

文章编号: 1001—4322(2000) s1—0185—04

阳极化膜用于等离子体电光开关 放电腔绝缘模拟研究*

郑奎兴, 鲁敬平, 张雄军, 郑建刚, 董云, 冯斌, 魏晓峰

(中国工程物理研究院 高温高密度等离子体物理国家重点实验室, 四川 绵阳 919-988 信箱 621900)

摘 要: 壳体金属化是等离子体电光开关实现阵列结构的必须, 放电腔的绝缘是壳体金属化的技术关键和难点。分析了等离子体电极电光开关放电腔的主要放电过程和特性; 介绍了几种厚度阳极化膜的击穿电压和用于电光开关放电腔绝缘模拟实验的情况和结果。初步分析了影响阳极化膜用于等离子体电极电光开关放电腔绝缘的主要因素, 实验表明 $60\mu\text{m}$ 厚度的阳极化膜可以满足电光开关放电腔绝缘的实用要求。

关键词: 电光开关; 绝缘; 阳极化膜; 辉光放电

中图分类号: TN 520 **文献标识码:** A

为了提高泵浦效率, 一些大型激光器(像美国的 NIF 等)都将采用结构紧凑的阵列结构设计, 这种阵列结构相应对光学元器件提出了严格的空间限制和机械要求。电光开关也必须采用相应的阵列结构, 即将多块晶体固定在一个主体框架上, 作为一个单元进行整体调节。由于晶体的开关效率受晶轴和光轴的夹角影响较大, 要保证同一单元多块晶体轴线能满足设计指标要求并长期保持稳定, 对壳体材料的机械强度和机械加工性能都有较高的要求, 因此必须采用金属壳体。由于等离子体电极电光开关是利用两端放电腔中辉光放电形成的等离子体作为电极, 采用金属作壳体就需要解决放电腔的绝缘问题, 它包括电极与壳体之间的绝缘, 辉光放电等离子体与壳体之间的绝缘。

涂覆绝缘涂层也是解决放电腔绝缘的办法之一, 但由于放电腔内需要抽真空和存在放电溅射离子的轰击问题; 同时涂层在装配和运输过程中容易脱落, 因此, 该途径存在较大的技术风险。阳极化膜是通过电化学反应将表层一定厚度的铝转化成三氧化二铝, 利用三氧化二铝的介电特性来实现绝缘。该方法具有膜层与基体之间结合强度高, 因离子轰击而产生的溅射物少等优点。对于阳极化膜层的电气绝缘特性不同的资料有不同的说法, 以往的研究主要针对封孔阳极化的情况, 应用环境与电光开关放电腔也不一样, 美国 LLNL 成功的将 $100\mu\text{m}$ 的阳极化膜用于电光开关的绝缘, 但对膜层厚度的选择没有给出理论和实验依据。阳极化膜具有随着膜层厚度增加, 对基体材料和基体表面加工的要求越来越高, 加工成本增加等特点。因此, 开展未封孔阳极化膜的电气特性和用于放电绝缘特性研究, 优化用于等离子体绝缘的膜厚参数具有实用意义。本文分析了放电腔的主要放电过程和特性, 介绍了阳极化膜击穿电压测试和模拟实验的情况。

1 金属壳体电光开关的放电特性

等离子体电极是通过阴阳极之间气体辉光放电建立的, 阴阳极之间加有两个脉冲电压, 一个是脉宽为 0.5s 的预电离脉冲, 电压为 2kV ; 另一个为主放电脉冲, 峰值电压为 $4\sim 6\text{kV}$ (电流一般为 $2\sim 3\text{kA}$),

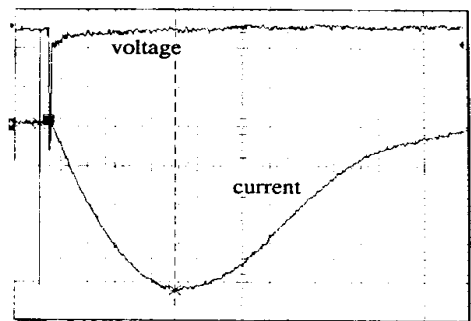


Fig 1 Discharging waveforms in dielectric shell chamber

图 1 无阳极化内衬放电电流电压波形

* 收稿日期: 2000-09-06; 修订日期: 2000-11-15
基金项目: 国家 863 惯性约束聚变领域资助课题
作者简介: 郑奎兴(1966-), 男, 副研究员。

