,此时中间部分的水已完全实现相变,并在温度突破 273K 后继续降低。

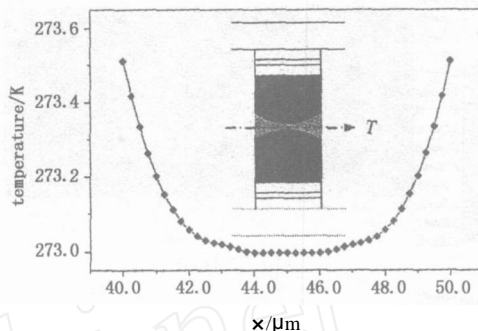


图 7 $t = 6\text{ms}$ 水相变界面及相变中间线的温度分布

对完整的降温以及相变过程进行分析,可以看出,制冷片开始工作后,水中间线处温度即开始迅速降低,并且在 273K 附近维持 4 ~ 5ms 后完全实现相变,此后温度迅速降低,可以认为开始对光信号进行切换作用。所以,水从降温到中间点完全实现相变耗时不到 8ms。当然,以上仅仅是从理论分析角度得出的响应时间,在实际器件中,考虑到制冷片功率问题以及基底散热等问题,响应时间应通过实验进一步确定。

(2) 匹配液为苯的情形

苯的折射率与 K9 玻璃的基本匹配,但考虑到苯具有毒性,所以本文没有对其进行实验研究。由于苯的热物性数据齐全,以下对其作为匹配液的情况进行模拟分析,一方面可考察以苯作为匹配液在原理上的可行性,另一方面也可与水作对比分析。

由图 8 中降温过程中苯的温度分布情况可看出,在降温过程中,苯的温度分布较不均匀,温度梯度较大,原因可能是因为苯的导热系数较水小很多,以至阻碍了苯液体内部热量的快速传递及平衡过程,从而也影响了相变及光开关的响应速度。所以在匹配液的选择方面,应尽量考虑导热系数较大的液体材料。从计算得到的相变界面图上可以看出,在时间 $t = 8\text{ms}$ 时,苯上下两个相变界面才开始接触,直到 $t = 9\text{ms}$ 时,苯中间线处大部区域才基本完成相变过程,可以认为此时才对光信号实现切换作用。之后苯中间线部分温度开始继续下降,这一完整的降温过程可由图 9 表示。与此有所差别的是,

在对水的模拟中, $t = 8\text{ms}$ 时水已完全实现了相变过程。计算结果还表明, 降温过程中, 苯的温度变化速度比水慢。尽管苯的相变点温度略高, 热容小, 但从模拟的综合结果分析, 在相变速度上苯并不具有比水明显的优势。

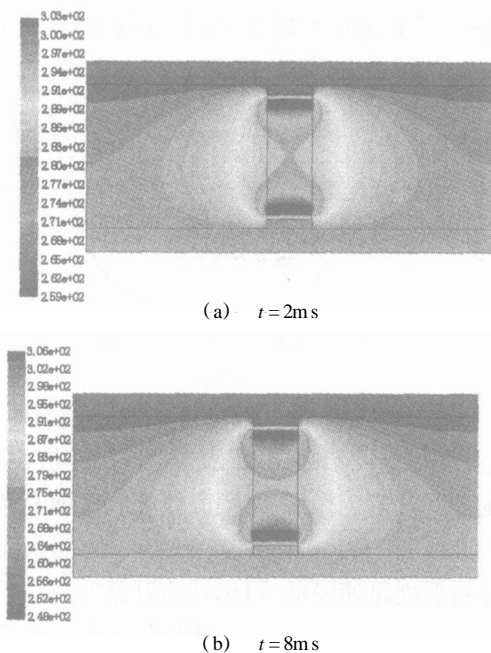


图 8 苯降温过程中截面温度场变化

总之, 以上研究表明, 全面深入的数值模拟和理论分析可为筛选合适的冻融光开关提供重要的参考意见, 为今后开发性能优良的光开关器件打下了基础。

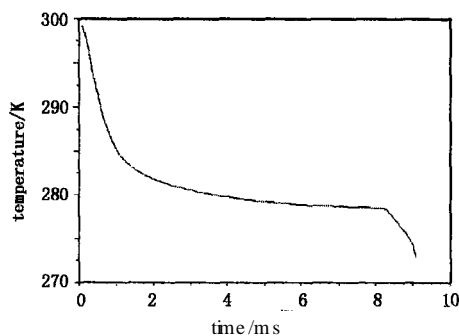


图 9 降温过程中苯中间线处温度变化过程

6 小结

本文提出了基于折射率匹配液的固液相变行为来对光信号实现切换的新概念型光开关技术, 并对其可行性进行了理论分析和实验验证, 结果表明通过选择特定的匹配液材料, 该光开关可以灵巧地完成对光信号的调控作用。文中还对冻融型光开关器件的相变传热问题进行了数值模拟, 从理论上分析了此类光开关执行过程中的温度场变化及热学响

应速度问题, 并对匹配液的筛选提出了相应原则。本文提出的冻融型光开关具有结构简单、易集成、工作温区广的特点, 随着今后在相应集成技术、传热优化等方面工作的展开, 有望发展出在某些光通讯特殊场合得到重要应用的光开关器件。

参考文献:

- [1] 曲小鹏, 刘静. 光网络开关中的微热学控制技术研究与应用 [J]. 激光与红外, 2004, 34(6): 403 - 407.
- [2] Li J, Zhang Q X, Liu A Q. Advanced fiber optical switches using deep RIE (DRIE) fabrication [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2003, 102(3): 286 - 295.
- [3] de Ridder R M, Driessen A, Rijkers E, et al Design and fabrication of electro-optic polymer modulators and switches [J]. Optical Materials, 1999, 12(2~3): 205 - 214.
- [4] Diener M B J. Polymeric thermo-optic space switch for optical communications [J]. Optical Materials, 1998, 9: 192 - 200.
- [5] Hwang W Y, Kim J J. A 1 \times V thermo-optic space switch in a polymeric planar waveguide [J]. Optics Communications, 1994, 109(3 - 4): 249 - 252.
- [6] Fouquet J E, Venkatesh S, Troll M, et al A compact, scalable cross-connect switch using total internal reflection due to thermally-generated bubbles [A]. Conference Proceedings Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting LEOS, 1998, 2: 169 - 170.
- [7] Venkatesh S, Fouquet J E, Haven R, et al Performance improvements in bubble-actuated photonic cross-connect switches [A]. Conference Proceedings Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting LEOS, 2002, 1: 39 - 40.
- [8] Vazquez C, Pena J M S, Aranda A L. Broadband 1 \times 2 polymer optical fiber switches using nematic liquid crystals [J]. Optics Communications, 2003, 224(1 - 3): 57 - 62.
- [9] 刘静, 曲小鹏. 冻融型光网络开关 [P]. 中国发明专利, 2004.
- [10] 波恩 M, 沃耳夫 E. 光学原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1978, 71 - 77.
- [11] Shinokawa F, Sakata T, Makiyama M, et al High-speed switching operation in a thermocapillarity optical switch for application to photonic networks [J]. NTT Technical Review, 2003, 1(7): 31 - 36.
- [12] 李俊昌. 激光的衍射及热作用计算 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 29 - 30.