

HT-7装置液态锂限制器实验中锂的腐蚀与沉积特性的研究*

孟献才^{1)2)#} 左桂忠^{2)#} 任君²⁾ 孙震²⁾ 徐伟²⁾ 黄明²⁾ 李美姮¹⁾
 邓辉球¹⁾ 胡建生^{2)†} 胡望宇^{1)‡}

1) (湖南大学物理与微电子科学学院应用物理系, 长沙 410082)

2) (中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

(2015年4月3日收到; 2015年6月9日收到修改稿)

在磁约束聚变等离子体装置中, 面对等离子体的第一壁将直接影响高温等离子体性能及第一壁寿命, 具有表面自我修复的、能有效抑制边界粒子再循环的液态金属锂第一壁越来越被重视, 其中液态锂第一壁与等离子体相互作用的研究尤其重要. 本文研究了HT-7装置液态锂限制器实验中锂的表面腐蚀及在装置内沉积特性、及其对等离子体性能影响. 实验表明, 当锂与等离子体相互作用较弱时, 锂以微弱的蒸发及溅射形式从表面腐蚀并进入等离子体, 表现为锂的线辐射有所增强, 等离子体内杂质水平降低, 氢再循环降低, 有利于等离子体约束性能提高; 当锂与等离子体间的相互作用比较强时, 锂主要以锂滴形式直接进入等离子体, 引起锂的辐射爆发, 最终引发等离子体放电破裂. 通过对锂斑及样品的分析发现, 锂主要沉积在限制器周围, 并且在低场侧及沿着等离子体电流方向沉积居多, 表现为极向和环向分布不均匀, 这也导致边界粒子再循环分布的不均匀. 这些实验为研究液态锂第一壁与等离子体相互作用, 分析液态锂第一壁在托卡马克装置上应用具有重要参考意义.

关键词: HT-7托卡马克, 液态锂, 第一壁, 腐蚀

PACS: 28.52.-s, 52.55.Fa, 52.80.Vp, 68.37.-d

DOI: 10.7498/aps.64.212801

1 引言

核聚变是解决未来能源危机问题的合理方式, 托克马克作为发生聚变反应的装置而备受关注. 在托克马克装置运行时等离子体中大量的电子、中性粒子及电磁辐射会逸出来并与面对等离子体的真空室壁(第一壁)发生强烈的相互作用, 产生的大量的粒子会反复运动在等离子体第一壁之间, 即降低等离子体的约束性能又加剧第一壁的损伤^[1-3]. 虽然等离子体与第一壁的相互作用不可避免, 但可通过使用优良的第一壁材料, 烘烤, 直流辉光放电清

洗, 表面镀膜等壁处理技术控制粒子边界再循环, 抑制杂质等, 这对高密度稳态运行的核聚变装置都具有重大意义^[4-7]. 锂, 特别是液态锂壁处理技术中是对粒子再循环控制的最有效手段, 既能有效的控制等离子体密度, 又能降低来自器壁的杂质, 还可以吸收来自高能粒子的热量保护第一壁, 这对于任何进行稳态运行的核聚变装置都具有重大意义, 它可以解决大部分未来聚变堆所面临的难题, 包括长脉冲稳态运行、高能量约束等离子体、粒子控制和高密度放电、低的有效电荷数等, 尤其是液态锂壁, 还可以满足高热负荷的输运能力, 这种新概念

* 国家磁约束核聚变能研究专项(批准号: 2013 GB114004, 2014 GB124006)和国家自然科学基金(批准号: 11405210, 11105181)资助的课题.

共同第一作者.

† 通信作者. E-mail: hujs@ipp.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: wyuhu@hnu.edu.cn

将为磁约束聚变发展提供新的科学基础,也可能是未来聚变堆面对等离子体第一壁发展的一个重要途径^[7-21]. CDU-X^[8,9], FTU^[10,11], T-11M^[12-14], HT-7^[15-21], EAST^[15,17-21]等装置先后使用自由表面和毛细网结构的液态锂限制器,以及具有不同流动形式的流动液态锂限制器,实验证明通过使用液态锂限制器能够有效地改善等离子体性能.

但是,应用液态锂也面临一个很大的挑战,即等离子体放电轰击下液态金属锂的腐蚀和沉积的问题^[9-21]. 液态锂表面的腐蚀,主要是由于等离子体与液态锂表面相互作用引起的,主要包括锂的表面蒸发、燃料及杂质粒子对锂粒子的溅射及液态锂滴从锂表面的飞溅等. 在T-11 M装置液态锂限制器实验发现,当锂限制器温度小于450 °C时,限制器表面的锂发射以溅射为主,溅射率(Li⁺和D⁺)为0.5—1;当温度超过500 °C时,以锂的蒸发为主,其蒸发量随锂限制器靶温度指数增加. 实验还发现,腐蚀的液态锂的主要辐射集中在等离子体边界5 cm的区域,可以屏蔽掉约80%的欧姆功率,有效地保护了限制器表面结构^[13]. 在FTU装置上,通过液态锂限制器(LLL)实验发现,通过蒸发及溅射作用在限制位置的下环形成一个锂的辐射环,在等离子体与限制器之间形成了一个隔离层,有效地保护了锂限制器. 但是,实验也发现锂的蒸发量存在一个临界值,当限制器温度超过550 °C时,锂的蒸发引起锂的辐射增强,冷却边界等离子体,导致MHD的不稳定性($m = 2, n = 1$)出现,最终发生等离子体破裂^[11]. 腐蚀的液态锂大部分以Li⁺存在,很少量的锂能进入到等离子体中心,大部分在等离子体边界运输并沉积到装置壁的表面^[21]. 在NSTX上,对腐蚀(溅射为主)的锂的沉积做了详细分析,发现被电离的锂约94%再次沉积到液态锂偏滤器^[22]. 在T-11 M的实验中,同样对锂的沉积分布做了详细的研究,发现锂的沉积在电子侧和离子侧存在明显的不对称性,也就是在刮削层(SOL)内,锂离子以离子热速度量级的速度沿着离子漂移的环向运动(也就是等离子体电流 J_p 的方向)^[14].

液态锂在托卡马克复杂电磁环境下的腐蚀及在等离子体中的运输,既能够提高等离子体性能,又可能会引起等离子体放电的破裂,因此需要对等离子体放电条件下的液态锂的腐蚀、运输及沉积等做详细的研究. 本文详细分析了HT-7装置液态锂

限制器实验中锂的腐蚀与沉积特性,分析了不同的锂与等离子体相互作用条件下锂的腐蚀机理及引起的等离子体性能变化;通过对装置上不同位置样品上沉积锂的分析,深入研究了腐蚀的锂在等离子体内的运输及分布,为未来液态锂在核聚变装置的应用提供数据积累.

2 实验系统

HT-7装置是一个中型聚变研究装置,其主要设计参数为:大半径 $R = 1.22$ m,小半径 $a = 0.27$ m. 装置的主要的部件包括限制器、内衬、软铁、真空室壁及其他的面对等离子体部件. 其中主限制器为掺杂石墨材料(1%B, 2.5% Si, 7.5% Ti),表面镀上一层100 μm 的SiC涂层. 此外,还配备多种物理诊断系统等,能够有效地测量并分析等离子体的品质. 图1展示了HT-7装置内真空室的结构.

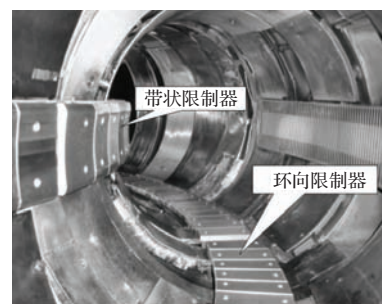


图1 HT-7装置内真空室

Fig. 1. Vacuum chamber of HT-7 device.

