

1. 46~1. 66GHz 250W 宽带硅微波脉冲大功率管

王因生[†] 李相光 傅义珠 王佃利 丁晓明 盛国兴 康小虎

(南京电子器件研究所, 南京 210016)

摘要: 报道了 L 波段高端中脉冲 250W 宽带硅微波脉冲大功率晶体管研制结果. 该器件采用微波功率管环台面集电极结终端结构、非线性镇流电阻等新工艺技术, 器件在 1. 46~1. 66GHz 频带内, 脉宽 200 μ s, 占空比 10% 和 40V 工作电压下, 全带内脉冲输出功率大于 250W, 功率增益大于 7. 0dB, 效率大于 45%.

关键词: 硅; 微波; 功率管

EEACC: 2560J

中图分类号: TN323. 4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)05-0965-05

1 引言

微波大功率晶体管与微带电路技术相结合, 使得微波大功率发射系统固态化和小型化成为可能. 固态雷达发射机阵面上输出数十千瓦峰值功率需要成百上千只微波大功率器件, 这些器件的性能和微带电路的水平决定了整个微波发射系统的性能. 事实上, 固态微波发射系统的发展很大程度上是受到微波大功率器件水平制约的. 整机电路在频率、功率、增益、带宽、抗失配和可靠性等方面对微波大功率器件提出越来越高的要求, 从而促进了硅微波脉冲大功率管的发展^[1~7].

进入新世纪以来, 由于大功率微波脉冲发射系统的迫切需要, 国外仍在对硅微波脉冲大功率管结构和工艺技术进行改进, 不断有新的微波大功率器件推出. 例如国外 APT 公司的军工与宇航分部^[1]于 2006 年 7 月宣布了一种新系列高功率晶体管, 旨在用于高端 L 波段 (1. 46~1. 66GHz) 军用脉冲雷达, 以满足固态相控阵雷达急需. 该公司采用最新的芯片设计, 提高了工艺水平, 增强了器件性能, 在上述频率范围内获得更高的功率和增益. 其脉冲宽度为 200 μ s, 占空比 10%, 该系列高功率晶体管共基极 C 类工作最大峰值输出功率为 250W, 集电极效率 40%, 增益在 7. 0dB 左右.

为满足日益增长的需求, 在 1. 46~1. 66GHz 220W 脉冲功率管系列研制^[2]的基础上, 针对微波大功率的特点, 提出了一种微波功率管环台面集电极结终端新结构, 着重解决加大工作电流后引起的低击穿电压, 同时完善了非线性镇流技术和双层金属布线新工艺, 进一步降低了器件芯片结温, 增大了输出功率和功率增益. 本文报道近期 1. 46~1. 66GHz 250W 宽带大功率脉冲管的研制结果和所采用的环台面集电极结终端新结构等新技术.

2 器件结构特点和工艺技术

2.1 微波功率器件设计的一般考虑

众所周知, 微波功率器件通常是由无数小单元器件并联而成, 因此功率器件芯片小单元的设计必须遵循小信号的设计理论. 对于微波器件, 小信号时最高振荡频率 f_{\max} 为:

$$f_{\max} = \left[\frac{f_T}{8\pi(r_b + R_E)C_C} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

功率增益 G 和 f_{\max} 之间的关系式为 $f_{\max} = 10^{G/20} f$. 提高 f_T , 降低 $(r_b + R_E)C_C$ 乘积值就可以使 f_{\max} 增大, 从而提高器件在特定工作频率下的功率增益. 从器件结构看, 要提高器件的 f_{\max} 和微波功率增益关键就在于必须提高晶体管的 3 个周长面积比, 尤其是提高发射极周长与基区面积比. 因此器件的几何尺寸要精细, 实现高密度浅结窄基区薄外延层, 以便获得大的器件功率增益.

其次, 微波功率器件随着输出功率的增大, 器件阻抗随之下降, 其结果造成带宽变窄, 功率增益也下降. 可见设计微波大功率器件, 还必须致力于提高器件输出阻抗, 解决好较小的集电区中有较大的发射极有效注入面积^[8].

