

文章编号: 0258-7025(2001)09-0809-04

# HCN 激光偏振干涉测量等离子体极向磁场\*

周艳 邓中朝 傅荟文 刘泽田 郇文忠 张光阳 王思耀

(核工业西南物理研究院 成都 610041)

**摘要** 介绍了一种利用 HCN 激光器测量等离子体极向磁场的诊断方法。设计建造了一台偏振干涉仪,获得了测量精度为  $0.3^\circ$  的法拉第旋转角。实验结果显示该系统可用于 HL-1M 托卡马克的极向场测量。

**关键词** HCN 激光器, 法拉第旋转, 极向磁场

中图分类号 TN 248.5; O 53 文献标识码 A

## Measuring Plasma Poloidal Magnetic Field by Using HCN Interferometer/Polarimeter

ZHOU Yan DENG Zhong-chao FU Hui-wen

LIU Ze-tian LI Wen-zhong ZHANG Guang-yang WANG En-yao

(Southwester Institute of Physics, Chengdu 610041)

**Abstract** A diagnostic method for measuring plasma poloidal magnetic field has been reported. By using of HCN laser an interferometer/polarimeter has been designed and built. The Faraday rotation angle was obtained with the precision of  $0.3^\circ$ . Experiment result shows that the system can be used for measuring plasma poloidal magnetic field in HL-1M Tokamak.

**Key words** HCN laser, Faraday rotation, poloidal magnetic field

## 1 引言

在托卡马克物理实验研究中,等离子体电流和由其感应而产生的极向磁场是研究等离子体磁流体不稳定性、趋肤效应、反常电阻等离子体输运和约束等特性的非常重要的物理参量。近年来,负剪切位形的出现使得人们对中空电流分布的放电引起了极大的兴趣,因此极向磁场的测量变成了一个实验热点。

在测量等离子体极向磁场的研究探索中,有人通过软 X 射线成像系统沿许多准直弦观测极向等离子体截面在“有理”磁面(即安全因子  $q = m/n$  的磁面)处出现 MHD 不稳定性引起的局部内破裂扰动,用弦之间振幅和相位的关系起伏进行模分析提供  $q$  径向分布的数据,从而推导出极向磁场。但这仅仅是在理论假设之上的结果,没有实验数据可以佐证。也有人用固有杂质线的偏振光谱学方法,用

中性氢束将氢原子能态间光跃迁在磁场中的塞曼效应分裂为简单的三垂线特征测量极向场,但由于中性氢束电离截面大和等离子体引起的衰减强,所以信号电平很低,必须要许多次可重复性放炮数据方可使用。还有人利用中性氢束注入磁化等离子体中通过运动的斯塔克效应来实现  $q$  分布的测量,这种方法合适的中性氢束容易获得,且光谱技术相对简单,实验数据的获取较为容易<sup>[1]</sup>,但成本较高。

本文将介绍最可能成为常规诊断的远红外激光法拉第旋转极向磁场测量法。利用波导 HCN 激光器作光源<sup>[2]</sup>,设计一套 HCN 干涉/偏振系统,实现了法拉第偏转角度的测量。

## 2 测量原理

当一束线偏振光平行于等离子体极向磁场方向通过等离子体时,该线偏振光的偏振面将以磁场为轴旋转。只要适当地选择入射束频率(实验中选择波长为 337 nm 的 HCN 激光),可将这些偏振变化简化为一个近乎纯的法拉第旋转,此旋转正比于电

\* 国家自然科学基金重点基金(编号:19787502)资助项目。

收稿日期:2000-05-30; 收到修改稿日期:2000-07-12

子密度与沿探测路径的磁场分量的乘积的积分 ( $-\int n_e B_{F\parallel} dl$ )。法拉第旋转角  $\Omega$  与磁场  $B_{F\parallel}$  和传播距离  $Z$  有如下关系<sup>[3]</sup>

$$\Omega(\omega \gg \omega_p) = \frac{e^3 B_{F\parallel}}{\partial \epsilon_0 m^2 c \omega^2} n_e Z$$

