

96 GHz 边廊模 Denisov 辐射器

蔡有志^{1,2}, 薛长江^{2*}, 刘娟³, 屈劲², 余川²

(1. 电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054;

2. 中国工程物理研究院应用电子学研究所 高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621900;

3. 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要:介绍了采用 Denisov 辐射器将 96 GHz 边廊模式信号转换为高斯波束的设计、仿真及测试结果. 基于耦合波理论给出 Denisov 辐射器的设计方法. 根据 96 GHz $TE_{6,2}$ 模式 Denisov 准光模式转换器结构布局的要求, 优化得到 Denisov 辐射器, 输入半径 6.4 mm, 长 52 mm, 辐射器切割边缘电流幅值为汇聚中心点的 10%, 输出准高斯能量转换效率达 96.51%. 由其组成的准光模式转换器冷测输出高斯波束束腰直径 22.4 mm, 矢量转换效率大于 95%.

关键词: Denisov 辐射器; 模式耦合理论; 边廊模式

中图分类号: TN811; TN814 文献标识码: A

Design of 96 GHz whispering-gallery mode Denisov launcher

CAI You-Zhi^{1,2}, XUE Chang-Jiang^{2*}, LIU Juan³, QU Jin², YU Chuan²

(1. School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. Science and Technology on High Power Laboratory, Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;

3. Institute of Electronic Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Design, simulation and test of a Denisov quasi-optical mode converter, which convert a 96 GHz whispering-gallery mode into Gaussian beam, was introduced. Based on the mode coupling theory, the design method of Denisov launcher is shown. To meet the layout requirement for the 96GHz $TE_{6,2}$ Denisov quasi-optical mode convertor, a Denisov launcher was optimized. The configuration of the launcher is 6.4 mm for input radius and 52 mm in length. The amplitude of current at the cut edges of the launcher wall decrease to 10% of the focused current in the center. The energy conversion efficiency of output quasi-Gaussian beam reached 96.51%. The tested output field of Denisov mode converter is obtained. The diameter of beam waist is 22.4 mm. The vector conversion efficiency is greater than 95%.

Key words: Denisov launcher, mode coupling theory, whispering-gallery mode

PACS: 84.40.lk, 52.50.-b

引言

随着回旋管向高功率、高频率的方向发展,其工作腔体模式也越来越高,典型的工作模式有角向对称 TE_{0n} 模、 TE_{mn} 边廊模 (Whispering Gallery Mode)^[1]. 然而高阶腔体模式在自由空间的传输或辐射存在严重的绕射和极化损耗,需进行降阶处理,但传统的波导模式转换器不仅设计难度高,而且一般体积庞大,加工困难,难于应用^[2-3]. 准光模式转换

器采用开敞结构,通过调整辐射波束空间场分布的途径实现模式高效变换,同时结构紧凑,可以有效解决这一技术难题^[4]. 准光模式转换器主要由波导辐射器、准椭圆反射镜及 2~3 级相位修正镜构成,其中,高效率的波导辐射器是准光模式转换器中的核心器件,其性能直接影响整个系统的性能. 波导辐射器最早的是由圆波导直接螺旋切割形成的 Vlasov 辐射器,但其切口边缘场场强高,易击穿,同时切口处衍射和反射大,可见报道的辐射器转换效率小于

收稿日期: 2012-09-30, 修回日期: 2012-12-25

基金项目: 国家科技支撑计划资助课题 (2012BAK06B06)

Foundation item: Supported by the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2012BAK06B06)

作者简介 (Biography): 蔡有志 (1988-), 男, 四川成都人, 在读硕士, 从事毫米波技术研究. E-mail: cyzxi2007@126.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: tiger1978@sohu.com

Received date: 2012-09-30, revised date: 2012-12-25

90%^[5],不能用于高平均功率回旋管.现在俄罗斯、美国、德国、日本等回旋管研制先进国家,一般都采用具有空间周期结构的高效 Denisov 辐射器.如图 1 所示,该辐射器由微扰结构和螺旋切口组成,通过微扰结构将输入的边廊模式转换为场辐射口径上呈准高斯分布状态的混合模式^[6],可大幅降低切口边缘场场强,减小辐射器边沿的绕射损失,同时提高模式转换器的输出波束的高斯含量.

