

# 吸收非线性物理的新应用

## ——积分型光子“晶体管”的模型研究\*

陈晓波 张光寅 郝昭 许京军

(南开大学物理系, 天津 300071)

**提要** 利用光色材料的弱饱和光强参数的吸收非线性, 创新地提出了积分型“光子晶体管”的研究构想, 系统地构造了系列并行运行吸收非线性光子学器件模型, 对其性能进行了基础性的详细论证与分析, 对其可能应用也给予了简要讨论。

**关键词** 吸收非线性, 光子“晶体管”, 光色材料与光色效应, 并行光子学器件

### 1 引言

随着科学的发展, 序列运行器件的能力已接近极限, 发展并行运行的方法与器件已成为科学最重要的发展方向之一, 但电子间不可避免的相互作用和相互干扰使电子学器件在发展并行运行功能上受到极大的限制。因此, 利用光子天然的并行运行能力发展各种新型的并行运行光子学技术与器件已受到了科学界和各国政府的广泛重视。

结合作者两年多来在光色材料的不断摸索研究和国际上该领域科学的最新发展, 最近我们在国际上创新地提出了“光子晶体管”的研究构想<sup>[1]</sup>, 即系统地利用光色材料的吸收非线性来构造光子学器件, 突破非线性器件与应用过去主要局限在折射率非线性领域的局面。

本文进一步发展了“光子晶体管”的研究构想, 系统而详细地进一步提出了积分型光子二端管、三端管、四端管等物理模型, 形成了一系列的积分型光子晶体管器件模型。

### 2 物理图象

光色效应很早就已经得到人们的重视和研究<sup>[2]</sup>。当一类光色材料受到紫外光照射, 由于光异构化作用, 材料由无色体转变为有色的异构体。这一过程可由图1的能级结构来描述。其中, 能级 $|1\rangle$ 是无色体的基态,  $|2\rangle$ 是激发态,  $|3\rangle$ 是等效的变色后的异构体的基态, 这是一个亚稳态。光强为1的光只与能级 $|1\rangle$ 的吸收共振, 而不与异构体的基态 $|3\rangle$ 吸收共振。在光强 $I$ 较小时, 能级 $|1\rangle$ 有大量的布居数, 随着 $I$ 的增大, 这些布居将跃迁至能级 $|2\rangle$ , 再通过异构化转移并储存在能级 $|3\rangle$ 上, 从而在能级 $|3\rangle$ 形成了一个“布居库”, 将大量的布居储存起来,  $|1\rangle$ 上的布居就少了。这样, 就出现了 $I$ 的透过率随光强的增大从低透到高透的非线性变化<sup>[3,4]</sup>。这个过程可用速率方程来描述, 并且可由计算机对其求得数值解, 结果如图3所示的低饱和光强的

\* 国家自然科学基金、基金委优秀中青年专项基金和国家教委跨世纪优秀人才计划资助项目。

收稿日期: 1995年1月3日; 收到修改稿日期: 1995年5月10日

吸收非线性  $T-I$  曲线。 $T$  是光的透射率,  $I$  是光的光强。 $T-I$  曲线的形状与电子晶体管的  $V-I$  伏安特性曲线相似。