当电子密度由干涉仪获得后,在同样的干涉仪中测量法拉第旋转的偏转角,就可得到沿传播方向的磁场量。在托卡马克中这个磁场量就是极向场平行于测量束的分量  $B_{F\parallel}$ 。利用外差探测法,使用一偏振束分束器,将通过等离子体的探测束分成平行于和垂直于初始束偏振的两个分量,由法拉第旋转所产生的垂直分量与本地振荡器混频产生一个差拍信号,它的振幅近似比例于旋转角。

### 3 法拉第旋转实验光路设计

为了验证本实验室的实验条件对法拉第旋转法测量磁场的适用性和精度,设计了一套以  $\lambda/2$  波片的旋转来模拟等离子体磁场的变化所引起偏振面旋转的偏振干涉光路系统,并获得了初步的模拟数据。

法拉第旋转角模拟实验光路设计在以五根导轨形成的一个台面上(见图1)。HCN激光器的反射平面镜前端竖直地固紧三根平行细铜丝,在激光器端口输出的  $EH_{\parallel}$  模 HCN 激光线偏振方向平行于地面。由于球面反射镜、反射平面镜有一定的退偏作用,为了固定偏振方向和提高偏振度,分别在  $\lambda/2$  波片旋转系统前和复合线栅  $P_3$  前放置线偏振起偏器  $P_1$  和  $P_2$ 。球面反射镜  $F_1$  将激光器的出口束腰变换至  $\lambda/2$  波片(该波片将激光偏振面变换  $\pi/2$ ) 旋转系统处,  $F_2$  镜将束腰变换至旋转柱面光栅上,光斑直

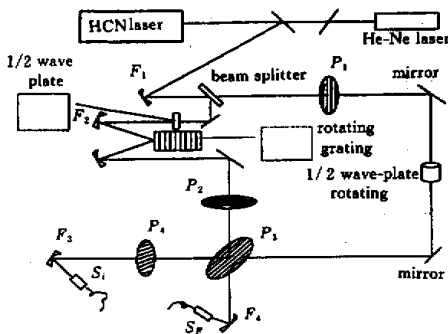


图1 法拉第旋转偏振光路示意图

Fig.1 Optical arrangement of Faraday rotation polarimeter

径为 10 mm。旋转柱面光栅起调制器的作用,调制频率为 10 kHz。 $F_3, F_4$  又将复合的干涉测量束与偏振测量束光斑分别聚焦在  $\phi 2$  mm 的 TGS 探测器上。双折射石英晶体制成的  $\phi 40$  mm 的  $\lambda/2$  波片以平行光轴做 X 切割,其厚度为 3.48 mm,  $\lambda/2$  波片固定在一特制的步进电机带动的旋转机构上,线偏振激光垂直入射到旋转机构的  $\lambda/2$  波片上,激光的偏振方向与波片光轴的夹角为  $\pi/4 + \alpha$ ,通过波片后,激光的偏振方向旋转  $\pi/2 + 2\alpha$ ,随着  $\lambda/2$  波片等角度步进旋转(实验中取该角度为  $0.3^\circ$ ),在探测器  $S_F$  上就可探测到等值的角度变化(该等值角校正后为  $0.6^\circ$ )。复合兼分束器的线栅  $P_3$  由平行于入射平面的平行钨丝制成,它使垂直于其平行丝方向且与原激光输出端偏振一致的分量(该分量为 S 分量,通过  $\lambda/2$  波片旋转  $90^\circ$ ) 完全通过且无相位变化,而经  $\lambda/2$  波片旋转后的与前者垂直的分量(该分量为 P 分量)部分透过,部分反射, P 分量的透射和反射部分在复合线栅  $P_3$  处分别产生  $\pi/4$  和  $3\pi/4$  的相移。而从光栅处来的 S 分量经复合线栅  $P_3$  产生部分透射和部分反射,透射光与测量束的 P 分量的反射部分相干形成法拉第旋转角的正弦差拍信号  $S_F$ ,而反射偏振光与测量束的 S 分量偏振方向相互垂直,经  $45^\circ$  偏置的线栅分析器  $P_4$ ,使它在同一偏振方向上相干,产生含干涉光路相移量的正弦差拍信号  $S_1$ <sup>[4]</sup>。

