

利用 bR 膜实现全光布尔逻辑操作*

李玉栋¹ 孙 骞¹ 张春平¹ 张光寅¹ 李庆国²

(¹南开大学物理学院光子学中心 天津 300071; ²复旦大学生理和生物物理系 上海 200433)

提要 bR 膜是一种优良的非线性光学材料,利用 bR 膜中的全息光栅的记录光、读出光及衍射光三者偏振状态之间的关系,在 bR 膜中实现了全光布尔逻辑操作。这种方法简便,实用性较强。

关键词 全光布尔逻辑操作, bR 膜, 全息光栅

1 引 言

近年来,全光逻辑器件的研究工作成为一个研究热点。由于光学逻辑器件具有可实现并行操作,抗干扰能力强,成本低等优点,人们认为光学逻辑器件极有可能在不久的将来取代目前广泛使用的逻辑器件^[1]。在诸多的逻辑运算中,布尔逻辑是最基本的逻辑运算之一。很多复杂的逻辑操作都可以通过布尔逻辑的适当组合得以实现。布尔逻辑运算的表达变量只有两个:逻辑 1 和逻辑 0,这在光学中是很容易通过光强等参量实现的。全光布尔逻辑操作方面的研究开展得较早,目前已经发展了诸多实现全光布尔逻辑操作的方法^[2~4],它们各有长处,也各有局限。例如,利用空间光调制器(SLM)的全光布尔逻辑操作^[2],方法简便,可以并行操作,但 SLM 的价格较高,其数据传输率受到 SLM 分辨率等参数的制约;利用半导体激光器耦合增益实现全光逻辑操作的方法^[3],开关速度高,有利于与其他光学器件集成,但很难实现并行操作等等。因此,有必要利用新的机制和新型材料以实现高实用性的全光布尔逻辑操作。

细菌视紫红质(Bacteriorhodopsin,简称 bR)是存在于嗜盐菌紫膜中的一种光致变色材料,具有光驱动质子泵的功能^[5,6]。bR 分子吸收光子后经过一个复杂的光循环过程,最后又回到初态,在光循环过程中,伴随着吸收系数和折射率的改变^[7,8]。由于 bR 分子制备困难,通常使用的是由嗜盐菌制备的包含 bR 分子的 bR 膜。利用嗜盐菌只能在高浓度的 NaCl 和镁盐环境下才能生长和维持其结构这一特性,我们可降低嗜盐菌溶液中 NaCl 和 MgCl 的浓度,这样嗜盐菌细胞就会发生解聚^[9]。通过分离可获得高纯度的紫膜,将紫膜溶于适当基质中即可制造出所需的 bR 膜^[10]。bR 膜不但保留了 bR 分子优良的光学性质,而且制备简单,稳定性高,易于成膜,成膜尺寸大,价格便宜。基于这些优点,bR 膜已被广泛用于实时光学信息处理、光电转换、光开关等方面^[5,6]。文中,利用 bR 膜全息记录能力,通过 bR 膜中全息光栅的记录光、读出光和衍射光三者偏振状态之间的关系,实现了全光布尔逻辑操作。

* 国家自然科学基金(19674030 和 39730150)和天津市自然科学基金资助项目。

2 bR 膜中的全息光栅

当一束光照射到 bR 膜上时, bR 膜中产生一系列复杂的光循环过程^[6]。伴随着这些过程, bR 膜的吸收系数和折射率都会发生变化。如果将两束具有相同偏振方向的相干光同时入射到 bR 膜上, 两束光在 bR 膜中相干并形成干涉条纹, 条纹的光强是正弦调制的。在这一干涉条纹的照射下, bR 膜的吸收系数和折射率发生调制变化。其结果就象普通全息记录材料一样, 全息光栅被记录在 bR 膜中。如果两束光照射的同时, 用第三束光(读出光)以 Bragg 角照射 bR 膜, 读出光受到膜中全息光栅的衍射作用, 产生衍射光, 根据全息学原理可知^[11], 衍射光的偏振状态由读出光的偏振状态决定。衍射光的偏振方向与读出光的偏振方向一致, 而与两束记录光的偏振无关。以下称这种光栅为普通全息光栅。