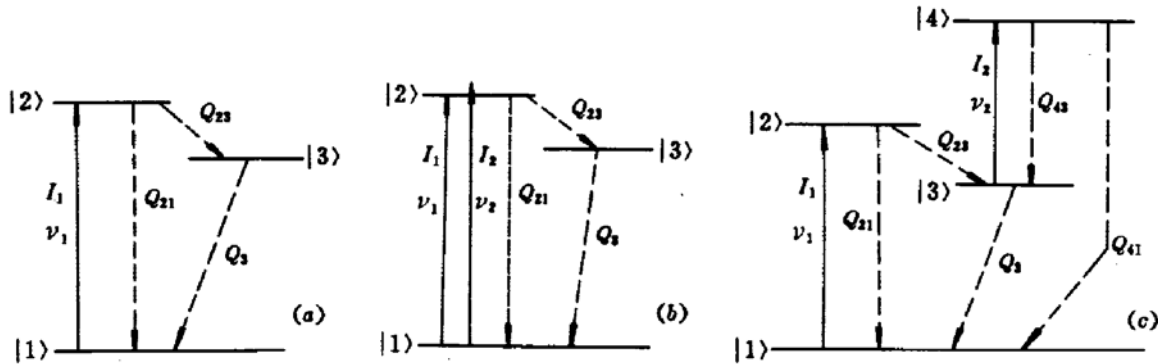


Fig. 1 The illustration of the energy levels of photonic transistors  
 (a) photonic diode; (b) photonic triode; (c) photonic tetrode

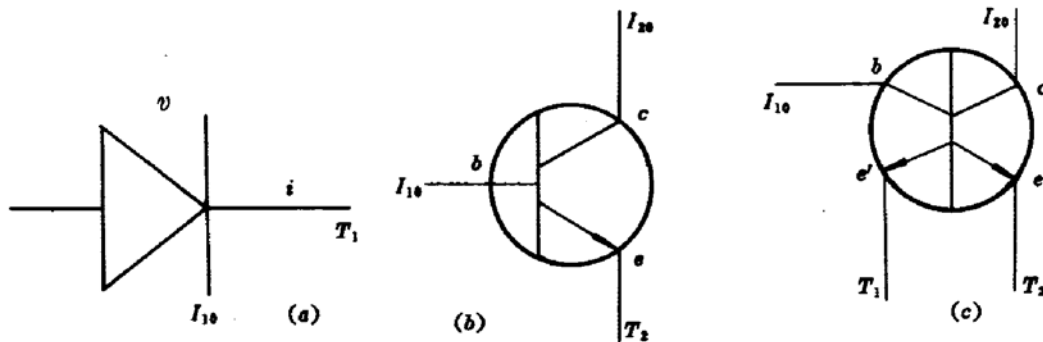


Fig. 2 The analogy between photonic transistors and electronic transistors  
 (a) photonic diode; (b) photonic triode; (c) photonic tetrode

我们提出的这种低饱和光强的  $T-I$  非线性关系曲线实质上是一种光子型“ $T-I$  晶体管特性曲线”,即这种吸收非线性即构成了光子晶体管(晶体管的英文名称为 Transistor,其原意为渡越管,所以光子晶体管的英文名称为 Photonic Transistor 是非常符合其性质的)。在只有一束光的情况下,  $T$  和  $I$  就是这束光的透射率和光强,此时构成光子二端管。在有二束光的情况下,则  $T$  是第一束光的透射率,  $I$  是与之交迭的第二束光的光强。此时构成光子三端管[如图 1(b) 所示]或四端管[如图 1(c) 所示]。

对于光子三端管,它是由图 1(b) 所示的三能级系统构成的,即在光子二端管的基础上增加了与  $\nu_1$  不同频的也与  $|1\rangle-|2\rangle$  吸收共振的频率为  $\nu_2$  的第二束激光  $I_2$ ,由计算机很易解出第二束光的透射率  $T_2$  对第一束光的入射光强  $I_{10}$  的关系曲线  $T_2-I_{10}$ ,结果如图 4 和图 5 的实线所示。其中  $\alpha = \sigma(\nu_1)/\sigma(\nu_2)$ ,  $\sigma(\nu_1)$ ,  $\sigma(\nu_2)$  分别是吸收介质在频率  $\nu_1$  和  $\nu_2$  处的吸收截面。该结果与光子二端管的结果很相似,在低光强下,透过率很低;在高光强下,透过率接近 100%;而在工作区附近,透过率从低通迅速变为高通。显然由第一束光的入射光强  $I_{10}$  很易控制第二束光的透射率  $T_2$ ,而由  $\alpha$ ,  $I_{20}$  等参量,很易调整其吸收非线性的程度(半高处的相对斜率)。我们提出这种  $T_2-I_{10}$  非线性关系曲线实质上是一种光子型“ $T-I$  三极管伏安特性曲线”,即光子三端管,如图 2(b) 所示。

