

用细菌视紫红质膜实现多进制数字光学运算^{*}

顾立群¹⁾ 陈桂英¹⁾ 郭宗霞¹⁾ 张春平^{1)†}

田建国¹⁾ 张光寅¹⁾ Q. W. Song²⁾

¹⁾ (南开大学物理学院, 天津 300071)

²⁾ (Department of Electrical Engineering and Computer Science,
Syracuse University, Syracuse, NY 13244, USA)

(2003 年 8 月 1 日收到, 2004 年 4 月 14 日收到修改稿)

细菌视紫红质(bR)膜对黄光和蓝光的透射具有互补调制特性,由解黄光、蓝光透射光强的速率方程而得到黄光和蓝光的互补抑制透射特性的解析表达式和图示结果.提出了无进位和无退位的多进制数字光计算的矩阵加、减运算模型,构造了新型光计算的基本处理模式和计算结构,设计了多进制矩阵的加法和减法的最佳实验方案,并用 bR 膜实现了多进制数字光矩阵的减法运算实验操作.

关键词:细菌视紫红质膜,数字光计算,运算结构,光调制

PACC:4270G, 4225B, 4280V

1. 引 言

数字光计算是在光学信息的数字编码和逻辑运算的基础上发展起来的.利用细菌视紫红质(bacteriorhodopsin,简称为 bR)膜进行逻辑运算的研究已很多^[1-4],文献[5-7]利用偏振光及相位共轭实现光逻辑运算及图像处理;以 bR 膜为基础芯片,文献[8-10]阐述了利用光调制特性实现全光逻辑运算及图像亮背景滤除,这些大多致力于二进制逻辑运算及图像模拟运算.利用液晶的逻辑操作实现二进制相减也有报道,但液晶是电光调制而不是全光调制,多进制的全光操作仍然是一个复杂问题.我们用 bR 膜设计了计算模型并进行了多进制运算,要完成的数字光计算是实现某些运算的结构,用这些结构实现的数字运算既保持了模拟光计算的高度并行性,又可实现光信息二进制编码及逻辑运算的最基本操作.本文用 bR 膜的蓝光和黄光互补调制特性,构造了新型光计算的基本处理模式和计算结构.

本文所讨论的多进制数字光计算的图像编码着眼于单色图像,单色图像主要是针对其空间光强分

布经过某种算法转化为另一幅具有多灰度级的数字阵列.每一阵元的透射率都是从 0 至 9 的十个级别中的一个透射级别.其级别之间应该是线性增减的透射关系.因此,透射率对应的是 $(i/n)T$, 其中 i 是第 i 级别, n 是 10, T 代表最大级别透射率.这样的十进制编码底片,在均匀光入射下其透射光是一幅光强分别处于 0—9 个级别的矩阵.显然,这样一个矩阵要比一幅二进制编码阵列小得多.

从数学上分析可以得出,任何计算操作都能转化为基本的线性非进位加法和非退位减法操作,因此若利用多进制编码方法进行光计算,只要光子器件能够实现准确的多进制加减操作,就可以进行复杂的数字光计算.对于多进制的数字光计算,不能像二进制的数字光计算那样利用双稳器件直接实现,但利用 bR 膜的双光束互补抑制透射机制可以直接实现多进制的基本数字光计算.

2. 利用 bR 膜实现多进制数字光计算的原理

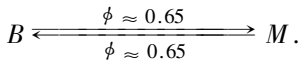
2.1. bR 的光循环及二能级简化模型

细菌视紫红质是一种新型的生物光学材料,由

^{*} 国家自然科学基金(批准号 60278007)和天津市自然科学基金(批准号 033601311)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zhangcp@nankai.edu.cn

于它优异的非线性光学特性,因而在光学信息处理等方面获得应用.当黄光($\lambda = 568 \text{ nm}$)照射 bR 膜时,bR 分子产生异构化,经一系列热弛豫中间态,完成生理功能,返回初态 B (基态).然而在持续光照时,由于各个中间态都具有有限的弛豫时间,所以在全部 bR 分子中,在某一时刻一部分分子将仍处于初态,有些分子分别处于光循环中的各个中间态,即发生异构化的分子数将随各种条件变化而不同,这些条件包括入射光强、bR 膜的分子浓度、各态的弛豫时间等.光循环各个中间态中, M 态的存活时间最长,因此在我们所考虑的问题中可以将光循环简化为