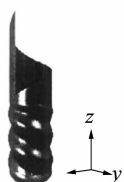


图 1 Denisov 辐射器结构示意图
Fig. 1 Schematic drawing of the Denisov launcher

目前受回旋管研究制约,国内在此方面的研究还处在起步阶段,可见报道的回旋管中采用的主要是 Vlasov 辐射器^[7],为满足我国对更高频率和更高功率微波源需求,开展具有更高效的 Denisov 辐射器研究,具有实际的应用价值.

本文针对高阶边廊模内置 Denisov 辐射器进行了研究.首先给出了 Denisov 辐射器设计理论,然后详细介绍了混合模式组成、微扰结构设计的模式耦合理论.结合 3 mm 波段边廊模回旋管的具体参数,优化得到 96 GHz TE_{6,2} 模回旋管内置 Denisov 辐射器结构,并给出 CST 微波工作室全电磁场仿真结果和 Denisov 模式变换器冷测结果.测试结果表明该模式转换器标量和矢量转换效率分别达到 99.02% 和 95.36%.

1 设计理论

根据准高斯场预聚焦理论模式组成和含量^[6],利用耦合波理论对辐射器微扰段结构进行优化;然后根据上述结构得出实际混合模式组成和含量,并进一步得出微扰段波导壁场分布,据此按照辐射器长度最短化和切口处电流最小化的原则,得到辐射器的切口位置.

1) 纯边廊模式在辐射器中通过半径微扰转换为呈准高斯分布的混合模式,该混合模式组成需满足^[8]:波导纵向:各模式需要有相同的焦散面半径,近似的微扰长度与切口长度;波导角向:各模式需要有相同的焦散面半径,相近的 Bessel 函数零点;各模

式间相对于功率需满足表 1 的要求(针对 $\Delta m = \pi/\theta = 3$).

表 1 TE 模式各模式分布

Table 1 Set of TE modes to generate a Gaussian-like field distribution

		Azimuthal bunching		
Axial bunching	TE _{m-2,n+1} power (1/36)	TE _{m+1,n} power (1/9)	TE _{m+4,n-1} power (1/36)	
	TE _{m-3,n+1} power (1/9)	TE _{m,n} power (4/9)	TE _{m+3,n-1} power (1/9)	
	TE _{m-4,n+1} power (1/36)	TE _{m-1,n} power (1/9)	TE _{m+2,n-1} power (1/36)	

2) 基于耦合波理论的耦合波方程是研究半径渐变微扰模式变换的基本方程.

针对 Denisov 辐射器,其微扰结构的半径为^[9]:

$$R(\phi, z) = R(z) + \alpha z + \sum_{h=1}^2 \delta_h \cos(l_h \phi + \Delta\beta_h z) \quad (1)$$

其中, $\Delta\beta_1 = k_{z_{m-n}} - k_{z_{m+n}}$, $l_1 = \pm 1$

$$\Delta\beta_2 = k_{z_{m-n}} - k_{z_{m \pm \Delta m, n \pm \Delta n}}, l_2 = \pm \Delta m$$

$R(z)$ 是输入圆波导半径, $K_{z_{m,n}}$ 是 TE_{m,n} 模式纵向波数, α 为波导张角;

l_1 取正对应于右旋,取负对应于左旋;

$$\Delta m = \pi/\theta, \theta = \arccos(m/x_{m,n}) \quad (2)$$

δ_h 为微扰的幅度, $x_{m,n}$ 为 m 阶 Bessel 函数导数的第 n 个零点.

