

基于 DFB 激光器的光学微波信号的产生^{*}

谢红云^{1)†} 金冬月¹⁾ 何莉剑¹⁾ 张蔚¹⁾ 王路²⁾ 张万荣¹⁾ 王圩²⁾

1) 北京工业大学电子信息与控制学院 北京 100022)

2) 中国科学院半导体研究所 集成光电国家重点实验室 北京 100083)

(2007 年 9 月 13 日收到 2007 年 11 月 16 日收到修改稿)

采用量子阱混杂的材料集成技术制备并联分布反馈激光器和 Y 形波导耦合器集成的新型光电器件. 两个并联分布反馈激光器的激射模式在频率上稍有差别, 这两束不同频率的激光在 Y 形波导耦合器拍频产生光学微波信号. 分别独立调节注入到两个激光器的电流大小, 可以得到从 13 GHz 到 42 GHz 连续可调的光学微波信号.

关键词: 光学微波信号生成, 分布反馈激光器, Y 形波导, 拍频

PACC: 7820, 4265K, 4260B, 4280S

1. 引 言

高频微波信号广泛应用于骨干光纤通信传输网络中, 作为调制信号源直接调制半导体激光器等光电器件, 利用光纤近 30 THz 的传输带宽和极低的传输损耗, 完成骨干网络高速大容量的信息传输任务. 10 Gbit/s 的骨干传输网络已经商业化并得到了广泛应用, 当前的骨干传输网向着更高的传输速率如 40 Gbit/s 的速率发展. 但产生高频信号的电学微波器件的设计和制备相当复杂, 器件的寄生参数严重限制了信号的最高振荡频率, 而调制带宽也受半导体激光器等光电器件弛豫振荡频率的限制, 使得光纤传输系统难以达到更高的传输速率. 同时光纤通信网络中节点处的电光转换增加了系统的复杂性和成本. 直接采用光信号进行调制和传输, 构建全光网络, 使用光学微波信号作为光网络中的光复用载波, 光交叉互联信号, 全光时钟恢复信号以及高速光孤子信号^[1-5]等能够达到高的传输速率, 在系统的成本和性能上更具优势. 因此, 光学微波信号的产生和传输对于基于光纤通信的高速大容量的现代通信系统具有重要的意义.

半导体激光器的自脉动理论是产生光学微波信号的理论基础, 1985 年 Ueno 和 Lang 报道了两段式

激光器产生自脉动的条件^[6], 随后多段激光器自脉动的理论研究和实际器件的制备以及拍频产生光学微波信号等方面的研究报道很多. 1992 年 Möhrle 和 Sartorius 的小组利用两段级联的分布反馈 (distributed feedback, DFB) 激光器, 通过调整两个部分的注入电流, 得到两个光模式的非线性耦合, 拍频获得了 2 GHz 到 10 GHz 的光学微波信号^[7]. 1998 年 Pham 等人也报道了采用级联两段 DFB 激光器拍频产生光学微波信号^[8]. 1999 年 Wang 等采用级联增益耦合的 DFB 激光器获得了 12—64 GHz 连续可调的光微波信号, 并分析对比了级联增益耦合 DFB 激光器与级联折射率耦合 DFB 激光器微波信号产生机理的异同^[9]. Hui 等同样采用强增益耦合级联 DFB 激光器得到了 25—80 GHz 的光微波信号^[10]. 2001 年 Möhrle 和 Sartorius 的小组在两段级联 DFB 激光器结构中引入相位调谐区, 更有效地调整两束光模式的相位, 使其拍频产生光微波信号^[11]. 同时, 基于两段级联 DFB 激光器的自脉动拍频理论不断完善^[12-14].

本文有别于两段级联 DFB 激光器, 报道由 InP 基并联 DFB 激光器和 Y 形波导耦合器集成产生光学微波信号的新结构^[15]. 两个并联 DFB 激光器产生不同频率的激射模式, 在 Y 形波导耦合器通过拍频产生光学微波信号. 独立调节注入到两个激光器的电流大小, 得到了在 13 GHz 到 42 GHz 连续可调的

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 90101025, 60776051), 北京工业大学博士科研启动基金 (批准号: 52002013200701), 北京工业大学青年科研基金 (批准号: 97002013200701), 北京市教委科技发展计划项目 (批准号: KM200710005015) 资助的课题.

