

光波导脉冲耦合器研究*

周建忠¹⁾²⁾ 陈抱雪^{1)3)4)†} 李家鞞¹⁾ 王关德¹⁾ 浜中广见⁵⁾

1)(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

2)(上海电缆研究所, 上海 200093)

3)(教育部光学仪器与系统工程研究中心, 上海 200093)

4)(上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

5)(日本法政大学工学院物质化学系, 日本 184-8584)

(2013年8月19日收到; 2013年9月13日收到修改稿)

提出并实验了一种新的波导型脉冲耦合器的构成和动作机理, 将光阻断效应表现的光粒子性和分支波导模式耦合表现的光波动性在光波导载体上有机结合起来, 用全光学方式实现了输入作用电脉冲与输出同步电脉冲之间的脉冲耦合动力学过程.

关键词: 光波导技术, 脉冲耦合神经网络, 硫属化合物玻璃, 光阻断效应

PACS: 42.82.Bq, 42.82.Et

DOI: 10.7498/aps.63.014211

1 引言

对外部脉冲刺激信号的响应表现出程度上的非线性积累和泄漏是脉冲耦合神经网络(PCNN)对仿神经元的特征性要求^[1,2], 积累和泄漏的竞争结果用阈值来判别, 阈值之上的兴奋态表现为响应脉冲的同步发放, 低于阈值则显示沉寂. 这种输入脉冲与输出脉冲之间的耦合动力学建立在生物大脑视觉皮层研究的实验基础上^[3-6], PCNN为研发更精确的仿生视觉系统提供了很有潜力的途径^[7,8]. 尽管PCNN的软件实现方法有很多, PCNN的实时响应操作需要通过硬件来实现^[9]. 在硬件实现方面, 已见报道的电路技术包括CMOS技术^[10,11]、基于FPGA的技术^[12,13]和超混沌发生器电路技术^[14]等. 利用光信号的可并行处理、无干扰和高速性, 用光学或光电结合的手段构造脉冲耦合模型对提高PCNN的系统规模和并行处理速度显然有利. Wang等实验了一种期待用于PCNN的光学脉冲发生器, 脉冲构造利用了光学双稳态, 频率

变动利用了反馈控制的光折变光栅, 输出脉冲的频率与输入光的强度构成耦合响应的关系^[15]. Clark等将光学微透镜的自适应波前校正与PCNN的平滑机理结合起来, 显示了降低噪声干扰的效果^[16]. 本文提出并实验了一种新的脉冲耦合构成和动作机理, 将光阻断效应^[17]表现的光粒子性和分支模式耦合表现的光波动性在光波导载体上有机结合起来, 用全光学方式实现了输入作用电脉冲与输出同步电脉冲之间的脉冲耦合动力学过程.

2 器件结构和动作原理

光波导脉冲耦合器的基本结构如图1所示, 由一个倒置的单模Y分支波导以及在两支输入臂上对称制备的多模复合波导构成. 单模Y分支波导用常规离子交换技术在SCHOTT公司的B270玻璃上制备, 多模复合波导的截面示于图1的局部放大, 在离子交换波导两侧开窗制备金属Al膜, 然后覆盖一层As₂S₈薄膜, 构成As₂S₈-B270离子交换复合多模波导. 由于金属膜的隔离作用, Al膜上背载

* 国家自然科学基金(批准号: 61077042, 60677032)和上海市重点学科建设项目(批准号: S30502)资助课题.

† 通讯作者. E-mail: bxchen55@live.cn

的 As_2S_8 薄膜对导波不作用 [18]. 就导波原理而言, 进一步采用 Lift-off 技术去除周边 Al 膜及其背载的 As_2S_8 薄膜仍然可以构成复合多模条波导, 且避免了金属吸收. 然而硫系非晶态玻璃不耐碱, 过不了多道工序中碱性溶液的关.

