

选用新介质的双池受激布里渊散射系统的研究^{*}

哈斯乌力吉 吕志伟[†] 李 强 巴德欣 何伟明

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

(2006 年 5 月 15 日收到, 2006 年 7 月 12 日收到修改稿)

从介质化学结构与吸收系数的关系入手, 寻找出系列吸收系数小, 适合作为放大池介质的新介质, 例如四氯乙烯(C_2Cl_4), 1,3-六氯丁二烯(C_4Cl_6)和六氟化苯(C_6F_6)等, 并计算或测量了入射光波长为 $1.064 \mu m$ 时的新介质受激布里渊散射(SBS)参数. 在双池 SBS 系统的放大池中分别选用 C_2Cl_4 和 C_4Cl_6 , 振荡池中均选用光学击穿阈值高, 并且布里渊频移与 C_2Cl_4 和 C_4Cl_6 的布里渊频移非常接近的乙醇(C_2H_5OH), 并利用 Nd:YAG 调 Q 激光器研究了该系统的性能. 实验结果表明, 该系统具有高负载能力, 高相位共轭保真度和高能量反射率稳定度等性能.

关键词: 受激布里渊散射, 双池 SBS 系统, 新介质

PACC: 4265C, 4265F

1. 引 言

受激布里渊散射(SBS)相位共轭镜有多种结构, 例如聚焦单池系统、紧凑双池系统和独立双池系统等. 除了聚焦单池以外, 其他结构均属于振-放双池系统, 由振荡池和放大池两部分组成. 振荡池中产生的 Stokes 种子光进入放大池, 与抽运光作用, 产生强的放大, Stokes 脉冲宽度变窄, 能量转换效率提高. 以往人们在振荡池和放大池中使用同一种介质, 其目的是为了确保 Stokes 种子和抽运光的频率差异恰为介质的布里渊频移, 从而使抽运光和 Stokes 种子光在放大池中相互作用能够驱动声子场. 但是, 当振荡池和放大池中使用同一种介质时, 由于介质吸收系数和光学击穿阈值等参数的限制, 将会降低系统的负载能力、相位共轭保真度和稳定度等性能. 这是因为, 首先现有大部分介质的吸收系数过大, 不适合作为放大池介质; 其次虽然少数几种介质的吸收系数较小, 但是光学击穿阈值过低, 不适合作为振荡池的介质. 因此, 当放大池和振荡池选用同一种介质时, 无法同时满足放大池和振荡池的需求. 为了解决该问题, 文献[1]研究了放大池和振荡池中选用布里渊频移接近的不同介质的方案, 从而一定程度上提高了双池 SBS 系统的性能. 但是, 这种选用不同介质

的双池 SBS 系统的进一步研究和应用也受到了一定的限制, 这是因为目前常用介质当中吸收系数小, 适合作为放大池介质的介质较少的缘故.

为了解决该问题, 本文从介质化学结构与吸收系数的关系入手, 寻找出了吸收系数小, 适合作为放大池介质的新介质, 例如四氯乙烯(C_2Cl_4)、六氯丁二烯(C_4Cl_6)和六氟化苯(C_6F_6)等. 放大池中分别选用 C_2Cl_4 和 C_4Cl_6 , 振荡池中均选用了布里渊频移与 C_2Cl_4 和 C_4Cl_6 的布里渊频移非常接近, 并且光学击穿阈值特别高的乙醇(C_2H_5OH), 利用 Nd:YAG 调 Q 激光器研究了双池 SBS 系统的性能. 实验结果表明, 该系统的负载能力大于 100 GW/cm^2 , 相位共轭保真度大于 90%, 能量反射率稳定度小于 3%.

2. 理论分析

2.1. 新介质的寻找

介质对光的吸收具有选择性, 即当光通过介质时, 具有某种能量的光子被吸收, 而另一种能量的光子不被吸收. 光子是否被介质所吸收, 既决定于物质的内部结构, 也决定于光子的能量^[2]. 分子在红外光谱区内的吸收产生于分子振动或转动的状态变化或者分子振动或转动状态在不同能级间的跃迁^[3].