以上是微波功率器件设计的一般考虑. 在研制 1. 46~1. 66GHz 250W 器件时, 由于脉宽长达 200 μ s, 要求平均输出电流大, 器件设计必须特别注意大电流注入引起的各种大注入效应、电流不均匀分布和芯片发热等因素, 正是这些因素严重影响着微波功率管的输出功率和可靠性.

2.2 芯片结构

1. 46~1. 66GHz 250W 器件子胞芯片选取功率/频率优值好的高效梳状多晶硅发射极结构, 单元间距

[†] 通信作者. Email: wysg@sina.com
2007-10-12 收到, 2007-11-30 定稿

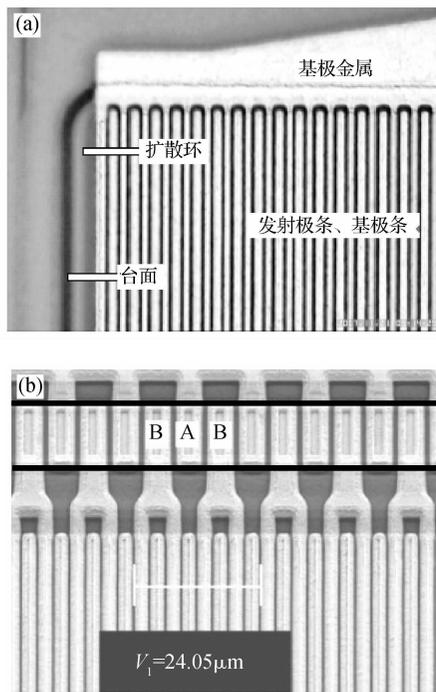


图 1 芯片结构照片

Fig.1 Picture of the chip structure

$6\mu\text{m}$,发射极周长与基区面积比大于 3000cm^{-1} ,达到较高的水平.芯片结构照片如图 1 所示.

研制工作在 100mm 硅微波功率管工艺线上进行,除采用多晶硅发射极、二次发射极镇流^[9]、浅结注入基区、亚微米光刻和刻蚀、多层金属化系统、双层金属布线、抗二次击穿和抗烧毁等先进工艺技术外,该芯片研制着重开展环台面集电极结终端结构、非线性镇流电阻和均匀热设计等工艺技术的研究.

2.3 环台面集电极结终端新结构

一定工作电压下微波功率器件要输出更大的功率,必须有更大的输出电流.但大的输出电流会引起各种大注入效应,例如基区扩展效应和发射极电流集边效应,造成晶体管电流增益和 f_T 快速下降.根据晶体管理论,大注入对应的临界集电极电流 J_{cr} 一般可用下式表达:

$$J_{cr} = qv_m(2\epsilon\epsilon_0 V_c/qW_c^2 + N_c) \quad (2)$$

式中 W_c 为外延层 n^- 区厚度; v_m 为载流子通过集电极结势垒区的最大饱和速度; N_c 为外延层 n^- 区的杂质浓度; J_{cr} 为临界集电极电流; V_c 为集电极外加电压.对于硅微波功率器件,上式括号内第二项比第一项大很多.由此可见,提高临界集电极电流值减少大注入效应的有效办法就是提高外延层 n^- 区的掺杂浓度 N_c .然而,提高 n^- 区的杂质浓度必然会引起器件集电极击穿电压的下降,影响器件工作的稳定和可靠性,因此必须改进器件集电极结终端结构来提高器件击穿电压.

通常微波功率器件结终端采用硼扩散保护环、分压环或台面等结构来提高器件的击穿电压,目的是要将电击穿的可能性从表面移向半导体的内部,并将电场减至最小以充分地利用半导体的性能.研究表明,对于 1.46

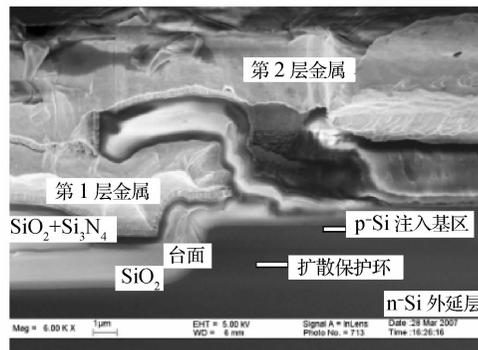


图 2 环台面结终端结构剖面扫描电子显微照片

Fig.2 SEM cross-section micrograph of mesa junction termination structure with one guard ring