锂限制器安装在HT-7的底部,通过波纹管驱动能够从 $r = 290$ mm移动到 $r = 260$ mm,锂放置在不锈钢的槽子内,具有3 mm的表面厚度,表面积377 cm^2 . 通过嵌入在限制器表面不锈钢槽表面以下1 mm的热电偶测量限制器的温度,通过装置内的其他诊断,监测锂与等离子体的相互作用. 实验前,在氩气的保护下,将锂放置到不锈钢槽子上,然后加温将其液化. 实验中,锂限制器加温到200 °C以上,并推到等离子体边界开展液态锂限制器的实验. 在锂限制器、锂限制器的环向对称位置(正北)以及东西侧九十度(正东西)低场侧位置上各放置一块硅样品. 锂限制器和样品的位置如图2所示,放电结束后通过对样品的分析来研究腐蚀的锂的沉积分布.

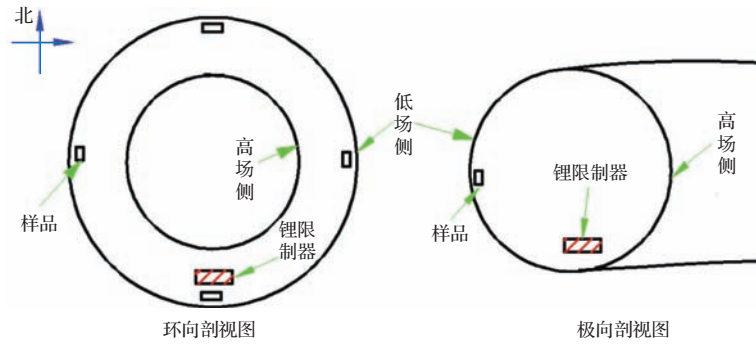


图2 锂限制器及样品的分布

Fig. 2. distribution of the Li limiter and samples.

3 实验结果

3.1 锂限制器放电中锂与等离子体的相互作用

3.1.1 锂的腐蚀及等离子体性能变化

在液态锂限制器放电中, H α 线辐射及氢氘比 (H/H+D) 降低了 20%—30%; CIII 和 OV 线辐射降低了 10%—20%; 随着 LiI 线辐射增强, 总的杂质辐射水平明显降低. 实验也发现了粒子约束时间增加 2 倍, 能量约束时间由 25.86 ms 提升到 30.04 ms, 等离子体约束性能提高 [15—18].

锂限制器条件下的等离子体放电中, 锂与等离子体放电之间的相互作用引起锂表面的腐蚀及等离子体性能的变化. 在其相互作用较弱时, 锂的线辐射有所增强, 等离子体内杂质水平降低, 氢再循环降低, 等离子体约束性能提高. 在锂与等离子体相互作用比较强时, 锂的辐射非常严重, 容易引发等离子体放电破裂. 如图 3(a), 对比了三次具有相同等离子体电流 ($I_p = 60$ kA) 和类似密度 ($0.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$) 的等离子体放电. 其中第 106010, 106040 和 106060 次放电分别为石墨限制器、固态锂限制器 (初始温度 $\sim 100^\circ\text{C}$) 和液态锂限制器 (初始温度 $\sim 265^\circ\text{C}$). 实验发现, 石墨限制器和固态锂限制器放电, 锂与等离子体相互作用较弱, 锂辐射略微增强, OV 杂质辐射及 H α 的线辐射强度降低, 等离子体性能略有提升. 在第 106060 次放电中, 在 1.6 s 附近, 液态锂与等离子体的相互作用较弱, 锂的辐射增强且较为稳定, 观察到其他碳及氢的线辐射也都有所抑制. 但是在放电的开始阶段, 锂的辐射水平明显增强, 并伴有锂的脉冲式爆发迹象, 同时其他杂质辐射也都增强, 等离子体品质变差. 尤

其是放电结束阶段, 由于锂的辐射爆发, 引起了等离子体放电的破裂.

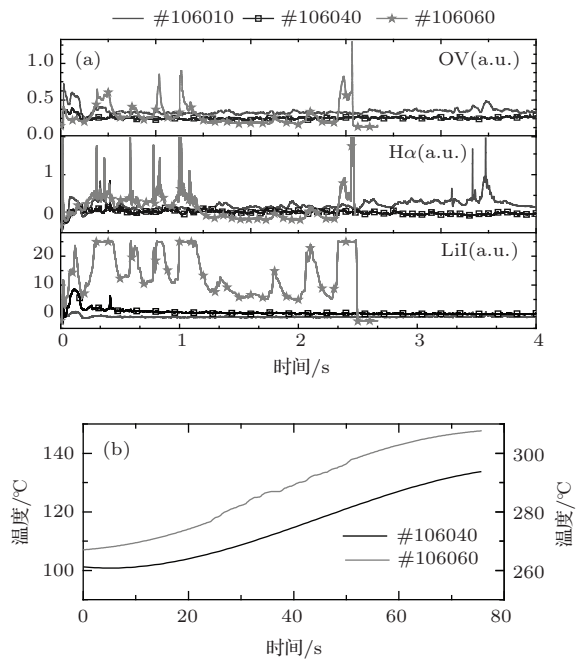


图3 不同放电条件下的参数 (a) 不同放电条件下 OV, H α , LiI 的相互比较; (b) 第 106040 和 106060 次放电点下限制器温度随时间的变化曲线

Fig. 3. Different parameters of plasma discharges: (a) comparison different parameters including OV, H α , LiI line emissions during three discharges; (b) temperature-time curves of Li limiter during discharges 106040 and 106060.

实验中, 通过布置在限制器背部的热电偶测得, 如图 3(b), 第 106040 次放电中, 固态锂限制器温升大约 30°C , 第 106060 次放电中, 液态锂限制器温升大约 40°C , 可能是因为热导系数的变化, 使得液态锂的温升较大. 从两个等离子体放电中锂限制器的温升可以看出, 锂限制器的温升都较小. 通过锂的表面温度分布计算液态锂表面的蒸发速度, 其计算公式为 [23]

$$G = 3.09 \times 10^{22} \times \frac{10^{[f-g/T]}}{\sqrt{T}\sqrt{M_{Li}}}, \quad (1)$$

其中 T 为温度, 单位 K; M_{Li} 为锂的摩尔质量, $7g/mol$; $f = 8.0$, $g = 8143.0$. 可以看出, 锂的蒸发速度是表面温度的函数, 随着温度的增加, 锂的蒸发速度将增加. 锂限制器表面单位时间内蒸发的粒子数可以通过以下公式计算:

$$N = G \times S, \quad (2)$$

这里 S 为限制器的表面积, 单位 cm^2 . 通过上式可算得, $310\text{ }^\circ\text{C}$ 下液态锂限制器表面锂的蒸发速率为 $1.97 \times 10^{17}\text{ s}^{-1}$. 同时锂的溅射引起的锂的发射率, 根据 HT-7 边界探针测得的结果 [17], 可以估算出, 在 HT-7 液态锂实验中溅射到等离子体中的锂的速率将为 $(1-2) \times 10^{20}/s$.

在锂限制器实验过程中, 在锂的爆发时刻点, 观察到很多锂液滴从锂限制器上方装置的低场侧飞出 (尺寸在 $1-5\text{ mm}$), 如图 4. 假定有半径为 $1-2\text{ mm}$ 的锂滴飞出进入等离子体并很快消融, 那么进入等离子体的粒子数是 $(1-8) \times 10^{21}$. 因此, 这样的锂滴进入等离子体中, 锂粒子数要比溅射引起的大得多, 锂滴的发射引起的锂的腐蚀很可能是造成等离子体破裂的主要原因.