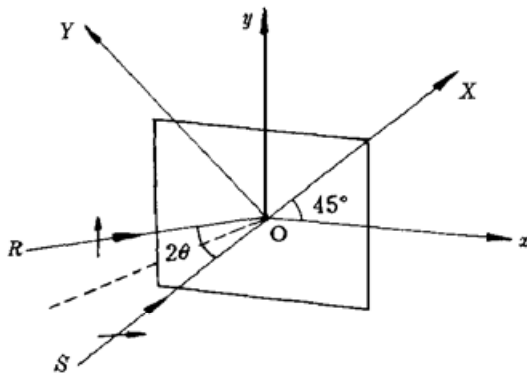


图 1 偏振全息光栅记录示意图

Fig. 1 Arrangement for polarization hologram recording

当两束偏振方向垂直的光相交时, 它们不能形成光强调制的干涉条纹。因此, 它们不能在全息干版等全息记录介质中记录下全息光栅。但在具有光致各向异性(包括光致二向色性和光致双折射)的材料中仍可以记录下全息光栅, 即偏振全息光栅。bR 膜中同时存在着光致二向色性和光致双折射这两种效应^[12], 因此, 两束正交偏振光可以在 bR 膜中记录下偏振全息光栅。下面讨论这种光栅的记录光、读出光与衍射光三者偏振方向之间的关系。

为简便起见, 只讨论两束光光强相同的情况。这种情况下, 光栅将有最高衍射效率。当两束光强相同, 偏振方向相互垂直的线偏振光 \vec{R} 和 \vec{S} 照射 bR 膜上(见图 1)

时, 其琼斯矩阵可以表示为

$$\vec{R} = \begin{bmatrix} \exp(i\mathcal{Q}_R) \\ \exp(i\mathcal{Q}_R) \end{bmatrix}; \quad \vec{S} = \begin{bmatrix} \exp(i\mathcal{Q}) \\ \exp(i\mathcal{Q}) \end{bmatrix}$$

其中 \mathcal{Q}_R 和 \mathcal{Q} 分别为 \vec{R} 和 \vec{S} 的位相。两者叠加形成的合成光场的电场为^[13]

$$\vec{E} = \begin{bmatrix} \cos\delta \\ i\sin\delta \end{bmatrix}$$

其中 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} x \sin\theta$, 2π 为参考光和信号光沿 x 方向的相位差; λ 为波长。从合成光场 \vec{E} 的形式可知, 合成光场可看成一个光强恒定、偏振方向空间调制的椭圆偏振光。bR 膜中光致二向色性和光致双折射同时存在, 在合成光场 \vec{E} 的作用下, bR 膜中的透射特性发生调制, 其透射矩阵可以写成如下形式

$$T \hat{=} \begin{vmatrix} T_x \exp(i\psi_x) & 0 \\ 0 & T_y \exp(i\psi_y) \end{vmatrix}$$

其中 T_x 和 T_y 分别为线偏振光沿 x 轴和 y 轴方向的振幅透过率, $\exp(i\psi_x)$ 和 $\exp(i\psi_y)$ 分别为相位透过率。

光照引起的二向色性与沿 x 方向和 y 方向偏振的光的光强差成正比。这里, 沿 x 和 y 方向偏振的光的光强差: $\Delta I = |\cos\delta|^2 - |i\sin\delta|^2 = \cos 2\delta$ 。设膜中最大的光致二向色性和光致双折

$$T_x - T_y = (t_e - t_o) \Delta I = (t_e - t_o) \cos 2\delta$$

定义 $T_0 = \frac{T_x + T_y}{2}$ 和 $\Delta T = \frac{t_e - t_o}{2}$, 则有 $T_x = T_0 + \Delta T \cos 2\delta$, $T_y = T_0 - \Delta T \cos 2\delta$ 。同理, 位相差可以写为: $\psi_x - \psi_y = \frac{2\pi}{\lambda} d(n_e - n_o) \cos 2\delta$, 其中 d 为 bR 膜的厚度。定义 $\psi_0 = \frac{\psi_x + \psi_y}{2}$ 和 $\Delta\psi = \frac{2\pi}{\lambda} d \frac{n_e - n_o}{2}$, 则 ψ_x 和 ψ_y 可以分别写为: $\psi_0 + \Delta\psi \cos 2\delta$ 和 $\psi_0 - \Delta\psi \cos 2\delta$ 。于是, 透射矩阵可以写成如下形式