### 4 法拉第旋转角信号的采集处理

由于  $S_1$  的信号幅值较大,因此由磁场引起的偏振变化对其基本上不产生影响。而磁场变化的信息主要包含在  $S_F$  中。为了求得法拉第旋转角的信息,可将  $S_1, S_F$  在探测器上的信号写成如下形式<sup>[5]</sup>

$$S_{i,F}(z) = C_{i,F} + A_{i,F} \sin(\Delta\omega t + \Delta\phi + \Phi_{i,F})$$

式中,  $C_{i,F}$  表示  $S_1$  信号或  $S_F$  信号由于线栅的透射、反射所引起的相位变化,当光路确定后,  $C_{i,F}$  与测量的时刻无关,应为一常数。振幅  $A_{i,F}$  和由金属线栅引起的相位角  $\Phi_{i,F}$  与法拉第测量束及干涉测量束的强度  $I_p, I_s$  以及它们的偏振参数 ( $\Psi_p, \epsilon_p$ ) 和 ( $\Psi_s, \epsilon_s$ ) 有着复杂的关系。在实际运行中,要做到光路中线偏振光的线偏振度足够高(这可以通过准确地确定激光器输出端的偏振方向,减少光学元件的减偏效应和利用线栅起偏器控制增强偏振束的线偏振方向和偏振度来解决),且测量的法拉第角足够小,那么,可以认为  $\Psi_{i,F} \ll 1, \epsilon_{i,F} \ll 1$ , 则<sup>[5]</sup>

$$A_I \approx \sqrt{I_p I_r (1 - \Psi_F - \epsilon_F)} \approx \sqrt{I_p I_r}$$

$$A_F \approx \sqrt{I_p I_r (\Psi_F^2 + \epsilon_F^2)}$$

$$\tan \Phi_I \approx (1 - \epsilon_F) / (1 - \Psi_F) \approx 1$$

$$\tan \Phi_F \approx \epsilon_F / \Psi_F$$

那么, TGS 探测器上的信号为

$$S_i = \sqrt{I_p I_r (1 - \Psi_F - \epsilon_F)} \sin(\Delta\omega t + \Delta\phi + \Phi_i)$$

$$S_F = \sqrt{I_p I_r (\Psi_F^2 + \epsilon_F^2)} \sin(\Delta\omega t + \Delta\phi + \Phi_F)$$

式中  $I_p, I_r$  分别表示测量束与参考束的光强。

考虑到在实际的托卡马克装置中, 由于密度梯度造成的探测束的偏转引起探测束光强的减少, 在模拟实验中, 我们将同样通过假想等离子体 ( $\lambda/2$  波片) 的干涉测量信号, 作为偏振信号的参考信号, 扣除光强变化引起的测量误差。

采集处理的原理方框图见图 2。在干涉信号道  $S_i$  一侧, 首先是带通滤波, 将  $10 \text{ kHz} \pm 2 \text{ kHz}$  信号以外的背景噪声去除, 再经平方器得到正比于  $I_p I_r (1 - \Psi_F - \epsilon_F)$  的测量信号。偏振探测器一侧, 带通滤波后经乘法器将偏振信号与干涉信号相乘。经低通滤波器, 滤去高频项, 得到的信号为  $\frac{1}{2} I_p I_r \cdot$

$$\sqrt{\frac{1 - \Psi_F - \epsilon_F}{2 - 2\Psi_F - 2\epsilon_F + \epsilon_F^2 + \Psi_F^2}} (\Psi_F - \Psi_F^2 + \epsilon_F - \epsilon_F^2)$$

实验中, 由于选择的波长为  $337 \text{ nm}$ , 入射波长与等离子体环向场(纵场)的双折射效应因为满足  $B_i^2 \bar{n}_e < 4.1 \times 10^{25} \lambda^{-3} L^{-1}$ , 可以忽略, 再加上光路设计中考虑了传输光的高线偏振性,  $\epsilon_F \ll 1$ 。因此, 线