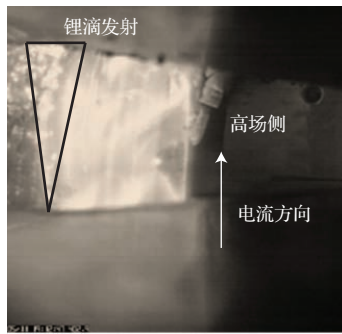


图 4 锂滴的发射

Fig. 4. liquid Li droplet splashing.

3.1.2 锂的腐蚀与等离子性能的环向不对称性

在液态锂限制器的放电中, 腐蚀的锂进入刮削层, 锂很容易被电离 (锂的第一电离能为 5.4 eV), 被电离的锂粒子在等离子体中沿磁力线运动. 实验中观察到了等离子体性能距离限制器位置的不同而不同 (等离子体性能的环向不对称性). 如图 5 所示, 分别比较了石墨限制器下第 106005 次欧姆放电和液态锂限制器 (锂的温度超过 $200\text{ }^\circ\text{C}$)

下的第 106049 次放电的等离子体参数. 两次放电具有相同的等离子体电流 130 kA , 等离子体密度 $2 \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$. 在锂限制器放电中, 锂的线辐射强度比石墨限制器条件下增强近 5 倍, 锂限制器附近的 $H\alpha$ 线辐射强度比石墨限制器条件下降低了约 40%, 而在远离锂限制器的环向对称位置, 由于限制器正北环向对称位置上锂量较少, 对氢的再循环抑制较弱, $H\alpha$ 线辐射强度只略微降低.

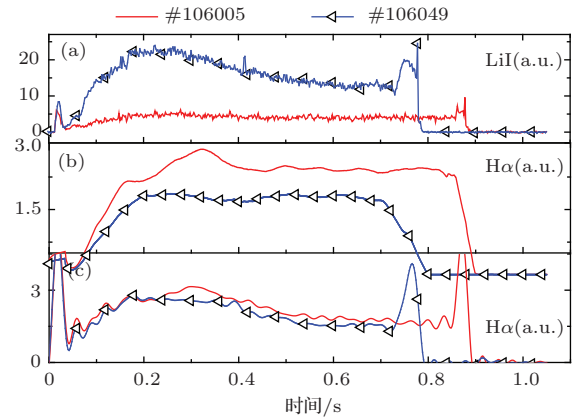


图 5 不同条件下参数的比较 (a) LiI 线; (b) 限制器位置的 $H\alpha$ 线; (c) 限制器环向对称位置 $H\alpha$ 线

Fig. 5. Comparison of parameters at different condition: (a) LiI line emission; (b) $H\alpha$ line emission at limiter position; (c) $H\alpha$ line emission at toroidal symmetrical position of Li limiter.

综上所述, 在等离子体放电中, 液态锂与等离子体相互作用引起锂以蒸发、溅射及锂滴发射的方式进入等离子体, 造成液态锂表面的腐蚀. 在 HT-7 装置不同类型的锂限制器放电中, 锂的蒸发及溅射引起的锂的腐蚀较小, 而以锂滴发射形式引起的锂的腐蚀较为严重. 在锂与等离子体相互作用较弱时, 腐蚀的锂较少, 等离子体放电平稳, 等离子体性能得到改善; 在锂与等离子体相互作用较强时, 大量的锂滴发射引起液态锂表面的腐蚀, 不仅严重影响锂限制器的使用寿命, 而且由于大量腐蚀的锂进入等离子体边界引起边界冷却, 从而造成等离子体的破裂. 在以后的锂实验研究中, 将着重探究不同的锂腐蚀量对等离子体性能的影响.

3.2 锂的沉积分布分析

3.2.1 沉积的锂在装置内的宏观分布及成分分析

HT-7 实验结束后, 打开真空室与大气连通, 一个月后进入真空室对锂限制器位置拍照, 并取出放

置的样品。如图6(a),发现有大量的白斑(尺寸在1—10 mm量级)分布在限制器的周围,西侧最远沉积位置离限制器约1 m,东侧沉积距离约0.3 m,西多东少(电流从东向西,在整个锂限制器试验中,等离子体电流始终为顺时针方向。),低场侧多于高场侧,在低场侧锂斑呈现发散型分布,可能是由于从低场侧发射出来的锂滴受电磁力作用沉积的结果。表面成分经X射线光电子能谱仪(XPS)分析,发现Li, C, O元素含量分别为25.69%, 23.2%, 51.21%,说明其主要成分为 Li_2CO_3 ,这是锂在空气中长时间氧化的产物,见图6(b)。

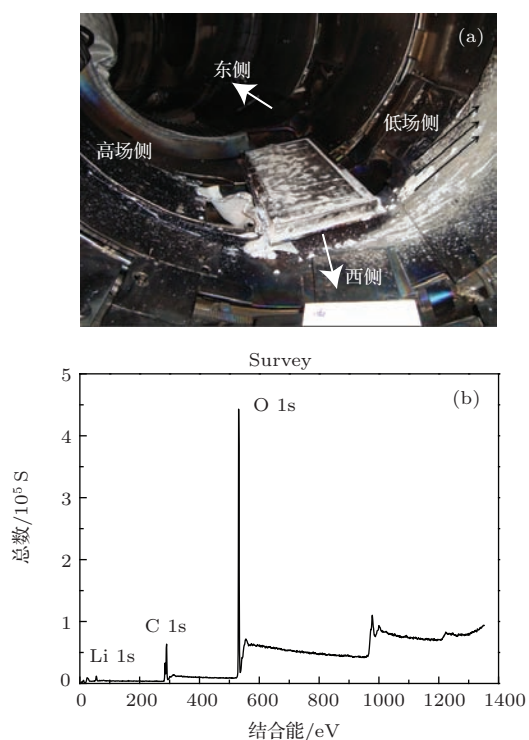


图6 (a) 限制器位置锂斑的分布; (b) 锂斑的XPS成分分析

Fig. 6. (a) Distribution of lithium spots at Li limiter position; (b) component analysis of the Li spot by XPS.

3.2.2 沉积的锂在各种样品上的微观分析

3.2.2.1 不同位置低场侧硅样品上锂的沉积膜分析

通过对样品上锂的沉积膜(锂膜)做扫描电镜(SEM)分析发现,锂限制器位置低场侧硅样品上镀膜分布相当均匀,但有局部开裂的现象,镀膜厚度约为100 nm,如图7(a), (b)。经XPS分析,锂膜表面元素为C, O, B, Si, W, Li, 各元素所占的原子百分比分别为50.26%, 28.98%, 9.26%, 0.36%, 0.05%

及11.09%,如图7(c)。样品分析结果表明其表面镀膜是锂镀膜,锂膜中出现B元素是由于经过很多次等离子放电,先前硼化壁处理时的工作介质 $\text{C}_2\text{B}_{10}\text{H}_{12}$ 被溅射出来并沉积到锂膜上;W元素是由钨样品的溅射沉积引入锂膜;Si元素可能是硅样品和石墨瓦表面的SiC膜溅射引入锂膜内。

