

用于激光等离子体中脉冲强磁场产生的电感耦合线圈

赵佳羿 胡鹏 王雨林 王金灿 唐桢波 胡广月

Optimization of pulsed intense magnetic field device for laser plasma experiment via inductively coupled coil

Zhao Jia-Yi Hu Peng Wang Yu-Lin Wang Jin-Can Tang Hui-Bo Hu Guang-Yue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 165202 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210441

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210441>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于平行磁控的磁化等离子体光子晶体THz波调制器

Parallel magnetic-controlled THz modulator based on two-dimensional magnetized plasma photonic crystal

物理学报. 2017, 66(5): 054210 <https://doi.org/10.7498/aps.66.054210>

激光等离子体光丝中太赫兹频谱的调控

Control of the terahertz spectra generated from laser induced plasma

物理学报. 2020, 69(2): 024205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191200>

强激光产生的强磁场及其对弓激波的影响

Strong magnetic fields generated with a metal wire irradiated by high power laser pulses and its effect on bow shock

物理学报. 2017, 66(9): 095202 <https://doi.org/10.7498/aps.66.095202>

质子成像法测量电容线圈靶磁场

Measurement of magnetic field of capacitor-coil target using proton radiography

物理学报. 2020, 69(17): 175202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200215>

基于蒙特卡罗-离散纵标方法的氘氚激光等离子体聚变反应率数值模拟

Numerical simulation of deuterium-tritium fusion reaction rate in laser plasma based on Monte Carlo-discrete ordinate method

物理学报. 2019, 68(21): 215201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190440>

非平衡感应耦合等离子体流场与电磁场作用机理的数值模拟

Numerical investigation on interaction mechanisms between flow field and electromagnetic field for nonequilibrium inductively coupled plasma

物理学报. 2019, 68(18): 185202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190865>

用于激光等离子体中脉冲强磁场产生的电感耦合线圈*

赵佳羿¹⁾ 胡鹏¹⁾ 王雨林¹⁾ 王金灿¹⁾ 唐栓波^{1)†} 胡广月^{1)2)‡}

1) (中国科学技术大学工程与应用物理系, 中国科学院近地空间环境重点实验室, 合肥 230026)

2) (中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院超强激光科学卓越创新中心, 上海 201800)

(2021年3月8日收到; 2021年4月8日收到修改稿)

脉冲强磁场装置是磁化激光等离子体实验的核心设备. 本文研制了一种用于优化脉冲强磁场设备的电感耦合线圈, 相对于单匝磁场线圈可以进一步提高磁场强度. 通过实验和模拟研究了电感耦合线圈的初级螺线管匝数和直径对磁场强度的影响, 发现对于 2.4 μF 电容的放电系统, 电感耦合线圈的初级螺线管在 35 匝、35 mm 直径时, 可以在 5 mm 内径的次级磁场线圈中获得最高的峰值磁场强度, 是相同尺寸单匝磁场线圈产生磁场强度的 3.6 倍. 在充电电压 20 kV 时, 峰值磁场强度达到 19 T, 使用铍铜材料的电感耦合线圈克服强磁场中线圈炸裂问题, 在 35 kV 的充电电压下得到了 33 T 的峰值磁场强度. 这种新方法产生了更强的磁场、降低了对回路电感的要求、提升了实验排布的灵活性, 为研究强磁场下的激光等离子体行为创造了条件.

关键词: 激光等离子体, 磁化等离子体, 脉冲强磁场设备, 电感耦合线圈

PACS: 52.72.+v, 52.50.Jm, 52.57.-z

DOI: 10.7498/aps.70.20210441

1 引言

外加强磁场与激光等离子体相互作用可以用来研究磁惯性聚变^[1-4]、激光聚变的磁化黑腔^[5,6]、磁准直射流^[7]、磁重联^[8]等天体和空间物理现象以及工业应用^[9]领域的一些重要问题, 脉冲强磁场装置是进行这些研究的核心设备. 有多种技术方案来产生脉冲强磁场, 例如高功率激光驱动的磁通压缩可以产生微米尺寸、数千特斯拉的亚纳秒脉冲磁场^[1], 激光打靶驱动瞬态电流的电容线圈靶可以在百微米尺寸产生数百特斯拉强度的纳秒脉冲磁场^[10]. 这些方案虽然产生的磁场强度高, 但尺寸小、时间短, 较难满足多数实验的参数要求. 基于

传统脉冲功率技术的脉冲强磁场设备得到了更多的关注, 它可以在磁场线圈中产生厘米尺度、数百纳秒至微秒持续时间、数十特斯拉强度的脉冲强磁场, 满足更多磁化激光等离子体实验的需求.

