·物理电子学·

105 GHz折叠波导EIO的研究和初步实验

张开春，吴振华

(电子科技大学太赫兹中心　成都　610054)

【摘要】采用折叠波导作为扩展互作用振荡器(EIO)的慢波谐振系统，对105 GHz EIO进行了系统的研究，包括慢波系统的色散特性和阻抗、起振电流随周期数的变化。设计了输出窗和电子枪结构，进行了PIC注波互作用模拟，EIO的模拟输出功率约26～50 W，频率约105.26～105.31 GHz。探讨了慢波系统的加工方式，加工了慢波系统、输出窗和电子枪结构，完成了初步试验，进行了相应的冷测和热测，测试了慢波系统的谐振特性、输出窗的传输特性以及电子枪发射性能和流通性。

关　键　词　电子枪；扩展互作用振荡器；折叠波导；输出窗

中图分类号　TN122　　文献标识码　A　　doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.06.009

Study and Preliminary Experiment of 105 GHz Extended Interaction Oscillator with Folded Waveguide

ZHANG Kai-chun and WU Zhen-hua

(THz Research Center, University of Electronic Science and Technology of China　Chengdu　610054)

Abstract　In this paper, a folded waveguide was adopted as the slow wave structure (SWS) of the extended interaction oscillator (EIO). An EIO with frequency 105 GHz was studied in detail, including the dispersion relation and the impedance of the SWS, the starting current varying with the period number, the structure of the window and the electron gun (E-gun), and the PIC simulation of the beam-wave interaction with output power 26～50 W and the corresponding frequency 105.26～105.31 GHz. The machining method of the SWS was investigated for fabricating the SWS and the window as well as the E-gun. The preliminary experiment of cold test and hot test was finished, including the performance of the SWS, the window and the E-gun with current density up to 100A/cm^2.

Key words　electron gun;　extended interaction oscillator;　folded waveguide;　output window

近二十年太赫兹受到了广泛的关注，它在通信、材料、光谱、医疗、生物医学、太空探测等领域有巨大的应用前景。随着MEMS加工技术、阴极发射水平等提高，很多国家都在积极研究频率高于100 GHz的中等功率电真空源，扩展互作用振荡器(extended interaction oscillator，EIO)是一种重要的电真空辐射源，正逐渐发展为一种关键的中等功率太赫兹辐射源[1-10]，具有巨大的应用价值。EIO的高频结构是一种两端短路的慢波结构，通过周期结构降低电磁波的相速，使其与电子注同步而实现有效的注-波相互作用，将电子束能量转化为电磁波能量。本文采用折叠波导作为EIO的慢波谐振系统，它是一种重要的慢波系统[10-12]，对105 GHz EIO进行了理论计算、电磁模拟、粒子模拟，并进行了初步实验，测试了慢波系统、输出窗和电子枪。

1　理论与模拟研究

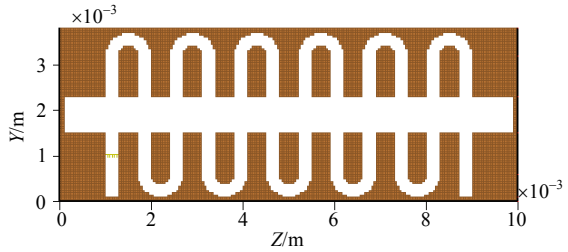
1.1　慢波谐振系统研究

EIO通常工作在$\beta L=n\pi$点附近(n=1,2,…)，工作模式为$n\pi$模，本文选取2π模作为EIO的工作模式。

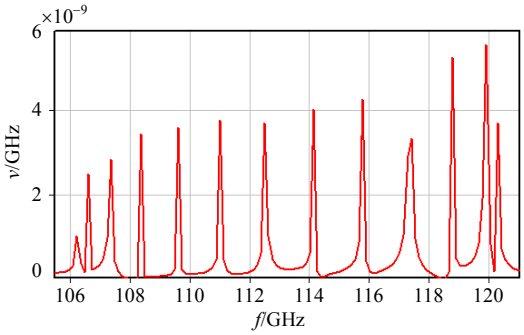
对于N个腔的周期系统，在0～π相位范围内应该有(N+1)个模式[13]，每个模式间的相移为π/N。通过测得不同模式所对应的谐振频率，即可得出该系统的色散特性曲线。在MAGIC中采用DRIVER命令，将折叠波导慢波谐振系统馈入电磁波，并设置E_z的观测点，将E_z的波形进行FFT变化，就可得到该系统的谐振频率分布。通过优化，105 GHz折叠波导慢波结构的尺寸如下：谐振腔高度为3.6 mm、厚度为1.6 mm，