偏振光的椭圆率可以忽略, 而法拉第旋转法又是用于小角度测量(根据 HL-1M 托卡马克装置的运行参数, 等离子体极向场沿探测束的平行分量的偏转角  $< 10^\circ$ ), 则  $\Psi_F \ll 1$ , 可以忽略  $\Psi_F, \epsilon_F$  的二次项, 偏振测量信号可简化为:  $\frac{1}{2} ab \cos(\Phi_F - \Phi_I) \approx \frac{1}{2} I_p I_r \cdot$

$\frac{1}{2} (\Psi_F + \epsilon_F)$ 。经除法器归一, 并略去二次小量, 法拉第旋转角正比于  $\Psi_F (1 + 2\epsilon_F) + \epsilon_F - \Psi_F$ 。其系数值需要在实验中校准决定。采集器获得了正比于旋转角  $\Psi_F$  的电压幅值后,  $A/D$  变换通过 I/O 接口输入计算机, 画出电压值随时间的变化过程。图 3 是模拟实验中测量得到的法拉第角旋转角与锁相放大器输出的电压幅值信号的校准图。从图中可以看出在旋转角  $-10^\circ \sim 10^\circ$  之间, 电压值与角度基本呈线性关系, 旋转角的  $1^\circ$  对应电压值约为  $1 \text{ V}$ 。图 4 是

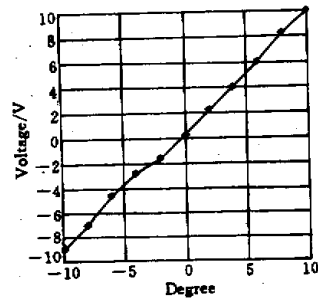


图 3 测量的旋转角信号输出电压与旋转角度的校准图

Fig.3 Calibration results of rotation angle voltage signal vs rotation angle

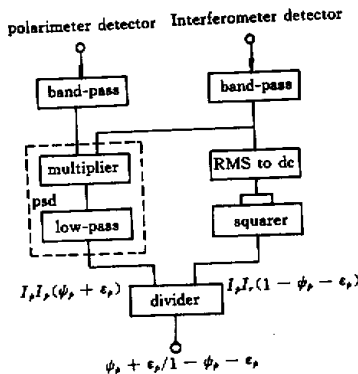


图 2 法拉第旋转采集处理方框图

Fig.2 Square-drawing of Faraday rotation signal processing system

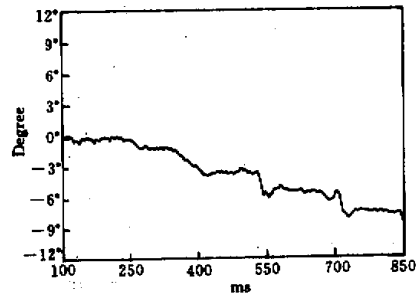


图 4  $1/2$  波片步进旋转时激光偏振面旋转角的测量值随时间的变化

Fig.4 Angle signal of polarization plane vs time during rotation of half wave plate

步进电机带动的  $\lambda/2$  波片模拟等离子体极向场逐步转动时测量的激光偏振面法拉第旋转角度的变化, 每步转角固定为  $0.3^\circ$ 。

## 5 结 论

用  $\lambda/2$  波片的旋转来模拟等离子体磁场的变化所引起偏振面法拉第旋转的初步实验结果证明, 法拉第旋转法测量等离子体极向磁场的原理是可行的, 也是能够在现有的实验条件下实现的。我们设计的这套偏振干涉光路和采集系统可以进行偏振面的小偏转角测量, 偏转角的测量精度为  $\Omega > 0.3^\circ$ 。针对 HL-1M 装置极向磁场小于  $10^4$  的条件, 该系统适用于 HL-1M 装置的测量需要。为了提高该系统的信噪比和测量精度, 我们将在系统的防震、复合线栅反射率的优化和提高测量束的偏振度方面做进一步