用黄光($\lambda = 568 \text{ nm}$)照射后, B 态异构化为 M 态, M 态上的 bR 分子可以通过两种途径返回基态 B .一种途径是通过热弛豫返回基态 B ,另一种途径是受蓝光($\lambda = 412 \text{ nm}$)照射后到达高能态,然后很快返回到 B 态.

2.2. 蓝光、黄光共同入射 bR 膜的互补抑制调制透射

由 Beer-Lambert 定律,bR 膜的透射光强可由下列的微分方程给出:

$$\frac{dI_{\lambda_i}}{dz} = -2.3026(\epsilon_{\lambda_i}^{B \rightarrow M} N_B + \epsilon_{\lambda_i}^{M \rightarrow B} N_M) I_{\lambda_i}. \quad (1)$$

不同波长的多束光同时照射 bR 膜时,其 B 态和 M 态上的分子摩尔浓度分别是

$$N_B = N \frac{\frac{1}{\tau} + \sum_{i=1}^n K_{\lambda_i}^{M \rightarrow B}}{\frac{1}{\tau} + \sum_{i=1}^n (K_{\lambda_i}^{B \rightarrow M} + K_{\lambda_i}^{M \rightarrow B})}, \quad (2)$$

$$N_M = N - N_B, \quad (3)$$

式中, N 为总的分子摩尔浓度, N_B 和 N_M 分别是 B 态和 M 态的分子摩尔浓度, τ 为 M 态弛豫时间, λ_i 为入射波长, $K_{\lambda_i}^{B \rightarrow M}$ 和 $K_{\lambda_i}^{M \rightarrow B}$ 分别是正向($B \rightarrow M$)和反向($M \rightarrow B$)的光反应速率常数,定义为

$$K_{\lambda_i} = \frac{2.3026 \phi \epsilon_{\lambda_i} \lambda_i I_{\lambda_i}^i}{N_A h c}, \quad (4)$$

式中, $I_{\lambda_i}^i$ 为入射光强, ϵ_{λ_i} 为相应于 λ_i 的消光系数, N_A 为阿伏伽德罗常量, h 为普朗克常量, c 为光速,

ϕ 代表量子产额.由方程(1)–(4)和 Beer-Lambert 定律得知:当蓝光(412 nm)和黄光(568 nm)同时照射 bR 膜时,其黄光透射光强 I_y^t 和蓝光的透射光强 I_b^t 分别为

$$I_y^t = I_y^i \exp(-\Delta_1 N z) - \frac{C}{2\epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_y) \cdot \lambda_y \cdot \tau} \times [1 - \exp(-\Delta_1 N z)] \ln\left(\frac{I_y^i}{I_y^t}\right) - \frac{I_b}{\lambda_y} I_b^i [\exp(-\Delta_1 N z)], \quad (5)$$

$$I_b^t = I_b^i \exp(-\Delta_2 N z) - \frac{C}{2\epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_b) \cdot \lambda_b \cdot \tau} \times [1 - \exp(-\Delta_2 N z)] \ln\left(\frac{I_b^i}{I_b^t}\right) - I_y^i \frac{\lambda_y}{\lambda_b} [\exp(-\Delta_2 N z)], \quad (6)$$