Denisov 辐射器腔体壁经过微小扰动,各模式间便会发生能量耦合现象.模式间耦合方程为:

$$\frac{\partial A^k}{\partial z} = -jk_{zk}(z)A^k - j \sum_{l=1}^L C_{k,l}A^l \quad (3)$$

其中, k 和 l 代表相互耦合的 TE 或 TM 模式, A^k 代表 k 模式的幅值, k_{zk} 代表 k 模式的纵向波数, $C_{k,l}$ 为模式间的耦合系数,针对 TE_{m,p} 与 TE_{n,q} 模式间的耦合其表达式为:

$$C_{k,l}(z) = \frac{mn(k_0^2 - \beta_{m,p}\beta_{n,q}) - \left(\frac{X_{m,p} - X_{n,q}}{R(z)}\right) \alpha_{k,l}(z)}{\sqrt{\beta_{m,p}\beta_{n,q}(X_{m,p}^2 - m^2)(X_{n,q}^2 - n^2)} R(\phi, z)} \quad (4)$$

上式中:

$$\alpha_{k,l}(z) = \alpha, l_h = m - n = 0$$

$$\alpha_{k,l}(z) = \delta_h \exp(j\Delta\beta_h z)/2, l_h = m - n$$

$$\alpha_{k,l}(z) = \delta_h \exp(-j\Delta\beta_h z)/2, l_h = n - m$$

2 理论计算

图 2 为准光模式转换器的结构布局图,镜 1 为

准椭圆反射镜, 镜 2 和镜 3 为相位修正镜. 该准光模式转换器工作频率 96 GHz, 半径 6.4 mm 的圆波导中的 $TE_{6,2}$ 模式经 Denisov 辐射器辐射到自由空间, 然后经过 3 镜系统换为距离第二相位修正镜面 220 mm 处, 束腰半径为 112 mm 的高斯光束.

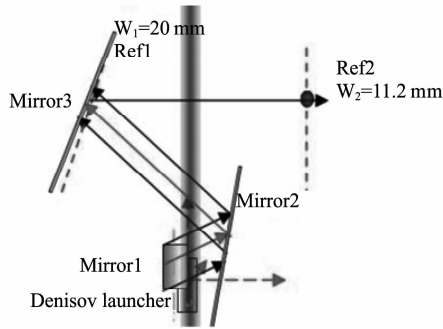


图 2 Denisov 准光模式转换器的结构布局图
Fig. 2 Schematic of the geometric structure of Denisov quasi-optical mode converter

根据上节设计理论, 以表 1 模式含量作为优化目标, 获得 Denisov 辐射器微扰结构参数如图 3 所示. 微扰段内各阶模式沿轴线的含量分布如图 4 所示, 最终模式耦合得到的混合模式含量与理论值基本吻合, 计算中最多考虑了 525 个 TE 模式和 525 个 TM 模式, 以及反向波、相位重匹配等因素^[10].

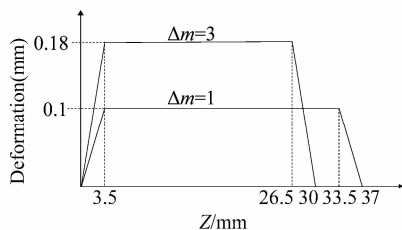


图 3 $TE_{6,2}$ 辐射器微扰结构示意图
Fig. 3 Schematic drawing of the wall deformations of the launcher for the $TE_{6,2}$ mode

图 5 为微扰段波导壁电流随相位和轴向传播距离的分布, 其中纵轴为波导内壁圆周角 ($^\circ$). 由于各模式的纵向波数不等, 壁电流沿轴向距离增加, 输入端均匀分布的壁电流发生多次群聚. 按照辐射器长度最短化和切口处电流最小化的原则, 得到辐射器的螺旋切口位置, 如图 5 中的白线所示, 其电流幅度相对于汇聚中心点为 -16.3 dB. Denisov 辐射器总长 52 mm, 螺旋切口起点距微扰起点为 34 mm, 切口约 18 mm.

图 6、图 7 为 CST 仿真所得辐射器的壁电流分

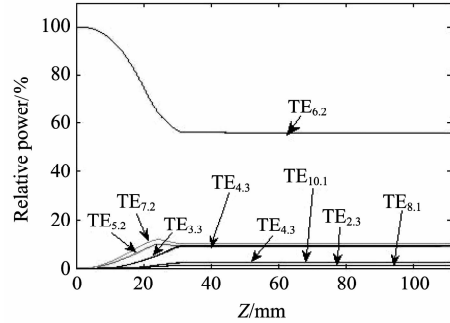


图 4 波导半径渐变微扰时, 各阶模式的相对功率沿轴线的分布
Fig. 4 The distribution of relative power for TE modes along axial

