

文章编号: 1001- 4322(1999)04- 0505- 04

激光差拍波等离子体加速装置中 约束磁场的计算研究*

冯光耀, 王相纂, 裴元吉, 尚 雷, 王 琳, 李为民, 樊宽军, 徐宏亮

(中国科学技术大学, 国家同步辐射实验室, 合肥 6022 信箱, 230031)

摘 要: 通过对等离子体发生器建立三维模型, 计算得到磁场在该装置中的分布情况。所得结果与实际测量基本一致, 从而说明所建模型的合理性。通过调节一些参数, 对该模型进一步搞清了导致等离子体发生器中真实磁场较实验设计要求偏低的主要原因, 并提出了相应的改进方案。

关键词: 激光差拍波; 等离子体加速器; 约束磁场; 磁导率

中图分类号: O53 文献标识码: A

自从 T. Tajima 和 J. M. Dawson 于 1979 年提出等离子体加速器的概念以来^[1], 激光差拍波等离子体加速(PBWA)技术已经引起人们的广泛关注。该技术利用两束不同频率的高功率激光束在等离子体中的差拍效应来激励等离子体振荡, 从而产生很强的电场。理论计算表明: 根据 $E_{\max} \sqrt{n}$ (V/cm), 在密度为 10^{18}cm^{-3} 的等离子体中可以建立起 1GV/cm 的最大纵向加速电场^[2]。由等离子体离子源的研究可知, 对于双等离子体离子源, 工作气体压力一般为 0.6~11Pa, 按照这样的压力计算, 相应于完全电离的等离子体密度在 10^{14}cm^{-3} 的水平^[3]。磁场在此起着关键作用, 它把电流聚集起来, 形成大的电流密度和高的等离子体密度。因此需用足够强的磁场来约束, 要求磁场梯度方向与等离子体压强梯度方向相反, 即约束磁场应为内部区域弱外部区域强的“磁阱”。利用 OPERA-3D 程序组就实验主要装置等离子体发生器中的磁场分布进行分析讨论。

1 等离子体发生器中磁场的计算

1.1 建模

OPERA-3D (an Operating Environment for Electromagnetic Research and Analysis) 是一个利用有限元法分析电磁场的程序组, 可用来计算三维静磁场问题。等离子体发生器装置采用 H 型磁轭结构, 导电线圈放在磁轭上, 阳极和中间电极都用软磁材料作成, 其端部两个直径为 16mm 的突出圆台作为磁极, 中间留有粒子和光的通道。阳极、中间电极、屏蔽挡板和导磁铁芯共同构成 H 型铁的磁通路, 图 1 为其剖面图。通过网格划分、分层定义、边界设定等步骤, 所建等离子体发生器模型如图 2 所示, 建模时考虑了实物由于加工工艺问题所造成的导磁铁芯与挡板之间的间隙。

1.2 磁场分布情况

通过计算可得工作电流为 4A 时磁场在三维模型中的分布情况, 计算结果和利用霍尔效

* 国家自然科学基金资助课题
1999 年 5 月 13 日收到原稿, 1999 年 6 月 26 日收到修改稿。
冯光耀, 男, 1974 年 9 月出生, 博士生

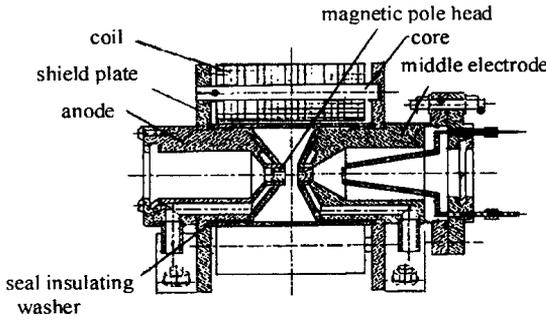


Fig 1 The cross section of the plasma generator
图 1 等离子体发生器剖面图

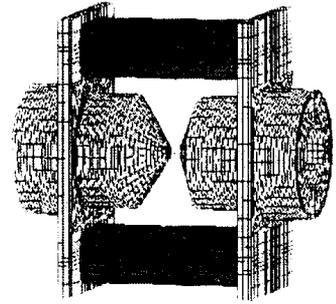


Fig 2 Structure diagram of the model
图 2 模型示意图

应测磁法所得实验磁场 ($I = 4A$) 如图 3 和图 4 所示, 分别为磁极间中心平面上, 纵向磁场 B_z 沿垂直方向 y 轴和沿水平方向 x 轴的分布。