$\sim 1.66\text{GHz}$ 250W 这样大的功率管,常规的集电极结终端结构已不易满足要求,为此在以前台面结构和硼扩散保护环工艺技术的基础上,提出了微波功率管环台面集电极结终端新结构.这种结构把硼扩散保护环和台面有机结合在一起,组成一个统一的集电极结终端电学系统.常规台面结构,虽然可以减少延伸电极电容,有利于提高微波功率增益,但由于集电极结耗尽层宽度有限,器件击穿电压受到限制.而硼扩散保护环结构由于表面曲率半径比体内小,往往首先在表面发生击穿.新结构对集电极结终端四周进行高能低浓度离子注入和高温推进,形成硼扩散结,然后进行台面腐蚀,在扩散结外面形成环形台面,最后对硅片进行介质填充和平坦化处理.

环台面结构能够提高集电极结终端击穿电压的原理可以这样定性地理解:在集电极结终端只有扩散环时,随着外加电压的加大,硼扩散保护环结构由于表面曲率半径比体内小,往往首先在曲率半径小的表面发生击穿,如果这时有一个一定深度的台面从远处向扩散环逐步接近,靠近到一定程度,由于台面的作用,改变了集电极结终端耗尽层的形状和宽度,从而降低该处表面电场强度,避免了表面击穿,其结果是提高了器件击穿电压.进一步的理论分析和模拟结果显示,台面在靠近结边缘时,器件击穿电压存在最大值,这与外延衬底浓度、扩散结深、台面高度、台面和结面之间的间距等因素有关,详细的理论分析和模拟计算将另行发表.

研制结果表明,采用这种环台面集电极结终端新结构的器件,集电区的杂质浓度在 $(4.0\sim 5.5)\times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 范围内,器件击穿电压在 $85\sim 100\text{V}$ 之间,输出功率和功率增益已能满足要求.此外,由于进行台面腐蚀,这种结构可以有效地减少集电极的侧向电容.由于硅片平坦化处理加厚了延伸电极下面的介质层厚度,可以减少延伸电极引起的寄生电容,从而提高了器件功率增益,改善了器件宽带性能.对以上结构,采用 ISE 工艺模拟软件在上述掺杂浓度范围内进行工艺模拟,在 $4.7\times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 杂质浓度下模拟得到的 93V 击穿电压,器件击穿发生在半导体内的扩散环底部,所得到的结果与实验相符合.在图 1(a)照片中可见环台面结构的平面视图,照片中白色圆弧为扩散环,外面黑色圆弧为环形台面.图 2 给

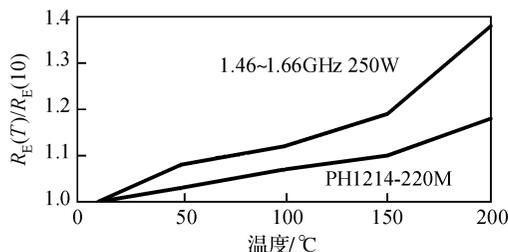


图 3 二种器件镇流电阻在不同结温下 $R_E(T)/R_E(10)$ 值的比较
Fig.3 A detail comparison of $R_E(T)/R_E(10)$ between two kind of devices ballasting resistor under different junction temperature

出了芯片环台面结终端结构剖面的扫描电子显微照片。

2.4 非线性镇流电阻技术

微波功率器件面积大,工作时功率密度高,由于热反馈效应使芯片局部区域电流集中,易形成局部热斑,不仅造成器件输出功率下降,严重时还可能导致器件烧毁.因此微波功率管必须引入发射极镇流电阻 R_E ,利用 R_E 的负反馈作用扼制芯片局部电流的集中.但 R_E 的引入会影响器件功率增益,必须很好地设计和考虑,以最小的 R_E 达到最好的镇流效果.文献[9]给出作者在早先研究中提出的采用多晶硅电阻和扩散电阻组成的二次镇流结构,这里的非线性镇流电阻技术是在二次镇流电阻的基础上进行的.

