

基于光纤四波混频波长转换和色散的慢光实验研究*

尹经禅[†] 肖晓晨 杨昌喜

(清华大学精密仪器与机械学系,精密测试技术与仪器国家重点实验室,北京 100084)

(2009 年 8 月 24 日收到;2009 年 11 月 25 日收到修改稿)

对基于光纤四波混频(FWM)波长转换和色散的慢光实现进行了详细和系统的实验研究.首先,实验测定了高非线性光纤中 FWM 带宽约为 40 nm,从而确定了慢光的可调谐带宽;接着,在普通单模光纤和色散补偿光纤(DCF)中针对 500 MHz 正弦信号和 100 ps 短脉冲信号分别实现了 3.4 和 1.98 ns 的脉冲延迟,在 DCF 中还实现了 2.09 ns 的脉冲提前.讨论了增大延迟量的方法,指出随着宽带 FWM 波长转换的实现和大色散光纤的应用有望获得微秒量级的大延迟量,从而为高性能光纤延迟线和全光缓存器等应用提供支持.

关键词: 慢光, 四波混频, 色散

PACC: 4265M, 4281D

1. 引 言

慢光技术是解决光网络中信号路由这一瓶颈的关键技术,对未来高速率大容量全光通信网络的美好憧憬已经成为目前全世界科学界的研究热点^[1-12],科学家已经提出基于电磁诱导透明^[1]、相干粒子振荡^[2,3]、受激布里渊散射^[4-6]、受激拉曼散射^[7]、光参量放大^[8]等多套慢光解决方案.其中人们提出了结合四波混频(FWM)波长转换和色散实现慢光的技术^[9-12],此技术具有如下优点:(1)可以产生大范围连续可调的延时量;(2)同时适用于皮秒量级的短脉冲信号和纳秒量级的长脉冲信号;(3)输出脉冲信号保持了输入脉冲信号的带宽,同时还保留了输入脉冲信号的相位信息.本文对基于 FWM 波长转换和色散的慢光进行了实验研究,利用具有负色散的普通单模光纤(SMF)对 500 MHz 的单频正弦信号在 FWM 波长转换后进行延迟得到 3.4 ns 的延迟量,利用具有正色散的色散补偿光纤(DCF)对 100 ps 宽度的宽带窄脉冲在 FWM 波长转换后进行延迟得到 1.98 ns 的延迟量.利用 FWM 和 DCF 还可方便地实现信号脉冲的提前,实验中实现了 2.09 ns 的脉冲提前.随着 FWM 带宽的增大和大色散光纤的应用可望实现微秒量级的延迟量.

2. FWM 带宽测量

为利用 FWM 实现信号波长的转换从而在大色散介质中实现慢光,首先必须关注的一个重要参量是 FWM 带宽.这决定了可以实现信号波长转换的范围,从而在色散参量一定的情况下进一步决定了可以实现慢光延迟量的范围,延迟量范围是全光通信中全光延迟线或全光缓存器的一个关键性能指标.首先测定高非线性光纤(HNLF)的 FWM 带宽,其实验装置如图 1 所示.连续抽运光经过掺铒光纤放大器(EDFA)进行功率放大,再经过偏振控制器后与信号光由 3 dB 耦合器一同输入 HNLF,在 HNLF 中它们发生 FWM 产生闲频光,亦即慢光实验中的波长转换光.新产生的闲频光、抽运光和信号光在 HNLF 末端由光谱仪进行监测.此测量中抽运光由一台经过相干控制的 ECL-210 型连续窄带激光器输出,参与 FWM 的抽运功率稳定于 20 mW,其中心波长分别位于 1535, 1543, 1550 nm 处,其中 1543 nm 是 HNLF 的零色散波长(ZDW),根据 FWM 理论中的相位匹配原则在 ZDW 处应该有最大的 FWM 带宽.在 HNLF 的 FWM 带宽测量中信号光由另一台 Agilent 8164A 型连续激光器输出,参与 FWM 的信号功率稳定于 0.6 mW,但其波长可在 1520—1620 nm 间调谐,所用的 HNLF 长为 1 km,非

* 国家自然科学基金(批准号:60878007)资助的课题.