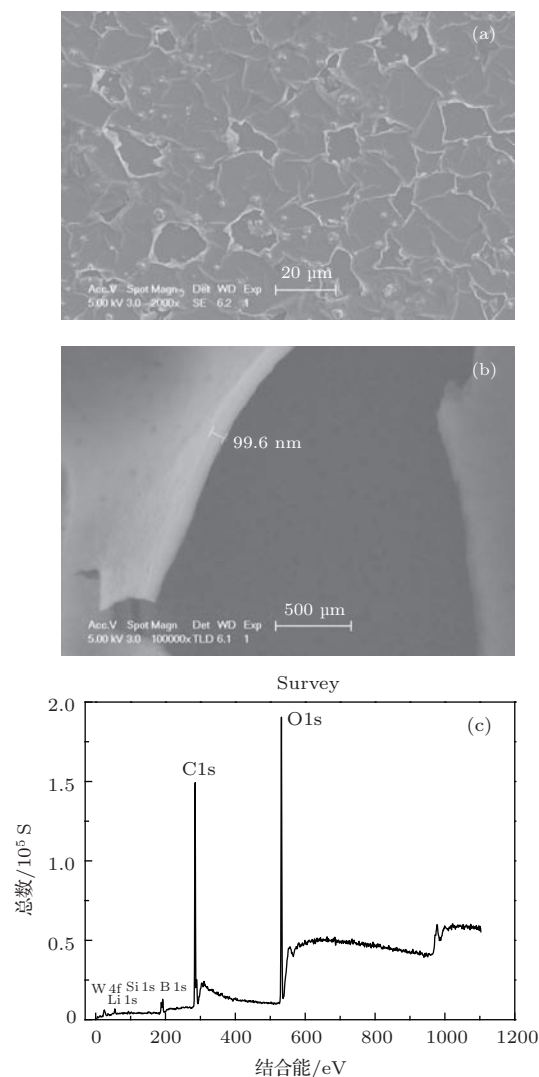


图7 限制器位置附近硅样品表面的锂膜分析 (a) 样品表面锂膜形貌; (b) 样品表面锂膜厚度; (c) 锂膜成分

Fig. 7. Li film on Si sample surface near Li limiter: (a) Morphology of Li film; (b) Li film thickness; (c) component analysis of Li film.

通过对锂限制器东西侧面各九十度(正东西)低场侧位置(各1/4周,距离锂限制器约2.35 m)硅样品上锂膜做SEM分析发现,两处的硅样品上沉积膜都比较均匀,XPS分析结果表面其成分为锂的化合物。如图8(a), (b),限制器西侧(沿等离子体电流方向)的硅膜厚度为76 nm,而锂限制器东侧的硅膜上沉积的锂膜厚度约为45 nm,这表明在距

离限制器相等距离的环向方向, 锂膜的沉积有明显的不对称性.

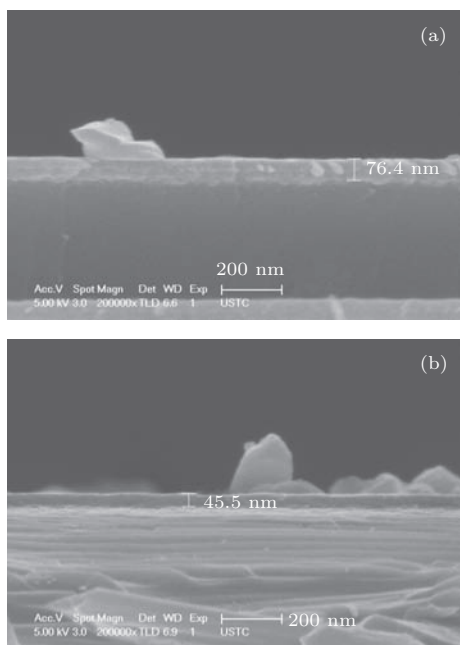


图8 不同位置样品表面的锂膜 (a) 西部硅样品上的锂膜厚度; (b) 东部硅样品上锂膜厚度

Fig. 8. Li film on different samples: (a) Li film thickness on the west Si sample; (b) Li film thickness on the east Si sample.;

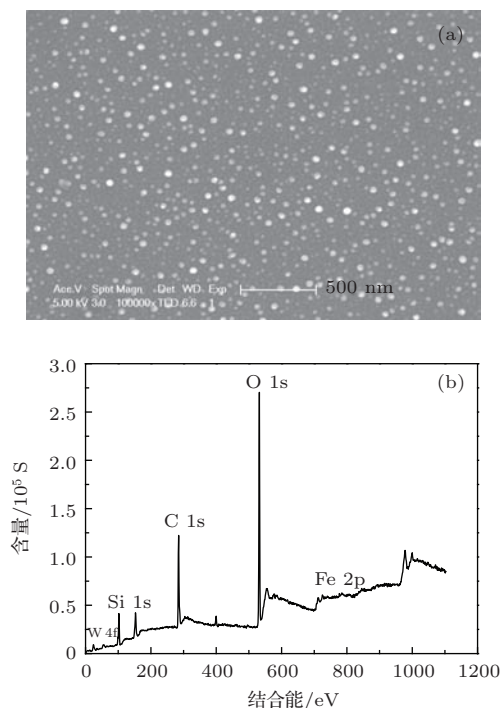


图9 环向对称位置处样品分析 (a) 环向对称位置硅样品表面形貌; (b) 样品表面成分分析

Fig. 9. Toroidal symmetrical position Sample analysis: (a) Morphology of Si sample at toroidal symmetrical position; (b) component analysis of sample surface.

通过对锂限制器的环向对称位置(正北)的低场侧硅样品上锂膜做SEM的分析发现, 硅样品上有零星颗粒物质分布, 没有沉积膜的形成, 如图9(a). 通过XPS对表面沉积的颗粒物进行探测, 发现颗粒物中探测不到锂元素, 只是其他器壁成分的溅射沉积产物而已, 其表面元素有C, O, Si, B, Fe, W, 各元素所占原子百分比分别为40.07%, 43.82%, 12.63%, 1.2%, 2.21%, 0.06%, 如图9(b).

实验发现, 距离锂限制器不同位置的环向方向上, 锂膜的沉积厚度不同. 距离锂限制器越近锂膜沉积越厚; 锂膜的厚度与等离子体电流方向相关, 沿着电流方向的锂膜要比背离电流方向的锂膜要厚.

3.2.2.2 石墨样品各成分的深度剖析

实验后, 取出锂限制器位置及接近环向对称位置高场侧的石墨瓦, 制备相应的石墨样品, 并对样品做XPS深度剖析, 测得各元素含量随镀膜厚度的关系曲线如图10. 两图中C, Si, Fe元素趋势基本相同, 图10(a)中O, B元素含量随锂膜厚度基本没有变化, 而图10(b)中O元素含量在20 nm处开始下降, 到60 nm之后基本恒定, B元素含量较限制器位置石墨样品在20 nm处有明显上升趋势, 到60 nm之后趋于平缓. 这是因为在开展锂限制器实验之前, HT-7装置使用含硼的掺杂石墨材料以及在锂限制器实验前开展了大量的硼化膜实验, 样品表面必然沉积大量B元素, (a)中O, B元素含量之所以没有变化是因为锂限制器高场侧位置石墨样品上锂膜较厚(大于70 nm), 光电子没有完全透射锂膜到达石墨表层. (b)中, 锂限制器环向对称高场侧位置石墨样品上锂膜较薄, 约有20 nm, 光电子完全透射到达石墨表层, Li_2CO_3 含量下降, O含量下降, B元素含量上升. 因此, 两图也说明了锂限制器位置镀膜较厚, 而锂限制器较远位置镀膜较薄.

石墨样品的XPS深度剖析分析结果进一步验证了硅样品上的SEM测量结果, 说明锂限制器条件下, 腐蚀的锂在等离子体中输运后, 出现了明显的环向不对称性.

综上所述, 距离锂限制器不同位置的环向方向上, 锂膜的沉积厚度不同. 样品表面锂的沉积膜厚度出现极向和环向分布不对称性的现象. 低场侧的锂斑沉积比高场侧多, 锂限制器西侧(电流方向)沉积的锂斑比东侧多. 通过样品分析发现, 距离锂

限制器不同位置的环向方向上, 锂膜的沉积厚度不同, 距离锂限制器越近锂膜沉积越厚; 而且锂膜的厚度与等离子体电流方向相关, 沿着电流方向的锂膜要比背离电流方向的锂膜要厚.