[†] E-mail: xiehongyun@bjut.edu.cn

光学微波信号.该器件光微波信号的产生机理不同于级联DFB激光器自脉动的拍频机理,能更独立地控制两个DFB激光器的激励模式,提高光学微波信号频率的可控性;不同部分之间有更好的电学和光学隔离.该集成器件为光纤通信系统中光学微波信号的产生提供了一种新的方法.

2. 器件设计

并联DFB激光器和Y形波导耦合的集成器件如图1所示.两个DFB激光器采用均匀布拉格光栅,并具有同样的周期.由于DFB激光器谐振腔内光的周期性反射由布拉格光栅周期变化的折射率引起,端面的损耗(包括Y形波导端面损耗和激光器端面损耗)对激光器满足激射条件和光模式选择的影响可以忽略.当不同的电流同时分别注入到两个DFB激光器,并且均大于激光器各自的阈值电流时,DFB激光器会同时在布拉格波长附近激射.由于注入的电流大小不同,损耗功率生成的热会不同,从而影响器件的激射频率,激射波长在布拉格波长附近随注入电流的增大而发生红移,向长波长方向偏移.虽然DFB激光器的热稳定性较好,但电流变化引起的两束激光在频率上的些微差别足以在同时耦合进入Y形波导时,进行拍频产生微波信号.另一方面,分别注入不同大小的电流,两个有源部分的载流子密度就会不同,从而激射光的相位相应的不同.两束光在Y形波导中进行非线性耦合时,调整两个注入电流可以使两束光的相位差合适拍频产生光学微波信号.下式给出了拍频产生光学微波信号的频率:

$$f = c \cdot \Delta\lambda / \lambda^2, \quad (1)$$

其中 c 是真空中光速, λ 是布拉格波长, $\Delta\lambda$ 代表两束激光间的频率差别.

从材料结构设计方面考虑,DFB激光器区是器件的有源部分,采用InGaAsP应变补偿多量子阱结

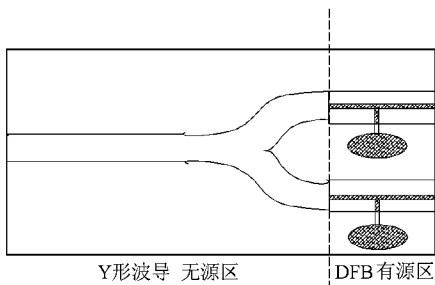


图1 DFB激光器和Y形波导耦合器集成器件

构作为有源层,带隙波长在 $1.55 \mu\text{m}$ 左右.Y形波导耦合器为器件的无源部分,两个DFB激光器产生的光同时进入Y形波导传输.波导材料采用InGaAsP多量子阱结构,为减少波导传输时的吸收损耗,材料带隙波长应小于有源部分的带隙波长,控制在 $1.4 \mu\text{m}$ 左右.有源部分和无源部分的集成通过量子阱混杂技术(quantum well intermixing, QWI)实现.量子阱混杂技术是一种生长后处理技术,首先在量子阱材料的表层产生大量的点缺陷,我们采取P离子注入的方法;然后在某种激励条件下,例如快速热退火促使点缺陷向量子阱区域移动;最后点缺陷的移动诱导量子阱/垒材料的组分原子在界面处发生互混杂,导致材料组分发生变化,从而使带隙波长蓝移.具体实验方法包括:一次外延生长完成后,通过实验确定 4500\AA 的氧化硅作为离子注入过程中DFB激光器有源区的掩模,在外延片表面制作 SiO_2 掩模图形,使用P离子注入,在 200 nm 厚的P-InP没有 SiO_2 保护的地方引入了点缺陷,如图2所示.通过SRIM软件模拟得出注入P离子能量为 50 keV 时,注入深度在 200 nm 附近,能够在InP层很好地引入缺陷同时不影响InGaAsP量子阱层的质量.因此能量 50 keV ,剂量 $5 \times 10^{13} / \text{cm}^2$ 的磷离子作为掺杂剂注入Y形无源耦合区.然后样品在 700°C 下做快速热退火(rapit thermal annealing, RTA)120 s,并用 SiO_2 保护样品表面防止P元素的大量损失.完成RTA后,Y形波导耦合区材料的带隙波长蓝移约 130 nm ,如图3所示给出的样品有源区和无源区材料的PL谱.两个区域的光荧光强度几乎相等,表明在采用QWI材料集成技术前后,材料的质量几乎不受影响,保持在同样高的水平.完成QWI后,有源区和无源区的多量子阱层对应的带隙波长分别为 $1.55 \mu\text{m}$ 和 $1.4 \mu\text{m}$,如