收稿日期：2012－04－17；　修回日期：2012－09－11
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金(ZYGX2009J045)；教育部博士点基金(20100185110022)
作者简介：张开春(1972－)，男，博士，副研究员，主要从事毫米波、太赫兹科学技术等方面的研究.

间隙宽度为0.3 mm、漂移区宽度为0.4 mm、电子注通道半径为0.4 mm。本文采用12个周期的谐振系统进行模拟，该系统将对应13个模式，结构图和频谱分布如图1所示，图中一个谐振峰对应一个模式。



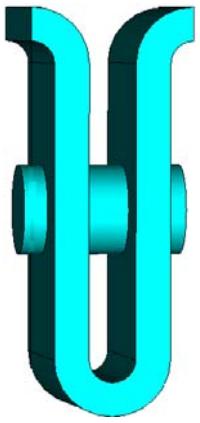
a. 12个周期结构



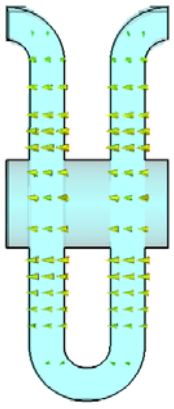
b. 频谱图

图1 折叠波导慢波结构

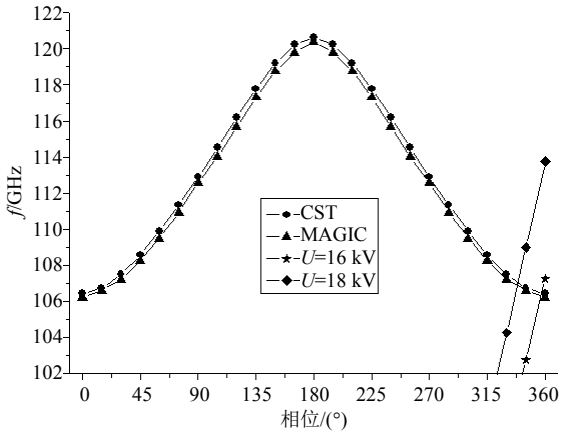
CST软件可以研究慢波系统的色散特性，在CST中对折叠波导慢波进行建模，为一个双周期折叠波导结构，如图2a所示。图中显示部分为真空，背景是良导体，通过设置边界条件和纵向周期条件，可以得到折叠波导在不同相移时的模式和色散曲线。2π模的电场分布如图2b所示，该系统的色散曲线图如图2c所示。通过这两种电磁软件得到的色散曲线结果一致，图中的另外两条直线分别表示18 kV和16 kV的电子注电压，从图中可以看出互作用的同步电压约16 kV。