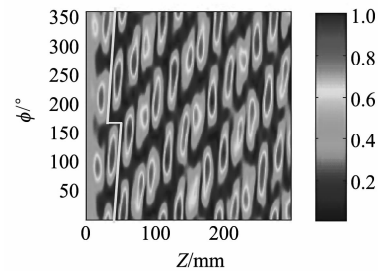


图 5 辐射器展开波导壁电流分布, 切口如图中所示
Fig. 5 Amplitude contours of fields on the unfolded launcher wall. The edges of cuts are indicated

布和辐射场分布. 图 6 中与理论设计相同位置获得了最佳壁电流汇聚, 辐射器切割边缘电流幅值为汇聚中心点的 10%. 在直切口存在最大约 2.5 A/m 的电流分布, 这主要是由于汇聚不规则, 同时考虑到出射准高斯波束在切口的边缘效应. 如图 7(a) 为与辐射器轴线间距为 11.9 mm 处电场分布, 其辐射波束与辐射器轴线有 42° 的夹角, 其分布有波纹, 图 7(b) 为修正后与出射轴垂直的准高斯波束分布, 束腰半径为 4.05 mm, 高斯含量超过 93%, 能量转换效率为 96.51%, 优于可见报道的 Vlasov 辐射器.

3 测试结果

以 3 mm $TE_{6,2}$ Denisov 辐射器设计的 Denisov 准光模式转换器, 其实物 and 实际测试束斑分布如图 8 所示. 图 8(b) 中, 圆圈为设计的束腰大小, 曲线为按照幅度分布搜索的束腰位置, 图 8(c) 中红线和蓝线分别为通过束斑中点的横、纵两个方向剖面相位分布, 绿色虚线为理想分布情况. 可见其幅度分布与理想分布符合很好, 相位偏差在绝大部分区域不超过 5° . 该束斑标量高斯含量为 99.02%, 矢量高斯含量

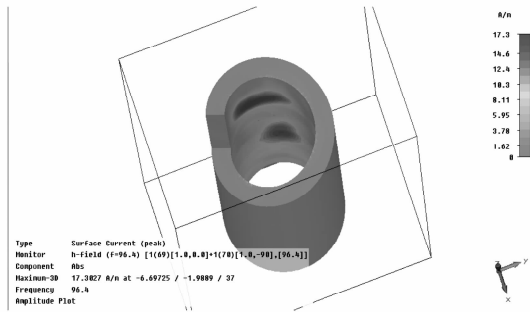
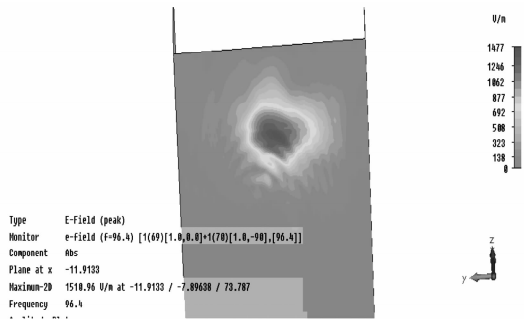
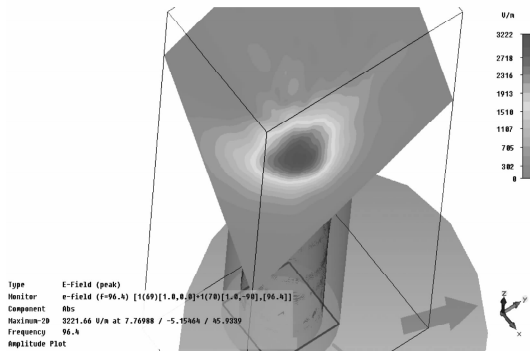


图 6 CST 计算得到 Denisov 辐射器壁电流分布
Fig. 6 Amplitude contours of fields on the Denisov launcher wall calculated by CST



(a) parallel to the axis



(b) Vertical to the direction of propagation

图 7 Denisov 辐射场功率分布
Fig. 7 Power distribution of the radiated field

为 95.36%, 该结果好于 Vlasov 准光模式转换器测试结果. 同时束斑区域外无特定分布, 为噪声分布, 说明其能量利用效率较 Vlasov 准光模式转换器好.