$$\hat{T} = \exp(i\psi_0) \begin{vmatrix} (T_0 + \Delta T \cos 2\delta) \exp(i\Delta\psi \cos 2\delta) & 0 \\ 0 & (T_0 - \Delta T \cos 2\delta) \exp(-i\Delta\psi \cos 2\delta) \end{vmatrix} \quad (1)$$

当读出光 \vec{R}' 照射在记录了偏振光栅的 bR 膜上时, 衍射光 \vec{S}' 有如下形式

$$\vec{S}' = \hat{T} \vec{R}' \quad (2)$$

由公式(1), (2)可以推出 bR 膜中偏振全息光栅中记录光、读出光和衍射光三者偏振方向之间的关系: 当读出光和记录光中的 \vec{S} 具有相同的偏振方向时, 衍射光具有和记录光中的 \vec{R} 相同的偏振方向, 它的偏振方向与 \vec{S} 的偏振方向垂直; 而当读出光和记录光中的 \vec{R} 具有相同的偏振方向时, 衍射光具有和记录光中的 \vec{S} 相同的偏振方向, 它的偏振方向与 \vec{R} 的偏振方向垂直。

3 全光布尔逻辑操作

布尔逻辑操作的逻辑值只有两个: 逻辑 0 和逻辑 1。电子逻辑器件利用电压的高低表示这两个值, 而全光逻辑器件中则以光强或偏振表示。本方法中, 我们分别定义两个相互垂直的偏振状态为逻辑 0 和逻辑 1。根据 bR 膜中记录的光栅的记录光、读出光和衍射光之间的偏振关系, 可以应用 bR 膜实现全光逻辑操作。

图 2 为实验装置图。一束线偏振的 He-Ne 激光 ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) 被分束镜分成等光强的两束, 每束光的光强皆为 2.27 mW , 两束光都是水平偏振的。这两束光对称入射到 bR 膜上, 并在 bR 膜中相干, 两者在空气中的夹角为 45° 。在这两束光的作用下, bR 膜中将形成普通全息光栅。当我们需要在 bR 膜中记录偏振全息光栅时, 在一束 He-Ne 光路中加入一 $\lambda/2$ 片, 则这束光的偏振方向变成竖直偏振。为了保持两束入射光的强度相等, 在另一束光中插入衰减片。这样的两束光可以在 bR 膜中写入偏振全息光栅。一束 Ar^+ 激光 ($\lambda = 514.5 \text{ nm}$) 作为读出光以 Bragg 角 ($\approx 18^\circ$) 入射到 bR 膜上。 Ar^+ 激光的强度很弱, 它对 bR 膜中全息光栅的抹去作用很小, 可以忽略。

实验测量了不同偏振状态的读出光受到 bR 膜中普通及偏振全息光栅衍射时形成的衍射光的偏振状态。衍射光的偏振状态受到光栅记录光和读出光的偏振状态的共同影响。光栅记录光与读出光的偏振状态可以通过光路中有无 $\lambda/2$ 片来确定, 而衍射光的偏振态不能直接确定, 原因在

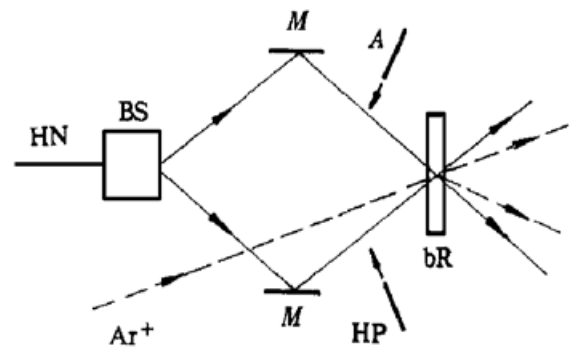


图 2 全息光栅记录及再现实验装置图
实线代表记录光, 虚线代表读出光和衍射光; BS: 分束器; Ms: 反射镜; A: 衰减器; HP: $\lambda/2$ 波片