[†] E-mail: yinjc04@mails.tsinghua.edu.cn

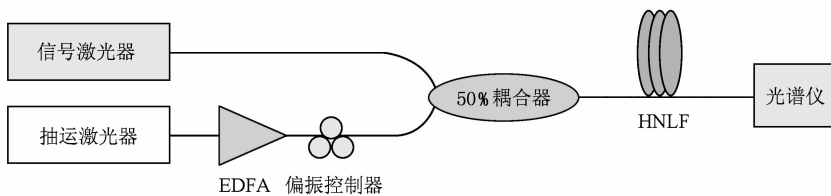


图1 HNLF 中 FWM 带宽测量实验装置示意图

线性系数为 $10 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$.

HNLF 的 FWM 带宽测量结果如图 2 所示. 通过比较抽运波长分别在 1535, 1543, 1550 nm 三处的 FWM 情况发现, 当处于 HNLF 的 ZDW 为 1543 nm 时, FWM 带宽最大, 3 dB 带宽为 40 nm, FWM 转换效率也相对较高, 因为 FWM 在 ZDW 处的相位匹配条件得到很好满足. 当抽运光中心波长偏离 ZDW 时, 由于存在越来越大的相位失配, 使 FWM 带宽减小的同时波长转换效率降低, 如图 2 抽运光波长在 1535 和 1550 nm 时的 3 dB 带宽都仅为 10 nm 左右, 这会使得利用 FWM 和色散实现慢光的延迟线或全光

缓存器的性能受到很大限制.

3. 慢光实验装置

在已测定 HNLF 的 FWM 带宽的前提下, 可以利用 FWM 和色散实现慢光, 慢光实验装置如图 3 所示. 信号脉冲光中心波长调到 HNLF 的 ZDW (1543 nm) 处, 以便在其放大作为抽运光后能实现宽带的波长转换进而实现慢光延迟的大范围可调. 抽运光和信号光经 3 dB 耦合器输入 HNLF 实现 FWM, 然后用 Santec 公司生产的 OTF-930 型可调谐滤波器滤出波长转换光 (闲频光), 实现波长转换的信号脉冲通过色散介质 (如 DCF 或 SMF), 最后用 THORLABS 公司生产的 D400FC 型光电探测器探测并将脉冲波形输入 Agilent DSO80204B 型示波器进行观测. 实验中利用原电信号脉冲作为示波器的外触发信号. 当不进行 FWM 直接让信号脉冲光通过整个光路时, 在示波器上会得到一个波形, 取此波形作为不存在延迟时的参考波形. 当进行了 FWM 将信号脉冲光实现了波长转换时, 示波器上的波形相对参考波形会有延迟 (或提前), 从而实现了慢光 (或快光), 延迟量的大小通过改变转换的波长进行调节.

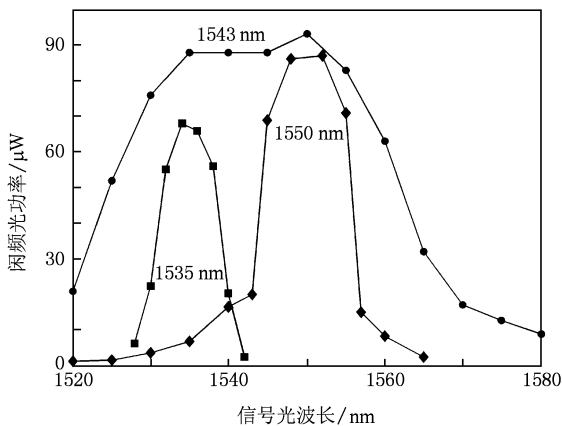


图2 FWM 实验所得带宽

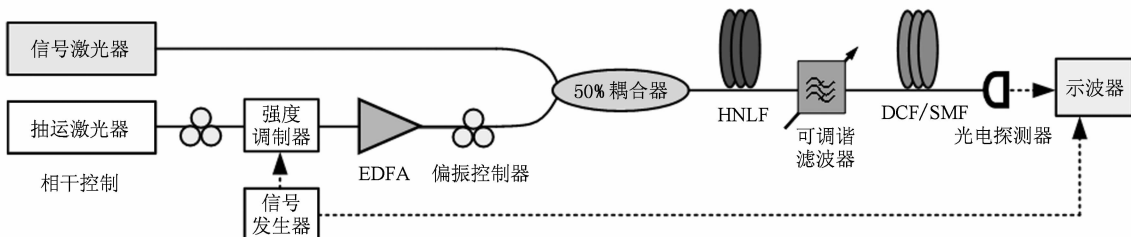


图3 慢光实验装置示意图

本实验在波长转换脉冲光通过色散介质后理应再进行一次波长转换从而实现针对信号脉冲光的波长还原, 但基于实验条件限制没有进行最后的波长还原, 但这对说明基于 FWM 波长转换和色散实现慢光没有太大影响. 我们先后进行了两组实

