

超快激光诱导的固体-超密等离子体转变

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/28378.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

超快激光诱导的固体-超密等离子体转变。 导读

近日，来自德国耶拿亥姆霍兹研究所的研究人员Yasmina Azamoum等成功实现了使用超短激光脉冲诱导固体-超密等离子体转变的光学探测，这一创新工作发表在国际顶尖光学期刊《Light: Science Applications》上。研究人员利用超快激光单次拍摄技术，通过一次泵浦即可测量等离子体的性质。利用这一技术观测到了不可忽略的等离子体膨胀。这对理解预等离子态以及低功率激光系统中的激光烧蚀至关重要。

研究背景

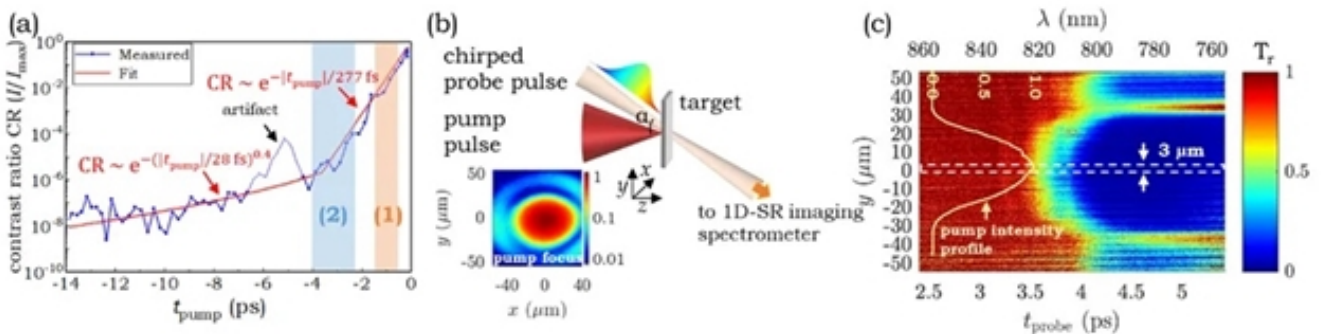
光与等离子体的相互作用是一个基本的物理过程，也具有十分广泛的技术应用。例如在激光加工行业，通过精确控制激光与物质的相互作用可以有效地进行材料的切割、雕刻和表面处理。了解预等离子体的状态对于优化这些工艺过程至关重要；另外，激光也可以驱动粒子加速，通过激光与固体靶的相互作用产生高能粒子束；掌握等离子体的形成和演化机制有助于提高粒子加速的效率和稳定性。激光手术与肿瘤治疗中也十分依赖光对等离子体的调控。因此对基础光与等离子体相互作用的过程进行研究具有重大意义。

但是，探究等离子体与超快激光的相互作用并非易事。首先，超快激光与等离子体的相互作用涉及电磁场、高温、高压和高电离度等多个物理场的复杂耦合，这些物理场在时间和空间尺度上的变化非常快速和剧烈，因此需要高精度的模型和计算方法来描述。其次，在超快激光与物质相互作用的过程中，非线性效应如多光子电离、隧穿电离和碰撞电离等起着关键作用。这些非线性过程的精确描述需要复杂的理论模型和大量的计算资源。另外，由于超快激光脉冲的持续时间通常在飞秒（10⁻¹⁵秒）量级，因此研究这些相互作用需要非常高的时空分辨率。实验技术和探测手段必须能够捕捉到这些超快过程的细节。

截至目前，在皮秒量级探究固态到等离子态的形成，尤其是预等离子态的形成及刻画仍然是一个关键难点。预等离子态具有预等离子体膨胀（pre-plasma expansion）的性质，是指在超快激光脉冲与固体靶相互作用的初期阶段，由于激光脉冲的电离作用，固体靶表面开始形成等离子体，并且这个新形成的等离子体随后发生膨胀的现象。而预等离子体膨胀对激光与物质相互作用的后续过程有重要影响。例如，在激光加工中，等离子体膨胀可能会影响激光的穿透深度和加工质量。在激光驱动的粒子加速中，等离子体膨胀会影响粒子的加速效率和能谱分布。因此，理解和控制预等离子体膨胀的过程对于优化激光应用非常重要。