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10476009, 60478020), 中国博士后科学基金(批准号: 20060390795)和哈尔滨工业大学优秀团体支持计划资助的课题.

[†] E-mail: zw_lu@sohu.com

对不同的介质来说,组成分子的原子以及原子间的化学键不同,因此吸收系数也不同.介质对近红外区的吸收主要是 $x-H$ (x 代表是 C, N, O, S, P) 的倍频(对应于分子振动状态在相隔一个或几个振动能级之间的跃迁),合音频(对应于分子两种振动状态的能级同时发生跃迁)的吸收^[4].因此,含有以上化学键的介质吸收系数都比较大,例如丙酮、苯、甲苯、硝基苯、正己烷、环己烷、甲醇和水等;反之,不含有以上化学键的介质吸收系数都比较小,例如 CCl_4 , CS_2 和 C_6F_{14} 等.根据以上介质化学结构与吸收系数的关系,寻找出了吸收系数小、化学稳定好、适合作为放大池介质的 C_2Cl_4 , C_4Cl_6 和 C_6F_6 等新介质^[5].表 1 列出了当入射光波长为 $1.064 \mu m$ 时的新介质 SBS 参数,其中声子寿命、增益系数、布里渊线宽和布里渊频移是根据文献 [6] 的公式计算而得的,计算时需要的其他相关参数摘自文献 [7, 8].吸收系数和光学击穿阈值(OBT)定义为介质内可见闪光或火花出现的概率 50% 时的抽运光功率密度)是直接测定.

为了降低介质所含杂质悬浮颗粒的影响,对表 1 中的所有介质均用滤膜孔径为 $0.22 \mu m$ 的溶剂过滤器进行了净化^[9],之后测定了其吸收系数和光学击穿阈值等值.由于抽运光能量达到激光器的最高值 $50 mJ$ 时, C_2H_5OH 无明显的光学击穿现象,因此可预计其光学击穿阈值在 $100 GW/cm^2$ 以上.

表 1 液体介质的 SBS 参数

	α / cm^{-1}	ν / MHz	Γ / MHz	g (cm/GW)	τ / ns	OBT (GW/cm^2)
C_2Cl_4	0.003	3016	376	6.1	0.42	20
C_4Cl_6	0.003	3032	649	4.9	0.25	18
C_6F_6	0.002	2323	456	2.8	0.35	30
C_2H_5OH	0.119	3019	354	4.5	0.45	> 100

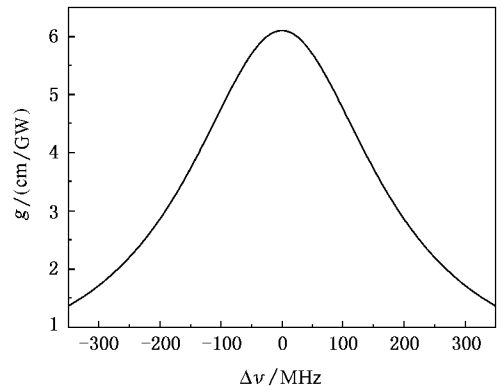
2.2. 布里渊频移的偏离对增益系数的影响

文献 [1] 理论分析和实验结果表明,布里渊频移接近的不同介质相互具有放大作用,这是因为每种介质的布里渊线宽都有一定的宽度,当两种介质的布里渊频移接近时,有一部分布里渊线宽相互重叠在一起,所以仍然有放大作用.放大池中需要使用吸收系数小的介质,因此可忽略吸收对增益的贡献,此时放大池介质的增益系数根据方程 (1) 算出^[10]

$$g = g^e \frac{1}{1 + (2\Delta\nu/\Gamma)^2}, \quad (1)$$

式中 g^e 为电致伸缩增益因子, $\Delta\nu$ 为布里渊频移的偏离 ($\Delta\nu = |\nu_1 - \nu_2|$, ν_1 为放大池介质的布里渊频移, ν_2 为振荡池介质的布里渊频移), Γ 为放大池介质的布里渊线宽.