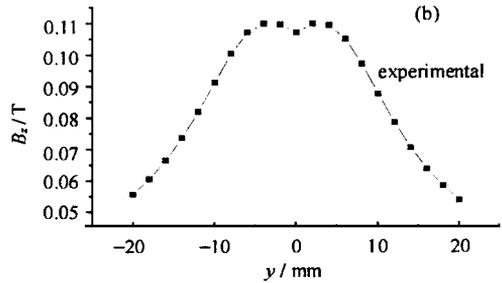
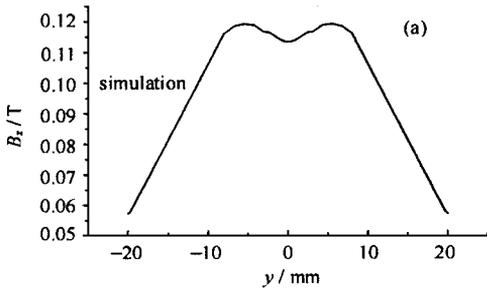


Fig 3 Relation between B_z and y at $x = z = 0$
图 3 (a) B_z - x 关系图, (b) 为实测 B_z - x 关系图

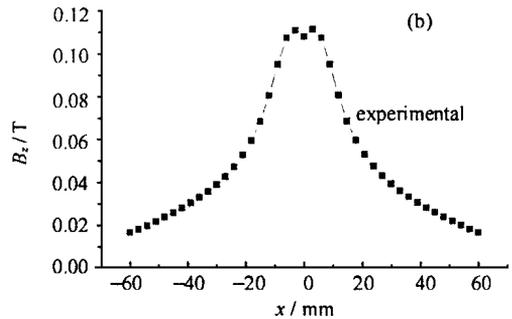
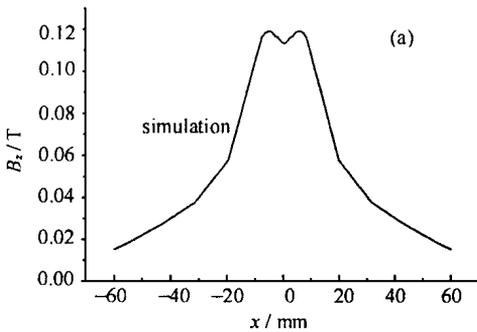


Fig 4 Relation between B_z and x at $y = z = 0$
图 4 (a) 计算所得的 B_z - x 关系图, (b) 为实测 B_z - x 关系图

可见计算结果与实测场型符合得很好。实测磁场在中心平面内的最大值为 $0.1144T$, 计算所得为 $0.1191T$, 误差小于 5% 。分析相差 $0.005T$ 左右的原因, 首先, 在建模时, 要求设定等离子体发生器所处外部空间必须为有限空间, 这与实际情况存在差异, 使得部分存在于实际空间中的磁场未考虑在内, 导致计算结果偏大。另外也存在加工工艺方面的原因。

计算所得纵向磁场 B_z 沿纵向 z 轴分布情况如图 5 所示, 可以看到 B_z 在 z 轴上并不关于中心平面对称。计算结果表明, z 轴上磁场最大值偏离中心平面 $1mm$, 这主要是由于该装置中