图 1 为放电电流波形图。阴阳极之间的距离为 300mm, 阴极为磁控阴极, 工作气压在 5~ 8Pa 之间, 其理论击穿电压值为 400V 左右, 击穿后阴阳极之间的电压始终维持在 400V 左右。

用金属作壳体面临两方面的绝缘问题, 一是防止阴极直接对壳体放电, 二是防止电子或离子直接通过壳体泄漏掉, 造成等离子体分布的不均匀。根据 LLNL 研究的结果, 放电腔内等离子体的密度为 $10^{11} \sim 10^{12}$, 等离子体温度小于 10eV^[4]。等离子体本身对壳体的绝缘要求不是很高, 等离子体的泄漏只能是先发生了阴极对壳体的放电, 将绝缘层破坏后, 金属壳体直接暴露在等离子体中, 因此, 金属壳体放电腔绝缘的重点应该是解决阴极直接对壳体放电的问题。

阴极对壳体放电的薄弱环节包括两种情况, 一是在主脉冲刚加上的几百 ns, 腔内存在几千伏的高电压; 二是辉光放电状态下的阴极位降, 即在整个放电过程中, 阴极附近都存在较强的电场。对于第二种情况, 只涉及到阴极附近, 我们可以采用加阴极绝缘套的办法解决。对于第一种情况, 由于放电总是由薄弱环节开始, 即什么地方绝缘性能差, 什么地方先被击穿, 理论上讲, 只要壳体的绝缘性能好于气体的绝缘性能, 对壳体放电的概率就较小, 其绝缘性能差别越大, 概率越小。

2 实验装置与方法

2.1 阳极化膜耐压特性测试实验

仿照国际标准建立了该实验测试装置。图 2 为电路原理简图, T_1 为调压变压器, T_2 为升压变压器, R_1 为实验电压测量电阻, R_2 是保护电阻, 微安表 1 指示加到试样上的电压, 微安表 2 指示流过试样回路的电流。试样接入回路时, 回路的低压端与试件接通, 高压端接到一个直径为 15mm 的球上, 球面与试样的阳极化膜接触。实验时, 调节 T_1 来改变加到试样上的电压, 在不同电压下, 测量流过回路的电流, 如果阳极化膜未被击穿, 则回路没有电流或电

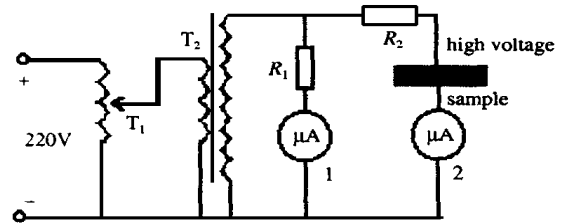


Fig. 2 Discharge circuit for breakthrough testing

$$R_1 = 100\text{M}\Omega, R_2 = 82\text{K}\Omega$$

图 2 耐压实验线路图

流很小, 当回路电流 $I = V/R_2$ 时的电压就是该膜的击穿电压。每件试样测试十个不同的位置, 它们的算术平均值就是该膜层的耐压值。

试样选用了 A112 普通硬铝, 试样膜厚分别为 $30\mu\text{m}$ 、 $60\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$ 三种, 阳极化膜在中物院机械制造与工艺研究所和成都飞机工业公司加工。膜厚测试由成都飞机工业公司理化中心完成。

2.2 阳极化膜用于金属壳体放电腔绝缘实验模拟

我们分别对膜厚为 $30\mu\text{m}$ 和 $60\mu\text{m}$ 的情况进行了等离子体绝缘模拟实验。未对 $100\mu\text{m}$ 的情况进行实验主要由于两方面的原因: 一是美国 LLNL 已经成功建成 $100\mu\text{m}$ 膜厚的装置, 并且经过了长时间的考验, 我们可以直接作为一个参照点; 二是阳极化加工单位对大面积试件加工到 $100\mu\text{m}$ 的膜厚存在技术困难。

放电装置利用了已经建成的超高分子聚乙烯壳体 $240\text{mm} \times 240\text{mm}$ 普克尔盒。实验时在放电腔内放入阳极化内衬, 模拟金属壳体放电时等离子体周围的环境。阳极化内衬紧贴腔壁, 与阳极之间用导体接通, 保持同一电位, 在阴极端加超高分子聚乙烯阴极绝缘套, 避免阴极与阳极化内衬直接接触, 解决阴极位降产生的强电场问题, 基本结构如图 3 所示。实验时, 用 CCD 成像系统直接记录放电腔放电强度的空间分布情况, 同时利用 Tek644 示波器记录放电时的电流和电压波形。