从方程 (1) 可知,当 $\Delta\nu = 0$ 时, $g = g^e$; 当 $\Delta\nu \neq 0$ 时, $g < g^e$, 即只有当振荡池介质和放大池介质的布里渊频移相同时,放大池介质的增益系数最大. C_2Cl_4 的布里渊线宽为 $376 MHz$, 电致伸缩增益因子为 $6.1 cm/GW$, 根据方程 (1) 可算出 C_2Cl_4 的增益系数随布里渊频移偏离的变化关系,如图 1 所示.

图 1 C_2Cl_4 的增益系数随布里渊频移偏离的变化关系

当放大池介质为 C_2Cl_4 或 C_4Cl_6 , 振荡池介质分别为 C_2Cl_4 , C_4Cl_6 和 C_2H_5OH 时,根据方程 (1) 以及表 1 的相关参数可算出 C_2Cl_4 和 C_4Cl_6 的增益系数,列于表 2 中.由于 C_2Cl_4 和 C_4Cl_6 的布里渊频移与 C_2H_5OH 的布里渊频移非常接近,因此振荡池中产生的 Stokes 种子光在放大池中几乎能够得到最佳 ($6.09 \approx 6.1$; $4.87 \approx 4.9$) 的放大作用.

表 2 放大池介质的增益系数

放大池 \ 振荡池	C_2Cl_4	C_4Cl_6	C_2H_5OH
	C_2Cl_4	6.1	6.0
C_4Cl_6	4.8	4.9	4.87

3. 实验研究

3.1. 实验装置

实验装置如图 2 所示, Nd:YAG 调 Q 激光器由全反射镜 M_1 , 调 Q 染料片, 偏振片 P_1 , Nd:YAG 棒,

小孔光阑和部分反射镜 M_2 组成. 偏振片 P_2 和偏振片 P_1 平行, P_2 和 $1/4$ 波片组成隔离器, 防止 Stokes 后向散射放大光进入 YAG 振荡器, 振荡器输出的 p 偏振光经 $1/4$ 波片后变成圆偏振光. SBS 系统由放大池、振荡池和透镜 L_1 和 L_2 组成, 放大池(池长为 60 cm)前面放入凸透镜 L_1 ($f = 80$ cm), 其目的是对抽运光缩束以增强放大池中抽运光的强度; 抽运光被透镜 L_2 ($f = 5$ cm) 聚焦到振荡池(池长为 30 cm)中产生种子光, 产生的种子光在放大池中与抽运光耦合, 并得到有效的放大, 经过 $1/4$ 波片后变为 s 偏振光, 并被偏振片 P_2 反射. 抽运光、Stokes 种子光和 Stokes 出射光的能量用能量计 ED200 探测, 脉冲波形用 PIN 光电二极管探测, 并用数字示波器 TDS684A 来记录. 相位共轭保真度是通过列阵相机测量激光光束能量远场角分布而获得的^[11]. 介质光学击穿时的闪光用高性能 CCD 拍摄.

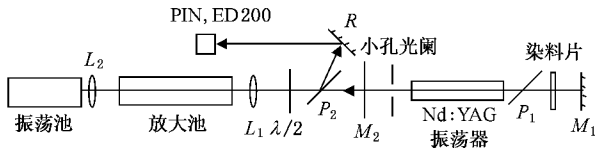


图2 实验装置示意图

3.2. 实验结果及其讨论

实验时 Nd:YAG 调 Q 激光器输出抽运光波长为 $1.064 \mu\text{m}$, 重复率为 1 Hz, 脉宽为 10 ns, 最高能量为 50 mJ, 抽运光能量的变化通过加入衰减片来实现, 发散角约为 1.6 mrad (5 倍衍射极限). 本文主要研究了放大池中分别选用 C_2Cl_4 和 C_4Cl_6 , 振荡池中均选用 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 的双池 SBS 系统性能. 为了进行比较, 同时还研究了放大池和振荡池中均选用 C_2Cl_4 和 C_4Cl_6 (由于 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 的吸收系数较大, 放大池中能量损耗过高, 无法建立放大池和振荡池中均选用 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 的双池 SBS 系统) 的双池 SBS 系统. 以上四类双池 SBS 系统分别用 1) $\text{A} : \text{C}_2\text{Cl}_4 + \text{G} : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 2) $\text{A} : \text{C}_4\text{Cl}_6 + \text{G} : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 3) $\text{A} : \text{C}_2\text{Cl}_4 + \text{G} : \text{C}_2\text{Cl}_4$ 和 4) $\text{A} : \text{C}_4\text{Cl}_6 + \text{G} : \text{C}_4\text{Cl}_6$ 来表示.