Fig. 2 Experimental setup for recording and reconstruction of holograms in bR film
Solid lines denote recording waves, and dashed lines denote reading and diffraction waves. BS: beam splitter; Ms: mirrors; A: attenuator; HP: $\lambda/2$ plate

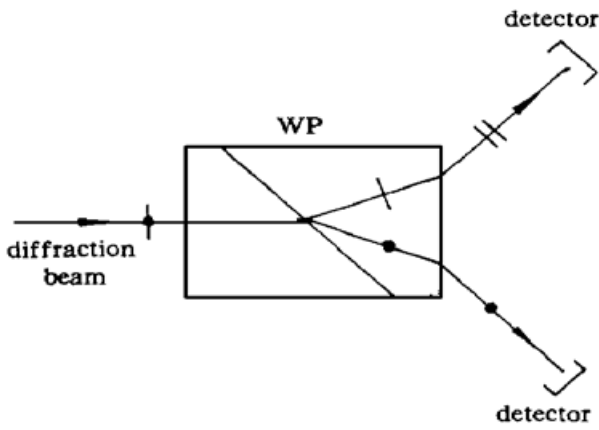


图 3 测量衍射光偏振状态的光路

WP: 渥拉斯顿棱镜

Fig. 3 Detection of polarization of the diffraction beam

WP: Wollaston prism

于各种光探测器所能探测的是光的强度而不是偏振状态。为此, 需要将光的偏振转化为光强。一种最直接的方法是利用偏振片的透光特性, 通过偏振片透射光强及偏振片透光方向确定入射光的偏振方向。这种方法的缺点是实用性差。这里, 我们利用渥拉斯顿(Wollaston)棱镜对衍射光进行偏振分析(见图 3)。由渥拉斯顿棱镜的特性可知, 水平偏振与竖直偏振光的偏转方向不同, 在这两个方向上各放置一个光探测器。水平和竖直偏振光分别使上侧和下侧的光探测器产生非零输出。通过探测器的输出情况可以判断衍射光的偏振方向。这种方法虽然比用偏振片的方法多使用一个探测器, 但由于在测量中不需要调节测量

元件(偏振片), 实用性更强。实验测量了不同偏振状态的记录光和读出光组合下产生的衍射光的偏振情况及衍射效率情况, 定义衍射效率为衍射光光强与读出光光强之比, 结果见表 1。可以看出, 实验测量的偏振态之间的关系与理论分析一致。定义垂直偏振(V)为逻辑 0, 水平偏振(H)为逻辑 1, 根据逻辑值与偏振态之间的关系, 表 1 转化成表 2 的形式。由表 2 可知, 可以在 bR 膜中实现全光布尔逻辑操作。

表 1 bR 膜中记录光、读出光和衍射光之间的偏振关系及衍射效率。 V : 垂直偏振; H : 水平偏振

Table 1 The polarization states of recording waves, reading wave and diffraction wave for holograms and the diffraction efficiency in bR film. V : vertical polarization; H : horizontal polarization

		Polarized states							
		V	V	V	V	H	H	H	H
Recording waves	\vec{R}	V	V	V	V	H	H	H	H
	\vec{S}	V	V	H	H	H	H	V	V
Reading wave		V	H	V	H	H	V	H	V
Diffraction wave		V	H	H	V	H	V	V	H
Diffraction efficiency ($\times 10^{-4}$)		2.7	2.7	0.32	0.32	2.7	2.7	0.32	0.32

表 2 利用 0 代表垂直偏振, 1 代表水平偏振后所形成的逻辑真值表

Table 2 The logical true table when 0 presents vertical polarization and 1 presents horizontal polarization