a. 周期结构建模



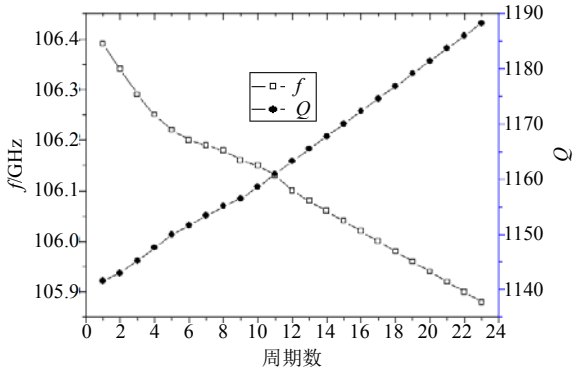
b. 2π模的电场分布



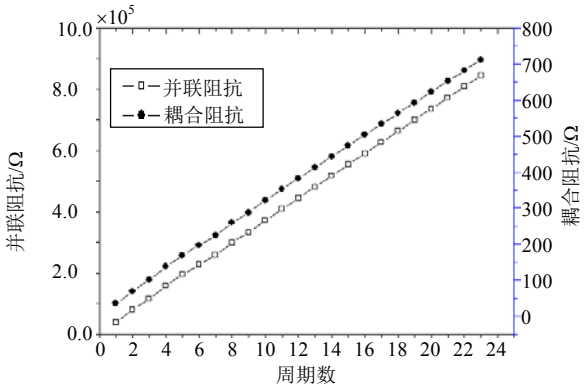
c. 色散曲线

图2 折叠波导慢波结构

在MAGIC中，利用本征模(EIGENMODE)命令，设置2π工作模的频率做参考值，在该频率附近扫描该谐振系统的谐振频率，通过观测间隙电压、腔体损耗、2π工作模的谐振频率f，可计算出品质因数Q和阻抗。在不同腔数的情况下进行模拟，得到各自的频率和Q值、阻抗，如图3所示。随周期数的增加，频率略微变小、Q值逐渐增加，特征阻抗和并联阻抗随谐振腔数基本成线性增长。



a. 频率和Q值随腔数的变化



b. 阻抗随腔数的变化

图3 模拟结果

1.2 输出窗研究

采用盒型窗设计方法[14]计算100～110 GHz的输

出窗，窗片为宝石窗片，在该频段下其相对介电常数ε_r约为9，窗片的厚度按$\lambda/4$来确定，约为0.25 mm。输出窗两端为标准的3 mm矩形波导，截面为2.54 mm×1.27 mm。输出窗的结构示意图如图4所示。ε_r取值8.9～9.3时，模拟结果显示该输出窗的传输特性较好；在96～110 GHz范围内，S_{21}均大于0.97。

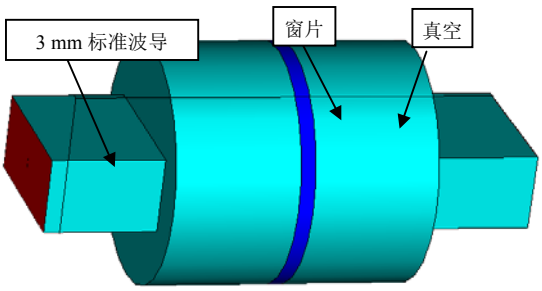


图4　输出窗建模

1.3　起振电流研究

起振电流[15]为：

$$I_0=\frac{V_0}{\frac{R_s}{Q}Q_L(-g_e)_{\max}} \tag{1}$$

式中，起振电流与R_s/Q、Q_L、$(-g_e)_{\max}$成反比、与电子注电压成正比。通过测量谐振系统的反射系数的相位曲线，可以计算出Q_L [16]约为180。当V_0=17 kV、Q_L=180、$(-g_e)_{\max}$为1.4～2.7时，R_s/Q取值如图3所示，计算所得的起振电流如图5所示。由图中可以看出，电流随周期数的增加而减小，当周期数为20时，起振电流约70 mA。

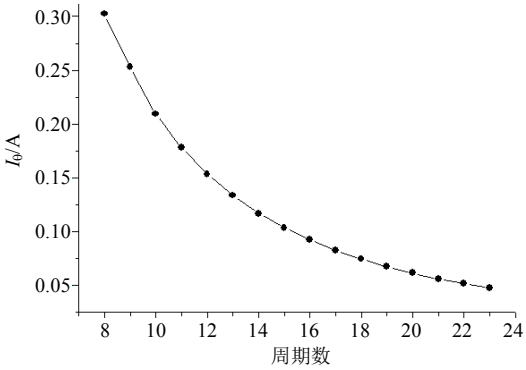
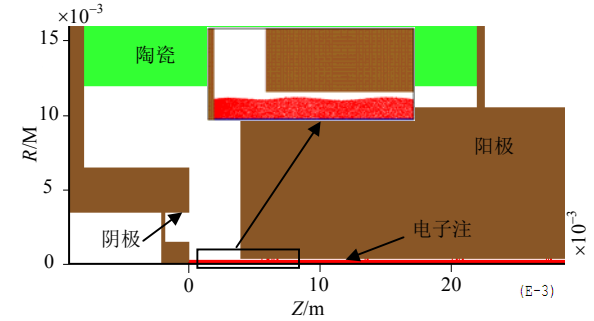