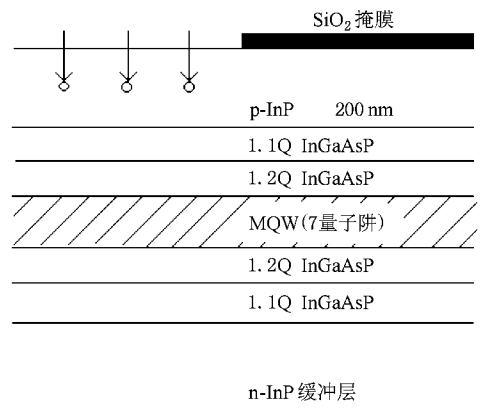


图2 离子注入过程示意图

图 3 所示,保证 Y 形波导耦合器有最小的吸收损耗,达到“透明传输”的要求.

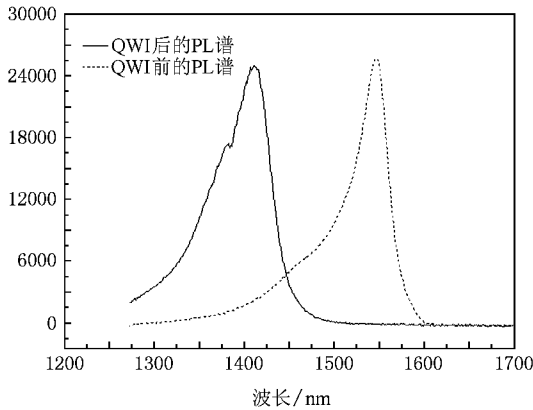


图 3 QWI 前后有源区和无源区材料的 PL 谱

Y 形波导耦合器的几何尺寸影响着波导的传输损耗,是器件设计的一个重要部分^[16].我们采用 S-bend 形式的 Y 形波导结构,结构参数如图 4 所示.传输损耗主要体现在波导弯曲损耗和散射损耗,而它们主要决定于弯曲波导的曲率半径、间距以及脊形波导制作工艺.波导的宽度(W)、两分支间距(D)和 S 形波导的弯曲半径(R),弯曲波导长度(L)等对波导的传输损耗影响严重.其中 L 可由 R, D 计算,所以只需要优化 W, R 和 D ,我们使用 BPM 方法模拟波导的传输损耗,优化各个几何尺寸.

波导需要单模传输,模拟计算不同 W 下的模式,发现只有当 $W \leq 2 \mu\text{m}$ 时为单横模工作.而 W 太小则会减小波导与光纤的耦合效率,提高制作工艺的难度,所以取 $W = 2 \mu\text{m}$.

我们首先基于有源区材料结构得到激光器的基模模式分布,并将基模加载到 Y 形波导耦合器的输入端.然后采用 BPM 方法模拟不同间距 D 下波导

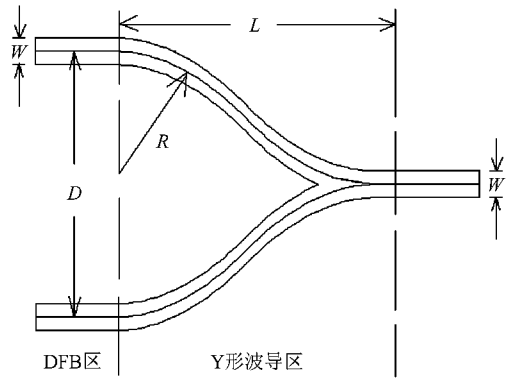


图 4 Y 形波导参数示意图

的光传输情况,监测传输的总功率(包括波导功率和泄漏功率等)和每个分支的波导功率.在 R 固定为 4 mm 、 25 mm 和 120 mm 时,分别扫描 $D/2$ 从 1 至 $15 \mu\text{m}$,步长 $0.5 \mu\text{m}$ 下得光传输.三种情况下模拟的结果类似,如图 5(a)所示.可以看出,当间距 D 较小时,波导中传输的光功率与总功率相比很小,这应该是两个分支的相互作用引起的.因此 D 应选择的足够大,以保证良好的光隔离减少波导损耗.考虑合适的器件尺寸,我们选择 $D/2$ 为 $10 \mu\text{m}$,即 D 为 $20 \mu\text{m}$.