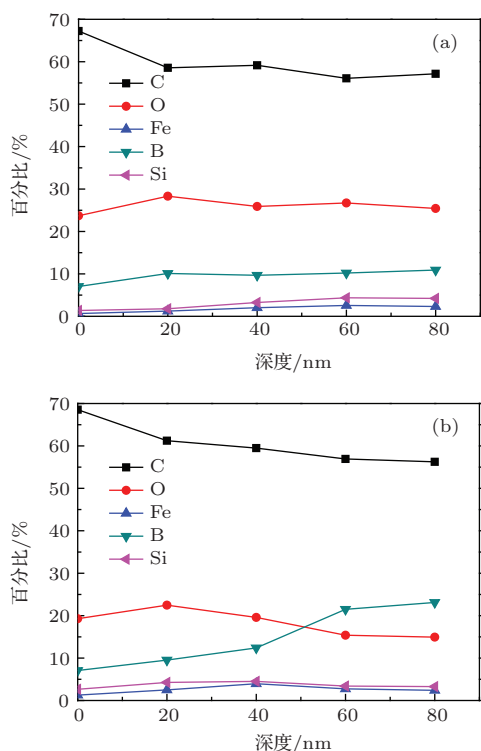


图10 石墨样品表面成分 (a) 限制器位置的石墨样品; (b) 环向对称位置附近的石墨样品

Fig. 10. components of graphite sample surface: (a) Graphite sample at Li limiter position; (b) graphite sample near toroidal symmetrical position.

4 讨论

在 HT-7 装置不同类型的锂限制器放电中, 液态锂与等离子体相互作用引起锂以蒸发、溅射及锂滴发射的方式进入等离子体, 造成液态锂表面的腐蚀. 腐蚀的液态锂将很快进入等离子体, 在等离子体中输运并最终沉积到装置的器壁上. 研究发现, 样品表面锂的沉积膜厚度出现极向和环向分布不对称性的现象. 低场侧的锂斑沉积比高场侧多, 锂限制器西侧 (电流方向) 沉积的锂斑比东侧多. 通过样品分析发现, 距离锂限制器不同位置的环向方向上, 锂膜的沉积厚度不同, 距离锂限制器越近锂膜沉积越厚; 而且锂膜的厚度与等离子体电流方向相关, 沿着电流方向的锂膜要比背离电流方向的锂膜要厚. 主要原因可能是, 在等离子体放电中, 液态锂受电磁力 ($\mathbf{J} \times \mathbf{B}$, \mathbf{J} 来自于等离子体电流及各种

感应电流等, \mathbf{B} 主要为装置内环向磁场的作用) 作用引起大量的锂滴在装置的低场侧位置发射出来, 以锂滴的形式发射进入等离子体并电离.

对锂滴运动做简单的分析, 在整个液态锂限制器试验中, 电流是顺时针方向 (自东向西), 环向磁场为逆时针方向 (自东向西), 等离子体运动方向与电流方向一致. 液态锂限制器接地, 来自刮削层的电流和感应电流使得液态锂的电流可以分为两部分: 垂直向下的电流 (J_{\perp}) 和平行液态锂限制器表面的电流 (J_{\parallel}). 总的电流将产生 $J_{\perp} \times B_p$ (电流方向) 和 $J_{\perp} \times B_t$ (径向方向) 以及 $J_{\parallel} \times B_p$ (垂直力使得锂向等离子体芯部溅射) 形成的合力. 此外, 由于热量梯度与锂面平行, 将会产生与 $J_{\parallel} \times B_p$ 平行的热磁流体动力效应力 [21]. 在这些力的作用使得锂滴沿着等离子体电流偏低场侧方向发射并运动, 这与图 4 中观测到的现象相符.

电离的锂粒子在等离子体中围绕着磁场线做螺旋运动, 在环向方向与等离子体电流的方向一致 [14,21,24], 故出现限制器附近沉积的锂斑西多东少, 低场侧多高场侧少, 限制器正西低场侧位置的锂膜要比正东低场侧位置的锂膜厚的现象.

实验结果与 T-11M 类似, 在 T-11M 的试验中, 发现锂在离子侧的沉积量明显高于电子侧, 实验验证了锂离子在 SOL 内以热速度量级沿等离子体电流方向运动 [14].

对于未被电离的中性锂粒子 (来自于锂的蒸发、溅射或锂滴飞溅) 而言, 其镀膜的范围与其平均自由程有关, 锂粒子的平均自由程与装置内真空压强的关系如下式 [25]:

$$\lambda_{\text{Li-He}} = 9.92 \times 10^{-2} / P_{\text{tot}} m. \quad (3)$$

这里 λ 是锂粒子的平均自由程; P 是真空压强, 单位 mtorr ($1 \text{ torr} = 1.33 \times 10^2 \text{ Pa}$). (从上式可看出 $\lambda \propto 1/P$, P 越大, λ 越小) 在不受装置真空室壁遮挡的情况下, 理论上绝大多数中性的锂粒子在锂限制器的周围将沉积在一个平均自由程以内. HT-7 放电时装置内压强约为 $6 \times 10^{-3} \text{ Pa}$, 平均自由程约为 2.2 m, 刚好约为装置周长的 1/4. 如图 11, 由于装置壁的阻挡到达阴影覆盖区域 (两侧约 1/4 左右) 以外的中性锂粒子的数量将会急剧减少, 这是限制器环向对称位置很难探测到锂的原因.

HT-7 装置内的等离子体性能的环向不对称性可能是由锂在等离子体内的分布的不均匀性引起

的. 锂限制器位置处, 锂粒子密度较高, 能够有效地吸附装置内的氢, 从而可以有效地降低限制器位置处的 $H\alpha$ 线辐射强度, 降低氢再循环, 提高等离子体性能; 在远离锂限制器的位置处锂粒子密度低, 不能有效地降低氢再循环, 不能有效地改善此处的等离子体性能. 下一步的实验研究中, 将通过增大限制器的尺寸, 提高锂在等离子体中的分布均匀性, 进一步改善等离子体性能.

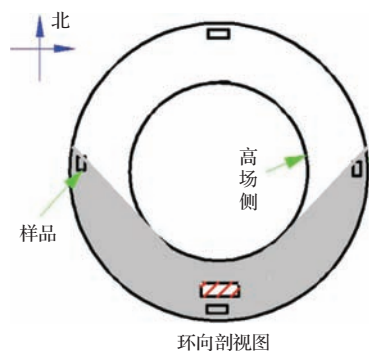


图 11 锂的覆盖区域

Fig. 11. Cover zone of lithium.

5 结 论

在 HT-7 液态锂限制器实验的等离子体放电中, 锂与等离子体之间的相互作用较弱时, 等离子体放电稳定, 锂的线辐射有所增强, 等离子体内杂质水平降低, 氢再循环降低, 等离子体性能提高. 当液态锂与等离子体间的相互作用较强时, 腐蚀的液态锂、尤其是以锂滴形成进入等离子体的锂, 容易引起等离子体放电的破裂. 腐蚀的锂进入等离子体, 在等离子体中输运并最终沉积到装置的器壁上, 并且出现了沉积锂的极向和环向分布不对称性的现象. 低场侧的锂斑沉积比高场侧多, 锂限制器西侧(沿电流方向)沉积的锂斑比东侧多. 通过样品分析发现, 距离锂限制器不同位置的环向方向上, 锂膜的沉积厚度不同, 距离锂限制器越近锂膜沉积越厚; 而且锂膜的厚度与等离子体电流方向相关, 沿着电流方向的锂膜要比背离电流方向的锂膜要厚. 通过对石墨瓦样品的深度剖析进一步验证了锂沉积在环向的分布不均匀性. 由于锂在装置真空室内分布的不均匀性, 引起了对等离子体放电中等离子体性能的环向不对称性, 靠近锂限制器位置处可以明显观测到氢再循环被抑制. 本次试验研究, 对液态锂限制器实验中锂的腐蚀及沉积特性有了深

入的理解, 为未来聚变装置中大规模液态锂的可能应用提供了实验及技术积累.

