

文章编号:1001-9014(2005)02-0265-04

内壁反射式远红外激光干涉仪的设计和应用

周艳, 邓中朝, 易江, 唐益武, 刘泽田,
施佩兰, 潘丽, 罗萃文, 陈燎原, 王思耀

(核工业西南物理研究院, 四川 成都 610041)

摘要:介绍用于HL-2A偏滤器托卡马克装置的远红外(FIR)激光干涉仪及其在等离子体电子密度测量中的应用. 一种新的软件比较相位技术被用来计算相移. 自恰式光路设计方法用于内壁挂镜光路的设计. 防污染装置延长了真空中反射镜的使用寿命. 电子密度测量结果表明偏滤器位形的等离子体放电减小了等离子体与第一壁的相互作用, 等离子体密度比孔栏放电位形的略为偏低.

关键词:电子密度; 反射式干涉仪; 相移软件比较; 偏滤器

中图分类号:0760L; 5225L; 5270K **文献标识码:**A

DESIGN AND APPLICATION OF REFLECTING FIR INTERFEROMETER

ZHOU Yan, DENG Zhong-Chao, YI Jiang, TANG Yi-Wu, LIU Zhe-Tian,
SHI Pei-Lan, PAN Li, LOU Cui-Wen, CHEN Liao-Yuan, WANG En-Yao

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, Chian)

Abstract: A reflecting FIR interferometer and measurement of electronic density in HL-2A tokamak were presented in this paper. The phase shift was calculated by a new kind of computer software compare technique. The way of self-fitting optical design was used to design the reflector in the chamber. To prevent the first mirror polluted, a special buffer was mount in the vacuum chamber and make the mirror work time longer. The results of measurement electron density show that the interaction between plasma and first wall is lower in diverter discharge than that in limit discharge.

Key words: electron density; reflecting interferometer; phase shift software compare; diverter

引言

在高温磁约束等离子体诊断研究中, 等离子体电子密度是最基本也是最为重要的等离子体参量. 世界上大中型的磁约束装置都采用了不同波长的远红外激光干涉仪来进行电子密度的探测. 如JET采用DCN激光干涉仪, RTP采用CH₃OH激光干涉仪^[1], TEXTOR采用HCN激光干涉仪相继获得了电子密度值和分布曲线, 并对诸多物理实验中的密度行为进行了深入的研究, 取得了令人鼓舞的结果.

HL-2A是中国第一个封闭式偏滤器位形的托卡马克装置^[2]. 偏滤器概念在聚变装置中的引入, 增加了真空中粒子流和能量流的主动控制的可能

性, 使杂质源与主等离子体分隔开, 从而提高了聚变效率. 通常托卡马克等离子体电子密度测量采用的是垂直弦的光路布局^[3], 干涉仪的所有光学元件都可以布置在真空室的外面. HL-2A装置偏滤器隔板挡住了光线的上下通道, 干涉测量只能采取横向弦的光路布置, 这意味着必须将一部分光学元件放置于等离子体放电的真空室中. 本文将介绍横向内壁反射式迈克尔逊型远红外激光干涉仪的研制及其在HL-2A装置实验中的应用.

1 测量原理

在一个均匀的磁等离子体中, 当离子的运动和电子的热速度可以忽略的情况下, 等离子体的折射

收稿日期: 2004-11-03, 修回日期: 2005-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10235010)

作者简介: 周艳(1963-), 女, 浙江永康人, 研究员, 博士, 主要从事激光等离子体诊断和等离子体物理研究.

Received date: 2004-11-03, revised date: 2005-01-06

率 N 可以满足 Appleton-Hartree 方程^[4], 并且当探测波的频率 ω 大于等离子体频率 $\omega_p = (n_e e^2 / \epsilon_0 m_e)^{1/2}$ 和电子的回旋频率 $\omega_{ce} = eB/m_e$ 时, 折射率 N 可以近似地表达为

$$N^2 = 1 - \frac{X(1-X)}{1-X - \frac{1}{2}Y^2 \sin^2 \theta \pm \left[\left(\frac{1}{2}Y^2 \sin^2 \theta \right)^2 + (1-X)^2 Y^2 \cos^2 \theta \right]^{1/2}}, \quad (1)$$

式中 $X = \omega_p^2 / \omega^2$, $Y = \omega_{ce} / \omega$, $\omega_p = (n_e e^2 / \epsilon_0 m_e)^{1/2}$ 为等离子体频率, $\omega_{ce} = eB/m_e$ 为电子的回旋频率, ω 为入射波的频率, B 为等离子体中的磁场, θ 为入射波波矢 k 与 B 的夹角, n_e 为电子密度, ϵ_0 为真空中的介电常数, m_e 为电子的质量. \pm 号代表着探测束的电场矢量平行或垂直于磁场方向.