图 3 是以上四类双池 SBS 系统的能量反射率随抽运光能量的变化关系曲线. 从图可以看出, 对于 1) $\text{A} : \text{C}_2\text{Cl}_4 + \text{G} : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 和 2) $\text{A} : \text{C}_4\text{Cl}_6 + \text{G} : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 系统而言, 能量反射率随着抽运光能量的增加而先是迅速上升, 之后缓慢上升. 这是因为在布里渊放大

池中, 注入反向传播的 Stokes 种子光时, 抽运光、声波和 Stokes 种子光相互作用, 将导致抽运光能量向 Stokes 种子光转移. 当抽运光能量增加时, 将导致更大的抽运光能量向 Stokes 种子光能量的转移, 增加了种子光放大率, 因此能量反射率迅速上升, 但是抽运光能量增加到一定值之后, 由于能量提取效率趋于饱和, 种子光放大率缓慢增加, 因此能量反射率缓慢上升^[12]. 由于 C_2Cl_4 的增益系数比 C_4Cl_6 的增益系数大, 因此相同条件下 1) $\text{A} : \text{C}_2\text{Cl}_4 + \text{G} : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 系统的能量反射率比 2) $\text{A} : \text{C}_4\text{Cl}_6 + \text{G} : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 系统的高一些. 由于 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 的光学击穿阈值很高, 因此这两类双池 SBS 系统的负载能力也很高 (100 GW/cm^2 以上), 始终不出现光学击穿现象. 通过测量可得, 其相位共轭保真度大于 90%, 能量反射率稳定度 (定义为测量值均方差与算术平均值之比)^[13] 小于 3%. 另外, 在 Stokes 种子放大的过程中, 脉冲前沿由于增益饱和而上升很快, 因此, 在脉冲得到完全放大后, 抽运光脉冲能量几乎全部转移到了一个很窄的后向脉冲中, 从而实现了脉冲压缩^[14], 图 4 显示了 1) $\text{A} : \text{C}_2\text{Cl}_4 + \text{G} : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 系统的脉冲波形 (10 ns/div).

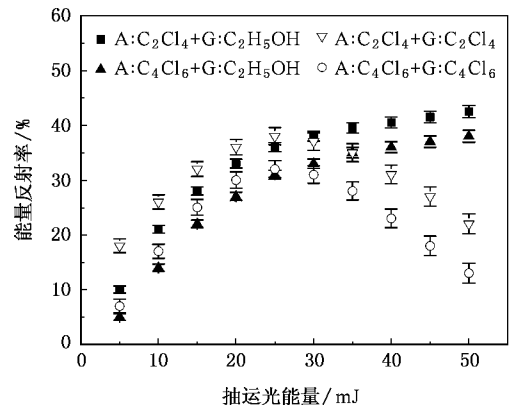


图3 四类双池 SBS 系统的能量反射率随抽运光能量的变化关系

对于 3) $\text{A} : \text{C}_2\text{Cl}_4 + \text{G} : \text{C}_2\text{Cl}_4$ 和 4) $\text{A} : \text{C}_4\text{Cl}_6 + \text{G} : \text{C}_4\text{Cl}_6$ 系统而言, 当抽运光能量小于 25 mJ 时, 随着抽运光能量的提高, 虽然该两类系统的振荡池中出现光学击穿现象, 但是强度非常弱 (声音小, 光斑弱, 如图 5(a) 所示), 因此能量反射率仍然随着抽运光能量的增加而上升. 但是当抽运光能量大于 25 mJ 时, 随着抽运光能量的提高, 该两类系统的振荡池出现严重的光学击穿现象 (声音变大, 光斑变强, 如图 5(b) 所示), 因此其能量反射率反而开始下降 (最高