如果放电时阳极化膜被大面积击穿, 或有大量的电荷或电流通过阳极化内衬, 则 CCD 可以记录到放电强度的空间不均匀状况, 由于放电时的负载发生了变化, 电流和电压波形也要相应发生变化。因此通过电流电压波形和 CCD 图像可以有效的分析放电腔内的放电状态。

3 结果与讨论

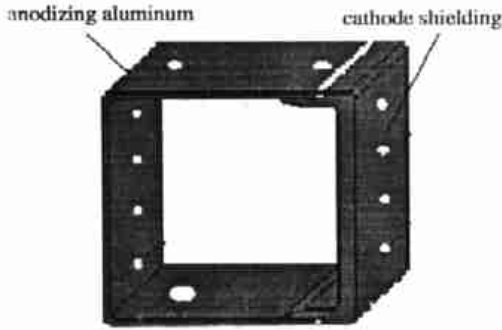


Fig 3 Sketch map of anodizing aluminum lined
图3 阳极化内衬结构示意图

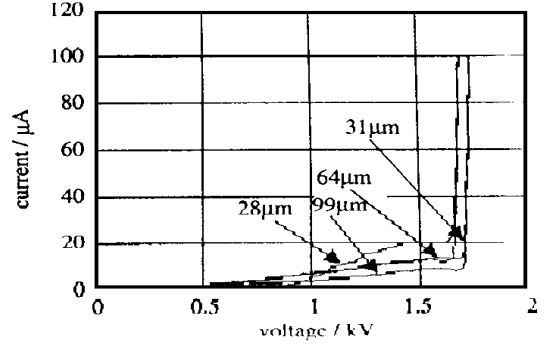


Fig 4 The current-voltage curves of breakdown tested samples
图4 击穿实验电流电压曲线

3.1 阳极化膜耐压特性

实验击穿电压值测试结果见表 1:

表 1 不同膜厚的击穿电压值

Table 1 The test value of breakdown for various anodizing films

samples	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
Thickness of film/ μm	31	99	28	64
Breakdown values/ kV	1750	1650	1700	1700

图 4 是在击穿前流过各试件的电流与试件两端所加的电压之间的变化曲线。电流发生突变的地方即为阳极化膜的击穿点。

从表 1 的数字和图 4 的曲线可以看出, 未封孔的阳极化膜耐压特性具有如下特点:

(1) 厚度为 $30\mu\text{m}$ 与 $100\mu\text{m}$ 之间的阳极化膜, 击穿电压值在 $1.5\sim 1.7\text{kV}$ 之间, 不随膜厚的改变而发生明显改变。尽管所用高压球大小、实验环境等与国际标准不完全一致, 其绝对值不很准确, 但其相对结果还是成立的。这一结果与阳极化膜的结构也是相吻合的, 由于未进行封孔处理, 击穿电压主要决定于无孔层的厚度, 一般无孔层厚度差别较小。

(2) 从图 4 的曲线可以看出, 从电压大于 500V 后, 就有微弱的电流通过试件, 并且随着电压的增大, 电流也线性的增加, 因此, 阳极化膜在回路中, 相当于一个大电阻, 其阻值为 $R = U/I = 1250 / (9 \times 10^{-6}) = 1.4 \times 10^8 \Omega$ 。

3.2 阳极化膜用于放电腔绝缘特性

膜厚为 $30\mu\text{m}$ 的阳极化内衬进行了大约 50 次放电后, 放电变得不稳定, 均匀性开始变坏。而膜厚 $60\mu\text{m}$ 的内衬进行了近 500 次放电实验, 放电均匀性没有明显的变化。

图 5 和图 6 是实验测得的 CCD 照片。从这些图中可以看出:

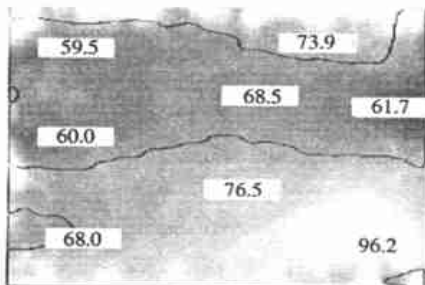


Fig 5 CCD image contour line of discharging in dielectric chamber
图5 没有阳极化内衬的放电强度等高图

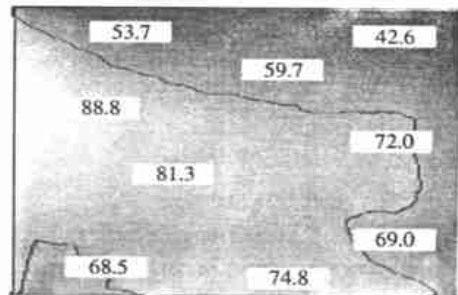


Fig 6 CCD image contour line of discharging with $60\mu\text{m}$ anodizing lined
图6 有 $60\mu\text{m}$ 阳极化内衬的放电等高图