对于光子四端管,它是由图 1(c) 所示的四能级系统构成的,  $|1\rangle$  为稳态的基态,  $|2\rangle$  为激发

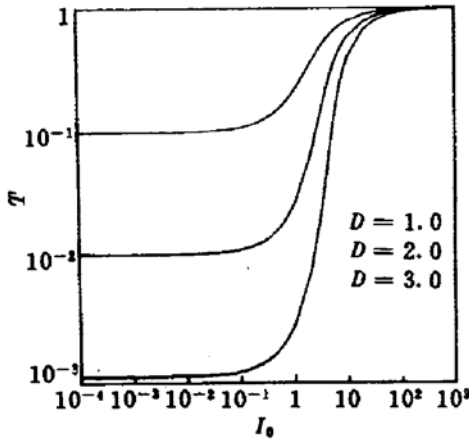


Fig. 3 The theoretical curves  $T-I_0$  of a photonic diode

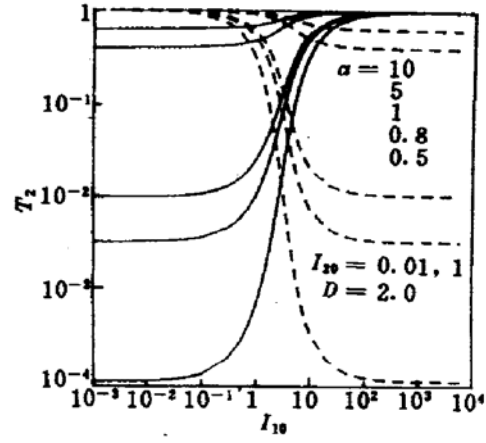


Fig. 4 The theoretical curves  $T_2-I_{10}$  varied with  $\alpha$  of a photonic triode (solid) and a photonic tetrode (dotted)

态,  $|3\rangle$  为亚稳的异构体的基态,  $|4\rangle$  为异构体的激发态。即在光子二端管的基础上增加了与  $\nu_1$  不同频而与  $|3\rangle-|4\rangle$  吸收共振的频率为  $\nu_2$  的第二束激光  $I_2$ , 由计算机很易解出第二束光的透射率  $T_2$  对第一束光的入射光强  $I_{10}$  的关系曲线  $T_2-I_{10}$ , 第一束光的透射率  $T_1$  随第一束光的入射光强  $I_{10}$  变化受  $I_2$  影响的关系曲线  $T_1-I_{10}$  和第二束光的透射率  $T_2$  随第二束光的入射光强  $I_{20}$  变化受  $I_1$  影响的关系曲线  $T_2-I_{20}$ ; 以及  $I_{10}$ ,  $I_{20}$ ,  $\alpha$  等参数对它们的影响。结果如图 4 和图 5 的虚线、图 6 和图 7 所示。我们提出的图 1(c) 结构和图 4~7 的这种  $T-I$  非线性关系曲线实质上是光子四端管, 如图 2(c) 所示。它的作用与价值包括三个方面:

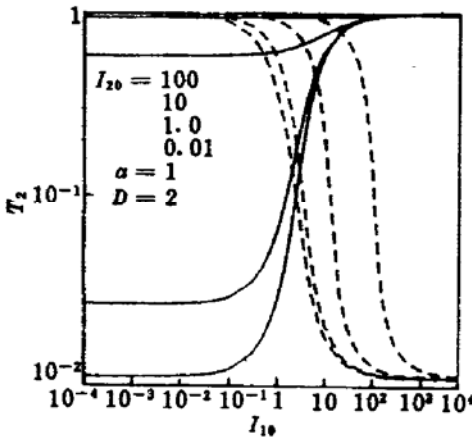


Fig. 5 The theoretical curves  $T_2-I_{10}$  varied with  $I_{20}$  of a photonic triode (solid) and a photonic tetrode (dotted)