其中

$$\Delta_1 = \frac{2\epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_y) \cdot \epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_y)}{\epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_y) + \epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_y)},$$

$$\Delta_2 = \frac{2\epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_b) \cdot \epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_b)}{\epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_b) + \epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_b)},$$

$$C = \frac{N_A h c}{\phi},$$

I_y^i, I_y^t, I_b^i 和 I_b^t 分别是黄光和蓝光的入射光强和透射光强, $\epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_y), \epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_y), \epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_b)$ 和 $\epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_b)$ 分别是黄光和蓝光正向($B \rightarrow M$)和反向($M \rightarrow B$)的消光系数.当 bR 膜的厚度 $d = 0.02 \text{ mm}$, $N = 1 \times 10^{-3} \text{ mol/mL}$, $\epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_y) = 54000$, $\epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_y) = 10000$, $\epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_b) = 46000$, $\epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_b) = 6000$ 时,图 1(a)给出了不同的蓝光偏置光强下蓝光和黄光的透射特性,虚线描述的是蓝光的透射情况,实线描述的是黄光的透射情况.图 1(a)的曲线 a、曲线 b、曲线 c、曲线 d、曲线 e 和曲线 f 分别对应蓝光偏置光强为 0, 1, 2, 3, 4 和 5 mW/cm^2 的情况.图 1(a)中 $I_y^t(I_b)$ 是由一固定蓝光及变化的黄光光强同时照射 bR 膜时黄光的透射光强.蓝光为 5 mW/cm^2 时黄光的阈值与实线 5 底端 B 点对应.入射黄光低于此阈值,蓝光将黄光抑制;高于此阈值, I_y^t 随 I_y^i 线性增加,即透射强度随入射黄光光强线性增加.对于一固定蓝光光强,其透射光强随入射黄光光强线性减小,如图 1(a)虚线所示.图 1(b)给出了不同的黄光偏置光强下蓝光和黄光的透射特性,虚线描述的是蓝光的透射情况,实线描述的是黄光的透射情况.图 1(b)的曲线 a、曲线

b、曲线 *c*、曲线 *d*、曲线 *e* 和曲线 *f* 分别对应黄光偏置光强为 0, 1, 2, 3, 4 和 5 mW/cm² 的情况. $I_b^i(I_y)$ 是由一固定黄光及变化的蓝光光强同时照射 bR 膜时蓝光的透射光强, 当黄光为 5 mW/cm² 时, 蓝光的阈值与虚线 5 底端 *B* 点对应. 这样蓝光被入射黄光调制的透射特性是: 当蓝光光强小于偏置阈值时, 黄光将蓝光抑制; 当蓝光入射光强增高于此阈值时, I_b^i 随 I_b^i 线性增加, 如图 1(b) 虚线所示. 对于一固定的黄光偏置, 其透射光强 I_y^i 随蓝光光强 I_b^i 呈线性衰减状态如图 1(b) 的实线所示. 从图 1 还可以看出, 只要输出光强大于 0.2 mW/cm², 输入与透射光强近似成线性关系. 因此, 在实验操作时要使透射光强大于 0.2 mW/cm².

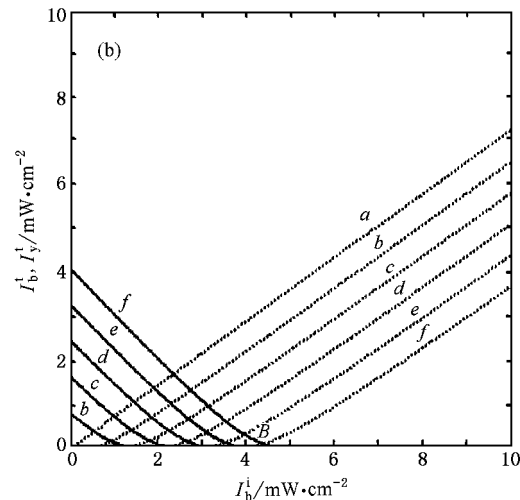
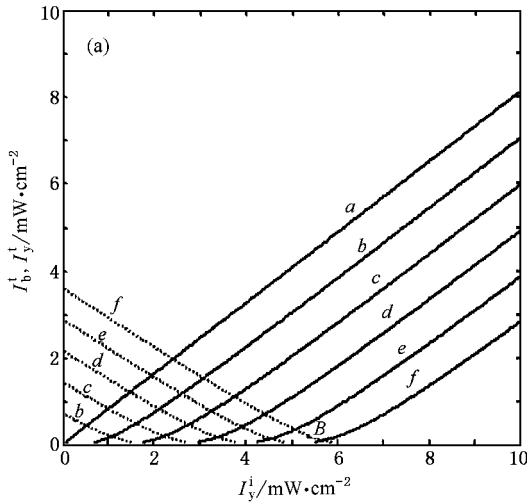