		Logical states							
		0	0	0	0	1	1	1	1
Recording waves	\vec{E}_1	0	0	0	0	1	1	1	1
	\vec{E}_2	0	0	1	1	1	1	0	0
Reading wave		0	1	0	1	1	0	1	0
Diffraction wave		0	1	1	0	1	0	0	1

当两束分别具有水平偏振和垂直偏振的光照射到 bR 膜上, bR 膜中记录的是偏振全息光栅。以读出光 A 作为输入信号, 以衍射光 C 为输出信号, 可以实现逻辑非操作(NOT)。当读出光 A 为水平偏振即 $A = 1$ 时, 衍射光 C 具有竖直方向的偏振态, 即 $C = 0$ 。当 A 为垂直偏振时

($A = 0$), 衍射光 C 为水平偏振($C = 1$)。表 3 总结了 A 与 C 的关系, 因此可见, $C = \bar{A}$ 。

如果将两束记录光 A, B 作为输入, 衍射光 C 作为输出, 就可以实现逻辑同操作。保持读出光为水平偏振。当两束写入光具有相同的偏振方向时, bR 膜中记录的是普通全息图。在这种情况下, 衍射光保持水平偏振不变, 即 $C = 1$ 。当一束记录光为竖直偏振, 而另一束为水平偏振时, bR 膜中记录的是偏振全息图。此时, 衍射光保持竖直偏振不变, 即 $C = 0$ 。由表 4 可知, 这就是逻辑同操作(XNOR): $C = A \odot B$ 。

如果同样将两束记录光 A, B 作为输入, 衍射光 C 作为输出, 只要将读出光改为保持竖直偏振状态, 由与上面相似的讨论可知, 此时 A, B 及 C 三者之间的关系如表 5 所示, 可见, 这就是逻辑异或操作(XOR)。由此, 我们可以实现操作: $C = A \oplus B$ 。

表 3 bR 膜实现的逻辑非操作的
真值表

表 4 bR 膜实现的逻辑同操作
的真值表

表 5 bR 膜实现的逻辑异或操作
的真值表

Table 3 Truth table for NOT logic Table 4 Truth table for XNOR logic Table 5 Truth table for XOR logic

realized by bR film

		NOT, $C = \bar{A}$	
Input	A	0	1
Output	C	1	0

realized by bR film

		XNOR, $C = A \odot B$			
Input	A	0	0	1	1
	B	0	1	0	1
Output	C	1	0	0	1

realized by bR film

		XOR, $C = A \oplus B$			
Input	A	0	0	1	1
	B	0	1	0	1
Output	C	0	1	1	0

4 讨 论

bR 膜中既可记录普通全息光栅, 又可记录偏振全息光栅。根据记录光、读出光和衍射光三者之间的偏振关系, 可以在 bR 膜中实现全光逻辑操作。

bR 膜中的光栅主要是吸收光栅。在实验中, 使用波长为 632.8 nm 的光作为光栅写入光, 这个波长处于 bR 分子的 B 态吸收峰的边缘处^[8]。因此, 它产生的吸收系数变化(对应于吸收光栅的振幅)较小, 影响了衍射效率, 如果以 570 nm 的光写入光栅, 以 650 nm 左右的光对光栅进行读出, 光栅的衍射效率可以达到 8% 以上, 且读出光对光栅的影响很小, 抹去作用很弱^[14]。

影响光学逻辑操作的精确度的一个重要因素在于逻辑 0 与逻辑 1 对应的光强之间的比例。理论上, 逻辑 0 对应的光强应为 0, 但由于各种原因, 这个值并不严格为 0。我们的方法中由于 bR 膜对入射光的散射, 会使逻辑 0 时仍有一些散射光照射到光探测器上。由于 bR 膜的散射中心 bR 分子的尺寸极小, 且 bR 膜的成膜特性好, 可以制备出表面非常平整的膜。因此, bR 膜的散射光很弱。本方法中, 输出端逻辑 1 与逻辑 0 对应的光强比大于 10^3 。如此高的光强比十分有利于精确测量逻辑输出值。