第一是  $T_2-I_{10}$  构成一个负阻的光子三端管, 如图 4, 5 的虚线所示, 即在高光强下, 透过率很低; 在低光强下, 透过率接近 100%; 而在工作区附近, 透过率即从高通迅速变为低通。

第二是  $T_1-I_{10}$  构成一种自反馈光子二端管, 而  $I_{20}$  能有效地影响或调整它的性能(工作区和非线性), 它构成新事滤波器的基础, 如图 6 所示。

第三是  $T_2-I_{20}$  构成可控光子二端管(光子可控硅), 它是由  $I_{10}$  调整和控制这种光子可控硅的动态范围、工作区和非线性的, 如图 7 所示。

### 3 数学表达及解

#### 3.1 光子“二端管”

图 1(a) 的能级结构就成了光子“二端管”的理论模型, 利用速率方程

$$\begin{cases} \frac{dN_2}{dt} = \frac{\sigma \cdot I}{h \cdot \nu} \cdot (N_1 - N_2) - (Q_{21} + Q_{23}) \cdot N_2 & (1) \\ \frac{dN_3}{dt} = Q_{23} \cdot N_2 - \frac{N_3}{\tau_3} & (2) \\ N_1 + N_2 + N_3 = N_0 & (3) \end{cases}$$

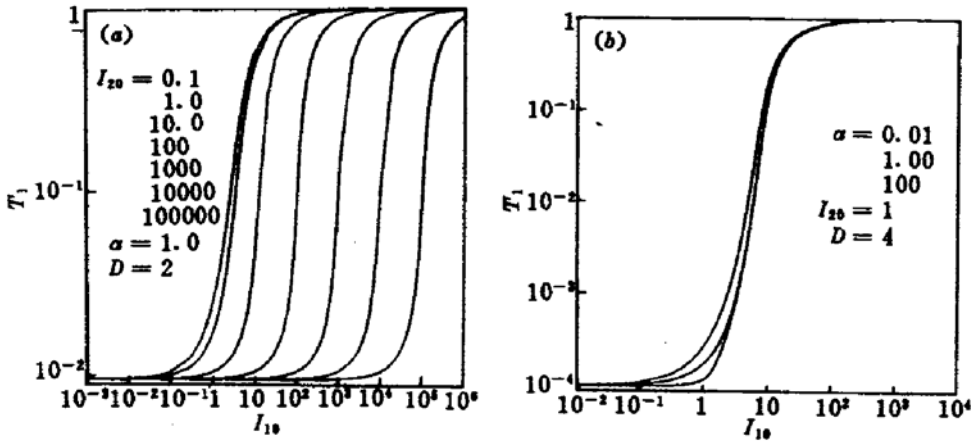


Fig. 6 The theoretical curves  $T_1-I_{10}$  of a photonic tetrode with  $I_{20}$  changing (a) and with  $\alpha$  changing (b)

式中,  $\sigma$  为材料的吸收截面,  $Q$  为跃迁效率,  $N$  为各能级粒子数密度,  $\tau_3$  是能级  $|3\rangle$  的寿命。在稳态条件下, 可以求得

$$N_1 = \frac{N_0}{1 + I/I_s} \quad (4)$$

其中,  $I_s = h \cdot \nu / (\varphi \cdot \tau_3 \cdot \sigma)$ , 变色效率  $\varphi = Q_{23} / (Q_{21} + Q_{23})$ , 再由  $dI/dt = -\sigma \cdot N_1 \cdot I$ , 可解得  $I_0 = I_i/I_s$  与透过率  $T = I_t/I_i$  的关系

$$T \cdot \exp[I_0(T - 1)] = \exp[-\sigma \cdot N_0 \cdot d] = \exp[-D/\lg e] \quad (5)$$