图 1 蓝光和黄光同时入射时相互调制透射曲线 (a)不同的蓝光偏置光强下蓝光和黄光的透射特性, (b)不同的黄光偏置光强下蓝光和黄光的透射特性

2.3. 黄光和蓝光各自独立变化实现多进制非进位加法

在没有蓝光照射时, 由(5)式可知 bR 膜的黄光自调制透射规律为

$$I_y^i = D(I_y^i - F(\tau, Nz)), \quad (7)$$

式中 $D = \exp(-\Delta_1 Nz)$, 当制作的 bR 膜的 τ 较长, Nz (浓度厚度积) 较小时, D 接近于 1. 在图 1(a) 中, 设 k_y 为曲线 I_y^i 线性部分的斜率, 黄光的透射光与照射光成如下线性关系:

$$\Delta I_y^i \approx k_y \Delta I_y^i. \quad (8)$$

设线性透射部分每隔一定入射强度间隔 ΔI_y 就确定为一个相邻灰度编码值的差, 比如 n 进制编码中, 从 0 到 $n-1$ 为编码值, 相邻编码值差为 1. 输出黄光光强也有同样的强度级别编码. ΔI_y 为一个编码的单位间隔, 设被加数 $A \in \{0, n-1\}$, 加数 $B \in \{0, n-1\}$, A 编码的输入光强 $A\Delta I_y^i$, B 编码的输入光强 $B\Delta I_y^i$, 则输出光强为

$$I_y^i = k_y(A + B)\Delta I_y^i. \quad (9)$$

即输入编码值以 $\frac{A}{k_y}$ 和 $\frac{B}{k_y}$ 代替 A 和 B , 可得输出为 $A + B$ 的编码. 由于 bR 膜的初态在蓝光区域的吸收较小, 所以蓝光的透射更满足线性透射. 因此, 无论是蓝光还是黄光其调制透射本身就是一个多进制加法器, 而且蓝光的加法运算比黄光更为准确.

2.4. 黄光、蓝光互补调制实现多进制减法运算

多进制加法器并不是 bR 膜光计算算法的特点, 多进制减法运算才是它的独特之处. 由于蓝光和黄光的调制作用, 并根据图 1(a), $\Delta I_y^i = -k\Delta I_b^i$, 只要 bR 膜的参数选定, $k = -\frac{\Delta I_y^i}{\Delta I_b^i}$ 就是一固定常数. 设

k_b 为蓝光透射直线的斜率, 则 $\Delta I_b^i = k_b\Delta I_y^i$. 在黄光的透射中由两部分组成, 一部分是入射黄光的贡献, 另一部分是入射蓝光的调制作用,

$$I_y^i = k_y I_y^i - k\Delta I_b^i. \quad (10)$$

设被减数为 A , 减数为 B , A 编码的黄光光强为 $A\Delta I_y^i$, B 用蓝光编码, 编码光强度为 $B\Delta I_b^i$, 两束光同时入射 bR 膜后, 由(10)式得

$$\begin{aligned} I_y^i &= Ak_y\Delta I_y^i - Bk\Delta I_b^i \\ &= Ak_y\Delta I_y^i - Bk_bk\Delta I_y^i \\ &= (A' - B')\Delta I_y^i. \end{aligned} \quad (11)$$

对于入射黄光及偏置蓝光较大时,图 1(a)中黄光和蓝光透射直线的斜率 k_y, k_b 的值分别为 0.8 和 0.6545, $k \left(k = -\frac{\Delta I_y^i}{\Delta I_b^i} \right)$ 由图 1(a)可得) 值为 1.375, 其

中 $A' = k_y A, B' = k_b k B$. 根据本文所选用的 bR 膜的参数,对于蓝光偏置、黄光输出的情况,由(11)式知,若输入被减数编码和减数编码分别为 $A - B$,从黄光的透射光中可得到 $A' - B'$ 编码. 要得到输出编码 $A - B$,由黄光输入的被减数编码不能是 A ,而以输入 $= \frac{A}{k_y} = 1.25A$ 的编码,蓝光输入编码 B 以 $\frac{B}{kk_b} \approx 1.1B$ 代替. 即调节输入的黄光和蓝光的偏置光强度均分别按一定比例大于编码 A 和 B 的强度,此时通过透射黄光编码便可以读出 $A - B$ 的编码结果. 这是由于蓝光和黄光并不是按 1:1 光强相互调制的结果.