参考文献

- [1] Krasheninnikov S I, Smirnov R D, Rudakov D L 2011 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **53** 083001
- [2] Huang Z H, Yan L W, Yukihiko T, Feng Z, Cheng J, Hong W Y, Pan Y D, Yang Q W, Duan X R 2015 *Chin. Phys. B* **24** 7
- [3] Huang Y, Sun J Z, Sang C F, Ding F, Wang D Z 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 035204 (in Chinese) [黄艳, 孙继忠, 桑超峰, 丁芳, 王德真 2014 物理学报 **63** 035204]
- [4] Hu J S, Sun Z, Zuo G Z, Wu J H, Li J H, Chen Y, Wang H Y, Wang X M, Li J G 2012 *Chinese Vacuum Society 2012 Annual Conference* Lan Zhou, China, September 21, 2012, p149
- [5] Li J H, Hu J S, Wang X M, Yu Y W, Wu J H, Chen Y, Wang H Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 205203 (in Chinese) [李加宏, 胡建生, 王小明, 余耀伟, 吴金华, 陈跃, 王厚银 2012 物理学报 **61** 205203]
- [6] Zheng X W, Li J G, Hu J S, Li H, Cao B, Wu J H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 155202 (in Chinese) [郑星炜, 李建刚, 胡建生, 李加宏, 曹斌, 吴金华 2013 物理学报 **62** 155202]
- [7] Sun Z, Hu J S, Zuo G Z, Ren J, Cao B, Li J G, Mansfield D K 2014 *Fusion Eng. Des.* **89** 2886
- [8] Kaita R, Majeski R, Boaz M, Eftthimion P, Gettelfinger G, Gray T, Hoffman D, Jardin S, Kugel H, Marfuta P, Munsat T, Neumeyer C, Raftopoulos S, Soukhanovskii V, Spaleta J, Taylor G, Timberlake J, Woolley R, Zakharov L, Finkenthal M, Stutman D, Delgado A L, Seraydarian R P, Antar G, Doerner R, Luckhardt S, Baldwin M, Conn R W, Maingi R, Menon M, Causey R, Buchenauer D, Ulrickson M, Jones B, Rodgers D 2005 *J. Nucl. Mater.* **337** 872
- [9] Majeski R, Jardin S, Kaita R, Gray T, Marfuta P, Spaleta J, Timberlake J, Zakharov L, Antar G, Doerner R, Luckhardt S, Seraydarian R, Soukhanovskii V, Maingi R, Finkenthal M, Stutman D, Rodgers D, Angelini S 2005 *Nucl. Fusion* **45** 519
- [10] Vertkov A, Luyblinski I, Evtikhin V, Mazzitelli G, Apicella M L, Lazarev V, Alekseyev A, Khonlyakov S 2007 *Fusion Eng. Des.* **82** 1627
- [11] Pericoli R V, Alekseyev A, Angelini B, Annibaldi S V, Apicella M L, Apruzzese G, Barbato E, Berrino J, Bertocchi A, Bin W, Bombarda F, Bracco G, Bruschi A, Buratti P, Calabro G, Cardinali A, Carraro L, Castaldo C, Centioli C, Cesario R, Cirant S, Cocilovo V, Crisanti F D, Antona G D, Angelis R D, Benedetti M D, Marco F, Esposito B, Frigione D, Gabellieri L, Gandini F, Giovannozzi E, Granucci G, Gravanti F, Grossetti G, Grosso G, Lannone F, Kroegler H, Lazarev V, Lazzaro E, Leigh M, Lyublinski I E, Lubyako L, Maddaluno G, Marinucci M, Marocco D, Martin J R, Mazzitelli G, Mazzotta C, Meller V, Mirizzi F, Monari G, Moro A, Muzzini

- V, Nowak S, Orsitto F P, Panaccione L, Panella M, Pieroni L, Podda S, Puiatti M E, Ravera G, Regnoli G, Romanelli F, Romanelli M, Shalashov A, Simonetto A, Smeulders P, Sozzi C, Sternini E, Tartari U, Tilia B, Tuccillo A A, Tudisco O, Valisa M, Vertkov A, Vitale V, Vlad G, Zagorski R, Zonca F 2007 *Nucl. Fusion* **47** S608
- [12] Apicella M L, Mazzitelli G, Lazarev V B, Azizov E A, Mirnov S V, Petrov V G, Evtikhin V A, Lyublinski I E, Vertkov A V, Lucca F D, Ferdinando E, Mazzone G, Ramogida G, Roccella M 2005 *Fusion Eng. Des.* **75** 351
- [13] Mirnov S V, Azizov E A, Evtikhin V A, Lazarev V B, Lyublinski I E, Vertkov A V, Prokhorov D Y 2006 *Plasma Phys. Control. Fusion* **48** 821
- [14] Mirnov SV, Lazarev V B 2011 *J. Nucl. Mater* **415** S417
- [15] Zuo G Z, Hu J S, Li J G, Luo N C, Zakharov L E, Zhang L, Ti A 2011 *J. Nucl. Mater* **415** 1062
- [16] Hu J S, Zuo G Z, Li J G, Luo N C, Zakharov L E, Zhang L, Zhang W, Xu P 2010 *Fusion Eng. Des.* **85** 930
- [17] Sun Z, Hu J S, Zuo G Z, Ren J, Li J G, Zakharov L E, Mansfield D K 2013 *J. Nucl. Mater* **438** 899
- [18] Ren J, Hu J S, Zuo G Z, Sun Z, Li J G, Ruzic D N, Zakharov L E 2014 *Phys. Scr.* **T159**
- [19] Hu J S, Ren J, Sun Z, Zuo G Z, Yang Q X, Li J G, Mansfield D K, Zakharov L E, Ruzic D N 2014 *Fusion Eng. Des.* **89** 2875
- [20] Ren J, Zuo G Z, Hu J S, Sun Z, Yang Q X, Li J G, Zakharov L, Xie H, Chen Z X 2015 *Rev. Sci. Instrum.* **82** 23504
- [21] Zuo G Z, Ren J, Hu JS, Sun Z, Yang Q X, Li J G, Zakharov L E, Ruzic D N 2014 *Fusion Eng. Des.* **89** 2845
- [22] Mansfield D K, Roquemore A L, Schneider H, Timberlake J, Kugel H, Bell M G 2010 *Fusion Eng. Des.* **85** 896
- [23] Deng B Q, Yan J C, Huang J H 2000 *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering* **20** 373 [邓柏权, 严建成, 黄锦华 2000 核科学与工程 **20** 373]
- [24] Stotler D P, Skinner C H, Blanchard W R, Krstic P S, Kugel H W, Schneider H, Zakharov L E 2011 *J. Nucl. Mater* **415** S1058
- [25] Stotler D P, Skinner C H, Blanchard W R, Krstic P S, Kugel H W, Schneider H, Zakharov L E 2011 *J. Nucl. Mater* **415** S1058

Study of erosion and deposition characteristics of Li during liquid Li limiter experiment in HT-7*

Meng Xian-Cai^{1)2)#} Zuo Gui-Zhong^{2)#} Ren Jun²⁾ Sun Zhen²⁾ Xu Wei²⁾ Huang Ming²⁾
Li Mei-Heng¹⁾ Deng Hui-Qiu¹⁾ Hu Jian-Sheng^{2)†} Hu Wang-Yu^{1)‡}

1) (Department of Applied Physics, School of Physics and Electronics, Hunan University, Changsha 410082, China)