$I_0$  就是以  $I_s$  为单位的入射光强,  $d$  为材料厚度,  $D$  为材料光密度。

利用计算机, 不难求出超越方程(5)的解, 从而得到入射光强与透过率的关系曲线(图2)。从这里, 可以看出  $I_s$  是产生吸收非线性的饱和光强。

### 3.2 光子“三端管”

如图1(b)的能级结构构成了光子“三端管”,  $I_1, I_2$  都与基态  $|1\rangle$  吸收共振, 其中  $I_1$  是操作光,  $I_2$  是信号光。通过  $I_1$  光强的改变就可以实现  $I_2$  透过率的非线性变化。

利用速率方程和吸收方程

$$\begin{cases} \frac{dN_2}{dt} = \left( \frac{\sigma_1 \cdot I_1}{h \cdot \nu_1} + \frac{\sigma_2 \cdot I_2}{h \cdot \nu} \right) \cdot N_1 - \frac{Q_{23}}{\varphi} \cdot N_2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{dN_3}{dt} = Q_{23} \cdot N_2 - \frac{N_3}{\tau_3} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} N_1 + N_2 + N_3 = N_0 \end{cases} \quad (8)$$

可解得

$$N_1 = \frac{N_0}{1 + I_1/I_{1s} + I_2/I_{2s}}$$

再由吸收方程

$$\begin{cases} \frac{dI_1}{dz} = -\sigma_1 \cdot N_1 \cdot I_1 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \frac{dI_2}{dz} = -\sigma_2 \cdot N_1 \cdot I_2 \end{cases} \quad (10)$$

通过计算机解得微分方程组的数值解, 我们就可以得到图3、图4中实线所示的一系列计算曲线。其中,  $\alpha = \sigma_1/\sigma_2$  是两束光的吸收截面之比。

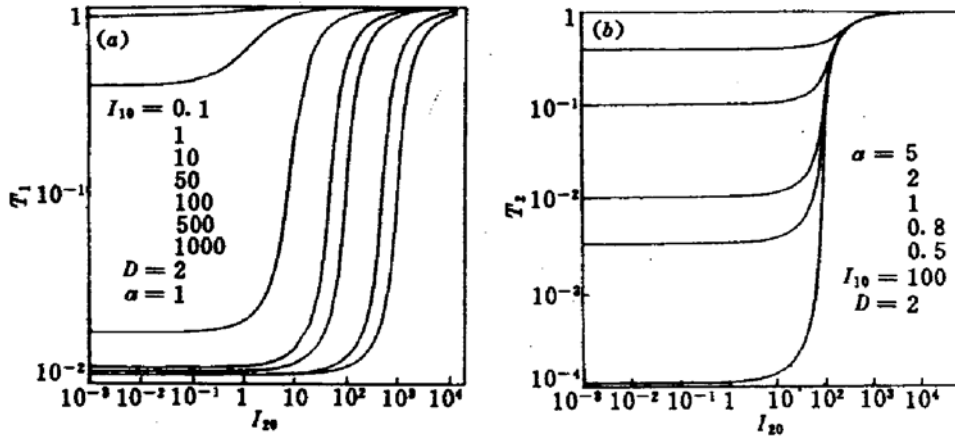


Fig. 7 The theoretical curves  $T_2-I_{20}$  of a photonic tetrode as a function of  $I_{10}$  (a) and of  $\alpha$ (b)