在进行 $A - B$ 操作时,若 $a_{ij} > b_{ij}$,则抑制后的黄光光强等级代表了 $A - B$ 的编码. 若 $a_{ij} < b_{ij}$, $A - B$ 后为负值,实验中因为 bR 膜是不能输出负光强的,所以从黄光读出相减的结果是黄光输出编码为零. 负值在实验中可以通过蓝光光强读出. 因为在黄光被全抑制时,蓝光正处于被黄光线性抑制的透射线性减小区域,由图 1(b)可得到

$$I_b^i = k_{bl} B \Delta I_b^i - \frac{1}{k_1} A T \Delta I_y^i, \quad (12)$$

$$\Delta I_y^i = k_{yl} \Delta I_b^i. \quad (13)$$

由(12),(13)式可得

$$\begin{aligned} I_b^i &= k_{bl} B \Delta I_b^i - \frac{1}{k_1} A k_{yl} \Delta I_b^i \\ &= \left(k_{bl} B - \frac{k_{yl}}{k_1} A \right) \Delta I_b^i \\ &= (B' - A') \Delta I_b^i. \end{aligned} \quad (14)$$

根据本文所选用的 bR 膜的参数,对于黄光偏置、蓝光输出的情况, k_{yl}, k_{bl} 分别为图 1(b)中黄光、蓝光透射直线的斜率,其值分别为 1 和 0.8, k_1 由 $\Delta I_y^i = -k_1 \Delta I_b^i$ 确定,其值为 1. 即当 $A < B$ 时,通过蓝光可以读出 $A - B$ 结果,偏置黄光的编码为 $\frac{k_1 A}{k_{yl}} \approx A$ 不

变,蓝光输入以 $\frac{B}{k_{bl}}$ 代替 B ,即输入以 $1.25B$ 代替 B . 从以上的分析中可知,若从黄光中读取 $A - B$,输入编码的 A, B 都必须调到合适的值,若从蓝光中读取 $A - B$,只需调整输入编码 B 即可,因此,在实验中我们采取从蓝光中读取 $A - B$.

3. 利用 bR 膜实现多进制数字光减法计算的实验

为演示矩阵相减,必须先制备矩阵模板(底片),但此实验应该为一个实时实验,即照射到 bR 膜上的两个待减方阵应是上一级光处理单元的输出结果,相减结果应作为下一处理单元的输入数据. 因此,只要上一级处理结果变化,在 bR 膜的透射光中立即可以检测出变化的矩阵相减结果. 底片的最高透射率依曝光时间而定,设为 T ,最低透射率近似为零,在 0 与 T 之间将按透射率高低设置五个级别,它们的透射率分别为 0, 0.25 T , 0.5 T , 0.75 T , T , 相邻两透射级别之间的透射率差为 0.25 T . 因此制作的三个矩阵透射底片的透射率分别为

$$P = \begin{pmatrix} 1/2 & 1/4 & 1 & 1/2 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2 \\ 1 & 1/2 & 1/2 & 1/4 \\ 1/4 & 1/4 & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$Q = \begin{pmatrix} 1/4 & 0 & 1/2 & 0 \\ 1 & 1/2 & 1/2 & 1 \\ 0 & 0 & 1/4 & 1/4 \\ 1/4 & 1 & 0 & 1/4 \end{pmatrix},$$

$$R = \begin{pmatrix} 1/2 & 1/4 & 1/2 & 0 \\ 1 & 1/4 & 1/2 & 1 \\ 0 & 0 & 1/4 & 1/2 \\ 1/4 & 1 & 0 & 1/4 \end{pmatrix},$$