国际上多个课题组都根据各自的激光装置和实验需求研制了合适的脉冲磁场设备^[10-18]. 我们课题组也研制了多款适用于小型激光器和神光 II 大型激光装置的紧凑型脉冲强磁场设备^[19-22], 最大峰值电流约 95 kA, 利用厘米尺度的单匝线圈可以产生约 10 T 峰值强度的脉冲强磁场.

脉冲强磁场设备通常使用厘米尺寸的单匝磁场线圈, 这是因为单匝磁场线圈占据的立体角较小, 不会明显干扰激光等离子体实验的激光和探测器排布, 方便实验的开展; 但单匝磁场线圈在整个放电

* 中国科学院战略先导专项项目 (批准号: XDB16000000)、国家自然科学基金 (批准号: 11775223, 11375197, 11605200, 11275202)、中央高校基本科研业务费专项资金和强场激光物理国家重点实验室开放基金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tanghb@ustc.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: gyhu@ustc.edu.cn

系统中占据的电感份额小^[21,22], 只有小部分能量用于产生强磁场, 能量利用率较低. 螺线管磁场线圈^[11]的特征与之相反, 螺线管电感较大, 可以将大部分能量集中于磁场线圈从而产生更强的磁场, 但螺线管体积大、占据立体角大, 严重限制了实验的灵活性.

降压变压器技术有望解决小体积单匝磁场线圈和高能量利用率不兼容的问题. 这种电感耦合线圈^[23]将多匝螺线管的能量通过变压器耦合到单匝磁场线圈上, 磁场线圈两端电压降低、电流增大. 多匝螺线管占据了较大的系统电感份额、能量利用率高; 单匝磁场线圈的尺寸小、方便实验排布且磁场更强, 可以满足大部分实验的需求.

本文研制了用于脉冲强磁场设备的电感耦合线圈. 此时, 单匝磁场线圈不再与放电系统直接连接, 而是由多匝螺线管组成的初级线圈与放电系统相连, 通过电感耦合变压器将螺线管能量耦合到单匝磁场线圈上. 电感耦合降压变压器提升了电流密度, 在单匝磁场线圈中产生更强的磁场. 电感耦合线圈的使用可以降低系统对回路电感的要求, 传输线(连接电容器、开关和磁场线圈)可以更长, 放宽了对系统紧凑性和对实验环境的要求. 电感耦合线圈产生磁场的大小, 主要受初级螺线管的匝数和直径影响, 因此本文通过模拟和实验确定了最优的初级线圈匝数和直径, 使得磁场强度提升了 3.6 倍, 通过使用高强度磁场线圈材料产生了 33 T 的高强度磁场.

2 电感耦合线圈的原理和设计

使用电感耦合线圈的脉冲强磁场设备的电路结构如图 1 所示, 左边初级回路由放电系统和变压器的初级螺线管组成, 右边次级回路由变压器的次级线圈和磁场线圈组成, 两个回路通过变压器初级螺线管和次级线圈的电磁感应耦合在一起.

初级回路使用 24 个 100 nF 的高压电容器作为储能单元, 由高压电源 (Teslaman TD2202 100 kV/2200 W) 为其充电; 使用激光触发的火花隙开关^[22]控制电路导通, 除螺线管外放电系统其余部分的总电阻为 0.1 Ω 、总电感为 450 nH.

电感耦合线圈的示意图和实物图如图 2 所示, 使用包裹 0.25 mm 厚聚酰亚胺绝缘层、1.4 mm 直径的铜线 (14 AWG, Accu-Glass Products, Inc.) 沿尼龙圆柱骨架密绕成多匝螺线管作为初级线圈, 通过两端的引线连接到放电系统的同轴传输线上.

与尼龙圆柱等高的铜圆柱体紧密包裹螺线管作为次级线圈. 本文的实验中, 次级线圈与磁场线圈是一体加工而成, 铜块另一端逐渐收窄、中间切出一条缝隙形成传输线的正负极, 在末端形成一个内

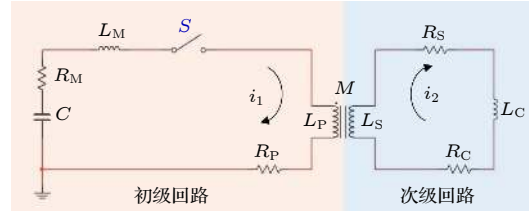


图 1 脉冲强磁场设备的电路图. 橘色框内是初级回路, 蓝色框内是次级回路. L_M 和 R_M 分别为初级回路除螺线管之外的电感和电阻; L_P 和 R_P 分别为变压器初级螺线管的电感和电阻; L_S 和 R_S 分别为变压器次级线圈的电感和电阻; L_C 和 R_C 分别为次级回路中除变压器次级线圈以外的电感和电阻; C 是电容器的电容

Fig. 1. Circuit diagram of a pulsed intense magnetic field device. The left orange box is the primary circuit, and the right blue box is the secondary circuit. L_M and R_M are the inductance and resistance of the primary circuit except the solenoid; L_P and R_P are the inductance and resistance of the transformer primary solenoid; L_S and R_S are the inductance and resistance of the transformer secondary coil; L_C and R_C are the inductance and resistance of the secondary circuit except the secondary coil of the transformer; C is the capacitance of the capacitor.