可以看到,调节吸收截面比(图 3)和改变信号光的入射光强(图 4)都会在相当程度上使计算曲线发生相应的变化,从而导致“三端管”器件性能的较大变化。

### 3.3 光子“四端管”

光子“四端管”的能级结构如图 1(c) 所示。这是一个四能级系统,能级  $|4\rangle$  是异构体基态  $|3\rangle$  的激发态。

同前面相似,这一四能级系统依然可以用速率方程

$$\begin{cases} \frac{dN_2}{dt} = \frac{\sigma_1 \cdot I_1}{h \cdot \nu_1} \cdot N_1 - \frac{Q_{23}}{\varphi_2} \cdot N_2 & (11) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dN_3}{dt} = Q_{23} \cdot N_2 - \frac{N_3}{\tau_3} - \frac{\sigma_2 \cdot I_2}{h \cdot \nu_2} \cdot N_3 + Q_{43} \cdot N_4 & (12) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dN_4}{dt} = \frac{\sigma_2 \cdot I_2}{h \cdot \nu_2} \cdot N_3 - \frac{Q_{43}}{\varphi_4} \cdot N_4 & (13) \end{cases}$$

$$\begin{cases} N_1 + N_2 + N_3 + N_4 = N_0 & (14) \end{cases}$$

解得

$$N_1 = \frac{1 + I_2/I_{2s}}{1 + I_1/I_{1s} + I_2/I_{2s}} \cdot N_0, \quad N_3 = \frac{1 + I_1/I_{1s}}{1 + I_1/I_{1s} + I_2/I_{2s}} \cdot N_0$$

再由吸收方程

$$\begin{cases} \frac{dI_1}{dz} = -\sigma_1 \cdot N_1 \cdot I_1 & (15) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dI_2}{dz} = -\sigma_2 \cdot N_3 \cdot I_2 & (16) \end{cases}$$

利用计算机仍可解得微分方程组的数值解,就得到图 3, 图 4 中虚线所示的计算曲线。

与“三端管”所不同的是,“四端管”是一个“负阻”的光子“晶体管”,随着一束光的增强,另一束光的透过率由高透变为低透。

## 4 可能应用

完全可以相信,象利用电子晶体管的  $V-I$  特性曲线实现丰富多样的电子学器件一样,原则上,利用上述光子型“ $T-I$ ”特性曲线也一定可以实现诸多的光子学器件。对这种吸收非线性物

理过程的研究对于构造开发新型光子学器件是很有意义的。

经过半年多的初步研究,已发现我们提出的这一类积分型光子晶体管可应用的最优先领域是并行图象处理器件,和其他一些并行光子学器件,而不是与电子晶体管相竞争的领域。我们初步将进行的器件应用研究如下:(1)全光空间光调制器件;(2)光象放大器;(3)并行光学双稳器件;(4)去亮背景噪声的滤波器;(5)全光二维开关;(6)变象器(紫-可见,红外-可见);(7)新事滤波器(图象相减器);(8)软边光阑;(9)削平空间频谱的尖峰。

光子二端管是一束光对其自身的透过率施加以影响,这在实际应用中是有些不足的,与光子二端管相比,光子三端管、四端管较大地改善了光子二端管的性能并拓展了它的应用范围,更具有可应用性和可操作性,使光子晶体管成为真正的极有吸收力的一类新型非线性光子学器件。并且它是一种弱光光子学器件(其饱和光强在  $10 \text{ mW/cm}^2$  以下)。

很有意义的另一点是这种光子晶体管是利用了材料中单个分子的电子能级,它是做在比电子晶体管的  $p-n$  结更小的分子系统上的,无需制作高密度  $p-n$  结阵列那样的复杂工艺。

## 5 性能分析

对于光子二端管,由图3可以看出它的特性,即光密度  $D$  决定了它的动态范围。从图3可以看出如下定义是合理的:(1)光密度  $D$  的 99% 点到 1% 点对应的透过率的相对变化  $\Delta T/T_{0.99D}$  为有效动态范围;(2)光密度  $D$  的 90% 点到 10% 点对应的透过率的相对变化  $\Delta T/T_{0.90D}$  为线性动态范围。

表1列出了对二端管性能的计算结果,可以看出,随着  $D$  的增大,有效动态范围  $\Delta T/T_{0.99D}$  和线性动态范围  $\Delta T/T_{0.90D}$  迅速增大,而相应的操作光强的工作区却相对变窄,说明较大的光密度  $D$  对由这种光子晶体管构成的非线性器件的性能是有利的。当然  $D$  太大会造成透光效率降低,因而就要根据需要进行选择最合适的参数。

