

文章编号: 0254-6086(2010)04-0339-06

HL-2A装置ECRH系统的新天线设计

王超, 周俊, 曾建尔, 陈罡宇, 饶军

(核工业西南物理研究院, 成都 610041)

摘要: 应用准光学原理设计了 HL-2A 装置电子回旋共振加热(ECRH)系统新的集束天线, 该天线能使4束 68GHz/500kW/1s 电子回旋波通过椭球镜聚焦和平面镜的反射, 从一个直径350mm 装置窗口同时注入托卡马克, 对等离子体实现加热。根据基模高斯束的传播原理得出, 在装置环向横截面中心处单条波束的功率密度为 $158\text{MW} \cdot \text{m}^{-2}$, 功率密度降为中心密度的 $1/e^2$ 的半径为 31.7mm, 微波束经过镜面聚焦和反射产生的欧姆损失和衍射损失分别为 0.27% 和 0.64%。利用有限元分析软件 Ansys 对镜面进行热分析得到, 在 1s 脉冲载荷下最大镜面温升仅为 0.47°C, 镜面可以自然冷却。

关键词: ECRH; 天线; 高斯束; HL-2A 装置

中图分类号: O532.23

文献标识码: A

1 引言

在受控核聚变领域, ECRH 系统受到广泛应用, 如对电子的局域加热、控制电子温度和等离子体电流等重要参数的剖面分布、抑制等离子体磁流体动力学不稳定性、改善等离子体约束等^[1]。ECRH 系统在装置如 JT-60U^[2]、Tore Supra^[3]、TEXTOR^[4] 上都得到了成功应用, 在正在规划建设的 ITER 装置, ECRH 系统也将作为主要的加热手段之一^[5]。

HL-2A 装置是我国先进的具有偏滤器位型的托卡马克装置, 等离子体大半径为 165cm, 等离子体小半径为 40cm, 环向磁场强度 $B_r=2.7\text{T}$, 电子温度 $T_e=5\text{keV}$, 等离子体电流 $I_p=450\text{kA}$, 平均电子密度 $n_e=(1\sim 8)\times 10^{13}\text{cm}^{-3}$ 。2006 年该装置建成了四套 ECRH 系统, 分别从两个直径 350mm 装置窗口将微波束注入等离子体。

近年来利用四套 ECRH 系统进行了一系列物理实验, 在 2006 年物理实验中将电子温度加热到了 5keV, 在 2009 年实验中, 与中性束加热系统一起实现了 H-mode 放电, 对于一些 MHD 不稳定性也进行了深入的研究。

为了进一步提升等离子体温度, 开展高参数下的物理实验研究, 需要提高 ECRH 系统的注入功率, 2009 年实验计划增加两套 68GHz/500kW/1s ECRH 系

统。HL-2A 装置的窗口数量有限, 只能采取从现有 ECRH 天线增加注入功率的方式实现增加总的注入功率的目标, 为了能在同一个窗口同时注入四条束线, 需要设计新的发射天线。

国际上的大型托卡马克装置上的 ECRH 天线设计形式上虽然各有不同, 但所具有的基本功能可归结如下:

a. 由于单支回旋管的输出功率限制以及托卡马克装置窗口数量有限, 为了大幅度的加热等离子体, 通常采用在同一托卡马克窗口注入多条微波束的方式, Tore-supra ECRH 系统从一个窗口可以同时注入 6 条束线, ITER 设计的赤道面天线从一个窗口可以注入 24 条束线。

b. 具有转动机构, 使得微波束线的发射方向能够得到改变, 达到诸如电流驱动和抑制 NTM 的目的, ITER 的水平天线在环向的转动范围是 $20^\circ \sim 45^\circ$, 上部天线的极向转动范围是 $-53^\circ \sim -62^\circ$ 。

c. 都采用连续波(CW)运行, 天线中的镜面需要设计冷却回路带走吸收的热量。

2 天线结构

为了满足 HL-2A 装置加热等离子体的需要, 天线设计的基本要求包括: a. 能够同时容纳四条微

收稿日期: 2009-12-24; 修订日期: 2010-06-08

作者简介: 王超(1985-), 男, 四川自贡人, 硕士, 研究方向: 波加热技术。

波束线; b. 微波在天线中的功率损耗小, 避免过多的微波功率沉积在天线上; c. 四条微波束中心线都能够穿过装置环向横截面中心; d. 微波反射后的束腰尽量靠近装置环向横截面中心; e. 设计天线应该兼顾传输线的布置。