验, 第一组实验利用 500 MHz 的正弦信号来调制产生信号脉冲光的同时色散介质采用 10 km 色散为 190 ps/nm 的 SMF, 第二组实验利用宽度为 100 ps 的脉冲信号来调制产生信号脉冲光的同时色散介质采用 -127 ps/nm 的 DCF 模块.

4. 慢光实验结果及分析

在第一组慢光实验中,500 MHz 的正弦信号如

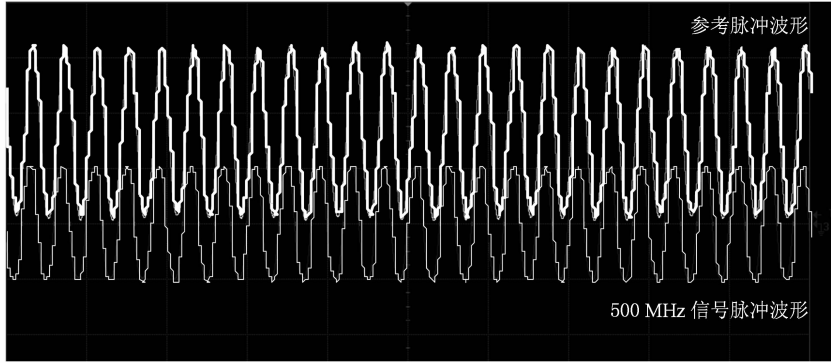


图 4 信号脉冲和参考脉冲的波形

当对信号脉冲光实行波长转换时,就会产生波长转换光(FWM 中的闲频光).图 5 中上方的谱线表示 HNLf 前没发生 FWM 时的光谱,最高的谱峰是 FWM 的抽运光(1543 nm),信号脉冲调制于其上,较低的谱峰即是 FWM 中的信号光(1550 nm).发生 FWM 后 HNLf 末端的光谱如图 5 中下方的谱线所示,在 1536 nm 处产生了波长转换光并保存了作为抽运光的信号脉冲信息,只是中心波长随信号光的变化而相对原信号脉冲抽运光发生了变化,从而在 SMF 中导致不同的延迟.图 5 中两条谱线的整体移动是由 HNLf 的本身损耗所引起.

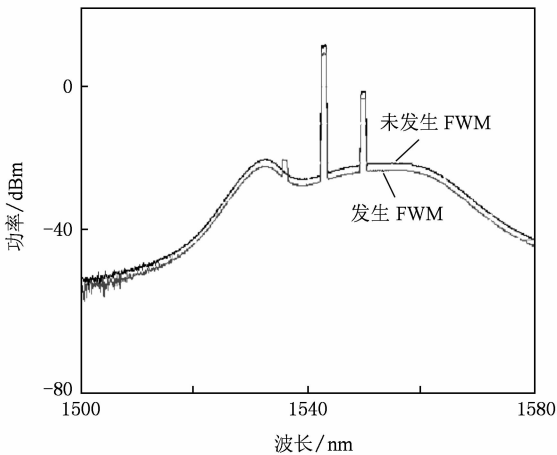


图 5 HNLf 前后的光谱 上方的谱线表示 HNLf 前没发生 FWM 时的光谱,下方的谱线表示 HNLf 后发生 FWM 时的光谱

连续改变 FWM 中信号光的波长以实现不同波长处的波长转换,从而实现不同程度的延迟.图 6 给

出了 1543 nm 的零延迟参考脉冲,同时还给出了 1545,1550,1555,1560 nm 处波长转换光的延迟脉冲,通过与参考脉冲的对比能看出明显的脉冲延迟.