Table 1 The calculated properties of a photonic "diode"

$D$	$D \cdot 99\%$		$D \cdot 1\%$		$\Delta I_0/(I_0)_{0.99D}$	$\Delta T/(T)_{0.99D}$
	$I_0$	$T\%$	$I_0$	$T\%$		
1	0.030	10.23	100.03	97.72	3333	8.6
2	0.051	1.05	105.3	95.50	2105	90.0
3	0.070	0.107	107.0	93.33	1528	847.5

$D$	$D \cdot 90\%$		$D \cdot 10\%$		$\Delta I_0/(I_0)_{0.90D}$	$\Delta T/(T)_{0.90D}$
	$I_0$	$T\%$	$I_0$	$T\%$		
1	0.2601	12.59	10.10	79.43	37.83	5.31
2	0.4679	1.585	12.05	63.10	24.75	38.81
3	0.6954	0.1995	13.71	50.12	18.72	250.23

对于光子三端管,其可操作性与可应用性较二端管有了进一步的提高:

(1) 透过率  $T$  是不易操作的,  $I_r$  才是可操作参量,对于三端管,  $T_2$  与  $I_{2r}$  是等价的,所以,由光强  $I_{2r}$  既可方便地操作这种非线性,又可使这种非线性获得更好的应用。

(2) 通过调整  $\alpha$  等参量,很易调整其吸收非线性的工作区和非线性的程度,尤其是后者,是很有意义的;例如对于空间光调制器,显然对于  $\alpha$  大的情况就较好,一是非线性较小、线性动

态范围对应的工作区较大,可以有较大范围光强的图象获得较好的线性变换,同时, $\alpha$ 的改变也就是不同的颜色的非相干图象变换为相干图象时抖动较小,其变换效率是稳定的和一样的。而对于光开关类型的器件,显然 $\alpha$ 小好,这样其非线性很小,可以迅速实现开和关两种状态的改变。

表 2 列出了计算结果,对其非线性给出了详细的计算。

Table 2 The calculated properties of a photonic "triode"

$\alpha$	99% · D/α		1% · D/α		ΔT/(T) <sub>0.99D</sub>
	$I_0$	T%	$I_0$	T%	
5	0.0163	40.179	101.39	99.08	1.4660
1	0.0310	1.0470	101.44	95.50	90.213
0.8	0.0386	0.3350	101.47	94.41	280.82
0.5	0.0414	0.0110	101.39	91.20	8289.9

$\alpha$	90% · D/α		10% · D/α		50% · D/α	ΔT/(T) <sub>0.90D</sub>
	$I_0$	T%	$I_0$	T%	$K_{rel.}$	
5	0.440	43.65	11.229	91.20	0.3588	1.0893
1	0.454	1.585	11.230	63.10	1.8549	38.810
0.8	0.456	0.5623	11.230	56.23	2.3496	99.000
0.5	0.457	0.0251	12.215	39.81	3.8551	1585.1

对于光子四端管,它的可应用性最大。首先对于负阻光子三端管,我们知道,负反馈器件是电子学器件的一个基础,本文所提出的这种负阻光子三端管在这方面可能具有较大的潜力与价值,它是非常值得深入研究的。另外,自反馈光子二端管和可控光子二端管也都是很有潜力的。而在这其中,可选择适当的  $D$ ,  $\alpha$ ,  $I_{20}$  等参量来达到我们所需的非线性器件的性能。

特别是,由图 3~6 可以看出对于光子二端管、三端管和四端管,它们具有一个共同的特点,即在饱和光强  $I_s$  附近,透过率迅速实现低透与高透间的变换,因而,  $I_s$  是一个重要的参量。图 8 给出了对饱和光强  $I_s$  的计算结果,可以看出,对于积分型光子“晶体管”,只有光色材料因其具有较大的振子强度和较长的亚稳态寿命才使其可能具有极小的饱和光强  $I_s$ ,才能使光子“晶体管”成为一种弱光光子学器件。