脉冲耦合动作利用了上述结构的两个基本功能, 一个是倒置 Y 分支波导的模式耦合, 另一个是复合波导的非饱和光阻断效应 [19]. 图 2 (a) 给出了由单模波导构成的一个倒置的 Y 分支耦合光路, 两支相干输入光 A 和 B 在波导输入端的相位相反, 且 B 光的功率大于 A 光的. 根据模式耦合原理, 在楔形过渡波导的入口处激发齐对称 1 阶模和基模, 随着楔形波导逐渐变窄, 高阶模最终被耦合成辐射模而消散, 结果唯有基模从输出端出射. 若 B 光的功率降低至与 A 光的相等, 如图 2 (b) 所示, 在楔形过渡波导的入口处几乎只激发齐对称 1 阶模, 该模式被输出波导截止, 输出接近零. A 光在这里发挥了阈值作用. 两支输入光的相对光功率的调节利用了复合波导的光阻断效应, Y 分支耦合光路的输出举动表现为对光阻断效应的响应. 光阻断效应是

As_2S_8 材料特有的一种光-光作用, 利用了次能级电子跃迁过程对 632.8 nm 信号光的吸收, 向次能级抽运电子的工作由带隙光激励来完成 [20-22]. 复合波导除了要求有低的插入损耗以外, 光场分布尽可能集中在 As_2S_8 层中传输是有效实现光阻断效应的关键. 图 3 是复合波导沿波导轴芯切开的剖面图, 在 B270 玻璃衬底上, 采用选择性二次离子交换技术制备厚度变化的折射率渐变条波导 [23]. 其中过渡区域 L_2 通过侧向扩散自然形成, 长度与离子交换的温度和时间有关, 约为 1 μm 量级. 输入和输出两端的波导提供 632.8 nm 波长单模传输, 中间较薄的条波导在不覆盖 As_2S_8 薄膜时对 632.8 nm 波长截止. 632.8 nm 入射光在输入波导中激励基模传输, 在复合波导的入射端激发多模, 经 L_1 长度的多模干涉传输后, 通过 L_2 区域的模式相位调节, 光波被耦合到 L_3 区域, 且光场分布主要集中在 As_2S_8 薄膜中传输. L_3 被设计成输入场的镜像距离, 由于光路结构对称, 根据互易原理, 光波通过复合波导后被耦合到输出波导出射.

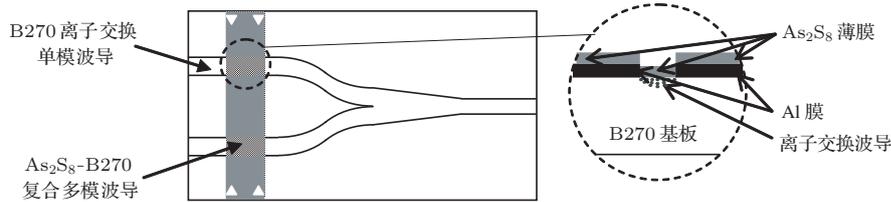


图 1 光波导脉冲耦合器基本结构

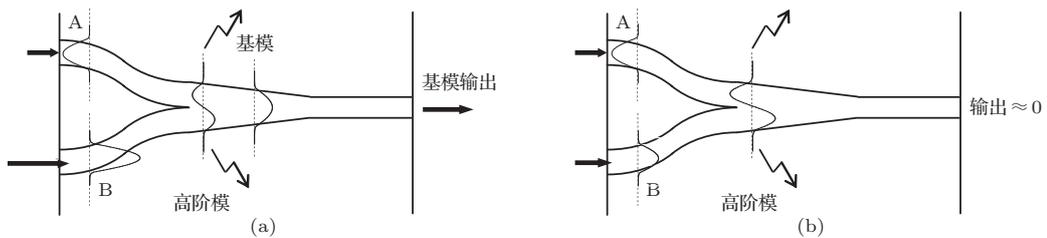


图 2 分支波导模式耦合

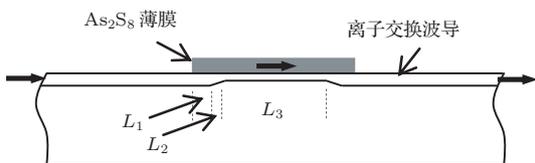


图 3 As_2S_8 -B270 离子交换复合波导轴向剖面

制备离子交换波导的离子源是 0.08% $AgNO_3$ -99.92% $NaNO_3$ 混合盐, Ag^+ 的摩尔比为 0.0398%.