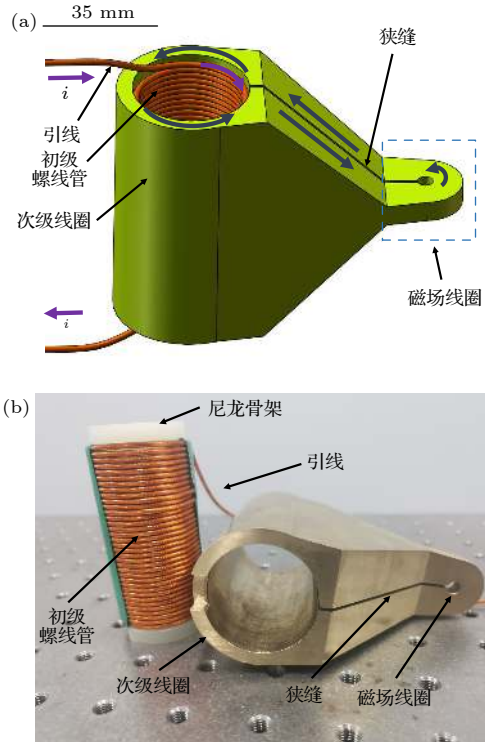


图 2 电感耦合线圈的 (a) CAD 设计图和 (b) 实物图

Fig. 2. (a) CAD design drawing and (b) photograph of inductively coupled coil.

径 5 mm(外径 24 mm)、高 7 mm 的圆孔作为磁场线圈. 实际使用中, 磁场线圈部分可能会被激光烧蚀, 不同实验中磁场线圈的结构和尺寸也会改变, 因此磁场线圈部分会加工成可灵活更换的独立部件. 当初级回路有电流流过螺线管时, 会在铜圆柱外壳感生出次级电流, 次级电流在磁场线圈中产生强磁场; 显然次级回路的电流值越大, 产生的磁场强度越大.

对整个脉冲强磁场设备的电路进行分析, 根据基尔霍夫电压定律^[24], 有:

$$(R_M + R_P) i_1 + (L_M + L_P) \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = U, \quad (1)$$

$$(R_S + R_C) i_2 + (L_S + L_C) \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = 0, \quad (2)$$

其中 i_1 和 i_2 分别为通过初级回路和次级回路中的电流; L_M 和 R_M 分别为初级回路除螺线管之外的电

感和电阻; L_P 和 R_P 分别为变压器初级螺线管的电感和电阻; L_S 和 R_S 分别为变压器次级线圈的电感和电阻; L_C 和 R_C 分别为次级回路中除变压器次级线圈以外的电感和电阻; $M = k\sqrt{L_P L_S}$ 是变压器的初级螺线管和次级线圈之间的互感, $0 < k < 1$ 是电感耦合的耦合系数 (在短螺线管近似下, k 值正比于初级线圈和次级线圈的半径比^[16]); $U = Q(t)/C$ 是电容器的时变电压, $Q(t)$ 是电容器的电荷, C 是电容器的电容.

假设回路的电流是正弦波, 得相量形式为

$$(R_M + R_P + j\omega L_M + j\omega L_P) \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2 = \dot{U}, \quad (3)$$

$$j\omega M \dot{I}_1 + (R_S + R_C + j\omega L_S + j\omega L_C) \dot{I}_2 = 0, \quad (4)$$

其中 $\omega = \sqrt{1/LC}$ 为圆频率, L 和 C 是回路的总电感和总电容.

对方程组求解, 可以得到:

$$\dot{I}_1 = \frac{R_S + R_C + j\omega L_S + j\omega L_C}{(R_M + R_P + j\omega L_M + j\omega L_P)(R_S + R_C + j\omega L_S + j\omega L_C) + \omega^2 M^2} \dot{U}, \quad (5)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{-j\omega M}{(R_M + R_P + j\omega L_M + j\omega L_P)(R_S + R_C + j\omega L_S + j\omega L_C) + \omega^2 M^2} \dot{U}. \quad (6)$$