(1) 考虑到脉冲放电固有的随机性, 实现放电图像的绝对重复是不可能的, 从实际需要出发, 根据放电强度的空间分布均匀性来判断腔内的放电变化。图 5 与图 6 的均匀性没有大的变化, 说明在放电过程中, 没有发生阳极化膜的击穿现象。

(2) 对比图 1、图 7 的电压- 电流波形图, 形状基本保持了一致, 表明其放电负载没有大的变化, 从另一个侧面说明 $60\mu\text{m}$ 膜厚的阳极化内衬没有发生大的击穿和等离子体的泄漏问题。

(3) 从耐压实验测试结果来看, 两种内衬的放电绝缘特性应该一样。而实验中膜厚 $30\mu\text{m}$ 的内衬出现放电均匀性和稳定性随着放电次数的增加而变坏的情况, 体现了两种膜层存在差别。这种差别在耐压实验中没有体现出来, 只在放电模拟实验时才有, 一方面说明这种差别性与放电的这种特殊环境有关, 另一方面说明放电环境对膜层总体厚度的差别比较敏感, 具体讲对多孔层比较敏感。在前面的分析中已经谈到, 等离子体的温度小于 10eV , 不会对膜层直接产生大的破坏和影响。放电腔的另一差异就是存在阴极溅射产生的离子, 由于溅射离子的能量可以到达 500eV , 因此溅射离子的轰击对膜层会有一定的破坏。在放电过程中, 多孔层将无孔层与溅射离子分离开, 离子轰击到无孔层的概率随多孔层的增厚而减小。

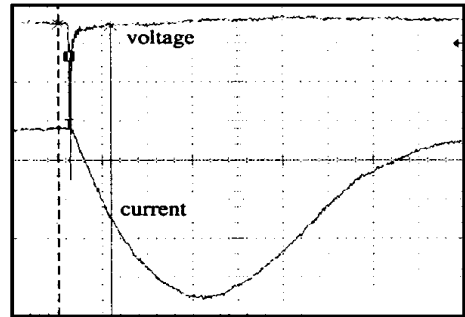


Fig 7 the voltage-current waveform with $60\mu\text{m}$ anodizing lined

图 7 有 $60\mu\text{m}$ 阳极化内衬放电电压电流波形

4 结 论

通过阳极化膜耐压特性实验和放电模拟实验表明: 阳极化膜的电气绝缘强度主要决定于无孔层的厚度; 用于等离子体放电绝缘时, 膜层厚度的选择主要考虑放电溅射离子轰击的影响; 厚度 $60\mu\text{m}$ 的阳极化膜可以满足金属壳体大口径电光开关放电腔的绝缘要求。

参考文献:

- [1] Rhodes M A, De Yoreo J J, Woods B W, et al Large-aperture optical switches for high-energy, multipass laser amplifiers[R]. UCRL-JC-105821-92-1, 1992
- [2] Rhodes M A, Woods B W, De Yoreo J J, et al Plasma electrode pockels cells for the Beam let and N IF lasers[R]. UCRL-JC-115597, 1994
- [3] 鲁敬平, 吕传信, 张雄军, 等 等离子体电极电光开关实验研究[J]. 强激光与粒子束, 1997, 9(1): 72-78
- [4] Rhodes M A, Boley C D, Tarditi A G, et al Plasma electrode pockels cell for CF lasers[J]. SPIE, 1995 94-104

Study on the isolation technology of metal shell plasma electrode pockels cell

ZHENG Kui-xing, LU Jin-ping, ZHANG Xiong-jun, DONG Yun, FENG Bin, ZHANG Xiaom-in, WEI Xiaofeng
(National Key Laboratory of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

Abstract The isolate of discharge chamber is a key issue of metal material shell PEPC. We have constructed the testing facilities for breakthrough and modulating discharge respectively. Testing samples of anodized film include three kinds of thickness which are $30\mu\text{m}$, $60\mu\text{m}$ and $100\mu\text{m}$ respectively. Experiments and theoretical analysis display that the breakdown threshold of the film depends mainly on the thickness of non-hole layer, and the basic thickness for the isolating of PEPC's glow discharge chamber is $60\mu\text{m}$.

Key words electro-optical switch; isolation; anodizing aluminum film; glow discharge