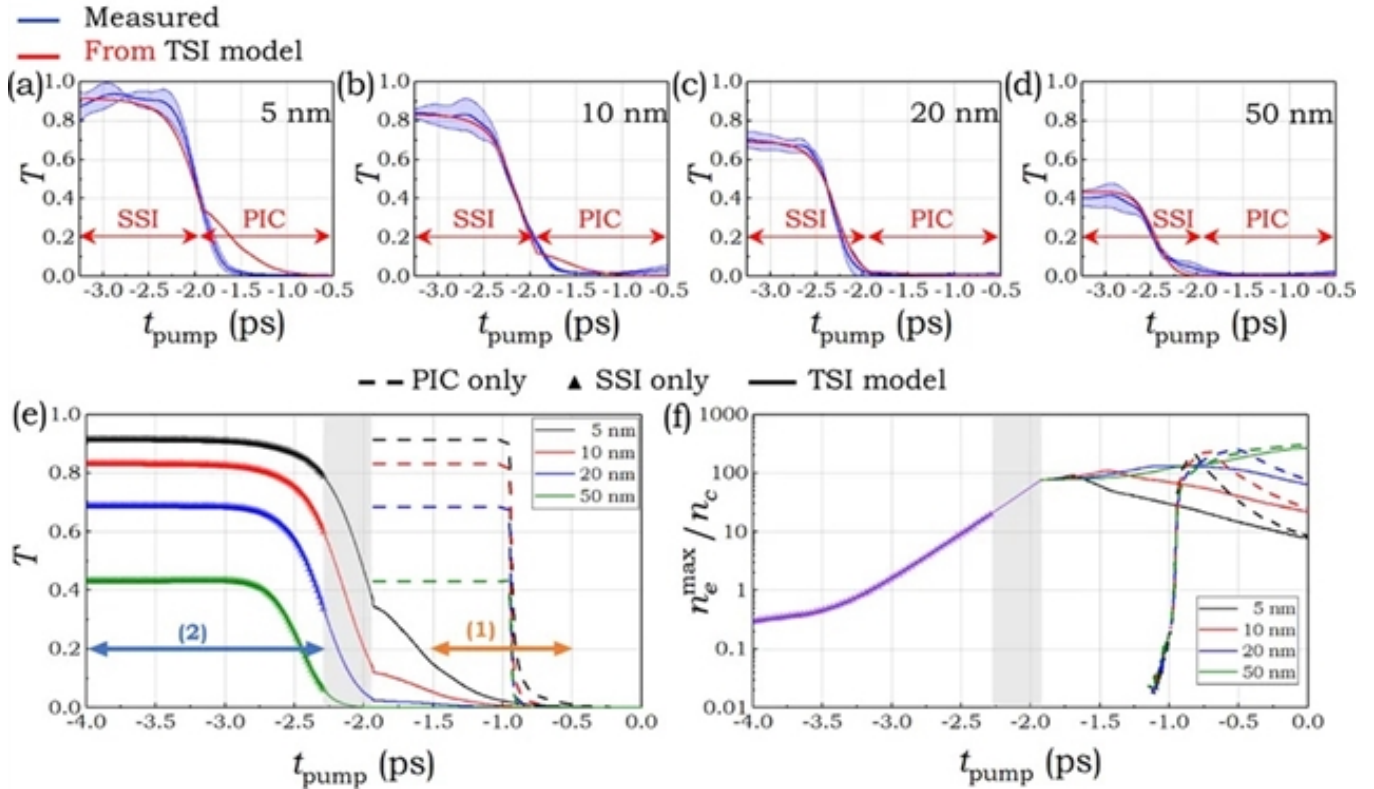
创新研究

本文创新性地利用单次拍摄技术来捕捉超快过程，所采用的探测光束经过特定的脉冲压缩和波长调谐，使其能够在极短的时间内覆盖整个感兴趣的动力学过程。通过这种方法，研究人员能够在单次激光泵浦中获得关于等离子体形成和演化的全面信息，而不需要依赖多次激光入射来累积数据。图1展示了实验的基本设置和初步结果。图中的泵浦激光的对比度随时间变化，显示了激光脉冲的上升沿和预峰值区域，这是形成预等离子体的关键时期。此外，文章中使用的探测技术，如非共线光学参量放大器（NOPA）和时间分辨光谱学，能够提供高时间分辨率的测量。这些技术允许研究人员以飞秒级的时间尺度捕捉到等离子体状态的变化，从而在单次事件中解析超快激光与固体相互作用的复杂动态。一维空间和时间分辨的相对探测传输测量结果揭示了等离子体密度随时间和空间的演化，特别是在激光脉冲作用下，类金刚石碳（Diamond-Like Carbon, DLC）薄膜从透明状态转变为不透明状态的过程（见图1（b），（c））。