理论和实验表明, Ag^+ 的摩尔比小于 0.5% 时, 扩散系数 D_{eff} 和表面折射率增量 Δn 是由 Ag^+ 摩尔比和离子交换温度 T 决定的近似常数 [24]. 对于 B270 玻璃, $T = 350 \text{ }^\circ C$ 时, $\Delta n = 0.019$, $D_{eff} = 4.09 \times 10^{-4} \text{ } \mu m^2/s$. 条波导的开窗宽度为 5 μm , 单模波导和截止波导的累计交换时间 Δt 分别是 60 min 和 20 min, 有效扩散深度 $d_{eff} = 2\sqrt{D_{eff}\Delta t}$ 分别是 2.43 μm 和 1.40 μm . As_2S_8

薄膜厚度是 $1.7 \mu\text{m}$, 632.8 nm 波长下的折射率是 2.2988 . 复合波导输入端耦合效率用 L_3 区域的光功率与输入光功率的比值 η_1 来表征, η_1 与 L_1 的长度相关, 在 L_1 区域, 复合波导是由单模波导和 As_2S_8 薄膜构成的多模波导, 多模干涉传输显示明显的周期性镜像再现, 周期长度约为 $192 \mu\text{m}$. 考虑到侧向扩散形成的过渡区长度 L_2 难以精确控制, L_1 取约 3 个周期的长度. 图 4 是 632.8 nm 波长的 BPM 仿真结果, 在 $L_1 = 575 \mu\text{m}$ 附近, 有 90% 以上的最大耦合效率, 且对 L_1 变动有较好的脱敏性. 过渡区 L_2 由侧向扩散自然形成, 长度约为 $1 \mu\text{m}$ 量级, 图 5 的 BPM 结果显示 L_2 在 $0.5\text{--}2.0 \mu\text{m}$ 范围内变动时 η_1 几乎不变. 这个结果提示对离子交换侧向扩散的控制是宽容的. 由于在复合波导的入口处发生了折射率分布的突变, 辐射模的激发是难以避免的, 耦合效率 η_1 与 As_2S_8 薄膜的厚度 h 也有关, 图 6 给出了 BPM 结果, 膜厚 h 在 $1.68\text{--}1.77 \mu\text{m}$ 范围内可以获得约为 91% 的耦合效率, 提供了约为 $0.1 \mu\text{m}$ 的膜厚允差. 图 7 给出了复合波导插入损耗与 L_3 的关联性, 在围绕设计长度 $2800 \mu\text{m}$ 的 $\pm 600 \mu\text{m}$ 跨度范围内, 插入损耗维持在 1 dB 左右, 显著表现出插入损耗对 L_3 变动的脱敏性. 这种脱敏作用与复合波导中

引入了离子交换截止波导有关, 理论上, 由于多模传输, 模场分布随传输距离表现周期性变动, 如图 8 的 BPM 仿真传输所示, 在由离子交换单模波导和 As_2S_8 薄膜构成的 L_1 区域, 周期性镜像再现的现象十分明显. 在 L_3 区域, 离子交换单模波导过渡为截止波导, 复合波导中高达数十个导模的光场大部集中在 As_2S_8 薄膜中传输, 类似于白光干涉降低了干涉对比度的效果, 模场分布随传输距离的周期性变化得到了有效模糊. 综上, 该复合波导除了可以为光阻断效应的实现提供有效作用媒介以外, 优化特点还体现在插入损耗对诸如过渡长度 L_1 和 L_2 , As_2S_8 膜厚 h , 以及作用长度 L_3 等关键参数的变化具有良好的脱敏性, 为工艺制备提供了充分的尺寸误差宽容度.