4 结论

给出了半径微扰 Denisov 辐射器设计方法并对 3 mm 边廊模 Denisov 辐射器结构进行了理论设计, 经三维全电磁场仿真软件 CST 仿真验证, 其输出准高斯能量转换效率达到 96.51%, 据此获得的 Denisov 准光模式转换器测试束斑幅度分布呈现明显汇

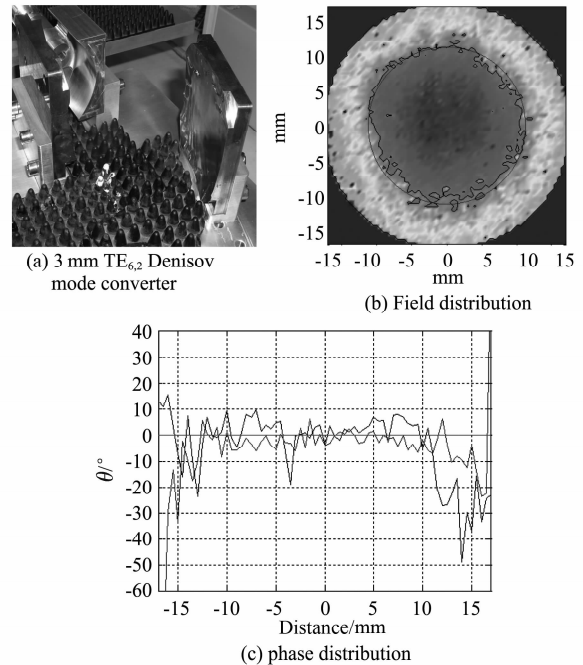


图 8 3mm TE_{6,2} Denisov 模式转换器及测试场分布
Fig. 8 3mm TE_{6,2} Denisov mode converter and field distribution by cold test

聚, 其冷测结果好于 Vlasov 模式变换器.

References

- [1] Petelin M I. One Century of Cyclotron Radiation [J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1999, **27**(2): 291-302.
- [2] Kartikeyan M V, Borie E, Drumm O, et al. Design of a 42 GHz 200 kW Gyrotron Operating at the Second Harmonic [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*. 2004, **52**(2): 686-692.
- [3] Kartikeyan M V, Borie E, Thumm M. Gyrotrons: *High power microwave and millimeter wave technology* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 1-5.
- [4] Jin Jianbo. Quasi-optical mode converter for a coaxial cavity gyrotron [D]. ChengDu: Southwest Jiaotong university, 2005. (金践波. 同轴腔回旋管准光学模式变换器 [D]. 成都: 西南交通大学, 2005).
- [5] Sabchevski S, Zhelyazkov I, Benova E, et al. Quasi-Optical Converters for High-Power Gyrotrons; a Brief Review of Physical Models, Numerical Methods and Computer codes [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2006, **44**: 102-109.
- [6] Denisov G G, Kuftin A N, Malygin V I, et al. 110 GHz gyrotron with built-in high-efficiency converter [J]. *International Journal of Electronics*, 1992, **72**(5): 1079-1091.
- [7] Wang Bin, Du Chaohai, Liu Pukun, et al. Study and design of a quasi-optical mode converter for W-band whispering-gallery mode gyrotron. [J] *ACTA PHYSICA SINICA*, (王斌, 杜朝海, 刘濮鲲, 等. w 波段边廊模回旋管准光模式转换器的研究与设计. *物理学报*), 2010, **59**(4): 2513-2517.
- [8] Neilson J. M. Optimal Synthesis of Quasi-optical Launchers (下转第 332 页)

表 3 使用预处理模型前后,光谱数据在不同温度条件与参照温度(25℃)比对的平均偏差(900 nm ~ 2 100 nm)

Table 3 Average deviation between test data under different temperature condition and 25℃ from 900 nm to 2 100 nm, before and after data pre-processing

测试环境温度	处理前平均偏差	处理后平均偏差
-19℃	11.71%	3.89%
-4℃	7.43%	3.95%
6℃	6.31%	4.15%
16℃	5.13%	3.95%
45℃	11.23%	4.60%
55℃	22.66%	5.99%