为实现 $A - B$ 和 $A - C$,将 P 矩阵用蓝光承载可得编码矩阵 A . 同理,编码矩阵 B 与 C 由透射矩阵 Q, R 用黄光承载可得. A 的矩阵阵元光强为

$$I_{bi}^i = \frac{i}{4} T I_b^i / k_{bl}. \quad (15)$$

B 或 C 的矩阵阵元光强为

$$I_{yi}^i = \frac{j}{4} T \frac{k}{k_y} I_y^i \approx \frac{j}{4} T I_y^i. \quad (16)$$

由(12)–(14)式可知,调节蓝光光强大于阈值光强,于是

$$I_b^i = \frac{(i-j)}{4} T I_b^i. \quad (17)$$

这一输出结果正是待减矩阵的阵元经过 bR 膜后相减的结果. 实际应用中的矩阵模板可以用液晶空间光调制器来实现.

根据以上的分析,我们先做了多进制矩阵减法计算的模拟实验. 所用的膜参量为: bR 膜吸收黄光

由 B 态异构至 M 态的消光系数 $\xi_{B \rightarrow M}(\lambda_y) = 54000$, bR 膜吸收黄光由 M 态异构至 B 态的消光系数 $\xi_{M \rightarrow B}(\lambda_y) = 10000$, M 态弛豫时间 $\tau = 5$ s, bR 膜浓度厚度积 N_z 为 $1 \text{ mmol/mL} \times 0.02 \text{ cm}$. 图 2 是一维多进制矩阵减法的原理示意图. 为了简化问题, 用一维矩阵说明相减原理. 黄光是偏置光、蓝光是输入和输出光. 图 2(a) 表示 1.25 倍的单位蓝光矩阵编码 (显示黑色), 图 2(b) 是单位黄光矩阵编码 (显示斜线). 按照偏置光为黄光、输入和输出光为蓝光的情况, 蓝光和黄光的光强按图 2(a) 和图 2(b) 的比例同时照射在 bR 膜上时, 恰好互相抑制掉. 因此, 蓝光和黄光输出分别为零, 如图 2(c), (d). 图 2 纵轴方向代表光强的大小. 图 2(a') 是入射蓝光矩阵 A (黑色表示), 高低台阶代表矩阵单元的编码, 编码以光强显示. 图 2(b') 是黄光矩阵 B (斜线表示), 高低台阶同

样代表矩阵元编码的光强显示. 图 2(c') 显示的是蓝光矩阵按照图 2(a) 和 (b) 比例减黄光矩阵剩余的蓝光矩阵编码的情况 ($a_{ij} - b_{ij} > 0$). 类似地, 图 2(d') 显示的是蓝光与黄光矩阵互相调制后剩余的黄光矩阵编码的情况 (斜线表示, $a_{ij} - b_{ij} < 0$). $A - B$ 对应编码结果在图 2(c') 中通过透射蓝光显示. 由于黄光和蓝光都是代表编码, 因此剩余蓝光的透射值代表了蓝光阵元减去黄光阵元之后的剩余编码值, 其结果在图 2(c') 中沿纵轴的方向显示黑色的是矩阵的最后减法结果的正阵元部分. 若同一阵列位置的蓝光光强不能完全抑制黄光光强, 剩余部分为相减后的剩余黄光光强, 图 2(d') 代表在透射黄光中蓝光阵元减去黄光阵元后的负阵元编码值. 这些编码值代表最后的减法结构 $A - B$ 的负阵元, 纵轴方向表示编码值大小.