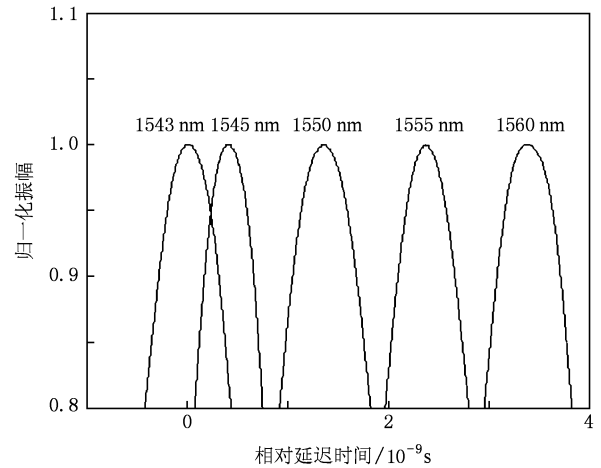


图 6 SMF 中信号脉冲延迟波形

图 6 中各脉冲延迟时间与波长的关系如图 7 所示.图 7 中的数据点为实验测量得到的延迟量,实线是相应实验值的线性拟合.对于 SMF,拟合线的斜率为 200 ps/nm,与光纤的标称色散值(190 ps/nm)符合很好.色散值为正表示波长处于 SMF 的反常色散区,这与后面使用 DCF 时得到负的色散值恰好相反,因为使用 DCF 时波长处于正常色散区.同时,由 SMF 中的延迟关系可以看出延迟量与转换的波长呈现出很好的线性关系,这表明波长变化越大延迟量也越大.

延迟量 τ 与光纤色散系数 D 、光纤长度 L 以及信号波长变化量 $\Delta\lambda$ 的关系如下:

$$\tau = DL\Delta\lambda, \quad (1)$$

其中 DL 表示长度为 L 的光纤色散量. 由(1)式可知: 当光纤的色散系数一定时, 延迟量 τ 与波长变化量 $\Delta\lambda$ 呈线性关系; 当波长变化量 $\Delta\lambda$ 一定时, 延迟量 τ 与光纤色散系数 D 呈线性关系, 因而光纤色散系数 D 越大延迟量 τ 也越大.

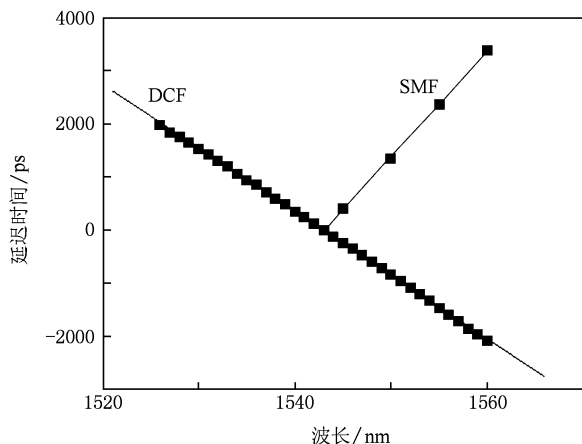


图7 DCF 和 SMF 中慢光延迟量与波长的关系 实线为实验测量值的拟合直线

在第二组慢光实验中, 所用的信号脉冲如图 8 所示, 其脉冲宽度为 100 ps, 脉冲周期为 800 ps. 由于信号脉冲太短, EDFA 对这样窄的信号脉冲光的放大功率有限, 导致 FWM 中的抽运功率较弱, 从而 FWM 后得到的波长转换光的功率也很小, 经过滤波通过 DCF 后其功率更小. 实验中, 我们在 DCF 后又进行了一次功率放大, 同时利用滤波器滤除放大器的放大自发辐射噪声, 然后再探测波长转换光的波形.