当探测束垂直于磁场方向入射 ($\theta = \frac{\pi}{2}$) 且电矢量平行于磁场方向时, 式(1)可以简化为

$$N = (1 - \omega_p^2 / \omega^2)^{1/2}. \quad (2)$$

如果探测束通过的是厚度为 $Z_2 - Z_1$ 的等离子体, 那么没有经过等离子体的参考路光束与探测束将产生一相位差

$$\phi = (2\pi/\lambda) \int_{Z_1}^{Z_2} [N_0 - N(Z)] dZ. \quad (3)$$

这里 N_0 是真空中的折射率 $N_0 = 1$, $Z_2 - Z_1$ 是通过等离子体介质的路程, $N = [1 - (n_e/n_c)^2]^{1/2} \approx 1 - \frac{1}{2}(n_e/n_c)^2 \approx 1 - (\omega_p^2/2\omega^2)$ 是等离子体的折射率. 将这些参数代入式(3)则得

$$\begin{aligned} \phi &= (\pi/\lambda n_c) \int_{Z_1}^{Z_2} n_e(Z) dZ \\ &= [\lambda e^2 / (4\pi c^2 \epsilon_0 m_e)] \int_{Z_1}^{Z_2} n_e(Z) dZ. \end{aligned} \quad (4)$$

通过测量干涉仪的相位变化就可以获得等离子体电子密度的测量值.

2 内壁反射式干涉仪的设计

HL-2A 装置由于偏滤器线圈的限制, 几乎没有可用的上下诊断窗口, 等离子体参数的测量大多使用水平窗口. HL-2A 的真空室的内壁没有窗口, 探测束只能通过内挂式反射镜返回到干涉仪. 因此干涉仪的选型结构采用迈克尔逊型.

用于干涉仪的主要光学元件有: 反射镜、反射凹镜、分束器、诊断窗口、光栅. 反射镜和反射凹镜由适用于远红外波段反射和聚焦的 K9 玻璃基地的镀铝

镜或镀金镜制成, 其损耗系数为 1%, 孔径大小由 $2.2d$ (d 为反射镜上光束的大小) 计算得出.

在等离子体电子密度的诊断中, 为了使探测的空间分辨率最好, 应将探测光束的束腰置于托卡马克等离子体的中平面上, 且使束腰越小越好. FIR 激光传输满足高斯光束传输规律, 束腰与发散角的关系成反比, 束腰越小, 到达诊断窗口的光束越大, 窗口尺寸的限制也越苛刻, 因此必须两者折衷考虑. 我们采用了自恰式的光路设计方法: 以诊断窗口的孔径和窗口到等离子体中心的距离作为限制条件, 来决定等离子体中心处的束腰大小; 以等离子体束腰和中心到真空室内壁的距离决定挂镜的曲率半径 (即反射镜的曲率与光束的曲率相等). 这样探测光束可以从内壁挂镜原路返回与入射光束完全重合地通过诊断窗口.

用于干涉测量的托卡马克的诊断窗口一般由石英晶体制成. 为了使入射光束的透过率最大, 吸收和反射最小, 我们用平行于光轴 z 切割的晶体, 且满足入射波电场矢量垂直于入射面, 平行于光轴.

除了诊断窗口的限制外, 在干涉仪的设计中还必须对以下几处束腰位置予以考虑: HCN 激光器的束腰位于输出端口处, 等离子体中心的束腰由装置的几何尺寸决定, 而用于多普勒频移的光栅由于反射面小, 也需放在束腰处. 同时探测器接受面也应位于束腰处. 因此用单面变换透镜或单面反射凹镜是不能完成如此多的变换, 必须用多面透镜组合变换.

图 1 是 HL-2A 激光迈克尔逊型干涉仪的示意图. 3m 腔长的 HCN 激光器光束的束腰 $d_0 = 21.5$ mm. 通过凹面反射镜 M_3 将激光光束经 5.6m 距离从装置大厅底层引入第二层, 进入由数根导轨搭成的干涉仪光路主体. SP1 分束器将光束分成测量束和参考束两部分. M9 和 M2 组成的凹镜组将测量束