用于微波注入的装置窗口直径只有 350mm, 环向场线圈、平衡场线圈的位置又限制了 HL-2A 装置窗口周围的空间大小, 再综合设计的基本要求, 天线设计提供了四种方案, 如图 1 所示。

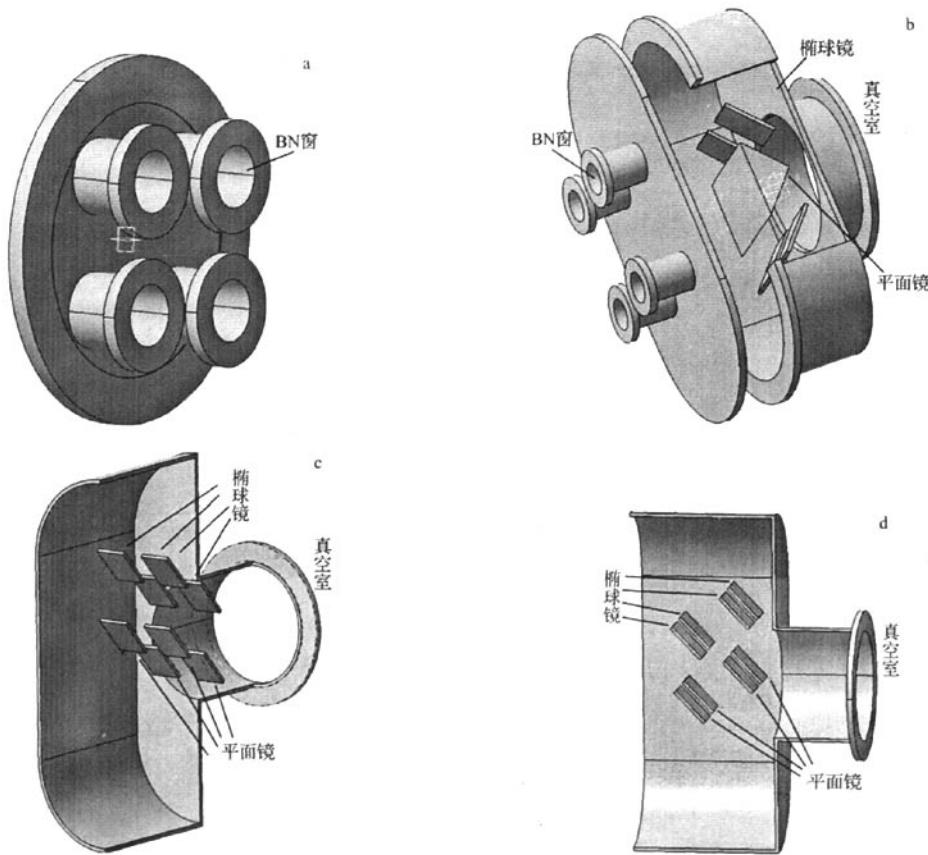


图 1 4 种天线设计方案

方案 a: 不使用准光学器件, 将四条微波束线通过 BN 窗直接注入等离子体, 这种方案简单可靠, 没有衍射损失和欧姆损失, 但是其不能使四条束线的中心线同时穿过装置环向横截面中心, 对应的传输线布置如图 2a 所示。由于回旋管高度的限制, 每条传输线都需要利用换向波导改变传输线的高度, 总共需要 11 个换向波导, 传输线结构复杂, 传输损失大, 而且 BN 陶瓷窗口没有镜子遮挡, 在

放电和壁处理期间, 容易受到污染。

方案 b: 能保证四条束线的中心线穿过装置环向横截面中心, 且垂直入射, 传输线布置如图 2b 所示。只有两条传输线需要利用换向波导改变传输线高度, 共需要 7 个换向波导, 放电和壁处理过程中镜子对 BN 窗口还具有一定的遮挡作用, 但天线结构相对复杂, 且会出现衍射损失和欧姆损失。