由 (6) 式中可以看到, 在放电系统的 C , R_M 和 L_M 以及次级回路的 R_C 和 L_C 不变时, 影响次级电流的变量还有以下参数: (a) 圆频率 ω , 由回路的电感 (主要是初级线圈的电感 L_P) 决定; (b) 互感 M , 除变压器初级螺线管的电感 L_P 和变压器次级线圈的电感 L_S 外, 还需要考虑耦合系数 k 的影响, k 越大, 电流 \dot{I}_2 越大; (c) 次级线圈的电感 L_S 和电阻 R_S . 由于要保证较高的耦合系数, 要求次级线圈紧密包裹初级螺线管, 这两个参数很大程度上取决于初级螺线管的结构; (d) 初级螺线管的电感 L_P 和电阻 R_P , 它们主要由螺线管的匝数和直径决定. 由分析可知, 这些变量大小均依赖于初级螺线管匝数和直径的选取, 即初级螺线管的匝数和直径是影响磁场强度的关键参数, 因此我们重点研究了初级螺线管的匝数和直径对磁场强度的影响.

3 电感耦合线圈的实验结果与分析

3.1 电感耦合线圈测试与优化

设计制作了不同匝数 (10—45 匝) 和直径 (25—45 mm) 的初级螺线管, 并加工了相匹配的黄铜变压器外壳. 使用放置于初级回路中的罗氏线

圈 (Pearson Electronics 4418) 测量放电电流, 并使用经过校准的磁探针放置于磁场线圈中心来测量磁场波形.

各种尺寸的电感耦合线圈产生的峰值磁场强度如图 3 所示. 可以看到, 线圈的磁场强度一开始随着初级螺线管匝数和直径的增大而增大, 在 35 匝、35 mm 直径时磁场达到峰值. 当初级线圈的匝数较少时, 初级螺线管的电感较小, 线圈电感在放电系统的总电感占比较低, 导致较少能量转换为磁能, 磁场较小; 初级线圈直径较小时, 除了螺

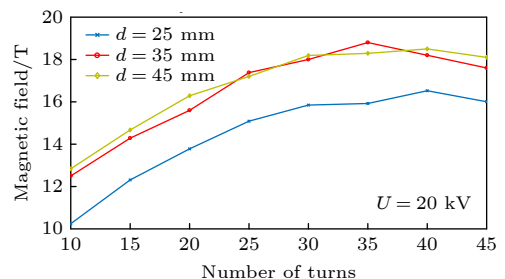


图 3 磁场线圈中心的峰值磁场强度随初级螺线管的匝数和直径变化

Fig. 3. The peak magnetic field at the center of magnetic field coil varies with the number of turns and diameter of the primary solenoid.

线管的电感占比较小外,与直径成正比的变压器次级线圈与螺线管的耦合效率 k 降低,产生的磁场强度也较小.匝数过多或直径过大,例如直径为35 mm匝数超过35匝或匝数为35匝直径到达45 mm时,磁场强度又开始减弱,从图4所示的螺线管的电感和电阻、磁场脉冲上升沿的变化曲线可以发现,此时螺线管电感过大、放电脉冲太长,同时电阻也较大,导致初级回路峰值电流降低,产生磁场强度变小.

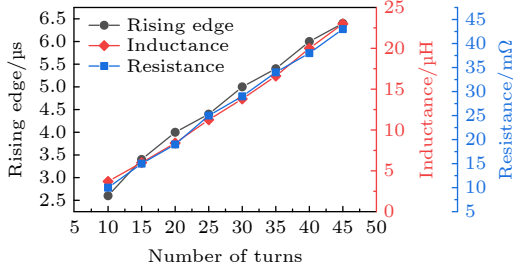


图4 初级螺线管直径35 mm时,螺线管部分的电感、电阻和磁场脉冲上升沿随线圈匝数的变化

Fig. 4. Inductance and resistance of the primary solenoid, and the rising time of the magnetic field pulse at different solenoids' numbers of turns. The diameter of the primary solenoid keeps at 35 mm.

从图3可以看出,在我们的脉冲强磁场设备上,电感耦合线圈的初级螺线管匝数为35、直径为35 mm时,电感耦合线圈与脉冲强磁场设备的匹配最好,此时螺线管的电感 L_P 为16.6 μH (是初级回路其余部分电感的36倍)、电阻 R_P 为32 $\text{m}\Omega$ 、电感耦合系数 $k \approx 0.84$;次级线圈的电感 L_S 为15 nH,电阻 R_S 为0.2 $\text{m}\Omega$,脉冲强磁场设备的电感和电阻分布如表1所列.表中放电系统和初级螺线管的电学参数分别由单匝线圈负载时的放电实验和LCR表直接测量得到;次级线圈和次级回路的电学参数由COMSOL模拟得到.在20 kV充电电压时使用该电感耦合线圈,在内径5 mm、高7 mm的磁场线圈中心可以获得19 T的峰值磁场强度,此时电流和磁场波形分别如图5(a)和图5(b)所

表1 最高磁场强度时脉冲强磁场设备的电感和电阻分布

Table 1. The distribution of inductance and resistance of pulsed magnetic field device.