图5　起振电流随腔数的变化

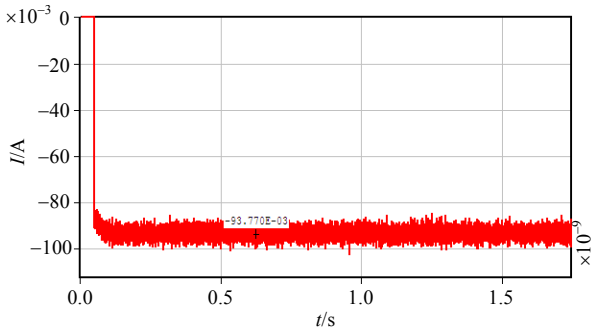
1.4　电子枪的设计和PIC模拟

鉴于当前的热阴极发射水平，在连续工作时最大发射密度约4 A/cm^2，在脉冲工作时可以达到100 A/cm^2[17-18]，因此本文设计了一种平板结构圆柱二极管型电子枪结构，它是非压缩型电子枪，并利用脉冲工作方式，以获得较大的电流密度，同时采用轴向均匀磁场，将电子枪完全浸没在磁场中。

当逸出功ϕ=1.7 eV、阴极发射面直径为0.6 mm、电压U=16 kV、T=1 000 ℃、阴阳极间距D=4 mm、轴向均匀磁场B_z=0.3 T时，通过PIC模拟，电子枪结构、电子注流通性和电子通道中的电流如图6所示。可以明显观测到电子注能顺利通过电子通道，层流性较好而且脉动很小，当磁场增加时脉动将更小。经测量可知，电子枪发射电流约为0.093 A，电流密度约为32.9 A/cm^2，电子枪的导流系数约为0.046 μP，当D=3.5 mm时，电流密度可达50 A/cm^2。



a. 电子注流通情况



b. 电子通道中的电流

图6　平板结构电子枪模拟结果

当工作模为2π时，由同步条件可以计算出电子的电压，选择工作电压在16～17 kV。当电流密度为30 A/cm^2、电子注电压为16.8 kV、纵向均匀磁场为0.3 T、周期数为21时，调制深度达20%以上。当电流密度分别为40 A/cm^{2}和50 A/cm^{2}时，该EIO可以工作的电压宽度约为1 kV，输出功率范围为26～60 W，输出信号的频率约105.26～105.31 GHz。随工作电压的增加，输出功率和信号频率随之增加。

2　实验研究

2.1　冷测研究

本文采用EDM慢走丝对折叠线冷测系统进行加工，整个测试系统包括：16个周期的慢波系统、渐变输出部分(从0.3 mm×1.6 mm渐变到3 mm波段标准矩形波导尺寸1.27 mm×2.54 mm)、直波导部分(3 mm波段标准矩形波导)。加工方案如下：先加工出折叠线包括渐变输出部分，然后在两端盖上盖板

加以封闭并焊接，最后将两端封闭部分采用慢走丝割除，以便与3 mm标准波导连接并测试。该方案的优点是可以保证慢波系统不变形和均匀性，缺点是二次加工时会污染高频系统并难以清除。

本文采用谐振法测量谐振特性和色散特性[13]，通过3 mm网络分析仪测试慢波系统的色散特性，测试结果如图7所示，图中所显示的数据是S_{21}参数，显示屏上的频率范围为90～110 GHz。通过测试结果可知，2π点约为107 GHz。另外，整个系统的传输损耗偏大，约为5 dB，在2π点附近的损耗约为12 dB。损耗偏大的主要原因包括：1) 慢波系统的表面粗糙度不够高，导致了表面损耗较大；2) 二次加工的污染将导致损耗增加；3) 测试时的装配失配将导致损耗增加。