实验得到 DCF 中实现慢光的部分延迟脉冲波形如图 9 所示. 由于 FWM 中因抽运功率低而导致波长转换效率低, 同时由于经过多次 EDFA 放大积累了较大的噪声, 使得探测到的延迟脉冲波形上叠加有较大的噪声, 与原信号脉冲波形相比有较大变化(如图 9 中脉冲波形的毛刺), 但这对观察脉冲的延迟量影响不是很大. 我们绘出了信号光波长为 1556, 1557, 1558, 1559 和 1560 nm (相应转换光的波长分别为 1530, 1529, 1528, 1527 和 1526 nm) 对应的波长转换脉冲的轮廓, 如图 9 中的粗实线所示. 由此可以看出, 随着信号光波长的不断改变, 相应波长转换脉冲就有不同的延迟, 延迟量与波长变化几

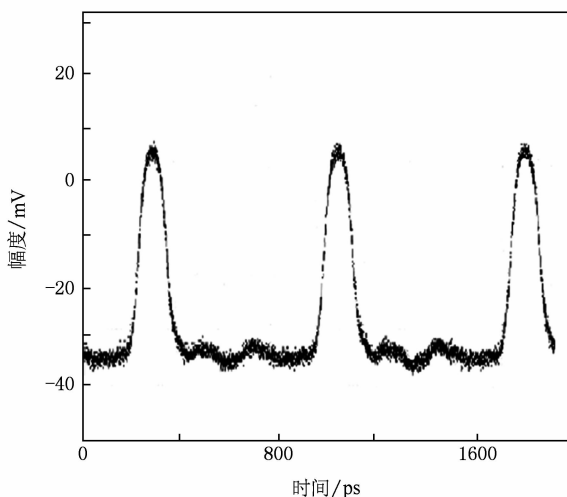


图8 输入脉冲波形

乎呈线性关系(图 7). 从图 7 可以看出, DCF 中延迟量拟合直线的斜率为 -120 ps/nm , 与 DCF 模块的标称色散值 -127 ps/nm 符合很好. 由 DCF 的延迟量拟合直线可以看出, 通过改变信号脉冲光的波长能够实现慢光或快光, 这比其他方法调节延迟量更加方便灵活.

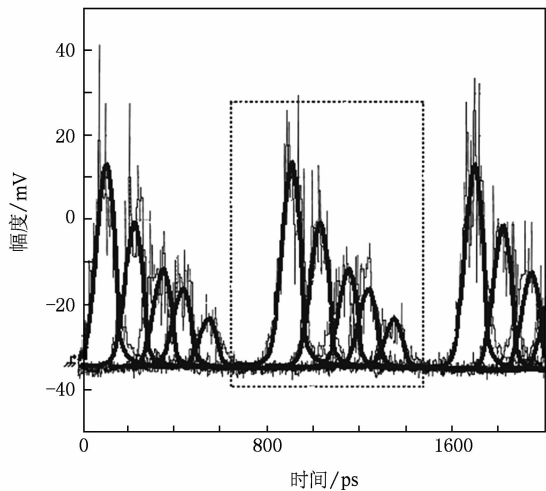


图9 DCF 中信号脉冲延迟波形

图 9 中不同波长对应延迟脉冲的幅度不一样, 随着波长转换光波长的减小 (FWM 信号光波长的增大), 延迟量增大的同时脉冲幅度也急剧变小, 这是因为此时的波长转换光已经处于 FWM 带宽的边缘使 FWM 效率骤减的缘故. 为了实现大延迟量慢光的同时保证被延迟的脉冲幅度不会有大的波动, 需要有宽带宽且带内平坦的 FWM 过程, 这可以通过现在性能优异的光子晶体光纤^[13-15]来实现此

种 FWM.

目前,已有研究表明可实现 500 nm 的宽带 FWM^[16]. 按照(1)式,若采用色散参量为 200 ps/(nm·km)的 DCF,DCF 长度若取 20 km,则有可能实现高达 2 μs 的慢光延迟量,这将大大扩展可调谐延时范围.但是,DCF 不能取得太长,DCF 过长会带来很大的损耗,同时还会造成很大的信号脉冲展宽.慢光延时中脉冲展宽问题可以通过再次的 FWM 相位共轭进行补偿,同时保持原有信号的波长.微秒量级的慢光延时有望在进一步的实验中实现.