参数	放电系统	初级螺线管	次级线圈	次级回路(不包括次级线圈)
电感	450 nH	16.6 μH	15 nH	3 nH
电阻	0.1 Ω	32 $\text{m}\Omega$	0.2 $\text{m}\Omega$	0.9 $\text{m}\Omega$

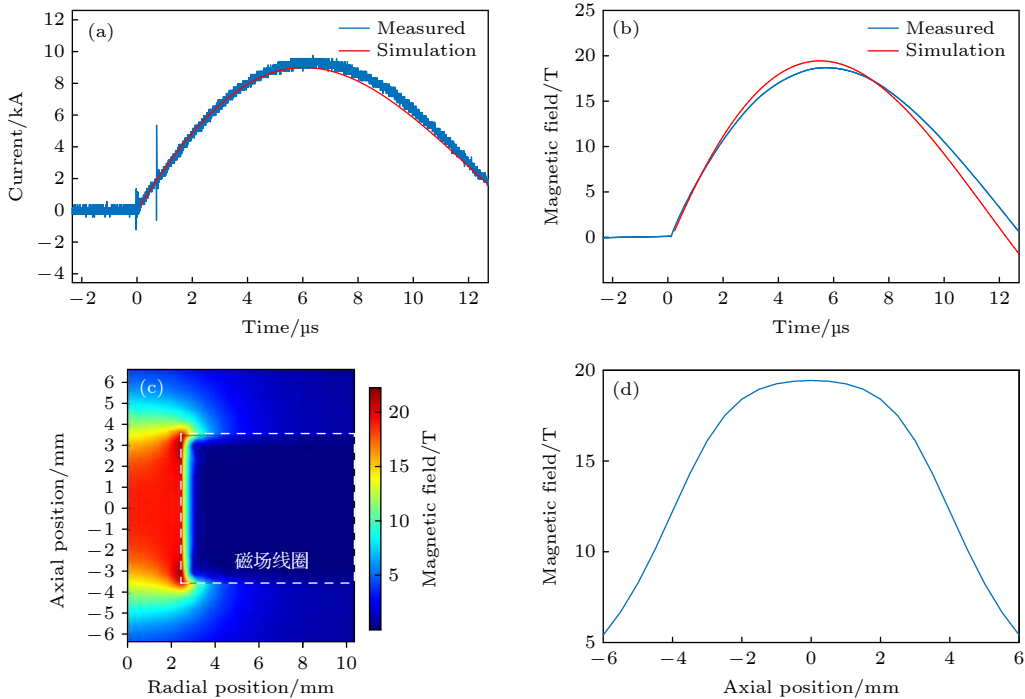


图5 使用35匝、直径35 mm初级螺线管的电感耦合线圈在20 kV时的放电测试结果和模拟结果 (a) 初级回路电流波形; (b) 磁场线圈的磁场波形; (c) 磁场峰值时磁场强度的二维轴对称分布; (d) 线圈轴向上的峰值磁场分布

Fig. 5. Experimental and simulation results of the pulsed magnetic field at 20 kV discharge voltage using an inductively coupled coil with primary solenoid of 35-turns and 35-mm diameter: (a) Current pulse of the primary solenoid; (b) magnetic field pulse at the center of the magnetic field coil; (c) two dimensional axisymmetric distribution of the peak magnetic field; (d) the peak magnetic field distribution along the axis of the magnetic field coil.

示. 初级回路的峰值电流达到 9.3 kA, 磁场脉冲的上升沿为 5.4 μs , 平顶磁场宽度 (大于 95 % 峰值磁场) 约为 3 μs .

本文使用多物理场有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 对放电过程进行数值模拟, 该软件可以进行二维轴对称或三维建模来研究力学、传热学、电磁学和等离子体物理等多学科领域的问题. 软件中预设有多个物理场接口, 模拟时可根据实际物理过程选择对应的接口来求解. 使用软件的电路模块和电磁场模块来计算电感耦合线圈能够产生的磁场强度. 电磁场模块需根据已知的电流分布和建立的三维线圈模型, 通过麦克斯韦方程组和欧姆定律计算得到三维空间的电磁场分布; 电流分布是未知量, 所以需要耦合电路模块进行分析. 电路模块可以根据设备的电路模型, 构建出对应的网孔方程, 再结合回路中电子器件的参数值, 求解得到线圈中的电流分布. 软件在求解前需要根据实际物理过程选择“稳态”或“瞬态”研究. “稳态”研究适用于求解变量不随时间变化的问题, “瞬态”研究则用于求解变量随时间变化的问题. 本文研究的实际电流和磁场波形随时间变化, 因此在模拟中选择“瞬态”研究.