确定弯曲波导的曲率半径 R 时,选择 D 为 $20 \mu\text{m}$ 扫描 R 从 1 mm 到 225 mm ,步长 $10 \mu\text{m}$ 下传输的总功率和波导功率,模拟结果如图 5(b)所示.在 $R < 4 \text{ mm}$ 时, Y 形波导的 S-bend 弯曲损耗非常严重,而 $R > 9 \text{ mm}$ 时,传输功率基本不随 R 变化.考虑器件尺寸和波导内部随传输距离增加的损耗, R 不宜过大,我们取 $R = 4 \text{ mm}$ 为宜.图 6 是 Y 形波导在 $W = 2 \mu\text{m}$, $D = 20 \mu\text{m}$, $R = 4 \text{ mm}$ 的几何尺寸下,光传输损耗的情况,波导总功率损耗 3.98 dB ,单支波导功率损耗 4.37 dB ,接近理想的 3 dB 损耗.

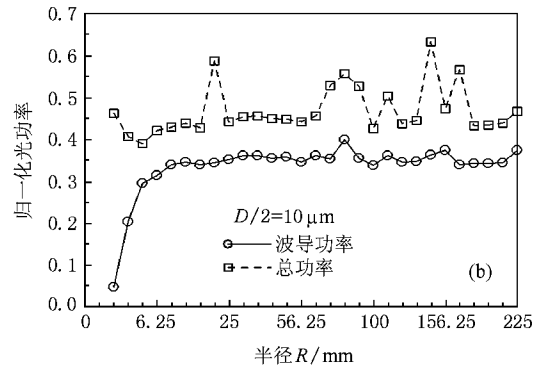
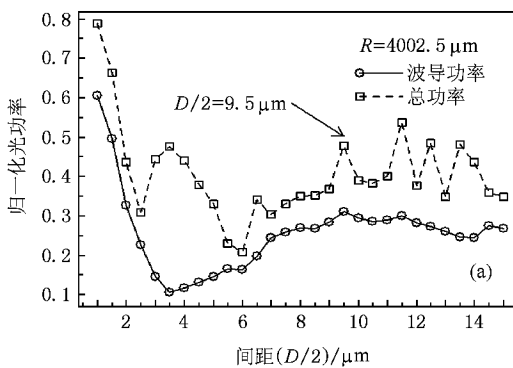