的改进工作。

## 参 考 文 献

- 1 T. Fujita, H. Kuko, T. Sugie *et al.*. Current profile measurements with motional Stark effect polarimeter in the JT-60U Tokamak. *Fusion Engineering and Design*, 1997, 34-35:289~292
- 2 Zhou Yan, Jiao Yiming, Zhang Qingchun. Optimizing design of variable metal mesh coupler for the HCN laser. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1993, A20(12):896~899 (in Chinese)
- 3 Xu Jialuan, Jin Shangxian. *Physics of Plasma*. Beijing: Atomic Energy Publishing Company, 1981. 328~329 (in Chinese)
- 4 Deng Zhongchao, Diao Guangyao, Zhou Yan *et al.*. Multichannel FIR laser interferometry on the HL-1 Tokamak. *Fusion Engineering and Design*, 1997, 34-35:403~406
- 5 Soltwisch H.. Current distribution measurement in a tokamak by FIR polarimetry (invited). *Rev. Sci. Instrum.*, 1986, 57:1939~1944

## 美国激光医学学会第 21 届年会简介

2001 年 4 月 18~22 日, 美国激光医学学会 (ASLMS) 在路易斯安那州新奥尔良召开了第 21 次年会。其论文摘要集刊登在 ASLMS 的会刊 *Laser in Surgery and Medicine* 2001 年的增刊 13 上。会议共收到论文 287 篇, 按论文篇数排名为美国 181 篇, 德国 23 篇, 中国 13 篇, 英国和意大利各 8 篇, 奥地利、日本和瑞士各 6 篇, 法国和巴西各 4 篇, 澳大利亚和印度各 3 篇, 西班牙、阿根廷、罗马尼亚、克罗地亚、斯洛伐尼亚、丹麦和比利时各 2 篇, 俄罗斯、荷兰、北爱尔兰、挪威、沙特阿拉伯、伊朗、新加坡和韩国各 1 篇。中国的关崇文主任医师和刘承宜教授分别获得国家高技术基金和国家自然科学基金的资助, 参加了会议。

会议采用了大会、小组会议、微型会议、专家座谈、专题研讨会(有偿)、张贴报告、展览、短训班(有偿)和学会工作会议共 9 种形式。

大会报告主要是获奖人的演讲和 2000 年新人资助项目的汇报, 包括展望与发展: 激光的医学之旅 (William B. Mark 纪念演讲); 创新之机遇 (护理/联合健康奖); 激光医学领域教育水平的提升; Leon Goldman 的遗产 (Leon Goldman 演讲) (Leon Goldman 被称为激光医学之父); 以激光治疗皮肤的血管损伤的进展为模型介绍从 1980 年到 2000 年激光疗法的发展 (Ellet H. Drake 演讲); 激光组织焊接的两层焊料 (2000 年新人研究奖汇报)。

小组会议专题与去年相同。共宣读论文 205 篇。其中中国 8 篇。中国学者刘承宜教授领导的小组分别在两个小组会议(心血管、普通外科与胸整型外科小组和生物刺激作

用小组)做了 5 个报告。在生物刺激作用小组会议上的 4 篇论文工作突破了生物刺激作用的研究现状, 引起广泛关注。

微型会议共宣读论文 23 篇, 其中中国香港 1 篇, 主要是临床报告。

张贴报告 54 篇论文中中国大陆 1 篇, 中国香港 3 篇。参加展览的公司有 74 家, 大部分出售外科用医用激光器及其附属产品, 其中有用于外伤和牙科的低强度激光治疗方法的激光器。

据会议传出的信息, 激光医学每个领域的发展已相对比较成熟, 预示了在交叉领域的发展趋势, 包括激光医学与药物医学的交叉和低强度激光效应在激光外科长期效应中的作用等。

正式会议之前办了激光皮肤重塑等 12 个收费短训班。

大会颁发了 5 个理事长提名奖和 3 个名人纪念奖、5 个最佳学生/居民论文奖、最佳基础科学和临床科学论文奖各 1 名和 1 名最佳护理奖。

下次年会将于 2002 年 4 月 10~14 日在 Georgia 的 Atlanta 举行。投稿截止于今年 9 月, 详细信息可以在网站 <http://www.aslms.org> 查询, 或直接用电子邮件与 [aslms@dwave.net](mailto:aslms@dwave.net) 联系。

<sup>1</sup> 广州华南师范大学传光光学实验室 广州 510631

<sup>2</sup> 中国科学院上海光机所 上海 201800

刘承宜<sup>1</sup> 关崇文<sup>2</sup>

(收稿日期: 2001-06-14; 收到修改稿日期: 2001-07-16)