使用软件进行模拟时, 首先将表 1 中已知的电学参数按图 1 所示的电路导入软件的电路模块, 经电路模块计算得到初级回路和电感耦合线圈中的电流. 然后导入图 2(a) 中的三维电感耦合线圈模型, 在电磁场模块将电路模块输出的电流分布作为初始条件输入给螺线管, 通过电磁场模块的瞬态模拟, 计算得到电感耦合线圈产生的三维电磁场空间分布.

如图 5(a) 和图 5(b) 所示, 模拟结果与实验结果的一致性非常好. 同时, 模拟结果还给出了实验无法测量的其他关键参数, 例如模拟显示磁场线圈部分的峰值电流为 168 kA, 是初级回路 9.3 kA 峰值电流的 18 倍 (因为次级回路接有负载, 不是理想变压器, 同时变压器在耦合过程中存在能量损失, 所以无法达到线圈匝数的 35 倍). 电感耦合线圈的降压、升流实现了对电流的提升, 获得了更强的磁场强度.

当脉冲强磁场设备不使用电感耦合线圈作为负载, 而是直接连接使用 14 AWG 铜导线制作的内径 5 mm 的单匝磁场线圈时, 在 20 kV 放电只能获得 5.2 T 的峰值磁场、28 kA 的峰值电流, 电

感耦合线圈的使用将磁场强度提升了 3.6 倍. 如果不加变压器的次级回路, 在 20 kV 放电时 35 匝、直径 35 mm 的螺线管能产生 4 T 的峰值磁场强度 (磁场的空间体积是单匝磁场线圈的数十倍), 这种大体积螺线管占据立体角大, 严重限制了实验的灵活性, 磁场区域变大也使得磁场强度减小.

3.2 进一步提升磁场强度

为了测试电感耦合线圈的极限性能, 测量了黄铜材料的电感耦合线圈产生的峰值磁场强度随放电电压的变化关系, 并将实验结果与 COMSOL Multiphysics 模拟的结果进行了对比, 如图 6 所示. 模拟和实验发现, 线圈能提供的磁场强度与放电电压呈线性变化关系, 在脉冲强磁场设备的放电电压小于 30 kV 时, 实验测量的结果与模拟结果的一致性较好. 但当放电电压为 35 kV 时, 实验测得的峰值磁场强度开始小于模拟值. 这是因为当充电电压超过 30 kV 以后, 在磁场线圈内产生的磁场强度超过 25 T, 此时的磁压力 $P = 250 \text{ MPa}$ 超过了黄铜的屈服强度 200 MPa, 磁场线圈扩张使得磁场变弱. 因此在放电电压为 35 kV 时, 实验获得的峰值磁场强度小于模拟结果, 更高放电电压时甚至出现了磁场线圈炸裂问题.

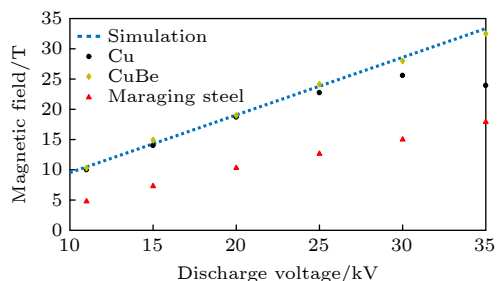


图 6 磁场线圈产生的峰值磁场强度随放电电压的变化. 虚线为模拟结果, 点为实验结果. 电感耦合线圈材料分别是 Cu, CuBe 和马氏体时效钢, 屈服强度分别为^[25]: 黄铜 200 MPa, 铍铜 1 GPa, 马氏体时效钢 2 GPa

Fig. 6. The peak magnetic field produced by magnetic field coil varies with the discharge voltage. The dotted line is the simulation result, and the dot is the experimental result. These inductively coupled coils are made of Cu, CuBe or Maraging steel with yield strength of: Cu ~200 MPa, CuBe ~1 GPa, Maraging steel ~2 GPa.

为了避免线圈扩张导致的磁场强度降低, 改用具有更高屈服强度的铍铜 (1 GPa) 和马氏体时效钢 (2 GPa) 制作了相同尺寸的电感耦合线圈, 并且使用高强度尼龙线对次级线圈和磁场线圈的连接

部分进行了加固. 35 kV 电压时的测试结果表明, 这两种材料的线圈均未出现扩张和损坏, 铍铜制成的电感耦合线圈可以在 35 kV 的放电电压下, 产生 33 T 的峰值磁场强度. 我们发现, 在相同的放电电压下, 马氏体时效钢材料的线圈能够产生的磁场强度小于铍铜线圈. 这是因为马氏体时效钢的电阻率 (约为 $75 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$) 显著大于铜合金 (约 $7.1 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$)^[26], 次级回路电阻较大、感应产生的电流变小.