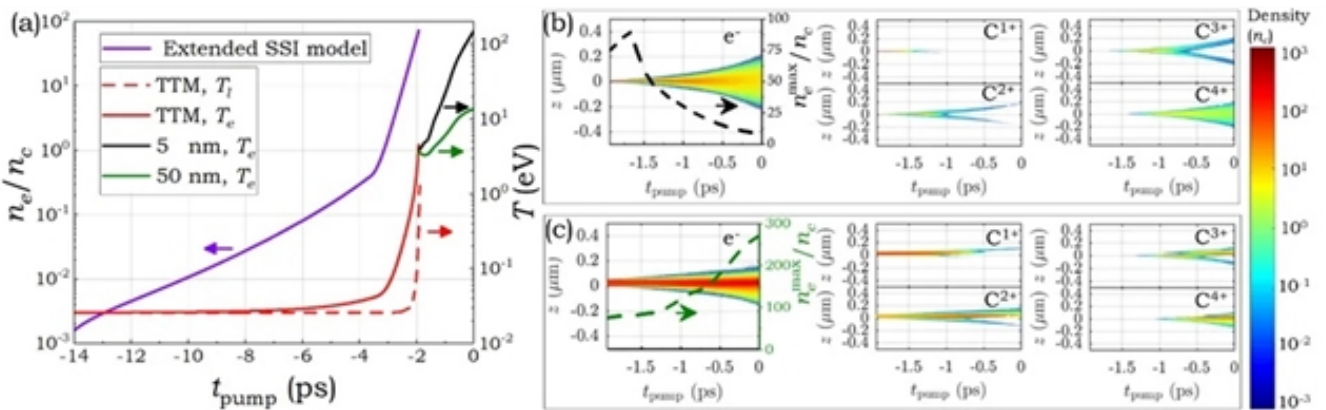


图一：单次空间和时间分辨探针的透射测量。(a)泵浦激光的对比度随时间的变化。(1)和(2)对应着图二(e)的两种情况。(b)实验示意图。泵浦脉冲正入射聚焦在目标上，而探测脉冲以 37° 角斜入射。插图显示了正入射聚焦的泵浦光束的归一化强度。(c)一维的空间和时间分辨的相对透过率 T_r 。

此外，为了更好地理论建模超快激光与等离子体相互作用的过程，文章创新性地提出了TSI模型，该模型结合了固态相互作用（SSI）模型和粒子模拟（PIC）模型的特点，不仅考虑了固态物质的电离过程，还考虑了等离子体形成后的动力学行为。这种结合使得模型能够更准确地描述激光脉冲上升沿期间的初始电离和随后的等离子体膨胀。根据这一模型，作者得到了不同厚度DLC薄膜的实验测量和理论计算的绝对透射结果，如图2所示。最后，基于TSI模型，作者计算得到了等离子体电子和碳离子密度的时空演化（见图3）。这些结果揭示了等离子体在激光脉冲作用下的快速形成、膨胀和离子化过程。揭示了等离子体屏蔽效应的物理机制。



图二：(a)-(d):5-50nm厚度的类金刚石碳片（DLC）下，测量（蓝色）和理论计算（红色）的绝对透过率 $T(t)$ 。测量值为四次拍摄的平均值。峰值强度为 10^{15} - 10^{16} W/cm ^{2} 。蓝色阴影为拍摄的标准差。红色曲线为TSI模型计算得到的。(e)计算的不同DLC箔厚度随时间变化的探针。虚线，三角形和实线分别对应于仅PIC，仅SSI和TSI模型。(f) 最大电子密度 $n_{\text{e}}^{\text{max}}$ 随泵浦时间 t_{pump} 的函数。



图三：根据TSI模型计算出的，5和50nm的DLC薄膜在相互作用过程中的等离子体性质。(a)由TTM模型计算的随时间变化的电子密度。(b)和(c)展示了电子密度和碳离子密度随时间变化的特性。

综上，本文通过单次拍摄的激光泵浦探测技术成功捕捉了超快激光脉冲诱导下固体到超密等离子体转变的动力学过程，揭示了预等离子体的形成和膨胀机制。而交互模型（TSI）有效地结合了固态相互作用和粒子模拟，为理解这一复杂转变提供了精确的理论描述。这些发现对于优化激光加工和粒子加速等应用至关重要，也为未来激光与物质相互作用的研究指明了新方向。（来源：

LightScienceApplications微信公众号)

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-024-01444-y>

作者：Yasmina Azamoum 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发