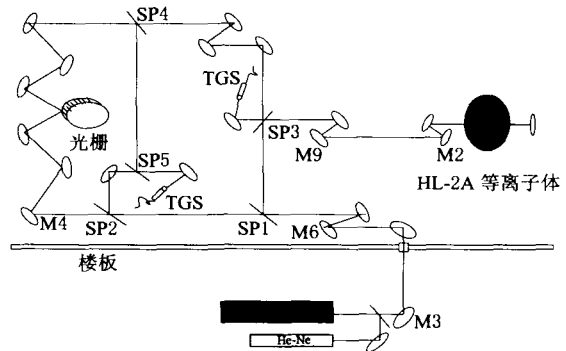


图 1 内壁反射式激光干涉仪示意图
Fig. 1 The diagram of reflecting FIR interferometer

的束腰由 8.77mm 变换到等离子体赤道面中心 13mm,并使在窗口处束斑最小,其值为 18.4mm. 在距等离子体中心束腰 524mm 处,安置一凹面镜,该反射镜将光束自恰返回,在中心处与入射的光束束腰重合. 由通过等离子体返回的光束与通过光栅产生了多普勒频移的参考光束在 SP3 处汇合,通过短焦距凹面反射镜将束腰变换到 $\Phi 2$ 的 TGS 探测器端面上,由此得到测量道差拍信号. 在参考道光路中,由 SP2 分束器将其分成两部分,一部分经过光栅调制;另一部分不通过光栅,两者在 SP5 处汇合,由 M8 短焦距凹面镜聚焦 TGS 探测器上,产生参考道差拍信号.

托卡马克等离子体放电过程中,由于高能粒子的轰击、射频波放电拉弧和壁处理技术的使用,真空室中面向等离子体的器壁、窗口和反射镜均要遭到溅射和膜涂覆. 为此我们设计了多次反射防污挡板置于内壁挂镜的两侧(该挡板位于孔栏的阴影区). 经 2002 年和 2003 年的两轮实验对比表明,采用同样膜厚的镀金凹面反射镜无防污装置的放电 20 天玻璃基底上的金膜 95% 以上溅射掉(图 2(a)),采用了防污装置的放电 50 余天 80% 的金膜还存在(见图 2(b)). 该反射镜对 $337\mu\text{m}$ 的激光的反射在不同的污染区域有不同的表现:在拉弧区(图中有细小花纹区域) FIR 激光的反射率为 75%,在粒子的沉积区(图中上下部位) FIR 激光的反射率为 60%. 等离子体放电对装置会产生一些机械振动,为此在内挂镜镜架的设计中采用了弹簧顶拉式结构^[5].

3 软件比较相位数据处理技术

HL-2A 托卡马克装置采用的是空心变压器的结构,装置的周围存在很大的杂散磁场,会对测量系统造成一定的干扰. 通常干涉仪的信号采集处理采用硬件相位比较方法^[6],由于本文介绍的内壁反射



图 2 采用防污染挡板前(a)后(b)的反射镜表面对比图
Fig.2 The mirror surface compared with (a) before (b) after using defence buffer

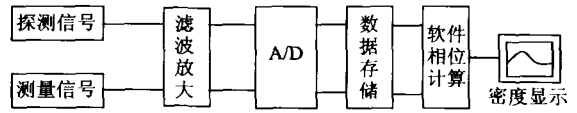


图 3 干涉仪采集处理系统示意图
Fig.3 The flow chart of data acquisition

式激光干涉仪的探测器距装置 4m 左右,放电过程中产生的干扰常常造成条纹误记数. 为此我们采用一种新的软件比较相位技术. 其原理见图 3. 由热释电探测器 TGS 测量到的参考路和探测路的正弦波差拍信号分别经频率为 $10\text{k} \pm 2\text{k}$ 的带通滤波放大系统进入 1M 采样率的采集系统,通过 A/D 变换 PC 机将两路信号的原始数据存储在计算机中. 用软件识别技术将正弦波的周期及各个过零位置找出,比较参考路与测量路的相位,由式(4)得到电子密度的信息.

由于软件比较方法将干涉仪的差拍信号记录存储,当放电对干涉仪系统产生干扰时,可以通过分析原始信号,找到干扰的位置,用不同的选择条件语句,判定过零点的阈值范围和位置,增加或去除条纹,获得合理的密度曲线,从而可以提高整个系统的测量准确率.

HL-2A 内壁反射式干涉仪的测量精度在等离子体电流 $I_p < 200\text{kA}$, 纵场 $B_T < 2$ 特斯拉的工作范围内为 $1 \times 10^{12}\text{cm}^{-3}$. 图 4 是干涉仪测量得到的原始相位变化信号和电子密度波形.

4 偏滤器等离子体放电的密度行为

内壁反射式激光干涉仪已于 2002 年在 HL-2A 托卡马克上投入实验测量,为 2002 ~ 2003 年两轮工程和物理实验近 2 000 多次放电提供了电子密度数

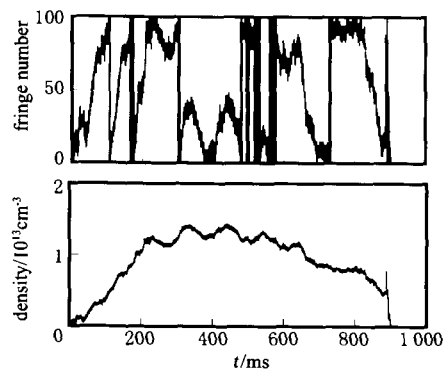


图 4 干涉仪条纹和密度波形
Fig.4 The fringe number of interferometer and density curve

据.