镇流电阻的非线性是指 R_E 随外加电场和温度的非线性变化,这里着重考虑 R_E 随温度 T 的非线性增加.由半导体物理^[10]可知,硼扩散镇流电阻的电阻率 $\rho = 1/pq\mu$,其中 $1/\mu = 1/\mu_L + 1/\mu_I$, μ_L 是晶格长声学波散射迁移率, $1/\mu_L = m^* AT^{3/2}/q$; μ_I 是电离杂质散射迁移率, $1/\mu_I = m^* BN_I/q T^{3/2}$.由上可见,低温下杂质散射起主要作用,高温下晶格散射起主要作用.对于轻掺杂半导体的迁移率,电离杂质散射机构可以略去,迁移率主要取决于晶格长声学波散射机构,这时的半导体迁移率 $\mu \approx \mu_L = q/m^* AT^{3/2}$,迁移率 μ 随温度升高而减小,且迁移率 μ 下降速率与受主杂质浓度有关,杂质浓度越低,电离杂质散射的影响越小,迁移率下降的速率越快.所以较轻掺杂浓度的镇流电阻值随温度变化是非线性的,成立 $dR_E/dT \propto T^{1/2}$,在芯片出现热斑的地方, R_E 表现出更大的电阻值.实验结果表明,采用非线性镇流技术的微波功率管发射极镇流电阻可以更有效抑止热斑的形成,消除由于局部过热引起的器件输出功率下降.器件非线性发射极镇流电阻的位置可以从图 1(b) 照片中找到,照片上部两条黑线之间就是扩散镇流电阻的地方,该处硅片下面有一扩散电阻层,从发射极金属电极条 B 流出的发射极电流必须流经由 B-A 之间由扩散电阻层组成的电阻才能流到外电路金属发射极引线.

1.46~1.66GHz 250W 器件选用轻掺杂 ($\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) 硼扩散电阻制作镇流电阻,可以起到很好的镇流效果,达到好的器件热稳定性.图 3 给出 1.46~1.66GHz 250W 器件与国外 M/A-COM PHI 公司产品 PH1214-220 型类似器件在不同结温下,发射极镇流电

Image Statistics			
Mean	140.402	St Dev	2.624
Median	140.262	# Pixels	1674
Min	133.697	X	198
Max	151.409	Y	122
		Rectangle:	
		Top	96
		Left	139
		High	27
		Wide	62

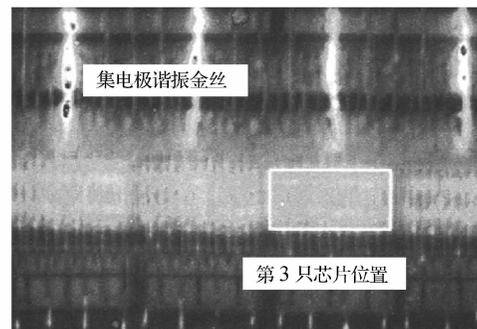


图 4 1.46~1.66GHz 250W 器件红外热分布图
Fig.4 Infrascopes thermal map of 1.46~1.66GHz 250W power transistor

阻 $R_E(T)$ 与 10°C 时镇流电阻 $R_E(10)$ 的比值.在 10°C 时,两器件具有相同的镇流电阻值 $R_E(10)$,随着温度升高镇流电阻值非线性上升,且实验样管上升速率明显比进口器件快,从而可以获得较好的镇流效果.

2.5 均匀热设计技术

微波大功率器件工作在高功率密度条件下,结温很高,通常有源区中心表面的温度最高,可以用器件峰值结温来表示.根据可靠性理论,峰值结温是表征器件热性能的重要参数,一般情况,结温每升高 10°C ,器件的使用寿命将减小一半.为提高器件可靠性,降低峰值结温,进行器件热均匀设计十分重要.

1.46~1.66GHz 250W 大功率管采用以下技术来改进和降低功率管芯片热分布不均匀:有源区采用多子胞结构;尽可能长的基极周长;二次发射极镇流、非均匀发射极镇流;非线性镇流电阻以及最近开发完善的低应力介质薄膜双层金属布线工艺技术.硅微波大功率管采用低应力介质薄膜双层金属布线工艺后,外层金属层为芯片提供另外的导热通道,使芯片表面的热分布更趋均匀.这种双层金属布线的剖面位置在图 3 的扫描电子显微剖面照片中已同时标出.以上几项工艺技术能很好地改善芯片内的温度分布.