中间电极和阳极形状不完全相同造成的。由于受实验条件限制, 未能进行该方向的磁场测量。

纵向磁场 B_z 在磁极间垂直平面上的分布情况如图 6 所示, 可明显看到磁场的“磁阱”式分布。计算得到磁极间中平面上最大约束磁场 $B_{out} = 0.1191\text{T}$, 中心处磁场 $B_{in} = 0.1137\text{T}$, 根据等离子体磁约束公式 $B_{out}^2/2\mu_0 = B_{in}^2/2\mu_0 + nkT$ [4], 估算得到在这种场型分布下, 中平面上可以约束的等离子体密度为 $3.6 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 左右, 这与实验测得等离子体密度 $3.9 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 基本吻合 [2]。

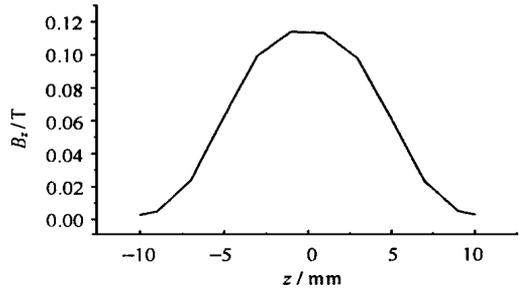


Fig 5 Relation between B_z and z at $x = y = 0$ (simulation)
图 5 B_z - z 关系图

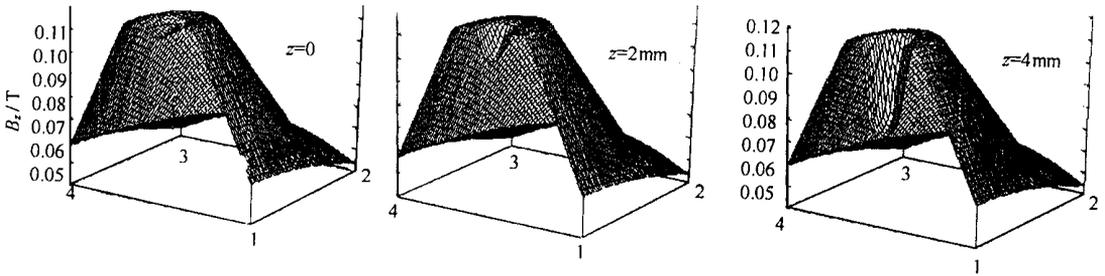


Fig 6 Magnetic field B_z distribution on different cross-sections
图 6 B_z 在磁极间不同截面上分布情况

2 分析与讨论

根据环路定理 [5] 进行估算, 磁极间隙为 1cm、线圈匝数为 518 匝, 电流为 4A 时, 磁极间隙中可产生大约 0.259T 的磁场, 而实测磁场只达到 0.1144T 左右。差别如此之大是由发生器装置的构造形式决定的, 分析主要有以下几个方面的原因。

(1) 通过程序计算可得导磁铁芯中磁场沿纵向的分布曲线如图 7 所示。可知铁芯中存在着较强的磁场, 特别是铁芯两端磁场已达到饱和, 使得该处磁导率很低, 形成较大磁阻, 使真实磁场比理想的理论计算结果偏低。

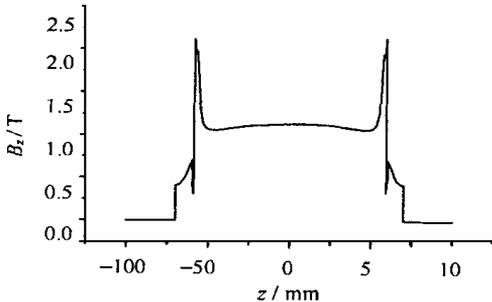


Fig 7 Magnetic field distribution along the core
图 7 磁场沿铁芯分布情况

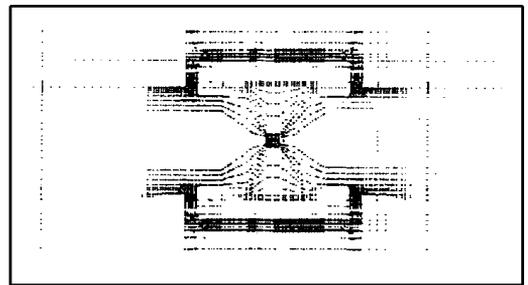


Fig 8 Spatial distribution of the magnetic field
图 8 磁场空间分布示意图

(2) 计算表明该装置所产生的磁场并不能完全约束在两个磁极中间, 整个中间电极和阳极间都存在着较强的磁场, 如图 8 所示。由于磁极面相对中间电极和阳极面很小, 因此这种磁