4 结 论

研制了一套用于脉冲强磁场设备的电感耦合线圈, 通过优化电感耦合线圈的初级螺线管匝数和直径, 大幅度提升了磁场强度. 当脉冲强磁场设备以 20 kV 放电, 可以在直径 5 mm 的磁场线圈中产生 19 T 的峰值磁场, 是单匝线圈峰值磁场的 3.6 倍, 磁场脉冲的上升沿为 5.4 μs 、平顶磁场宽度约为 3 μs . 相比于黄铜线圈在 30 kV 的放电电压下会出现扩张和损伤, 由屈服强度更高的铍铜制成的电感耦合线圈可在 35 kV 时正常工作, 并产生 33 T 的磁场强度, 可以进行更高磁场强度的激光等离子体实验. 下一步我们将对电感耦合线圈进行结构优化, 以进一步提升磁场强度、改善强磁场中线圈的炸裂问题、增强绝缘性能以适应更多实验环境.

参考文献

- [1] Gotchev O V, Chang P Y, Knauer J P, Meyerhofer D D, Polomarov O, Frenje J, Li C K, Manuel M J E, Petrasso R D, Rygg J R, Séguin F H, Betti R 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 215004
- [2] Chang P Y, Fiksel G, Hohenberger M, Knauer J P, Betti R, Marshall F J, Meyerhofer D D, Séguin F H, Petrasso R D 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 035006
- [3] Hohenberger M, Chang P Y, Fiksel G, Knauer J P, Betti R, Marshall F J, Meyerhofer D D, Séguin F H, Petrasso R D 2012 *Phys. Plasmas* **19** 056306
- [4] Bailly-Grandvaux M, Santos J J, Bellei C, et al. 2018 *Nat. Commun.* **9** 102
- [5] Sun K X, Huang T X, Ding Y K, Yi R Q, Jiang S E, Cui Y L, Tang X Q, Chen J S, Zhang B H, Zheng Z J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1750 (in Chinese) [孙可煦, 黄天晖, 丁永坤, 易荣清, 江少恩, 崔延莉, 汤晓青, 陈久森, 张保汉, 郑志坚 2002 *物理学报* **51** 1750]
- [6] Tang H B, Hu G Y, Liang Y H, Tao T, Wang Y L, Hu P, Zhao B, Zheng J 2018 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **60** 5
- [7] Pei X X, Zhong J Y, Zhang K, Zheng W D, Liang G Y, Wang F L, Li Y T, Zhao G 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 145201 (in Chinese) [裴晓星, 仲佳勇, 张凯, 郑无敌, 梁贵云, 王菲鹿, 李玉同 2014 *物理学报* **63** 145201]
- [8] Zhang K, Zhong J Y, Pei X X, Li Y T, Sakawa Y, Wei H G, Yuan D W, Li F, Han B, Wang C, He H, Yin C L, Liao G Q, Fang Y, Yang S, Yuan X H, Liang G Y, Wang F L, Zhu J Q, Zhang J, Zhao G 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 165201 (in Chinese) [张凯, 仲佳勇, 裴晓星, 李玉同, 阪和洋一, 魏会冈, 袁大伟, 李芳, 韩波, 王琛, 贺昊, 尹传磊, 廖国前, 方远, 杨骥, 远晓辉, 梁贵云, 王菲鹿, 朱健强, 丁永坤, 张杰, 赵刚 2015 *物理学报* **64** 165201]
- [9] Creel J R, Donnelly T, Lunney J G 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 071104
- [10] Law K F F, Bailly-Grandvaux M, Morace A, Sakata S, Matsuo K, Kojima S, Lee S, Vaisseau X, Arikawa Y, Yogo A, Kondo K, Zhang Z, Bellei C, Santos J J, Fujioka S, Azechi H 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 091104
- [11] Pollock B B, Froula D H, Davis P F, Ross J S, Fulkerson S, Bower J, Satariano J, Price D, Krushelnick K, Glenzer S H 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 114703
- [12] Albertazzi B, Béard J, Ciardi A, et al. 2013 *Rev. Sci. Instrum.* **84** 043505
- [13] Pollock B B, Froula D H, Tynan G R, Divol L, Price D, Costa R, Yepiz F, Fulkerson S, Mangini F, Glenzer S H 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 10F550
- [14] Gotchev O V, Knauer J P, Chang P Y, Jang N W, Shoup III M J, Meyerhofer D D, Betti R 2009 *Rev. Sci. Instrum.* **80** 043504
- [15] Li C X, Jin X, Wang G P, Zhang B Z, Gong H T, Gan Y Q, Li F, Song F L 2021 *Laser Part. Beams* **10** 1
- [16] Barnak D H, Davies J R, Fiksel G, Chang P Y, Zabir E, Betti R 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 033501
- [17] Zhu J Q 2018 *High Power Laser Sci. Eng.* **6** e55
- [18] Fiksel G, Agliata A, Barnak D, Brent G, Chang P Y, Folsbee L, Gates G, Hasset D, Lonobile D, Magoon J, Mastro Simone D, Shoup III M J, Betti R 2015 *Rev. Sci. Instrum.* **86** 016105
- [19] Wang Y L, Hu G Y, Hu P, Tang H B, Yuan P, Zheng J 2019 *J. Instrum.* **14** P09024
- [20] Wang Y L, Hu G Y, Hu P, Liang Y H, Yuan P, Zheng J 2019 *Rev. Sci. Instrum.* **90** 75108
- [21] Hu P, Hu G Y, Wang Y L, Tang H B, Zheng J 2020 *Rev. Sci. Instrum.* **91** 014703
- [22] Hu G Y, Liang Y H, Song F L, Yuan P, Wang Y L, Zhao B, Zheng J 2015 *Plasma Sci. Technol.* **17** 134
- [23] Fiksel G, Backhus R, Barnak D H, Chang P Y, Davies J R, Jacobs-Perkins D, McNally P, Spielman R B, Vigés E, Betti R 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 084703
- [24] Li H S 2006 *Circuit Analysis* (Vol. 4) (Beijing: Higher Education Press) p12 (in Chinese) [李瀚荪 2006 *电路分析基础* (第4版) (北京: 高等教育出版社) 第12页]
- [25] Bluhm H (translated by Jiang W H, Zhang C) 2008 *Pulsed Power Systems: Principles and Applications* (Beijing: Tsinghua University Press) p188 (in Chinese) [布卢姆 H 著 (江伟华, 张驰译) 2008 *脉冲功率系统的原理与应用* (北京: 清华大学出版社) 第188页]
- [26] Zhang S Y 2005 *The Latest Metal Material Grades, Properties, Uses and Comparison of Chinese and Foreign Grades, Quick-use Quick Reference Practical Manual* (Hong Kong: China Science and Culture Publishing Press) p709, p1122 (in Chinese) [张丝雨 2005 *最新金属材料牌号、性能、用途及中外牌号对照速查实用手册* (香港: 中国科技文化出版社) 第709页、第1122页]