全光逻辑器件的一个重要指标是逻辑器件的响应速度。这里使用的是连续光写入光栅, 且利用的是 bR 分子 M 态和 B 态之间的光循环, 由于使用的 bR 膜 M 态寿命较长, 为 7 s, 因此, 其响应速度较慢, 在秒的量级。而如果利用脉冲光写入光栅, 并通过化学修饰法改变 M 态寿命, 可使逻辑操作的响应时间达到微秒量级, 甚至更低。

bR 膜的稳定性高, 可进行多次光循环操作^[15]。因此, 用 bR 膜制作的全光逻辑器件具有较

将有广泛的应用。

参 考 文 献

- 1 W. T. Cathey, K. Wagner, W. J. Miceli. Digital computing with optics. *Proc. IEEE*, 1989, **77**(10): 1558~ 1572
- 2 Dominic F. G. Gallagher. Gain-coupled optical logic in semiconductor lasers. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(29): 4359~ 4371
- 3 S. Jutamulia, G. M. Storti, J. Lindmayer *et al.*. Use of electron trapping materials in optical signal processing. I: Parallel Boolean logic. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(32): 4806~ 4811
- 4 R. Torroba, R. Henao, C. Carletti. Digital polarization-encoding technique for optical logic operations. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(23): 1918~ 1921
- 5 R. R. Birge. Photophysics and molecular electronic applications of the rhodopsins. *Annu. Rev. Phys. Chem.*, 1990, **41**: 683~ 733
- 6 D. Oesterhelt, C. Brauchle, N. Hampp. Bacteriorhodopsin: a biological material for information processing. *Q. Rev. Biophys.*, 1990, **24**: 425~ 478
- 7 D. Zeisel, N. Hampp. Spectral relationship of light-induced refractive index and absorption changes in bacteriorhodopsin films containing wildtype BR_{WT} and the Variant BR_{D96N}. *J. Phys. Chem.*, 1992, **96**: 7788~ 7792
- 8 Q. W. Song, C. Zhang, R. Blumer *et al.*. Chemically enhanced bacteriorhodopsin thin-film spatial light modulator. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16): 1373~ 1375
- 9 D. Oesterhelt, W. Stoeckenius. Isolation of the cell membrane of *Halobacterium halobium* and its fraction into red and purple membrane. *Methods Enzymol.*, 1974, **31**: 667~ 678
- 10 Wang Yongmei, Tong Mingrong, Pan Jilun *et al.*. Preparation and chemical enhanced of bacteriorhodopsin film. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 1997, **30**(2): 25~ 30
- 11 Robert J. Collier, Christoph B. Burckhardt, Lawrence H. Lin. *Optical Holography*, Academic Press, Inc., 1971
- 12 N. M. Burykin, E. Y. Korchemskaya, M. S. Soskin *et al.*. Photoinduced anisotropy in bio-chrom films. *Opt. Commun.*, 1985, **54**(2): 68~ 70
- 13 L. Nikolova, T. Todorov. Diffraction efficiency and selectivity of polarization holographic recording. *Opt. Acta*, 1984, **31**(5): 579~ 594
- 14 John D. Downie, Daniel T. Smithey. Measurements of holographic properties of bacteriorhodopsin films. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(29): 5780~ 5789
- 15 N. Hampp, R. Thoma, D. Oesterhelt *et al.*. Biological photochrome bacteriorhodopsin and its genetic variant Asp96→Asn as media for optical pattern recognition. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(11): 1834~ 1841

All-optical Boolean Logic Using bR Film

Li Yudong¹ Sun Qian¹ Zhang Chunping¹ Zhang Guangyin¹ Li Qingguo²

¹Photronics Center, College of Physics, Nankai University, Tianjin 300071

²Department of Physiology and Biophysics, Fudan University, Shanghai 200433

Abstract bR film is one kind of excellent nonlinear optical materials. In this paper, we realized all-optical Boolean logic based on the relationship among the polarization states of the recording beams, the reading beam and the diffraction beam for the holograms in bR film. Our method is simple and practical.

Key words all-optical Boolean logic, bR film, holographic grating