5. 结 论

本文对基于 FWM 波长转换和色散的慢光实现进行了详细的实验研究.实验测得 HNLF 中 FWM

带宽为 40 nm,利用此相对较大的 FWM 带宽进行信号脉冲的波长转换,分别采用 SMF 和 DCF 两种色散介质针对 500 MHz 正弦信号和 100 ps 的脉冲信号进行了基于 FWM 波长转换的慢光实验和分析.在 SMF 中,当信号波长从 1543 nm 变化到 1560 nm 时得到了 3.4 ns 的延迟;在 DCF 中,当信号波长从 1543 nm 变化到 1526 nm 时得到了 1.98 ns 的延迟,而当信号波长从 1543 nm 变化到 1560 nm 时得到 2.09 ns 的时间提前.随着宽带 FWM 波长转换的实现和大色散光纤的应用有望获得微秒量级的大延迟量,从而为高性能光纤延迟线和全光缓存器等应用提供支持.

感谢清华大学电子工程系姚敏玉教授为本文研究工作提供实验上的帮助.

-
- [1] Hau L V, Harris S E, Dutton Z, Behroozi C H 1999 *Nature* **397** 594
- [2] Bigelow M S, Lepeshkin N N, Boyd R W 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 113903
- [3] Bigelow M S, Lepeshkin N N, Boyd R W 2003 *Science* **301** 200
- [4] Song K Y, Herraez M G, Thevenaz L 2005 *Opt. Express* **13** 82
- [5] Okawachi Y, Bigelow M S, Sharping J E, Zhu Z M, Schweinsberg A, Gauthier D J, Boyd R W, Gaeta A L 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 153902
- [6] Song K Y, Hotate K 2007 *Opt. Lett.* **32** 217
- [7] Sharping J E, Okwachi Y, Gaeta A L 2005 *Opt. Express* **13** 6092
- [8] Dahan D, Eisenstein G 2005 *Opt. Express* **13** 6234
- [9] Alic N, Windmiller J R, Coles J D, Radic S 2008 *J. Select. Top. Quantum Electron.* **14** 681
- [10] Wang Y, Yu C Y, Yan L S, Willner A E, Roussev R, Langrock C, Fejer M M, Sharping J E, Gaeta A L 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 861
- [11] Sharping J E, Okawachi Y, Van H J, Xu C, Wang Y, Willner A E, Gaeta A L 2005 *Opt. Express* **13** 7872
- [12] Fazal I, Yilmaz O, Nuccio S, Zhang B, Willner A E, Langrock C, Fejer M M 2007 *Opt. Express* **15** 10492
- [13] Wei D B, Zhou G Y, Zhao X T, Yuan J H, Meng J, Wang H Y, Hou L T 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3011 (in Chinese) [魏东宾、周桂耀、赵兴涛、苑金辉、孟佳、王海云、侯蓝田 2008 物理学报 **57** 3011]
- [14] Zhang D S, Dong X Y, Zhang W G, Wang Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1235 (in Chinese) [张德生、董孝义、张伟刚、王志 2005 物理学报 **54** 1235]
- [15] Liu X Y, Zhang F D, Zhang M, Ye P D 2007 *Chin. Phys.* **16** 1710
- [16] Okawachi Y, Foster M A, Chen X P, Turner-Foster A C, Salem R, Lipson M, Xu C, Gaeta A L 2008 *Opt. Express* **16** 10349

Experimental study of slow light based on four-wave mixing wavelength conversion and dispersion in optical fibers^{*}

Yin Jing-Chan[†] Xiao Xiao-Sheng Yang Chang-Xi

(*State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

(Received 24 August 2009; revised manuscript received 25 November 2009)

Abstract

Slow light based on four-wave mixing (FWM) wavelength conversion and dispersion is experimentally studied. The FWM bandwidth of the highly nonlinear fiber is measured to be 40 nm, which is also the slow light tunable bandwidth. A 3.4 ns delay of 500 MHz sine signal is achieved in standard single mode fiber, and 1.98 ns delay of short pulses with 100 ps width is achieved in dispersion compensation fiber (DCF). An advancement of 2.09 ns for the 100 ps short pulses is also achieved in the DCF. The method to increase the slow light delay is discussed, and large delay up to microseconds is expected when wideband FWM wavelength conversion and large dispersion fibers are used. The expected large delay will help us realize high efficiency fiber delay lines and all-fiber buffers.

Keywords: slow light, four-wave mixing, dispersion

PACC: 4265M, 4281D

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60878007).

[†] E-mail: yinjc04@mails.tsinghua.edu.cn