2) (Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(Received 3 April 2015; revised manuscript received 9 June 2015)

Abstract

In the magnetic confinement fusion device, the first wall as plasma facing components will directly affect the performance of high temperature plasma. And the interaction of plasma and materials also affect the life of the first wall. Liquid lithium first wall receives more and more attention due to the properties of repairing itself and effectively inhibiting boundary particle recycling. So the research of the interaction between liquid lithium wall and plasma is particularly important. Erosion and deposition characteristics of lithium and its influence on the performance of plasma during lithium limiter experiment in HT-7 device are studied in-depth in this paper. Experimental results show that when the interaction between Li and plasma is weak, Li enters into the plasma mainly by weak surface evaporation and sputtering. During this process, Li line emission is strengthened, impurity and hydrogen recycling is decreased resulting in the improvement of plasma performance. When the interaction between Li and plasma becomes extremely strong, it is found so many big scale Li droplets ejected from liquid lithium surface to cause intense Li efflux into plasma, leading to plasma discharge disruption. Li atoms coming from Li limiter are ionized in the scrape-off layer (SOL), and entered into hot plasma column as ions (Li^+ , Li^{2+} , Li^{3+}) and transported in plasma. After the experiment, it can be found that a lot of white spots distributed in the vacuum chamber wall, with its main composition being Li_2CO_3 by XPS analysis. Through observing Li spot distribution and analyzing the lithium film thickness by scanning electron microscopy (SEM) in different samples, it is observed that the lithium is primarily deposited around the limiter, but the number of Li spots is more at the low field side than that at the high field side of the device, and the Li film gradually becomes thinner along the toroidal direction of the HT-7 device, leading to the non-uniformity of impurity and hydrogen recycling. The experiment may provide a reference for studying the interaction of plasma and liquid lithium first wall and the application of liquid lithium first wall in future tokamak device.

Keywords: HT-7 tokamak, liquid lithium, first wall, erosion

PACS: 28.52.-s, 52.55.Fa, 52.80.Vp, 68.37.-d

DOI: 10.7498/aps.64.212801

* Project supported by the National Magnetic Confinement Fusion Science Program (Grant Nos.2013 GB114004, 2014 GB124006), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11405210, 11105181).

first author.

† Corresponding author. E-mail: hujs@ipp.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: wyyuhu@hnu.edu.cn

ACTA PHYSICA SINICA

Vol. 64, No. 21, November 2015

CONTENTS

SPECIAL ISSUE—Progress in Research of Superconductivity and Correlated Systems

- 214701 **First-principles study of electron-phonon coupling and superconductivity in compound Li_2C_2**

Gao Miao Kong Xin Lu Zhong-Yi Xiang Tao

- 217101 **Phase string effect and mutual Chern-Simons theory of Hubbard model**

Zhang Long Weng Zheng-Yu

- 217102 **Electron correlations and orbital selectivities in multiorbital models for iron-based superconductors**

Rong Yu

- 217401 **Heavy-fermion superconductivity and competing orders**

Yang Yi-Feng Li Yu

- 217402 **A brief analysis of annealing process for electron-doped cuprate superconductors**

Jia Yan-Li Yang Hua Yuan Jie Yu He-Shan Feng Zhong-Pei Xia Hai-Liang Shi Yu-Jun He Ge Hu Wei Long You-Wen Zhu Bei-Yi Jin Kui

- 217403 **Order parameters of non-centrosymmetric superconductors**

Zhang Jing-Lei Jiao Lin Pang Gui-Ming Yuan Hui-Qiu

- 217404 **Quantum criticalities in carrier-doped iron-based superconductors**

Li Zheng Zhou Rui Zheng Guo-Qing

- 217405 **Recent experimental progress in low-dimensional superconductors**

Zhang Xi Liu Chao-Fei Wang Jian

- 217406 **Phenomena and findings in pressurized alkaline iron selenide superconductors**

Guo Jing Sun Li-Ling

- 217502 **Magnetic and electrical properties of K_2NiF_4 -type Sr_2CrO_4**

Cao Li-Peng Wang Xian-Cheng Liu Qing-Qing Pan Li-Qing Gu Chang-Zhi Jin Chang-Qing

REVIEW

- 210202 **Application status and future of multi-scale numerical models for lithium ion battery**

Cheng Yun Li Jie Jia Ming Tang Yi-Wei Du Shuang-Long Ai Li-Hua Yin Bao-Hua Ai Liang

GENERAL

- 210201 **Numerical simulation of a hybrid magnetic refrigeration combined with high pressure Stirling regenerative refrigeration effect**

Gao Xin-Qiang Shen Jun He Xiao-Nan Tang Cheng-Chun Dai Wei Li Ke Gong Mao-Qiong Wu Jian-Feng

(Continued)

- 210301 **Research on extended micro-motion target echo simulation and characteristic extraction**
Wang Tong Tong Chuang-Ming Li Xi-Min Li Chang-Ze
- 210302 **Phenomena of limit cycle oscillations for non-Markovian dissipative systems undergoing long-time evolution**
You Bo Cen Li-Xiang
- 210303 **Transmission protocol and its performance analysis of quantum communication network based on packet switching**
Nie Min Wang Lin-Fei Yang Guang Zhang Mei-Ling Pei Chang-Xing
- 210501 **Vibration energy harvesting from a piezoelectric bistable system with two symmetric stops**
Lan Chun-Bo Qin Wei-Yang
- 210502 **Attitude estimation and three-axis magnetometer on-line calibration based on moving horizon estimation**
Zhao Guo-Rong Huang Jing-Li Su Yan-Qin Sun Cong
- 210503 **Pulse response of a monostable system**
Leng Yong-Gang Zhao Yue
- 210504 **Study on dynamical characteristics of a meminductor model and its meminductor-based oscillator**
Yuan Fang Wang Guang-Yi Jin Pei-Pei
- 210505 **Numerical simulations of hexagonal grid state patterns**
Bai Zhan-Guo Liu Fu-Cheng Dong Li-Fang
- 210506 **Improved averaged model and stability analysis of voltage-mode controlled positive output super-lift Luo converter**
Wang Fa-Qiang Li Jing Ma Xi-Kui
- 210507 **Chaotic circuit of ion migration memristor and its application in the voice secure communication**
Min Guo-Qi Wang Li-Dan Duan Shu-Kai
- 210508 **Chaos synchronization of coronary artery system based on higher order sliding mode adaptive control**
Zhao Zhan-Shan Zhang Jing Ding Gang Zhang Da-Kun

NUCLEAR PHYSICS

- 212801 **Study of erosion and deposition characteristics of Li during liquid Li limiter experiment in HT-7**
*Meng Xian-Cai Zuo Gui-Zhong Ren Jun Sun Zhen Xu Wei Huang Ming Li Mei-Heng
 Deng Hui-Qiu Hu Jian-Sheng Hu Wang-Yu*

ATOMIC AND MOLECULAR PHYSICS

- 213101 **Theoretical study on the photodissociation reaction of α -cyclohexanedione in ground state**
Yang Xue Yan Bing Lian Ke-Yan Ding Da-Jun

(Continued)

213102 **Research of data retention for charge trapping memory by first-principles**
Jiang Xian-Wei Lu Shi-Bin Dai Guang-Zhen Wang Jia-Yu Jin Bo Chen Jun-Ning

213301 **Theoretical and experimental study on line intensities of CO₂ and CO transitions near 1.5 μm at high temperatures**
Wang Min-Rui Cai Ting-Dong

ELECTROMAGNETISM, OPTICS, ACOUSTICS, HEAT TRANSFER, CLASSICAL MECHANICS, AND FLUID DYNAMICS

214201 **Study of the time-resolved emission spectra of the ejected plume generated by ultrashort laser ablation of graphite**
Feng Pei-Pei Wu Han Zhang Nan