图 5 不同器件参数下 Y 形波导中光传输的模拟结果 (a) 传输功率与间距 D 的关系 (b) 传输功率与弯曲半径 R 的关系

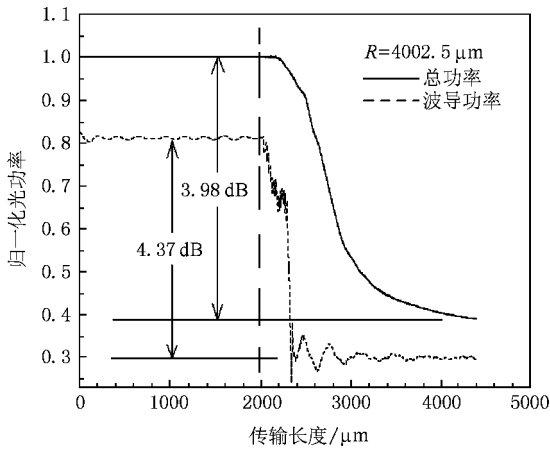


图 6 Y 形波导的传输损耗

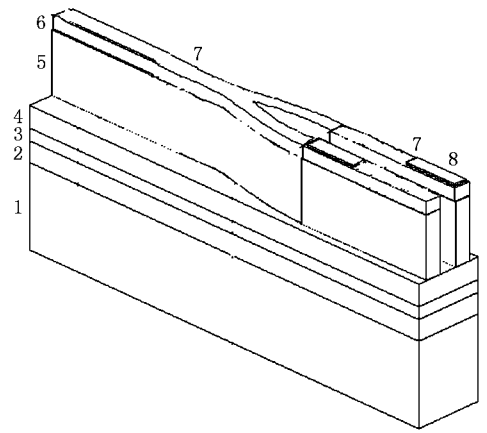


图 7 集成器件整体示意图

3. 器件制备

器件制备在 n 型磷化铟衬底上,采用金属化学气相淀积(MOCVD)在 665℃的生长温度下依次外延生长得到下波导层(low waveguide layer),多量子阱层(MQW layer),上波导层(upper waveguide layer)和 InP 盖层(InP cladding layer).接下来采用量子阱混杂 QWI 技术实现有源区材料和无源区材料的集成.两个 DFB 激光器的布拉格光栅采用全息曝光方法制备.上波导层上的磷化铟层为无源区的掩模,两个布拉格光栅制备在有源区的上波导层,并具有同样的布拉格周期.刻蚀去掉磷化铟牺牲层后进行二次外延,生长 p 型磷化铟盖层和 p 型铟钾砷接触层.器件的脊形波导以 200 μm 的氧化硅为掩模由反应离子刻蚀得到.刻蚀掉脊波导隔离区的铟钾砷层作好不同部分间的隔离.最后溅射 p 型 Ti/Au 金属并蒸发 n 型 Au/Ge/Ni 金属完成器件制作.图 7 给出了整个器件的示意图.脊波导宽约 2 μm,整个器件长 720 μm,其中 DFB 激光器和 Y 形波导耦合器分别为 300 μm 和 400 μm,中间隔离区约为 20 μm.

4. 实验结果

DFB 激光器端和 Y 形波导耦合器端腔面的出光功率分别为 7 mW 和 3 mW,说明 Y 形波导耦合器的传输损耗约为 57%,接近于理想 Y 形耦合器的传输损耗值.从 Y 形波导耦合器出光端面测得的激光

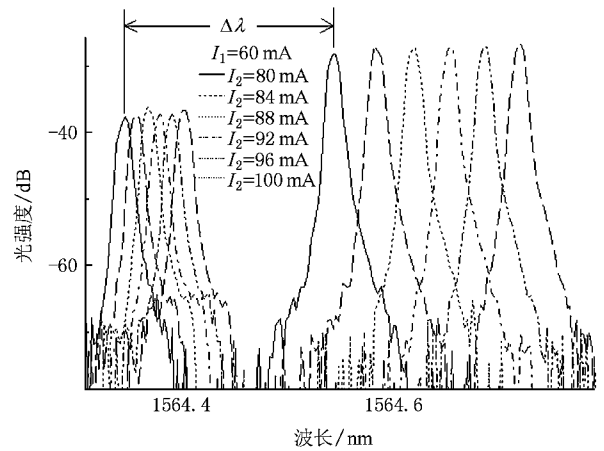


图 8 改变注入电流产生的频率差

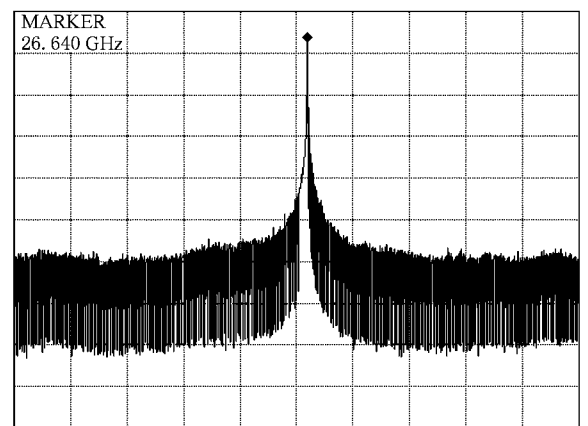


图 9 拍频产生的 26.64 GHz 的光微波信号

峰值波长 1.56 μm,边模抑制比达到 30 dB 以上.