方案 c: 四条束线在装置赤道面以上进入天线,

其中两条束线从赤道面注入, 另外两条也可以通过调整平面镜倾斜角度使得微波束中心线穿过装置环向横截面中心, 会出现欧姆损失和衍射损失, 天线结构较复杂。

方案 d: 四条束线在赤道面上以上进入天线, 两条束线从赤道面入射, 另外两条也可以通过调整平面镜倾斜角度使得微波束中心线穿过装置环向横截面中心, 但波束传输会受到镜面一定的干扰, 会有欧姆损失和衍射损失, 而且机械安装较为复杂。

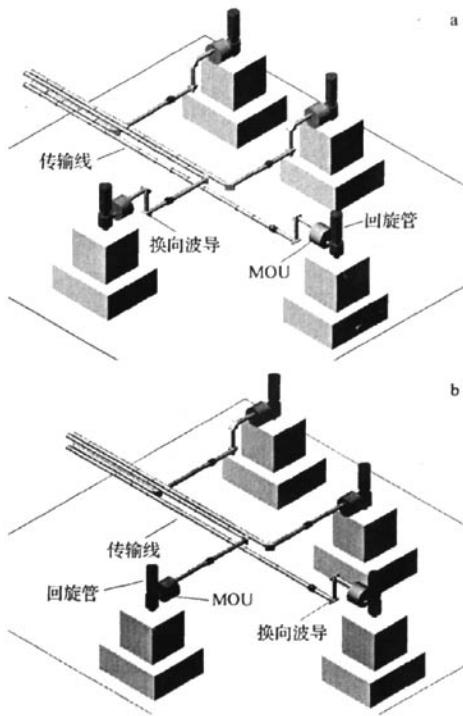


图 2 传输线分布图

天线设计最终选择了方案 b, 该方案除了能满足天线设计的基本要求外, 还具有以下优点: 采用对称结构, 方便设计与安装; 采用椭球镜和平面镜组合的方式可以控制微波的束腰大小和位置; 微波束在天线中不会相交; 经平面镜反射后的微波束与赤道面的夹角较小, 有利于等离子体加热。天线设计结构如图 3 所示, 四条微波束线分布在两个平面, 束线中心分别从 HL-2A 装置赤道面上下 150mm 处通过 BN 窗进入发射天线, 经过椭球镜的聚焦和平

面镜的反射进入真空室, 其中椭球镜镜面与水平面成 45° 夹角, 为了使四条束线的中心线能两两相交到装置环向横截面中心, 平面镜与水平面的夹角为 46.8°。

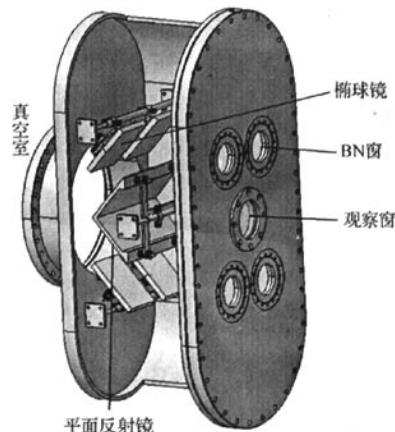


图 3 天线结构

3 椭球镜设计

3.1 基模高斯束的传播

电子回旋波从波导口出来后在自由空间中耦合成基模高斯束, 沿 z 轴方向传播的基模高斯束在自由空间中的功率密度分布为^[3]:

$$I(r, z) = \frac{P}{\pi R^2(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{R(z)^2}\right) \quad (1)$$

$$R(z) = R_w \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{2\pi R_w^2}\right)^2} \quad (2)$$

$$R_w = 0.42 \times R_0 \quad (3)$$

其中, P 为波束的总功率; λ 为微波波长; $R(z)$ 为沿着波的传播路径; 距离为 z 处的功率密度降为中心密度的 $1/e^2$ 的半径; R_w 为波导口处的波束功率密度降为中心密度的 $1/e^2$ 的半径; R_0 为波导半径。从直径为 80mm 的波导口耦合出来的 68GHz/500kW 的基模高斯束在波导口处, 波束功率密度降为中心密度的 $1/e^2$ 的半径为 $R_w = 0.42 \times R_0 = 16.8$ mm, 其在自由空间中的传播如图 4 所示。从图中可看出, 波束在自由空间中具有发散的特性。