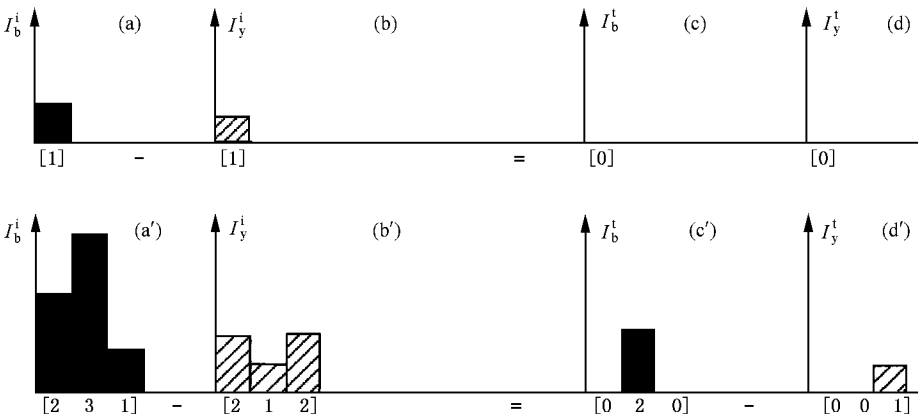


图 2 多进制矩阵减法的一维原理示意图 (a) 和 (b) 分别为输入蓝光和黄光恰好相互抑制的光强比例 ;(c) 和 (d) 分别为从蓝光透射光和黄光透射光中得到的相互抑制的结果 ;(c') 和 (d') 分别为从蓝光透射光和黄光透射光中得到的 (a') 中矩阵减 (b') 中矩阵的结果

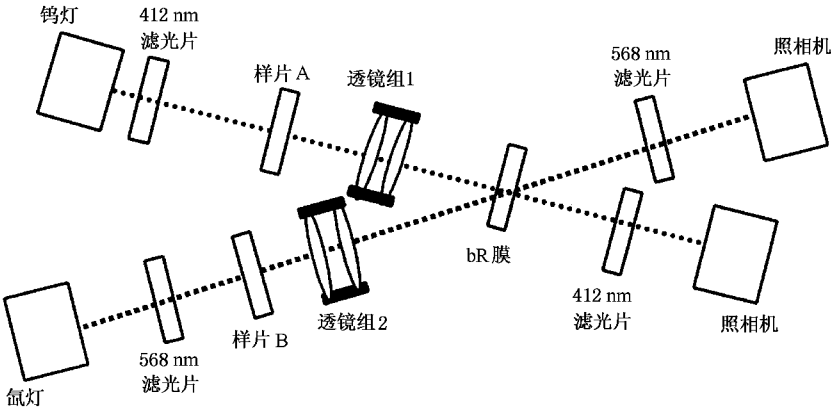


图 3 实验装置示意图

实验装置如图 3 所示, 在光路的两个物光束中 放置两幅待减模板 (底片). 调节黄光光强使得矩阵

A 与 B 相同的矩阵元正好减掉,这时可以认为黄、蓝双光束匹配.在相减结果中, a_{ij} 为矩阵 A 的编码值,对应为图 4(a)(由蓝光照射),亮的方块代表编码值大,暗的方块代表编码值小.如图 4(a)中, $a_{13} =$

$4, a_{23} = 0, b_{ij}$ 为矩阵 B 的编码值,对应为图 4(b)(由黄光照射), c_{ij} 为 $A - B$ 的编码值, $c_{ij} > 0$ 的正值阵元的编码值部分结果对应图 4(c).矩阵 $A - B = C (c_{ij} > 0)$ 可以表示为

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 & 4 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \\ 4 & 2 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 4 & 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 & 0 \\ 4 & 2 & 2 & 4 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 4 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 \end{pmatrix}.$$

(18)

(18)式表示蓝光输出的结果,该结果代表了 $a_{ij} \geq b_{ij}$ 的相减结果, $a_{ij} < b_{ij}$ 的相减结果在透射黄光中体现出来.实验中,选择 bR 工作在线性区,即选择蓝光和黄光承载光强较强(大于 0.2 mW/cm^2),因此相减结果可以保证是线性相减.另外,也可以看作有两对矩阵元的相减结果略有出入.其原因为:一是我们的

灰度版制作的并非完全准确,即原始矩阵的底片透射率并非完全准确地代表编码值,造成相减不彻底.二是入射光并非完全均匀光(如钨丝灯光)及 bR 膜非均匀性等影响.

另外,减常量计算、数字取补光计算和二进制矩阵相减,也可用类似方法实现,恕不一一列出.