PHYSICS OF GASES, PLASMAS, AND ELECTRIC DISCHARGES

215201 **Numerical simulation of heat transfer and natural convection of the indirect-driven cryogenic target**

Huang Xin Peng Shu-Ming Zhou Xiao-Song Yu Ming-Ming Yin Jian Wen Cheng-Wei

215202 **Experimental optimization in ion source configuration of a miniature electron cyclotron resonance ion thruster**
Tang Ming-Jie Yang Juan Jin Yi-Zhou Luo Li-Tao Feng Bing-Bing

CONDENSED MATTER: STRUCTURAL, MECHANICAL, AND THERMAL PROPERTIES

216101 **First-principles study on the hydrogenation of the O₂ on TiN₄ embedded graphene**
Lu Zhan-Sheng Li Yan Cheng Ying-Jie Li Shuo Zhang Xi-Lin Xu Guo-Liang Yang Zong-Xian

216102 **Simulation on surface morphology evolution of metal targets irradiated by intense pulsed electron beam**
Yu Xiao Shen Jie Zhong Hao-Wen Zhang Jie Zhang Gao-Long Zhang Xiao-Fu Yan Sha Le Xiao-Yun

216103 **Angular dependence of proton single event multiple-cell upsets in nanometer SRAM**
Luo Yin-Hong Zhang Feng-Qi Guo Hong-Xia Guo Xiao-Qiang Zhao Wen Ding Li-Li Wang Yuan-Ming

216201 **Micro-damage characteristics of incipient spall in high-purity copper**
Peng Hui Pei Xiao-Yang Li Ping He Hong-Liang Bai Jin-Song

216501 **Thermal rectification of heterojunction nanotubes**
Wen Jia-Le Xu Zhi-Cheng Gu Yu Zheng Dong-Qin Zhong Wei-Rong

216701 **The Influence of Co binding phase on adhesive strength of diamond coating with cemented carbide substrate**
Jian Xiao-Gang Chen Jun

216801 **Molecular dynamics simulation on the wetting characteristic of micro-droplet on surfaces with different free energies**
Xu Wei Lan Zhong Peng Ben-Li Wen Rong-Fu Ma Xue-Hu

(Continued)

216802 **Study on controlling the stress in flexible Al/PI film by interface alloying**
Jiang Zhao Chen Xue-Kang

216803 **Effect of low As pressure annealing on the morphology and reconstruction of GaAs (001)**
Zhou Xun Luo Zi-Jiang Wang Ji-Hong Guo Xiang Ding Zhao

216804 **In-situ investigation on the growth of Cu-Al intermetallic compounds in Cu wire bonding**
Yang Qing-Ling Tan Yik-Yee Wu Xing Sim Kok Swee Sun Li-Tao

CONDENSED MATTER: ELECTRONIC STRUCTURE, ELECTRICAL, MAGNETIC, AND OPTICAL PROPERTIES

217501 **Azimuthal spin wave modes in an elliptical nanomagnet with single vortex configuration**
Lü Gang Cao Xue-Cheng Qin Yu-Feng Wang Lin-Hui Li Gui-Hua Gao Feng Sun Feng-Wei Zhang Hong

217701 **Effects of Co-doping on multiferroic properties of $\text{Bi}_6\text{Fe}_{2-x}\text{Co}_x\text{Ti}_3\text{O}_{18}$ ceramics**
Mao Xiang-Yu Zou Bao-Wen Sun Hui Chen Chun-Yan Chen Xiao-Bing

217801 **First-principle study of electronic structure and optical properties of $\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$**
Shen Jie Wei Bin Zhou Jing Shen Shirley Zhiqi Xue Guang-Jie Liu Han-Xing Chen Wen

INTERDISCIPLINARY PHYSICS AND RELATED AREAS OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

218101 **High temperature thermoelectric performance of Ca^{2+} doped CdO ceramics**
Liu Ran Gao Lin-Jie Li Long-Jiang Zhai Sheng-Jun Wang Jiang-Long Fu Guang-Sheng Wang Shu-Fang

218102 **Design and fabrication of broadband radar metamaterial absorber based on the resistor FSS**
Hui Yi-Cong Wang Chun-Qi Huang Xiao-Zhong

218201 **Effect of interfacial hydrogen bonds on the structure and dynamics of confined water**
Wang Ming Duan Fang-Li

218202 **Terminating the spiral wave and spatiotemporal chaos in cardiac tissue using the low-pass filtering scheme**
Pan Fei Li Wei-Xin Wang Xiao-Yan Tang Guo-Ning

218401 **Robust cubature Kalman filter target tracking algorithm based on generalized M-estimation**
Wu Hao Chen Shu-Xin Yang Bin-Feng Chen Kun

218901 **Community detection based on joint matrix factorization in networks with node attributes**
Chang Zhen-Chao Chen Hong-Chang Liu Yang Yu Hong-Tao Huang Rui-Yang

(Continued)

GEOPHYSICS, ASTRONOMY, AND ASTROPHYSICS

219501 **High-resolution laser frequency scanning interferometer based on fiber dispersion phase compensation**

Xu Xin-Ke Liu Guo-Dong Liu Bing-Guo Chen Feng-Dong Zhuang Zhi-Tao Gan Yu

219701 **A new simulation method of X-ray pulsar signals**

Xue Meng-Fan Li Xiao-Ping Sun Hai-Feng Liu Bing Fang Hai-Yan Shen Li-Rong

219702 **Multiple harmonic X-ray pulsar signal phase estimation method**

Song Jia-Ning Xu Gou-Dong Li Peng-Fei

公 告

为实现录用稿件的提前在线全文出版, 我刊采用单篇论文给定编码的目录方案, 编码的设定规则是: 期号 + 文章第一个PACS 代码的前两位数字 + 序号(按同一类代码文章录用时间的先后排序).

《物理学报》已加入“中国知网”优先数字出版, 录用文章将先于印刷版期刊在中国知网 www.cnki.net 在线优先发布, 如果作者不愿优先出版可在版权协议里补充说明, 如无补充说明, 编辑部将视为同意授权.

《物理学报》编辑部

物 理 学 报 (WULIXUEBAO)

(半月刊, 1933 年创刊)

2015 年 11 月 第 64 卷 第 21 期

版 权 所 有

ACTA PHYSICA SINICA

(Semimonthly, First Published in 1933)

Vol. 64 No. 21 November 2015

© 2015 Chinese Physical Society

编 辑 物 理 学 报 编 辑 部
(北京 603 信箱 邮政编码 100190)
主 编 欧 阳 钟 灿
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 物 理 学 会
中国科学院物理研究所
(北京 603 信箱 邮政编码 100190)
出 版 中 国 物 理 学 会
印 刷 装 订 北 京 科 信 印 刷 有 限 公 司
总 发 行 处 北 京 报 刊 发 行 局
订 购 处 全 国 各 邮 电 局
国 外 总 发 行 处 中 国 国 际 图 书 贸 易 总 公 司
(北京 399 信箱 邮政编码 100044)
广 告 经 营 许 可 证 京 海 工 商 广 字 第 0335 号

Edited by the Editorial Office of
ACTA PHYSICA SINICA
Editor-in-Chief: Ouyang Zhong-Can
Published by Chinese Physical Society
and Institute of Physics,
Chinese Academy of Sciences
Distributed by China International
Book Trading Corporation
P.O. Box 399, Beijing 100044, China
Editorial Office:
P.O. Box 603, Beijing 100190, China
E-mail: apsoffice@iphy.ac.cn
<http://wulixb.iphy.ac.cn>

ISSN 1000-3290

国内邮发代号: 2-425

国内统一刊号: CN11-1958/O4

国外发行代号: M52 定价: 120 元

公 开 发 行