利用 InfraScope II 型红外显微热像仪对 250W 典型器件进行器件热分布观察,如图 4 所示.器件共有 6 只芯片,中间第 3 只芯片温度最高,测量时取中间温度最高的第 3 只芯片进行器件芯片峰值温结测量区域.在外加直流功耗 40W,壳温 110°C 时,该芯片峰值温结为 151.4°C ,最低温度为 133.7°C ,芯片表面温度差

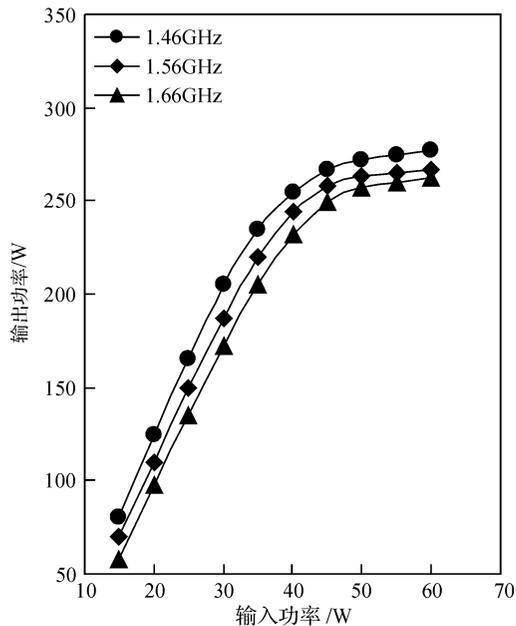


图 5 250W 器件输出功率、输入功率关系曲线

Fig.5 Output power versus input power of 250W power transistor

17.7℃,未见到任何热斑出现.由此可推得,当外壳温度在70℃时,器件的最高峰值结温应低于111.4℃,具有较低的峰值结温和较小的芯片表面温度差.低的峰值结温和均匀的芯片热分布意味着该器件将有较长的使用寿命.结合集电极镇流技术,该器件在额定输出功率250W时,可以承受3:1全相位失配实验,器件抗失配、抗烧毁能力满足使用要求.

3 研制结果

该器件采用 npn 外延高效梳状多晶硅发射极结构,外延层杂质浓度 $(4.0 \sim 5.5) \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,外延层厚度 $6 \sim 10 \mu\text{m}$.整个器件由6个面积为 $1660 \mu\text{m} \times 820 \mu\text{m}$ 功率芯片,20个内匹配电容和200多条引线金丝组成.经内匹配功率合成,该器件在1.46~1.66GHz频带内,脉宽 $200 \mu\text{s}$,占空比10%,40V工作电压和额定输入功率50W条件下,全带内脉冲输出功率大于250W,功率增益大于7.0dB,效率大于45%.图5给出了250W器件在上述条件下的输出功率和输入功率关系曲线.

4 结论

采用微波功率管环台面集电极结终端结构、非线性镇流电阻和双层金属布线等新工艺技术,研制出L波段高端中脉冲250W宽带硅微波脉冲大功率晶体管.该器件在1.46~1.66GHz频带内,脉宽 $200 \mu\text{s}$,占空比10%和40V工作电压下,全带内脉冲输出功率大于250W,功率增益大于7.0dB,效率大于45%.以上研制结果国内未见报道,目前器件性能已达到国外报道水平.

研制中提出的环台面集电极结终端新结构,允许通

过增加外延层浓度来提高器件输出功率.这种结构还可以有效地减少集电极结的侧向电容和器件延伸电极引起的寄生电容,有利于提高器件功率增益,改善器件宽带性能.研制中发展和完善了非线性镇流技术和双层金属布线等关键新技术,这些技术在增加微波功率管输出功率,降低大功率管峰值结温和提高器件可靠性方面起到了重要的作用,这些新技术同样可以用来研制其他波段微波功率管.

致谢 感谢用户单位张立军研究员和陈莉高工在此项研究中给予大力协作和帮助.本所五中心硅工艺线全体人员参加本项目研制,此外本所十六部提供管壳,在此表示衷心感谢.