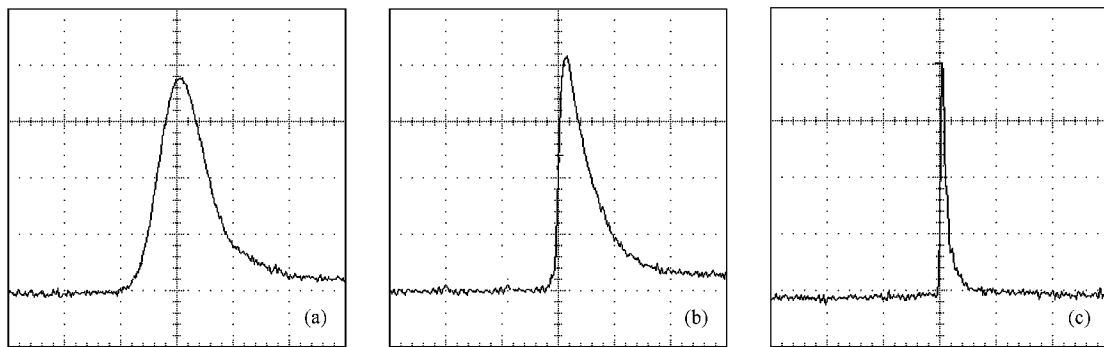


图 4 (a) 抽运光脉冲波形(脉宽为 9.8 ns, 前沿上升时间为 5.7 ns) (b) Stokes 种子光脉冲波形(脉宽为 5.4 ns, 前沿上升时间为 1.1 ns) (c) Stokes 出射光脉冲波形(脉宽为 0.8 ns, 前沿上升时间为 0.5 ns)



图 5 C_2Cl_4 光学击穿时的闪光示意图 (a) 10 mJ (b) 30 mJ

能量反射率小于 40%^[15,16]。严重的光学击穿现象同时也影响了系统的相位共轭保真度和稳定度等性能。通过测量可得,其相位共轭保真度小于 80%,能量反射率稳定度大于 5%。

另外,由于 C_2Cl_4 和 C_4Cl_6 的吸收系数比 C_2H_5OH 的吸收系数小,因此当光学击穿现象较弱(抽运光能量小于 25 mJ)时,3) A : $C_2Cl_4 + G : C_2Cl_4$ 和 4) A : $C_4Cl_6 + G : C_4Cl_6$ 系统的 Stokes 种子光的能量分别比 1) A : $C_2Cl_4 + G : C_2H_5OH$ 和 2) A : $C_4Cl_6 + G : C_2H_5OH$ 系统的 Stokes 种子光的能量大,因此

3) A : $C_2Cl_4 + G : C_2Cl_4$ 和 4) A : $C_4Cl_6 + G : C_4Cl_6$ 系统的能量反射率分别比 1) A : $C_2Cl_4 + G : C_2H_5OH$ 和 2) A : $C_4Cl_6 + G : C_2H_5OH$ 系统的高一些。

4. 结 论

介质对近红外区的吸收主要是 $x-H$ (x 代表是 C, N, O, S, P) 的倍频和合音频的吸收, C_2Cl_4 , C_4Cl_6 和 C_6F_6 等不含有以上化学键,对近红外光的吸收很小,适合作为放大池介质。 C_2Cl_4 和 C_4Cl_6 的布里渊频移与 C_2H_5OH 的布里渊频移非常接近,选用 C_2Cl_4 或 C_4Cl_6 作为放大池介质,选用 C_2H_5OH 作为振荡池介质,可有效地提高双池 SBS 系统的负载能力(大于 100 GW/cm^2)、相位共轭保真度(大于 90%)和能量反射率稳定度(小于 3%)等性能。

[1] Hasi W L J, Lü Z W, He W M, Wang S Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 742 (in Chinese) [哈斯乌力吉、吕志伟、何伟明、王双义 2005 物理学报 **54** 742]

[2] Xue H, Li L D, Yu J Y 1994 *Analytical Chemistry* (Beijing: Tsinghua University Press) p214 (in Chinese) [薛华、李隆弟、郁鉴源 1994 分析化学(北京:清华大学出版社)第 214 页]