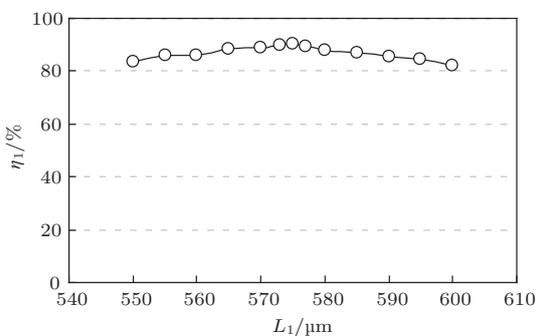


图 4 耦合效率 η_1 与 L_1 的关联性

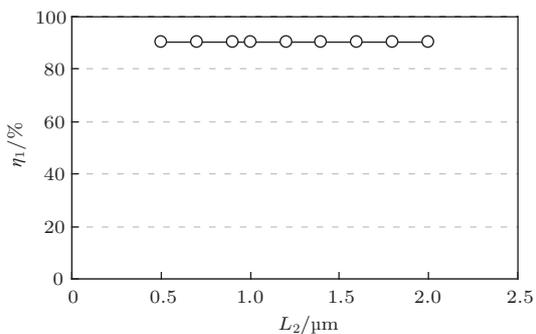


图 5 耦合效率 η_1 与 L_2 的关联性

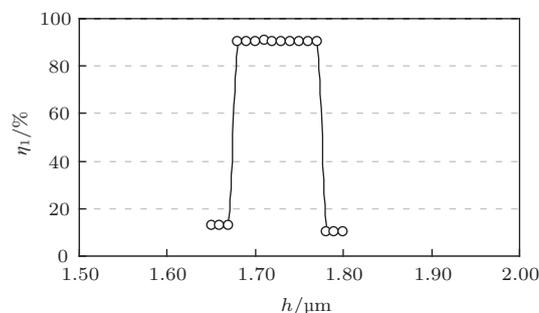


图 6 耦合效率 η_1 与 As_2S_8 膜厚 h 的关联性

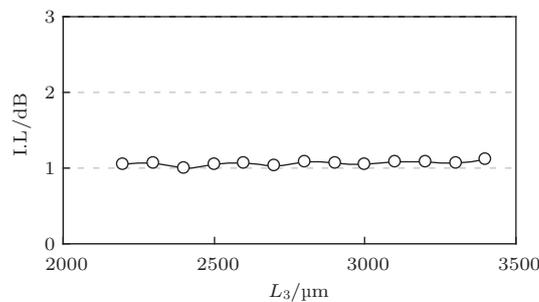


图 7 复合波导的插入损耗与 L_3 的关联性

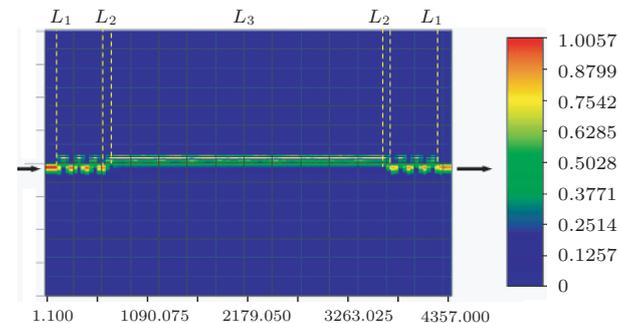


图 8 复合波导的 BPM 仿真传输

3 器件制备和实验结果

光波导脉冲耦合器试验样品的基本结构由图1给出,图9聚焦复合波导区域给出了制备工艺步骤,在B270玻璃衬底上,采用热蒸发真空镀膜技术制备了厚度为1.9 μm的金属铝掩膜,金属掩膜的开窗采用光刻技术,开窗宽度是5 μm,复合波导中 $L_3 = 3$ mm的区域被遮蔽,形成图9(a)的掩膜图形.第一次离子交换的离子源是0.08%AgNO₃-99.92%NaNO₃混合熔融盐,恒温时间是40 min.此后采用光刻套刻开窗打通 L_3 区域,形成图9(b)的掩膜图形.追加第二次离子交换,离子源与第一次离子交换的相同,恒温时间是20 min.之后采用光刻套刻去除输入和输出两端的金属掩膜,形成图9(c)的图形.用带有锋利刀口的刀片遮蔽玻璃露出区域后,真空淀积厚度为1.7 μm、长度为4.16 mm的As₂S₈薄膜,构成图9(d)所示的带有As₂S₈-B270离子交换复合波导结构的光波导脉冲耦合器样品.图10是试制样品中涉及复合波导和Y分支波导部分的显微照片,其中上下两根直波导是备用波导.

光阻断效应验证采用了上述同基制备的备用波导,实验结构如图11所示,复合波导的两端与632.8 nm单模光纤端面耦合,光纤-波导-光纤系统的对接耦合采用自行开发的自动调芯技术^[23],光纤与波导端面间填充了折射率匹配液.632.8 nm

He-Ne激光经输入光纤耦合激励复合波导的导模,导波光经输出光纤送入光功率计,通过示波器记录显示.带隙光是功率可调的441.6 nm He-Cd激光,经多模光纤耦合引导,从样品表面辐照As₂S₈薄膜,光束照射半径约为2 mm.快门开关用于控制实验程序.