3.2 椭球镜设计

为了增大微波束在沉积区域的功率密度, 需要

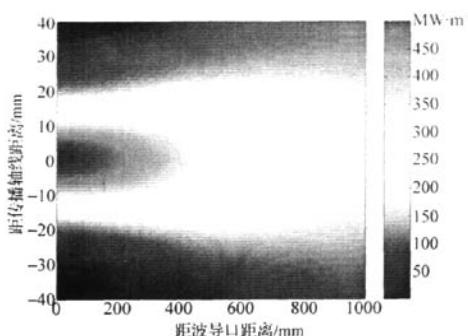


图4 基模高斯束在自由空间中的传播

利用聚焦镜使发散的微波束聚焦。对于正入射的高斯束，通常用球面反射镜来聚焦，焦距 F 为球面半径的 $1/2$ ，当束腰半径为 ω_0 的高斯束入射到距束腰的距离为 l 的球面反射镜时，反射后的高斯束束腰半径 ω'_0 和束腰到球面反射镜的距离 l' 分别为：

$$l' = F + \frac{(l-F)F^2}{(l-F)^2 + \left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}\right)^2} \quad (4)$$

$$\omega'_0 = \frac{F^2\omega_0^2}{(F-l)^2 + \left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}\right)^2} \quad (5)$$

当高斯束倾斜入射时，为了使反射后的波束仍保持高斯束的特性，必须用椭球反射镜来聚焦，其聚光特性仍可由式(4)、(5)表示。椭球镜的设计主要有两种方法，即离轴椭球法^[6]、准光学法^[7]等。此天线中的椭球镜的设计选用的是准光学法。当高斯束的入射角为 θ 时，椭球面方程为：

$$\frac{y^2}{b^2} + \frac{x^2 + z^2 + 2z(R-h_0)}{a^2} = 1 \quad (6)$$

$$h_0 = R - \sqrt{R^2 - a^2}$$

$$b = a/\cos\theta \quad (7)$$

$$R = 2F \cos\theta$$

其中， a 、 b 分别为椭球镜椭圆剖面的短半轴和长半轴； F 为椭球镜的焦距； R 为椭球镜的椭球面的短半轴； h_0 为椭球镜剖面离椭球镜顶点的距离。天线中的高斯束的入射角 θ 取 45° ，由于天线空间限制，选择 $a=55\text{mm}$ ， $b=a/\cos\theta=78\text{ mm}$ ，椭球镜与装置环向横截面中心光学距离为 900mm ， l 、 F 分别选择为 270mm 和 327mm 。根据式(4)~(7)得出的高斯

束与椭球面的特征参数列于表1中， ω 为高斯束传播到装置环向横截面中心时波束功率密度降为中心功率密度的 $1/e^2$ 的半径。由式(3)得出波束在直径为 80mm 的波导口处，功率密度降为中心功率密度的 $1/e^2$ 的半径为 16.8mm ，再由式(1)~(5)得出，波束经过椭球镜聚光和平面镜反射，沿传播轴线功率密度降为中心功率密度的 $1/e$ 的半径的变化如图5所示。在装置环向横截面中心处，单条波束的功率密度为 $158\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$ ，波束功率密度降为中心值的 $1/e^2$ 的半径为 31.7mm ，此处的功率密度分布如图6所示。从表1和图5、6得出该设计能满足天线设计的基本要求。

表1 高斯束与椭球镜的参数 单位：mm

a, b	F, R	l, l'	ω_0, ω'_0	h_0, ω
55, 78	327, 462	270, 289	23.6, 19	3.3, 31.7

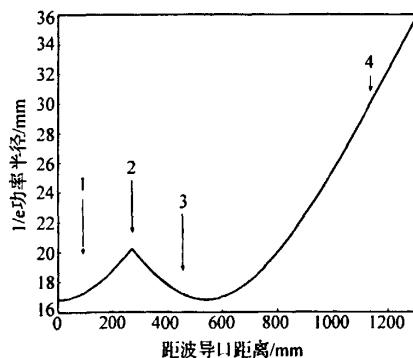
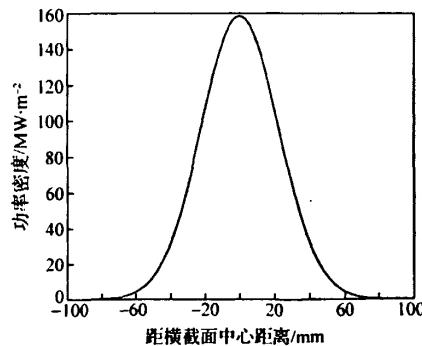
图5 波传播过程中功率密度降为中心值的 $1/e^2$ 的半径的变化情况