参考文献

- [1] Patterson H. High L-band medium pulse transistors. IEEE Microwave Magazine, 2006, 7(3): 118
- [2] Wang Yinsheng, Li Xiangguang, Fu Yizhu, et al. 1.44~1.68GHz 220W broadband silicon microwave pulsed high power transistors. Research & Progress of Solid State Electronics, 2006, 26(1): 139 (in Chinese) [王因生, 李相光, 傅义珠, 等. 1.44~1.68GHz 220W 宽带硅微波脉冲功率晶体管. 固体电子学与进展, 2006, 26(1): 139]
- [3] Fu Yizhu, Li Xiangguang, Dai Xuemei, et al. 3.1~3.4GHz 120W silicon pulsed power transistors. Research & Progress of Solid State Electronics, 2006, 26(1): 140 (in Chinese) [傅义珠, 李相光, 戴学梅, 等. 3.1~3.4GHz 120W 硅脉冲功率晶体管. 固体电子学与进展, 2006, 26(1): 140]
- [4] Huang Luoguang, Zhao Lihua, Liu Yingkun, et al. 2.6~2.8GHz 100W silicon microwave pulsed power transistors. Semiconductor Technology, 2004, 29(12): 45 (in Chinese) [黄维光, 赵丽华, 刘英坤, 等. 2.6~2.8GHz 100W 硅微波脉冲功率晶体管. 半导体技术, 2004, 29(12): 45]
- [5] Wang Yinsheng. Broadband L-band 250W silicon pulsed transistors. Research & Progress of Solid State Electronics, 2003, 23(3): 373 (in Chinese) [王因生. L波段250W宽带硅微波脉冲功率晶体管. 固体电子学与进展, 2003, 23(3): 373]
- [6] Pan Hongshu, Zhu Shiping, Li Mingyue, et al. Processing technology for 3.5GHz 65W silicon high power pulsed transistor. Semiconductor Technology, 2001, 26(11): 49 (in Chinese) [潘宏菽, 朱石平, 李明月, 等. 3.5GHz 65W 硅脉冲大功率管研制. 半导体技术, 2001, 26(11): 49]
- [7] Fu Yizhu, Li Xiangguang, Zhang Shudan, et al. S-band 100W silicon pulsed power transistors. Research & Progress of Solid State Electronics, 2000, 20(2): 123 (in Chinese) [傅义珠, 李相光, 张树丹, 等. S波段100W硅脉冲功率晶体管. 固体电子学与进展, 2000, 20(2): 123]
- [8] Wang Yinsheng, Lin Chuan, Wang Dianli, et al. L-band 150W broadband silicon pulsed power transistors. Research & Progress of Solid State Electronics, 1997, 17(2): 114 (in Chinese) [王因生, 林川, 王佃利, 等. L波段150W宽带硅脉冲功率晶体管. 固体电子学与进展, 1997, 17(2): 114]
- [9] Wang Yinsheng, Lin Jinting, Zhang Shudan. Study on dual emitter ballasting of silicon microwave power transistor. Chinese Journal of Semiconductors, 1997, 18(12): 912 (in Chinese) [王因生, 林金庭, 张树丹. 硅脉冲功率器件二次发射极镇流研究. 半导体学报, 1997, 18(12): 912]
- [10] Liu Enke, Zhu Bingsheng. Semiconductor physic. Beijing: National Defence Industry Press, 1981: 108 (in Chinese) [刘恩科, 朱秉升. 半导体物理学. 北京: 国防工业出版社, 1981: 108]

1.46~1.66GHz 250W Broadband Silicon Microwave Pulsed High Power Transistors

Wang Yinsheng[†], Li Xiangguang, Fu Yizhu, Wang Dianli, Ding Xiaoming, Sheng Guoxing, and Kang Xiaohu

(*Nanjing Electric Devices Institute, Nanjing 210016, China*)

Abstract: Using novel technologies such as the mesa junction termination structure with one guard ring and a nonlinear blasting resistor of microwave power transistors, a high L-band medium silicon pulse power transistor has been developed. Under 40V supply voltage, internally matched devices cover the frequency for high L-band radar applications from 1.46~1.66GHz with a pulsed output power of 250W and 45% collector efficiency. The gain is more than 7.0dB.

Key words: silicon; microwave; power transistor

EEACC: 2560J

Article ID: 0253-4177(2008)05-0965-05

[†] Corresponding author. Email: wyshg@sina.com

Received 12 October 2007, revised manuscript received 30 November 2007