磁约束聚变的目的是控制具有一定能量的粒子在装置中实现聚变反应,从而产生大量的反应能.粒子与容器器壁碰撞产生杂质,杂质将损耗反应粒子的能量.偏滤器将通过磁场位形使等离子体与器壁的作用降低,将杂质粒子引导出放电真空室,从而提高聚变反应的效率.图5是HL-2A装置典型的偏滤器等离子体放电波形和其间的密度演变过程.图(a)为真空紫外测得的主等离子体的OVI杂质谱线强度,(b)为本文介绍的干涉仪测量的主等离子体线平均密度,(c)为等离子体电流,(d)为偏滤器室中用可见光谱测量的CIII杂质的谱线强度.150ms以前为孔栏等离子体放电,偏滤器室中没有观察到CIII杂质,等离子体电子密度的变化与等离子体电流的演变一致.150~230ms期间,等离子体放电进入偏滤器位形,主等离子体中的杂质明显下降,偏滤器室中的杂质明显上升,电子密度减小,这时等离子体电流却没有明显的变化.230ms以后,等离子体又恢复到孔栏放电位形,偏滤器室中的杂质下降到几乎为0,主等离子体的杂质回复到150ms的水平.由于等离子体的电子密度与器壁的再循环相关,偏

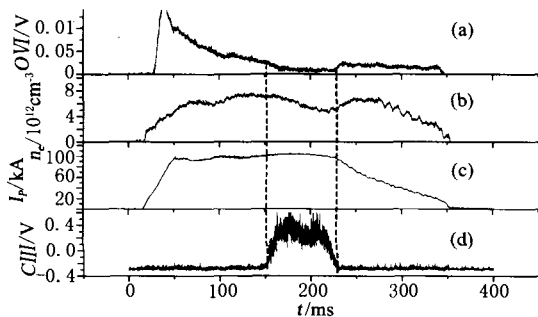


图5 偏滤器等离子体放电的典型波形和密度演变
图中(a)为主等离子体中的杂质OVI强度(b)为本文干涉仪测量的电子密度(c)为等离子体电流(d)为偏滤器室中的杂质CIII

Fig. 5 The typical waveform of plasma discharge and density (a) the OVI intensity in core plasma (b) the electron density measured by FIR interferometer (c) the plasma current and (d) the CIII in divertor plasma

滤器放电形成的磁场位形使最后一个封闭磁面刮离真空室的器壁的范围较小,壁与等离子体的相互作用减小,从而降低了再循环,电子密度也相应减小.偏滤器形成的x点,将主等离子体中的杂质引入偏滤器室,因此造成了偏滤器室中的杂质升高,这对于聚变堆工作时的除灰是非常有利的.

5 结语

本文介绍了用于中国第一个偏滤器托卡马克装置的内壁反射式激光干涉仪系统的设计及其在等离子体密度诊断中的应用.真空室中内挂镜的防污染设计保证了干涉仪的长期运行.在数据采集和处理中提出了一种软件比较相位方法,该项技术的使用,克服了空心变压器带来的杂散磁场的干扰造成的条纹误记数,提高了采数率.偏滤器放电期间的电子密度行为表明,偏滤器的磁场位形使等离子体与真空室器壁的相互作用降低,减小了粒子的再循环.

致谢 感谢 HL-2A 装置运行和等离子体诊断室的同仁们为本项工作提供的大力协助和支持.

REFERENCES

- [1] Rommers J H, Howard J, Donne A J H, *et al.* The multi-channel triple-laser interferometer/polarimeter system at RTP. [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, **68**, 1217—1226.
- [2] Liu Y, HL-2A Team. Recent experimental results from the HL-1M tokamak and progress in the HL-2A project [J]. *Nuclear Fusion*, 2004, **44**, 372—375.
- [3] Zhou Y, Deng Z C, Wang E Y, *et al.* Density Sawteeth-like in the LHCD Plasma of HL-1M [J]. *Chinese Physics Letters Proc. APFA&APPTC*, 1999, 53—56.
- [4] Hutchinson L H. *Principles of Plasma Diagnostic* [M]. New York: Oxford University, 1985, 93.
- [5] Deng Z C. A study of components for multichannel FIR laser interferometer in HL-2A device [R]. SWIP GF report. (邓中朝. HL-2A 装置多道远红外干涉仪部件研究. 核工业西南物理研究院 GF 报告), 2003.
- [6] Deng Z C, Diao G Y, Zhou Y, *et al.* Multi-channel FIR laser interferometry on the HL-1 Tokamak [J]. *Fusion Engineering and Design*, 1997, **34-35**:403—405.