图6 单条波束传播到装置环向横截面中心处的功率分布

4 功率损耗

波束辐射到镜面会有一部分功率损耗, 其中驱动效应会带来欧姆损失, 镜面的大小有限会带来衍射损失, 欧姆损失为^[5]:

$$f_o = 4s_{\text{eff}} \sqrt{\frac{\pi\rho}{\lambda Z_0}} / \cos(\theta/2) \approx 0.27\% \quad (8)$$

式中, $s_{\text{eff}}=2$ 为镜面的有效电阻率增强因子; $\rho=2.83 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 为电阻率; $Z_0=377\Omega$ 为自由空间波阻抗; $\theta=90^\circ$ 为微波方向变换角。根据椭球镜的设计参数以及波束辐射到镜面上的功率密度分布, 在镜子表面对功率密度积分, 就可得出镜面反射的功率, 用总功率减去镜面反射的功率即为衍射功率, 不同镜面尺寸造成的衍射损失如图 7 所示。由于发射装置的空间限制, 选择椭球镜的短半轴和长半轴分别为 $a=55\text{mm}$ 、 $b=78\text{mm}$ 时, 衍射损失为 0.64%, 因此单个镜面造成的微波能量损失都低于 1%。

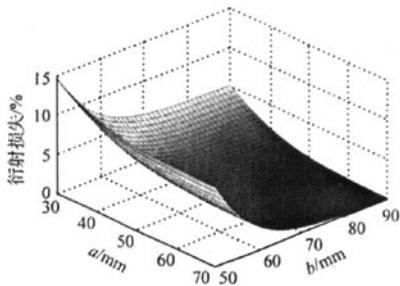


图 7 不同镜面尺寸产生的衍射损失

尽管镜面的反射率非常高, 镜子表面也能吸收微波的一部分能量, 在未达到热平衡以前, 镜面温度会随着脉冲时间的增加而增加。利用有限元分析软件 Ansys 模拟镜面吸收微波后的温度变化情况, 该软件的热分析功能基于能量守恒原理的热平衡方程:

$$\begin{aligned} \rho c \frac{\partial \phi}{\partial t} - k \nabla^2 \phi - \rho Q &= 0 \\ \nabla^2 &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (9)$$

式中, ϕ 为温度函数; ρ 为材料密度; c 为材料比热; k 为导热系数; Q 为物体内部的热源密度。利用有限元法计算出各节点的温度^[8]。本文利用平板

模型^[9]对微波照射到镜面上产生的热效应进行了模拟, 选用 4 节点 4 边形单元 PLANE55, 材料为 LY12, 其材料密度为 $2700\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 比热为 $880\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$, 热传导系数为 $204\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$, 对模型上施加两个对称的高斯分布的热源, 载荷时间为 1s, 经过计算, 镜面整体的温度分布如图 8 所示。从图 8 可以看出, 即便是功率密度最大处镜面温度的增量也很小, 仅为 0.47°C , 放电间隔时间有 8min, 镜面上沉积的热量有足够的时问耗散掉, 只需自然冷却。