[3] Lu W Z, Yuan H F, Xu G T 2000 *Modern Analyzing Technology of Near Infrared Spectra* (Beijing: China Petrochemical Press) p14 (in Chinese) [陆婉珍、袁洪福、徐广通 2000 现代近红外光谱分析技术(北京:中国石化出版社)第 14 页]

[4] Zhong H Q 1984 *Introduction of the Infrared Spectra* (Beijing: Chemical Industry Press) p176 (in Chinese) [钟海庆 1984 红外光谱法入门(北京:化学工业出版社)第 176 页]

[5] Hasi W L J, Lü Z W, He W M, Wang S Y 2005 *Laser Technology* **29** 311 (in Chinese) [哈斯乌力吉、吕志伟、何伟明、王双义 2005 激光技术 **29** 311]

[6] Erokhin A I, Kovalev V I, Faizullov F S 1986 *Sov. J. Quantum Electron.* **16** 872

[7] Cheng N L 2002 *Solvents Handbook* (Beijing: Chemical Industry Press) P227 and 244 (in Chinese) [程能林 2002 溶剂手册(北京:化学工业出版社)第 227 和 244 页]

[8] Bergmann L 1954 *Ultrasonic* (Beijing: National Defence Industry Press) P217 (in Chinese) [L 别尔格曼 1954 超声(北京:国防工业出版社)第 217 页]

[9] Hasi W L J, Lü Z W, He W M, Wang S Y, Liu S N 2004 *Chin. Opt. Lett.* **2** 718

- [10] Kaiser W , Maier M 1972 *Laser Handbook* (Amsterdam : North-Holland) p1117
- [11] Ding Y C , Lü Z W , He W M 2002 *Chinese Journal of Lasers* **29** 780 (in Chinese)[丁迎春、吕志伟、何伟明 2002 中国激光 **29** 780]
- [12] Lü Z W , Ding Y C , He W M 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1286 (in Chinese)[吕志伟、丁迎春、何伟明 2002 物理学报 **51** 1286]
- [13] Lü Z W , Wang X H , Lin D Y , Wang C , Zhao X Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1184 (in Chinese)[吕志伟、王晓慧、林殿阳、王超、赵晓彦 2003 物理学报 **52** 1184]
- [14] Ding Y C , Lü Z W , He W M 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2165 (in Chinese)[丁迎春、吕志伟、何伟明 2003 物理学报 **52** 2165]
- [15] Wang X H , Lü Z W , Lin D Y , Wang C , Zhao X Y 2004 *Chin. Phys.* **13** 1733
- [16] Hasi W L J , Lü Z W , He W M , Li Q , Ba D X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5654 (in Chinese)[哈斯乌力吉、吕志伟、何伟明、李强、巴德欣 2005 物理学报 **54** 5654]

Study on two-cell stimulated Brillouin scattering system with new media^{*}

Hasi Wu-Li-Ji Lü Zhi-Wei[†] Li Qiang Ba De-Xin He Wei-Ming
(*Institute of Opto-electronics , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China*)

(Received 15 May 2006 ; revised manuscript received 12 July 2006)

Abstract

According to the relationships between the chemical structure of the medium and the absorption coefficient , a series of new media with small absorption coefficients has been found , which are suited for use as the amplifier media . The stimulated Brillouin scattering (SBS) parameters of these media have been calculated or measured when the pump wavelength is 1.064 μm . Choosing C_2Cl_4 and C_4Cl_6 as amplifier medium and $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ as generator medium , we investigated the performances of two-cell SBS system pumped by Nd :YAG Q-switched laser . The $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ has a high optical breakdown threshold and the Brillouin frequency shift of $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ is close to those of C_2Cl_4 and C_4Cl_6 . The results indicate that the system has the characteristics of high power-load ability , high phase-conjugation fidelity and high energy reflectivity stability .

Keywords : stimulated Brillouin scattering , two-cell SBS system , new medium

PACC : 4265C , 4265F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10476009 , 60478020) , the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 20060390795) and the Program of Excellent Team in Harbin Institute of Technology .

[†] E-mail : zw_lu@sohu.com