4 结论

根据 AOTF 器件的分光原理,以及射频功放与 InGaAs 探测器的物理特性,本文提出了用于深空探测 AOTF 短波红外光谱仪温度影响的数据预处理模型. 经试验验证,使用预处理模型后,低温与室温数据的平均偏差从 11.71% 降低至 3.89%,同时高温与室温数据的平均偏差从 22.66% 降低至 5.99%,环境温度对光谱仪性能的影响得到了有效抑制,为其在月表探测宽温度范围应用提供依据,并为该类光谱仪器在深空及其数据应用提供参考. 在后续工作中,将对 AOTF 器件在宽温度范围下的特性进行仿真,通过更为详尽的数据,进一步完善 AOTF 短波红外光谱仪的温度校正方法.

References

[1] Tong Qing-xi, Zhang Bing, Zheng Lan-fen. *Hyperspectral remote sensing* [M]. Beijing: Higher Education Press (童庆禧,张兵,郑兰芬编著. 高光谱遥感——原理、技术与

应用. 高等教育出版社), 2006: 1-2.

- [2] Wang Jian-yu, Shu Rong, Liu Yin-nian, et al. *Introduction of spectral imaging technology* [M]. Beijing: Science Press (王建宇,舒荣,刘银年,等编著. 成像光谱技术导论. 科学出版社), 2011: 1-3, 105-107.
- [3] Gupta N, Acousto-optic tunable filters for infrared imaging [C]. Proc. of SPIE Vol. 5953, 2005.
- [4] HE Zhi-ping, SHU Rong, WANG Jian-yu. Imaging Spectrometer based on AOTF and its prospects in deep-space exploration application [C]. Proc. of SPIE Vol. 8196, 2011.
- [5] XU Rui, HE Zhi-ping, ZHANG Hu, et al. Calibration of Imaging Spectrometer Based on Acousto-Optic Tunable Filter (AOTF) [C]. Proc. of SPIE Vol. 8528, 2012.
- [6] YU Kuan-xin, Ding Xiao-hong, Pang Zhao-guang. *Principle and devices of Acousto-optic* [M]. Beijing: Science Press (俞宽新,丁晓红,庞兆广编著. 声光原理与声光器件. 科学出版社), 2011: 241-244.
- [7] XU Rui, HE Zhi-ping, ZHANG Ze-hong, et al. The research on characteristics of acousto-optic tunable filter by space radiation experiment [C]. Proc. of SPIE Vol. 8196, 2011.
- [8] Behzad Razavi. *Design of Analog CMOS Integrated Circuits* [M]. The McGraw-Hill Companies, Inc. 2001.
- [9] FENG Shi-wei, WANG Cheng-dong, YANG Ji, et al. Study on the photo responsivity of InP/InGaAs detector with the wavelengths [J]. *Semiconductor Optoelectronics* (冯士维,王承德,杨集,等. InP/InGaAs 探测器光响应度与波长关系的研究. 半导体器件), 2007, 28(4): 464-470.
- [10] ZHANG Yong-Gang, GU Yi, ZHU Cheng, et al. Fabrication of short wavelength infrared InGaAs/InP photovoltaic detector series [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张永刚,顾溢,朱城,等. 短波红外 InGaAs/InP 光伏探测器系列的研制. 红外与毫米波学报), 2006, 25(1): 6-9.
- [11] Ruud W M. Hoogeveen, Ronald J. van der A, Albert P H. Goede. Extended wavelength InGaAs infrared ($1.0 \pm 2.4 \mu\text{m}$) detector arrays on SCIAMACHY for space-based spectrometry of the Earth atmosphere [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2001, 42: 1-16.

(上接 271 页)

for High-Power Gyrotron. [J] *IEEE Trans. on Plasma Sci*, 2006, 34(3): 635-641.

[9] Goldenberg A L, Litvak A G. Recent Progress of high power millimeter wavelenth gyro-devices [J]. *Physics of Plasmas*,

1995, 2: 2562.

- [10] Thumm M K, Kasperek W. Passive high-power microwave components [J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 2002, 30(3): 755-786.