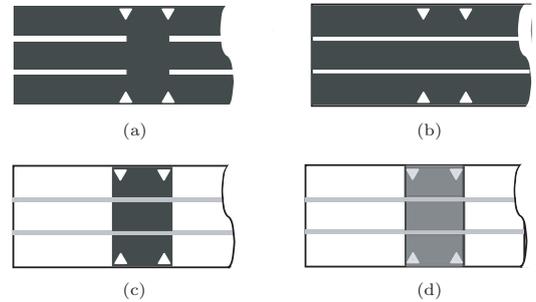


图9 复合波导制备工艺步骤 (a) 第一次离子交换; (b) 第二次离子交换; (c) 去除两侧Al膜; (d) 淀积As₂S₈薄膜

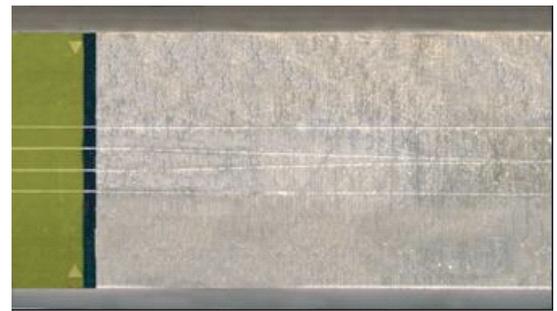


图10 试制样品的局部显微照片

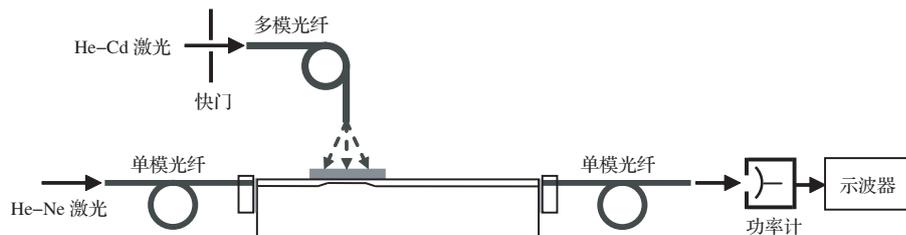


图11 光阻断实验结构

光阻断效应表现为632.8 nm导模传输在441.6 nm He-Cd激光照射处被截断,撤除441.6 nm辐照,632.8 nm导模恢复传输.动力学过程可以解释为短波长带隙光运输的浅能级极化子自陷电子构成对长波长信号光子的吸收,对长波长信号光的吸收程度与抽运到隙内自陷能级的电子浓度成比例,因此632.8 nm信号光的截断深度与441.6 nm带隙光的光子数量有关^[21].图12是复合波导光阻断效应的

测试结果,纵坐标是632.8 nm信号光的传输功率,图12(a)采用14 mW He-Cd激光抽运,隙内自陷电子浓度达到饱和,632.8 nm信号光的传输被深度截断.图12(b)是采用6.5 mW He-Cd激光的光阻断测试结果,He-Cd激光开闭三次,开通持续时间是20 ms,关闭持续时间是105 ms.开通期间发生隙内自陷电子的积累,由于调低了抽运光功率,光子抽运效率下降,隙内自陷电子浓度不能在20 ms

内达到饱和, 表现为 632.8 nm 信号光的传输不能被深度截断. He-Cd 激光关闭期间, 发生隙内自陷电子的泄放, 泄放的实质是受激电子的复合, 包含两个过程机理, 一个是隙内自陷电子经 632.8 nm 信号光光子抽运后复合, 另一个是室温环境中的自发复合^[24]. 复合过程表现为 632.8 nm 信号光传输功率的逐渐回复, 图 12 (b) 的曲线显示, 历经 105 ms 后的 632.8 nm 信号光的传输功率还不能回复到初始值, 表明复合是一个复杂过程, 动力学过程分析指出, 复合期间伴有部分受激电子被隙内亚稳能级屡次俘获的过程^[26].