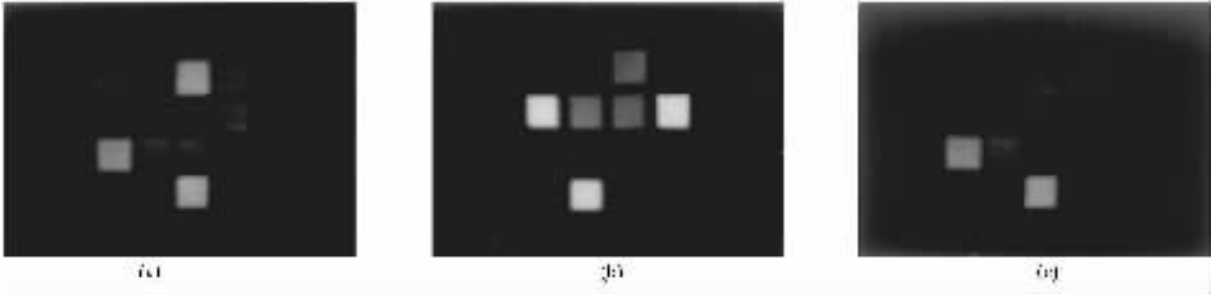


图 4 多进制矩阵相减实验结果

4. 结 论

我们利用 bR 膜黄光、蓝光的互补抑制调制特性,构造新型光计算的基本处理模式和计算结构,实现了多进制光矩阵的运算设计与实验操作,实验演

示了无进位和无退位的多进制数字光计算的矩阵加、减运算.多进制编码的光阵列运算不但可以代替以二进制编码的大阵列运算,而且为进行复杂的数字光计算打下了基础.利用新型光计算的基本处理模式,可以并行实现模拟光和数字光同时运算.

[1] Rao D V G L N, Aranda F J, Narayana D *et al* 1996 *Opt. Commun.* **127** 193

[2] Okada-Shudo Y, Yamaguchi I, Tomioka H *et al* 1996 *Synth. Met.* **81** 147

[3] Feng X Q, Hou X, Yang W Z *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2803 (in Chinese) [冯晓强、侯 洵、杨文正等 2003 物理学报 **52** 2803]

[4] Yang W Z, Yang Q, Chen F *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 761 (in Chinese) [杨文正、杨 青、陈 烽等 2003 物理学报 **52** 761]

[5] Zhen Y A, Yao B L, Wang Y L *et al* 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 671

[6] Fujiwara H, Nakagawa K, Suzuki T 1990 *Opt. Commun.* **79** 6

[7] Boothroyd S A, Chan L, Beckwith P H *et al* 1992 *Appl. Opt.* **31** 4004

[8] Song Q, Zhang C P, Richard B G 1993 *Opt. Lett.* **18** 1373

[9] Zhang T H, Zhang C P *et al* 2000 *Opt. Eng.* **39** 527

[10] Zhang C P, Gu L Y, Chen G Y *et al* 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 2161

Digital optical operation in multilateral system by bacteriorhodopsin film^{*}

Gu Li-Qun¹⁾ Chen Gui-Ying¹⁾ Guo Zong-Xia¹⁾ Zhang Chun-Ping¹⁾

Tian Jian-Guo¹⁾ Zhang Guang-Yin¹⁾ Q. W. Song²⁾

¹⁾ (*Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

²⁾ (*Department of Electrical Engineering and Computer Science,
Syracuse University, Syracuse, NY 13244, USA*)

(Received 1 August 2003 ; revised manuscript received 14 April 2004)

Abstract

Bacteriorhodopsin film has a special property of complementary suppression modulated transmission of yellow and blue beams. Resolving the transmission rate equations of the yellow and blue beams, the analytical formulae are obtained and graphic results are shown. We put forward a multilateral-system computational model of digital optical matrix addition and subtraction operations without carry and abdication respectively. The novel model and frame of basic optical computation are constructed, and the optimized project of digital optical matrix addition and subtraction operations are designed.

Keywords : bacteriorhodopsin film, digital optical calculation, operating structure, light modulation

PACC : 4270G, 4225B, 4280V

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60278007) and the Natural Science Foundation of Tianjin, China (Grant No. 033601311).