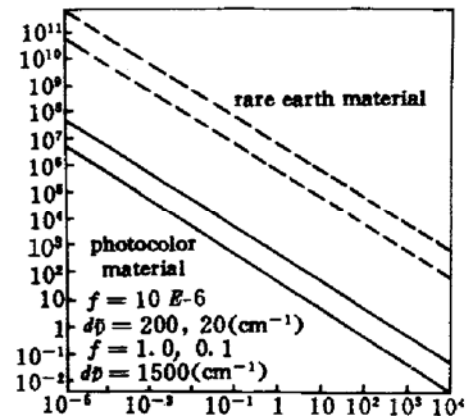


Fig. 8 The saturation intensity is shown as a function of the lifetime  $\tau_s$  of the sub-steady state of the photochromic isomeride, where  $f$  is the strength of the oscillator, and  $\delta\nu$  is the half-width of its absorption spectrum

### 参 考 文 献

- 1 张光寅, 许京军, 陈晓波等. 光电子·激光, 1994, 5(3):143
- 2 Durr H., Bouas-Laurent H. Photochromism, Elsevier science publisher B. V., 1990
- 3 Ofer Werner, Baruch Fischer, Aaron Lewis et al.. Saturable absorption, wave mixing, and phase conjugation with

bacteriorhodopsin. *Opt. Lett.*, 1990, 15:1117

- 4 Q. Wang Song, Chungping Zhang, Robert Blumer *et al.*. Chemically enhanced bacteriorhodopsin thin-film spatial light modulator. *Opt. Lett.*, 1993, 18:1373

## Research of the Integral Photonic "Transistor" Models ——New Application of Absorption Nonlinear Physics

Chen Xiaobo Zhang Guangyin Hao Zhao Xu Jingjun

(Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071)

**Abstract** A concept about a new kind of integral photonic "transistor", using saturation absorption nonlinearity of the weak saturation optical intensity parameter of photochromic material, is put forward in this paper. A series of parallel absorption nonlinear photonic device models are constructed. Their property is studied and analysed carefully and their probable application is simply discussed.

**Key words** absorption nonlinearity, integral photonic "transistor", photochromism, parallel photonic device

## 第十二届全国激光学术会议征文通知

中国光学学会激光技术专业委员会、中国电子学会量子电子学与光电子学会联合主办的第十二届全国激光学术会议将于 1996 年第二季度在湖北省召开。

### 一、征文范围

**A 类：激光理论** 光的本性；光电子学；光生物学；光化学；空间光学；激光光谱学；非线性光学；激光等离子体；激光与物质相互作用等。

**B 类：激光器件与技术** 固体、气体、半导体、自由电子、准分子等激光器、染料、化学激光器、波长可调谐激光器及其他新型激光器；激光技术；超快光学与电子学；红外技术；光信息处理与检测；光学双稳态及光存储器件；光电子学仪器与器件；激光和光学元件与材料；激光束整形、变换与传输；光束诊断技术。

**C 类：激光应用** 激光在工业中的应用；激光在微电子学中的应用；激光在医学方面的应用；激光在国防现代化方面的应用；以及激光在农业等方面的应用。

### 二、征文要求

1. 凡属上述征文范围内的最新科研成果和阶段性成果简报，有一定创造性的学术论文或能反映国内先进水平的技术报告，均可应征。

2. 提交论文提要(500 字)及论文摘要(50 字)各一式二份，征文用“挂号”寄至武汉华中理工大学激光技术与工程研究院辜建辉同志收，邮编 430074(电挂：武汉 7122 激光研究院；电话：7801541 转 8056)，并在信封右上角注明“十二届会稿”字样。

3. 征文截止日期：1995 年 12 月 31 日。

第十二届全国激光学术会议筹备组  
一九九五年五月