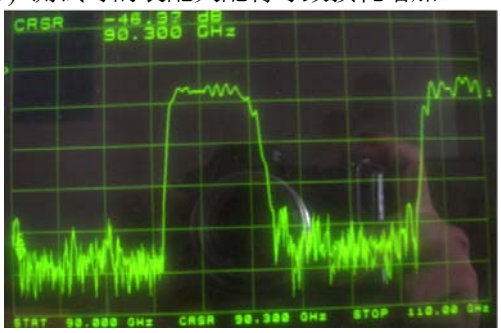


图7 折叠波导慢走丝加工件及冷测结果

2.2 输出窗测试

通过3 mm矢量网络分析仪测试输出窗的传输特性，测试结果如图8所示，图中曲线为S_{21}测量结果，频率范围为95～110 GHz。从图中可知，从100～107 GHz输出窗的衰减范围为1.5～3 dB，衰减较大，但在该频段范围内输出比较平坦。通过测试直波导，其衰减约为1 dB，则输出窗的实际衰减约为0.5～2 dB，与模拟结果有一些出入。另外，测试所得的输出窗的S_{21}曲线与模拟结果也有一些差异，在98.8 GHz和107.8 GHz处存在鬼模。造成这些差异的原因可能包括：实际的窗片厚度偏厚、窗片金属化区域不很均匀、窗片中心和波导中心有偏心、装配引起错位等。

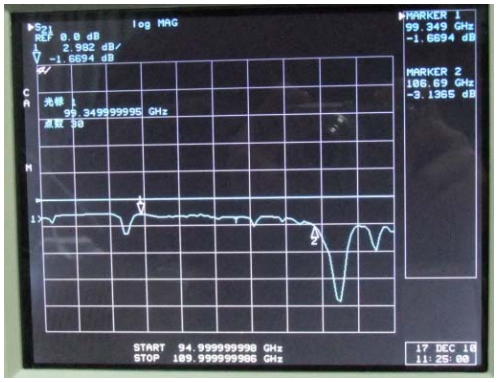


图8 输出窗测试

2.3 电子枪测试

根据模拟研究，本文研制了一个适合于3 mm波段的电子枪，阴极发射面直径为0.6 mm、阴阳极间距D=3.5 mm。采用脉冲工作方式，当磁场为0.3 T、电压为10～20 kV时，改变高压和灯丝电流(I_f)时，测得的发射电流如图9所示。由实验结果可知，当将灯丝电流略微增加时，发射电流有明显的增加；当I_f=0.9 A时，发射电流密度可达100 A/cm^{2}以上，可用于3 mm波段或更高频率的电真空器件。实验中电子流通率可达60%～70%(通过Φ0.8 mm、20 mm长的电子通道)，表明该电子枪的设计是可行的。

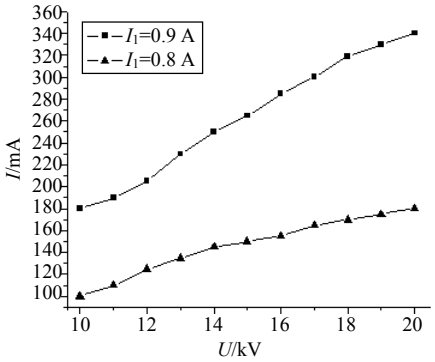


图9 电子枪实验

本文的实验没有测试出较强的输出信号，造成的原因主要有：1) 高频系统在2π点附近的损耗较大(由图7可知)，将导致Q降低和起振电流增加；2) 由于损耗的存在，实验中采用的互作用周期数不是最佳值；3) 由于加工和装配的影响，导致工作频率、耦合阻抗、起振条件发生改变。虽然如此，这次实验为后期的实验开展提供了许多值得借鉴的经验，需要深层次考虑和优化有损情况的互作用条件，包括最佳周期数、起振电流，以及在冷测实验时详细测试高频系统的工作频率和对应的损耗、阻抗，以便确定整管的工作条件。

3 结 论

从频率高于100 GHz的中等功率电真空源出发，选择折叠波导作为EIO的高频慢波系统，便于采用慢走丝技术一次成型加工高频系统。采用两种不同的电磁软件研究了该慢波系统的色散特性，取得了一致的结果。研究了其特征阻抗、Q值、谐振频率、起振电流随周期数(腔数)的变化，为实验研究提供了支持。采用PIC粒子模拟软件研究了电子枪的结构和电子注流通性，以及注波互作用，模拟结果表明该EIO可以工作在一定的电压范围，并存在一定的带宽，输出功率为几十瓦量级。设计并加工了慢波系