光阻断脉冲耦合效应的实验结构如图 13 所示, 632.8 nm He-Ne 激光经非对称光纤分路器后按 A:B≈2:8 功分, 两支非等分相干光波分别激励两

支波导的导模, 在 Y 分支波导处发生相干光波的分支耦合, 导波光经输出光纤送入光功率计, 用示波器记录显示. 一支光纤局部通过可调恒温器, 用以调节两支相干光的位相差维持在 π 的奇数倍. 一支直波导的复合波导区域用挡板遮蔽, 带隙光是功率为 5 mW 的 441.6 nm He-Cd 激光, 经多模光纤耦合引导, 从样品表面辐照 As₂S₈ 薄膜, 光束照射半径约为 2 mm, 辐照脉冲程序用快门开关控制. 图 13 中的电路处理系统用以得到耦合脉冲的同步发放, 阈值判别的结果决定是否允许触发器工作, 触发器处于工作状态时, 遵循降沿触开、升沿触闭的规则, 电脉冲串的脉宽是 10 ms, 脉冲周期是 200 ms.

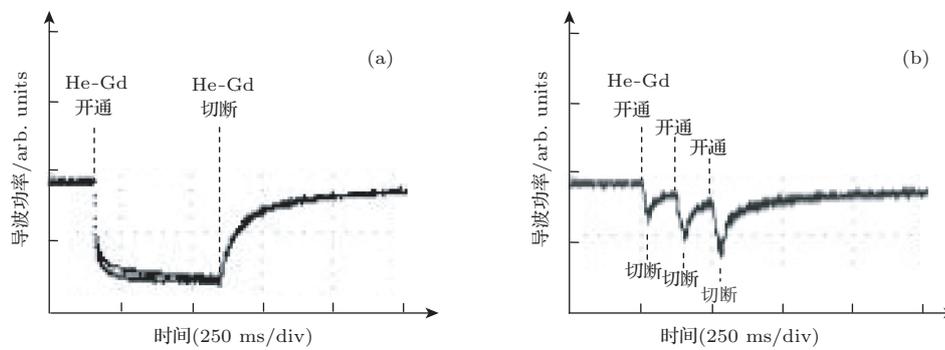


图 12 光阻断实验结果 (a) 饱和阻断; (b) 非饱和阻断

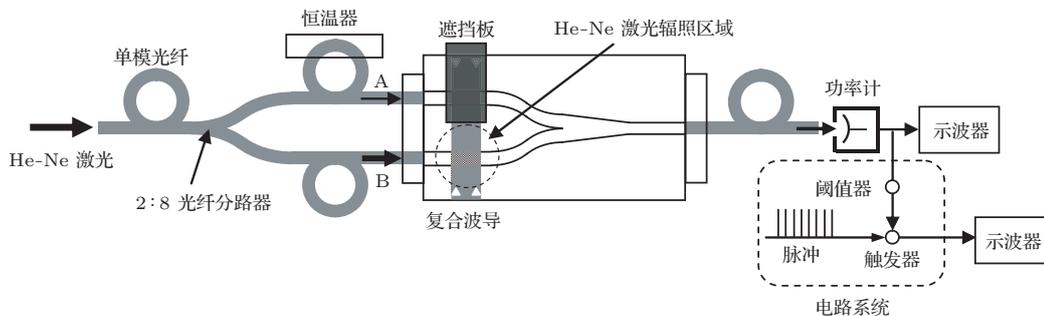


图 13 光阻断脉冲耦合效应实验结构

632.8 nm 导波光的输出示于图 14 (a), He-Gd 激光辐照脉冲的开通宽度是 110 ms, 遮断宽度是 90 ms. He-Gd 激光辐照开通期间, 由于复合波导的非饱和光阻断效应, B 光的传输功率下降, A 光和 B 光的光功率差异缩小, A 光和 B 光经分支波导模式耦合后, 输出功率进一步下降. He-Gd 激光辐照遮断期间, B 光的传输功率逐步回复, A 光和 B 光的光功率差异逐渐增大, 分支波导模式耦合效率