当两个独立的电流同时分别注入到两个 DFB 激光器,两个电流均大于激光器各自的阈值电流,并

且相差 20 mA 或者以上时,产生的两束激光在频率上有差别,同时耦合进入 Y 形波导进行拍频可以产生光学微波信号.固定一个注入电流在 60 mA,在 80 mA 到 100 mA 范围内改变另外一个注入电流,两束激光的频率差如图 8 所示,得到了在 13 GHz 到 42 GHz 范围内连续调谐的微波信号.图 9 是频率为 26.64 GHz 的光学微波信号,拍频产生的光学微波信号由 ADVAN R3182 频率分析仪测得.由于没有进一步控制调整两束激光的相位,产生的光微波信号的噪声较大.进一步优化器件结构能够得到更宽的信号带宽和较小的噪声.

5. 结 论

本文报道一种由并联 DFB 激光器和 Y 形波导耦合器构成的新型光电集成器件,产生光学微波信号.注入磷离子的 QWI 技术用以实现 DFB 激光器区有源材料和 Y 形波导耦合器区无源材料的集成.在 Y 形波导耦合区,拍频来自 DFB 激光器的两束频率稍有差别的激光,得到光学微波信号.改变注入到激光器的电流得到了连续可调的光学微波信号,调谐范围为 13 GHz 到 42 GHz.

-
- [1] Wang X L , Li G F , Charles S I 1993 *J. Lightwave Technol.* **11** 309
- [2] Georges B J , Lau K Y 1993 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **5** 242
- [3] Sun C K , Orazi R J , Pappert S A , Bums W K 1996 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **8** 1166
- [4] Swanson E A , Chinn S R 1994 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **6** 796
- [5] Swanson E A , Chinn S R 1995 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **7** 114
- [6] Ueno M , Lang R 1985 *J. Appl. Phys.* **58** 1689
- [7] Möhrle M , Feiste U , Horer J , Molt R , Sartorius T 1992 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **4** 976
- [8] Pham G , Duan G H 1998 *IEEE J. Quantum. Electron.* **34** 1000
- [9] Wang X H , Mao W M , Mohammed A *et al* 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 1292
- [10] Hui R , Zhe B , Demarest K , *et al* 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 518
- [11] Möhrle M , Sartorius B *et al* 2001 *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.* **7** 217
- [12] Wang C L , Wu J , Lin J T 2003 *Chinese Physics* **12** 528
- [13] Mohammed A , Li G F 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 525
- [14] Tian J , Ren C , Feng S *et al* 2006 *Chinese Physics* **15** 2471
- [15] Xie H Y , Wang L , Zhao L J , Zhu H L , Wang W 2007 *Chinese Physics* **16** 1459
- [16] Xiao J B , Ma C F , Zhang M D , Sun X H 2006 *Acta. Phys. Sin.* **55** 254 (in Chinese) [肖金标、马长峰、张明德、孙小茜 2006 物理学报 **55** 254]

Optical microwave generation based on DFB lasers^{*}

Xie Hong-Yun¹† Jin Dong-Yue¹ He Li-Jian¹ Zhang Wei¹

Wang Lu² Zhang Wan-Rong¹ Wang Wei²

1 † College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

2 † National Research Center of Optoelectronic Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(Received 13 September 2007 ; revised manuscript received 16 November 2007)

Abstract

A new device of two parallel distributed feedback (DFB) lasers integrated monolithically with Y-branch waveguide coupler was fabricated by means of quantum well intermixing. Optical microwave signal was generated in the Y-branch waveguide coupler through frequency beating of the two laser modes coming from two DFB lasers in parallel, which had a small difference in frequency. Continuous rapidly tunable optical microwave signals from 13 GHz to 42 GHz were realized by adjusting independently the driving currents injected into the two DFB lasers.

Keywords : optical microwave generation, distributed feedback laser, Y-branch, beat-frequency

PACC : 7820, 4265K, 4260B, 4280S

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 90101025, 60776051), Startup Foundation for P. h. D. of Beijing University of Technology (Grant No. 52002013200701), Young Science Foundation of Beijing University of Technology (Grant No. 97002013200701), the Beijing Municipal Education Committee of China (Grant No. KM200710005015).

† E-mail : xiehongyun@bjut.edu.cn