统和输出窗系统，并进行了冷测，测试结果与模拟结果比较吻合。研制了平板结构圆柱二极管电子枪，在脉冲工作时可获得很高的电流密度，可达100 A/cm^2。这些理论、模拟和实验研究为今后的EIO整管，特别是太赫兹频段的EIO整管或其他电真空器件的实验研究奠定了基础。不过还存在一些需要改进和完善之处，如尝试其他加工方式、提高表面粗糙度并降低表面损耗、改善电子枪结构和提高电子注流通率，有待进一步的研究。

参 考 文 献

[1] DAVE B, PETER H, MARK H, et al. Extended interaction klystron for submillimeter applications[C]//Conf 30th Infrared and Millimeter Waves and 13th Terahertz Electronics. 2005:84

[2] ALBERT R, PETER H, MARK H, et al. Extended interaction klystron for submillimeter applications[J]. IEEE Int Conf Vacuum Electronics, 2006: 191-195.

[3] ALBERT R, DAVE B, MARK H, et al. Sub-millimeter waves from a compact, low voltage extended interaction klystron[C]//Conf 32th Infrared and Millimeter Waves and 15th Terahertz Electronics, 2007: 892-894.

[4] ZHANG K C, WU Z H, LIU S G. Study of an extended interaction oscillator with a rectangular reentrance coupled-cavity in terahertz region[J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2009, 30(4): 309-318.

[5] ZHANG K C, WU Z H, LIU S G. Study of terahertz extended interaction oscillator[C]//IRMMW-THZ. 2008.

[6] ZHANG K C, WU Z H, LIU S G. Study of a rectangular coupled cavity extended interaction oscillator in sub-terahertz waves[J]. Chin Phys B, 2008, 17(9): 3402- 3406.

[7] ZHANG K C, WU Z H, YAN Y, et al. Design and preliminary experiment of 35 GHz pulsed extended interaction oscillator with folded waveguide[J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2010, 31(5): 543-550.

[8] 吴振华, 张开春, 刘盛纲. 8 mm带状注扩展互作用振荡器研究[J]. 电子科技大学学报, 2010, 39(1): 58-60.
WU Zhen-hua, ZHANG Kai-chun, LIU Sheng-gang. 8 mm sheet-beam extended interaction oscillator[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2010, 39(1): 58-60.

[9] 吴振华, 张开春, 刘盛纲. 0.1 THz折叠波导扩展互作用振荡器辐射源研究[J]. 材料导报, 2007, 21(11): 151-153.
WU Zhen-hua, ZHANG Kai-chun, LIU Sheng-gang. Research on 0.1 THz folded waveguide extended interaction oscillator radiation source[J]. Materials Review, 2007, 21(11): 151-153.

[10] BLLATTAEHARJEE S, KORY C L, LEE W J. Comprehensive simulation of compact thz radiation sources using microfabricated folded waveguide TWTs[J]. IEEE Int Conf Vacuum Electronics, 2002: 26-27.

[11] BLLATTAEHARJEE S, BOOSKE J H, KORY C L, et al. Folded waveguide traveling-wave tube sources for terahertz radiation[J]. IEEE Trans Plasma Science, 2004, 32(3): 1002-1014.

[12] 张兆镗. 微波管高频系统的测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
ZHANG Zhao-tang. Measurement of high frequency system of microwave tube[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982.

[13] 电子管设计手册编辑委员会.大功率速调管设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
Editor of Electronic Tube Design Handbook. Design Handbook of high power klystron[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979.

[14] PREIST D H, LEIDIGH W J. Experiments with high-power CW klystrons using extended interaction catchers[J]. IEEE Trans ED, 1963(3): 201-211.

[15] 张大伟, 冯进军, 李柄炎, 等. 用MAFIA计算外观品质因数Q[J]. 电真空技术, 2005(2): 27-28.
ZHANG Da-wei, FENG Jin-jun, LI Bing-yan, et al. Computation of the external Q value using MAFIA[J]. Vacuum Electronics, 2005(2): 27-28.

[16] WANG Y M, WANG J S, LIU W, et al. Development of high current-density cathodes with scandia-doped tungsten powders[J]. IEEE ED, 2007, 54(5): 1061-1070.

[17] WANG J S, LIU W, LI L L, et al. A study of scandia-doped pressed cathodes[J]. IEEE ED, 2009, 56(5): 799-804.

编 辑 黄 莘