Optimization of pulsed intense magnetic field device for laser plasma experiment via inductively coupled coil*

Zhao Jia-Yi¹⁾ Hu Peng¹⁾ Wang Yu-Lin¹⁾ Wang Jin-Can¹⁾
Tang Hui-Bo^{1)†} Hu Guang-Yue^{1)2)‡}

1) (CAS Key Laboratory of Geospace Environment, Department of Engineering and Applied Physics,
University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

2) (CAS Center for Excellence in Ultra-intense Laser Science(CEULS), Shanghai Institute of Optics and
Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

(Received 8 March 2021; revised manuscript received 8 April 2021)

Abstract

Magnetized laser plasma has attracted a lot of attention in recent years especially in magnetized inertial confinement fusion, laboratory astrophysics, and industrial application. Pulsed intense magnetic field device is the core equipment of magnetized laser plasma experiment. Here in this work, an inductively coupled coil is developed to optimize the pulsed intense magnetic field device. The primary coil of a multi-turn solenoid is used instead of a single-turn coil. Then the energy of the solenoid is delivered to the secondary coil via inductively coupled transformer, which increases the current density markedly. The current generates a stronger magnetic field in the single-turn magnetic field coil. The influence of the diameter and the number of turns of the primary solenoid of the inductively coupled coil on the magnetic field are explored in experiment and simulation. It is found that for a discharge system of 2.4 μF capacitance, the optimized parameters of the primary solenoid are 35 turns and 35 mm diameter. The optimized magnetic field is 3.6 times stronger than that of the conventional directly connected single-turn coil. At a charging voltage of 20 kV, the peak magnetic field reaches 19 T in a magnetic field coil of 5 mm inner diameter. The inductively coupled coil made of CuBe solves the problem of coil expansion in intense magnetic field, and a peak magnetic field of 33 T is obtained at a charging voltage of 35 kV. The present approach creates stronger magnetic field environments. At the same time, the inductively coupled coil reduces the requirements for system inductance, so that components such as energy storage capacitors and switch can be placed far from the coil, which improves the flexibility of the experiment setup.

Keywords: laser plasma, magnetized plasma, pulsed intense magnetic field device, inductively coupled coil

PACS: 52.72.+v, 52.50.Jm, 52.57.-z

DOI: [10.7498/aps.70.20210441](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210441)

* Project supported by the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB16000000), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11775223, 11375197, 11605200, 11275202), the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China and the Open Fund of the State Key Laboratory of High Field Laser Physics (SIOM), China.

† Corresponding author. E-mail: tanghb@ustc.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: gyhu@ustc.edu.cn