提高, 输出功率回升. 伴随 He-Cd 激光辐照脉冲作用下的非饱和光阻断效应, 复合波导中的极化子自陷态电子的浓度在泄漏背景下逐步累积, 显示了自陷电子浓度具备脉冲式累积的特点, 结果使得图 14 (a) 的锯齿型曲线显示递减趋势. 一旦 B 光的传输功率降至与 A 光的接近时, 输出端几乎是发散的辐射模, 锯齿型曲线显现平坦趋势. 图 14 (b) 显示了耦合脉冲的同步发放, 用于阈值判别的时延是

15 ms, 阈值调节在略高于图 14(a) 显示的暗线, 分支波导输出功率的谷值一旦低于阈值线, 触发开关停止工作, 耦合脉冲不再响应 He-Gd 激光辐照脉冲的举动, 同步发放停止. 显然, 耦合脉冲同步发放的持续时间与 A 光功率的相对大小成反比, A 光在这里发挥调节阈值的作用. 非饱和光阻断的实验表明, 光传输阻断和回复的过程响应还受带隙光

和传输光的光子密度比例的影响^[18], He-Cd 辐照光强、He-Ne 传输光强、A 光和 B 光的光强比例、以及控制 He-Cd 辐照开关的脉冲参数等都可以改变非饱和光阻断曲线的走势, 这个特点为 PCNN 的非线性作用机理的多样性表现以及混沌作用机理的相关研究提供了可能, 有关这方面的实验正在进行中, 待结果后另文报告.

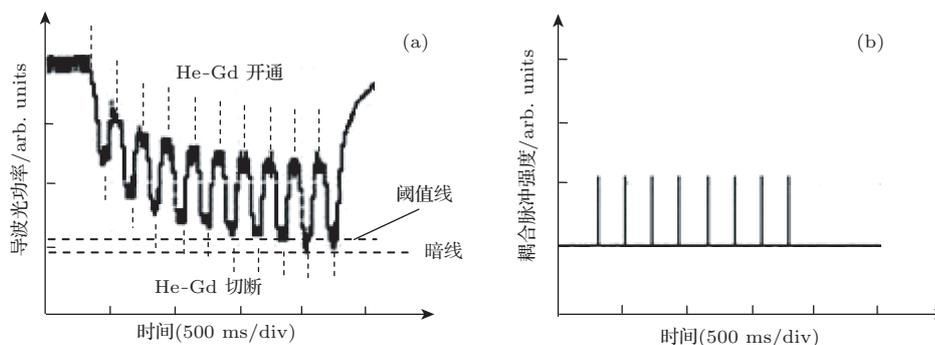


图 14 光阻断脉冲耦合效应实验结果 (a) 导波光的输出; (b) 耦合脉冲同步发放

4 结 论

泄漏背景下的脉冲式响应累积及其阈值限制下的耦合脉冲同步发放, 是脉冲耦合动力学过程的基本特征. 本器件采用 As_2S_8 -B270 玻璃复合波导的非饱和光阻断效应实现对输入脉冲信号的耦合响应, 利用光学反相非对称输入的波导分支模式耦合效应提供阈值限制, 采用降沿触开/升沿触闭电路实现耦合脉冲同步发放. 通过将光阻断效应表现的光粒子性和分支波导模式耦合表现的光波动性的有机结合, 用全光学方法实现了输入电脉冲与输出电脉冲之间的脉冲耦合基本过程.