场分布将会影响极间磁场的大小,使磁场强度偏低。从图中还可以发现两个屏蔽挡板间也存在漏磁。另外考虑到等离子体发生器所处外部空间的漏磁影响,程序要求对等离子体发生器所处空间应设定为有限大,通过计算作以下比较,对该模型在不考虑由于加工工艺问题而造成的气隙的情况下,取工作电流为 6A:外空间取 600mm × 150mm × 230mm 时,气隙中心平面上磁场最大值为 0.2487T;外空间取 600mm × 260mm × 320mm 时,气隙中心平面上磁场最大值为 0.2T。可见外空间取得越大,与理论估算差别就越大,越接近真实情况。

(3) 由于加工工艺不理想,并且套在中间电极和阳极上的两个密封绝缘垫圈厚度偏大,造成导磁铁芯与屏蔽板(支撑板)之间存在气隙,使整个磁路中气隙变长,增大了磁阻,导致磁极间隙中磁感应强度变小。

3 改进方案

根据实验设计要求,等离子体发生器产生的约束磁场应为内部区域弱、外部区域强的“磁阱”式分布,中平面上最佳约束磁场应不低于 0.1500T,并且由中心磁场 B_{in} 和最大约束磁场 B_{out} 所决定的等离子体的密度应在 10^{14}cm^{-3} 量级。为达到该指标,在不改变等离子体发生器装置基本结构的条件下,可作以下调整:增大导磁铁芯横截面尺寸,以降低铁芯中的磁感应强度,减小其饱和程度。计算表明,将铁芯横截面由原来的 44.5mm × 14.2mm 变为 64mm × 14.2mm,取工作电流为 5A,在磁极间隙的中心平面上可得 0.2070T 的场强,并可得到 $B_{out} = 0.2070\text{T}$, $B_{in} = 0.1969\text{T}$,根据等离子体磁约束公式得到在这种情况下可以获得的等离子体密度不低于 $1.17 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$,已可以满足实验要求;改进加工工艺,合理减小两个密封绝缘线圈的厚度,做到既保证密封效果,又尽可能减小导磁铁芯与挡板之间的气隙,以改善磁极间隙中的磁场。

参考文献

- 1 Rubenchik A and Witkowski S. Physics of Laser Plasma. New Year: Elsevier Science Publishing company, Inc., 1991
- 2 裴元吉等. 等离子体发生器装置的研制. 第二届全国加速器技术学术交流会议论文集, 1998
- 3 郭春龙. 等离子发生器的研制 [研究生论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 1996
- 4 戈兰特 B E 著. 马腾才等译. 等离子体原理. 北京: 原子能出版社, 1983
- 5 Jackson J D 著. 朱培豫译. 经典电动力学. 北京: 人民教育出版社, 1979

MAGNETIC FIELD SIMULATION AND RESEARCH OF PLASMA GENERATOR

FENG Guang-yao, WANG Xiang-qi, PEI Yuan-ji, SHANG Lei,

WANG Lin, LIW eim in, FAN Kuan-jun, XU Hong-liang

National Synchrotron Radiation Lab, USTC, P. O. Box 6022, Hefei 230029

ABSTRACT: In laser plasma beat wave accelerator, the strong magnetic field higher than 1500 Gauss, which can confine the behavior of plasma, is needed. In this paper, the distribution of magnetic field on plasma generator is obtained using OPERA-3D procedure. The simulation agrees with the experimental data well. While adjusting some parameters, some factors, which cause the actual magnetic field lower than the designed one, are found. Based on this simulation, modification has been given.

KEY WORDS: beat wave; plasma accelerator; confined magnetic field; permeability