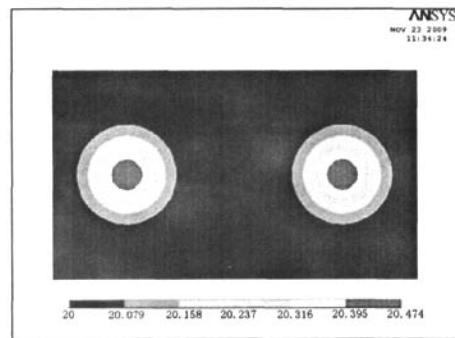


图 8 镜面上温度整体分布

5 总结

为了满足 HL-2A 装置实验提出的关于提高等离子体温度, 探索高参数下实现等离子体高约束状态的条件的要求, 该天线将应用于 HL-2A 装置 2009 年度下半年实验, 四条 68GHz/500kW/1s 微波束线将通过该天线同时注入等离子体。四束微波进入天线后, 经过椭球镜的聚焦和平面镜的反射, 能够两两相交于装置环向横截面的中心。在装置环向横截面中心, 单条束线中心功率密度为 $158\text{MW} \cdot \text{m}^{-2}$, 功率密度降为中心值的 $1/e$ 的半径为 31.7mm。在天线中, 每条束线的功率损耗都低于 1%。根据 ECRH 系统的脉冲运行条件, 通过 Ansys 软件对镜面进行热分析得到, 镜面最大温升仅为 0.47°C , 只需自然冷却。本次天线设计由于窗口大小的限制以及回旋管的单次运行时间只有 1s, 并没有考虑转动机构和对镜面进行冷却。在未来 HL-2M 装置物理实验中, 为了达到实现电流驱动, 控制等离子体电流剖面分布, 抑制不稳定性目的, 需要使反射镜在环向和极向都具有转动的能力, 改进本天线, 使平面镜具有转

动的功能即可满足要求,但具体的转动角度需要根据装置窗口的大小才能确定,对于今后的连续波运行,还需要设计冷却回路才能保证镜面的安全。

感谢陈文光博士和陆志鸿研究员以及104室全体人员在文章写作过程中给予的帮助和指导。

参考文献:

- [1] Manfred Thumm. MW gyrotron development for fusion plasma applications [J]. Plasma Phys. Contr. Fusion, 2003, 45: A143.
- [2] Ikeda Y, Kasugai A, Takahashi K, et al. Initial results of electron cyclotron range of frequency (ECRF) operation and experiments in JT-60U [J]. Fusion Engineering and Design, 2001, 53: 351.
- [3] Lennholm M. The ECRH/ECCD system on tore supra, a major step towards continuous operation [J]. Nucl. Fusion, 2003, 43: 1458.
- [4] Scholten J. Development of the 140 GHz gyrotron and its subsystems for ECH and ECCD in TEXTOR [J]. Fusion Engineering and Design, 2005, 74: 211.
- [5] ITER Detailed Design Document 5.2. Electron cyclotron heating and current drive system [R]. ITER Org., 2001.
- [6] Murphy J A. Distortion of a simple gaussian beam on reflection from off-axis ellipsoidal mirrors [J]. Infrared Millimeter Waves, 1987, 8: 1165.
- [7] 薛思文, 刘光钰, 刘永, 等. HL-1准光学ECRH传输系统的设计与大功率测量 [J]. 核聚变与等离子体物理, 1994, 14(2): 28.
- [8] 张洪信, 赵清海. ANSYS有限元分析完全自学手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [9] Bruschi A. ECRH antenna at 140GHz on FTU tokamak [J]. Fusion Engineering and Design, 2001, 53: 431.

Design of the new antenna of ECRH system on HL-2A tokamak

WANG Chao, ZHOU Jun, ZENG Jian-er, CHENG Gang-yu, RAO Jun

(Southwest Institute of Physics, Chengdu 610041)

Abstract: Using the principle of quasi-optic, the new antenna of the electron cyclotron resonant heating(ECRH) system on the tokamak HL-2A has been designed. After being focused by the elliptical mirror and reflected by the plane mirror, $4 \times 68\text{GHz}/500\text{kW/1s}$ electron cyclotron wave beams would be injected into the tokamak from one $\varnothing 350\text{mm}$ port to accomplish heating to the plasma. Based on the propagating theory of the fundamental Gaussian beam, it is gotten that at the centre of the cross section of the tokamak, the power density of each beam is $158\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$, and the power density radius, which means that the power density is reduced by a factor $1/e^2$ compared to the power density at the centre of the beam, is 31.7mm. On the mirror, due to the focusing and reflecting, the ohmic loss and diffraction loss of the microwave beams are 0.27% and 0.64%, respectively. By the finite element analysis software ANSYS, some thermal analysis of the mirror have been done. The result shows that the highest temperature increase would be only 0.47°C under 1s pulse load, so there is no need of any cooling.

Key words: ECRH; Antenna; Gaussian beam; HL-2A tokamak

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>