参考文献

- [1] Eckhorn R, Reitboeck H J, Arndt M, Dicke P 1990 *Neural Computation* **2** 293
- [2] Johnson J L, Padgett H J, Arddt M 1999 *IEEE Trans. on Neural Networks* **10** 480
- [3] Izhikevich E M 1999 *IEEE Transactions on Neural Networks* **10** 499
- [4] Gray C M, Konig P, Engel A K, Singer W O 1989 *Nature* **3** 334
- [5] Rybak I A, Shevtsova N A, Podladchikova L N, Golovan A V 1991 *Neural Networks* **4** 3
- [6] Rybak I A, Shevtsova N A, Sandier V M 1992 *Neuro-computing* **4** 93
- [7] Johnson J L, Padgett M L, Omidvar O 1999 *IEEE Transactions on Neural Networks* **10** 461
- [8] Johnson J L, Padgett M L 1999 *IEEE Transactions on Neural Networks* **10** 480
- [9] Wang Z B, Ma Y D, Cheng F Y, Yang L Z 2010 *Image and Vision Computing* **28** 5
- [10] Ota Y, Wilamowski B M 1999 *IEEE Transactions on Neural Networks* **10** 539
- [11] Ota Y 2002 *Proc. of the 28th Annual Conference of Industrial Electronics Society* Sevilla, Spain, Nov. 5-8, 2002 p3221
- [12] Schafer M, Hartmann G 1999 *Proc. of the Seventh International Conference on Microelectronics for Neural, Fuzzy and Bio-Inspired Systems* Granada, Spain, 9 April, 1999 p316
- [13] Pineda J V, Murguia M C, Cisneros R C 2006 *Proc. of International Joint Conference on Neural Networks* Vancouver, BC, July 16-21, 2006 p4051
- [14] Takahashi Y, Nakano H, Saito T 2004 *IEEE Transactions on Circuits and Systems—II: Express Briefs* **51** 468
- [15] Wang R B, Yeh P C, Chang H C, Yi X M, Zhao J H 1999 *Proc. SPIE* **3715** 46
- [16] Clark N, Banish M, Ranganath H S 1999 *IEEE Transactions on Neural Networks* **10** 599
- [17] Zou L E, Chen B X, Chen L, Yuan Y F, Hamanaka H, Iso M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1868 (in Chinese)[邹林儿, 陈抱雪, 陈林, 袁一方, 浜中广见, 矶守 2006 物理学报 **55** 1868]
- [18] Chen Y G, Wang Y H, Zhang Y, Liu S T 2007 *Chinese Physics* **16** 1315
- [19] Wang G D, Chen B X, Hamanaka H, Iso M 2012 *Journal of Optoelectronics-Laser* **23** 1494 (in Chinese)[王关德, 陈抱雪, 浜中广见, 矶守 2012 光电子·激光 **23** 1494]

- [20] Zou L E, Chen B X, Chen L, Yuan Y F, Hamanaka H, Iso M 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 153510
- [21] Wang G D, Chen B X, Wang P, Sui G R, Zou L E, Hamanaka H, Iso M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 074224 (in Chinese)[王关德, 陈抱雪, 王平, 隋国荣, 邹林儿, 浜中广见, 矶守 2011 物理学报 **60** 074224]
- [22] Shao G W, Jin G L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1096
- [23] Sun B, Chen B X, Sui G R, Wang G D, Zou L E, Iso M, Hamanaka H 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 094501
- [24] Zou R L, Chen B X, Wang H H 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 3439
- [25] Sui G R, Chen B X, Zhang X W, Zhou J Z, Fu C S, Iso M 2007 *Appl. Opt.* **46** 7452
- [26] Du L P, Chen B X, Sun B, Chen Z, Zou L E, Hamanaka H, Iso M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3593 (in Chinese)[杜丽萍, 陈抱雪, 孙蓓, 陈直, 邹林儿, 浜中广见, 矶守 2008 物理学报 **57** 3593]

Study on pulse coupler of optical waveguide*

Zhou Jian-Zhong¹⁾²⁾ Chen Bao-Xue^{1)3)4)†} Li Jia-Wei¹⁾
Wang Guan-De¹⁾ Hiromi Hamanaka⁵⁾

1) (School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

2) (Shanghai Electric Cable Research Institute, Shanghai 200093, China)

3) (Engineering research center of optical instruments and systems, Ministry of Education, Shanghai 200093, China)

4) (Shanghai key laboratory of modern optical system, Shanghai 200093, China)

5) (Faculty of Engineering, Hosei University, Tokyo 184-8584, Japan)

(Received 19 August 2013; revised manuscript received 13 September 2013)

Abstract

A new pulse-coupled device composed of optical waveguide is presented. Its operating mechanism is discussed based on experimental results. Particle nature of light in optical stopping and wave nature of light in mode coupling of branch waveguide are combined in the device operating, then the optical pulse-coupled dynamics between input electrical pulses and synchronous output electrical pulses is realized.

Keywords: optical waveguide technique, pulsed-coupled neural network, chalcogenide glass, optical stopping effect

PACS: 42.82.Bq, 42.82.Et

DOI: 10.7498/aps.63.014211

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61077042, 60677032), and the Shanghai Leading Academic Discipline Project (Grant No. S30502).

† Corresponding author. E-mail: bxchen55@live.cn