

从纳米天线到外太空卫星， 电子发射实现高效发电

意大利技术研究所 (Italian Institute of Technology) 的工程师们正利用多物理场分析进行一系列电子发射的研究, 试图利用它来提高设备在极端环境及生物医学应用中的供电效率。

作者 LEXI CARVER

工程师们在设计应用于外太空和人体中的设备时面临着一个共同的挑战：如何保证其安全性、可靠性和高效性？这是因为在水中、极端温度、高压及其他极端环境中使用的设备很难得到高效稳定的电力供应。近期，科研人员在提升设备能量使用效率的探索中发现，对于在外太空卫星和医疗器械等特殊环境中使用的设备，电子发射技术有望成为一项极具潜力的

发电方式。

当对金属表面或电极施加静电场、加热或光照时，电子会从金属中逸出，通常进入真空环境，这种现象就是电子发射，而逸出的电子可以被收集起来作为可用的电能。意大利技术研究所 (Italian Institute of Technology, 简称 IIT) 和欧洲航天局 (European Space Agency, 简称 ESA) 正在合作开发基于电子发射技术的太阳能收集

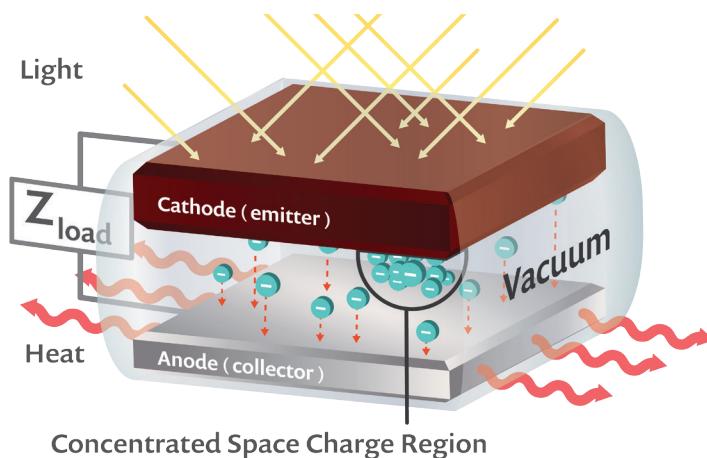


图 1. PETE 电池示意图。电子由于光（照射在半导体上）和热（由电荷载产生）的作用从负极逸出。电子在到达正极的过程中相互排斥而被“困”在真空间隙产生空间电荷的堆积。
图注：Light - 光；Load - 负荷；Heat - 热；Concentrated Space Charge Region - 集中空间电荷区；Vacuum - 真空；Cathode (emitter) - 负极（发射极）；Anode (collector) - 正极（集电极）

系统，用于为外太空的卫星供电。IIT 的研究人员还将类似的概念用于为纳米天线供电，以研究人脑中的电信号。他们使用数值仿真来研究放射电子的运动，并对相关设备进行了优化，以期拥有最佳的功能和最高的效率。

» 更高效的太阳能供电系统将被应用于卫星

光伏系统可以将太阳光转换成电能，地面或近地轨道的太阳能电池板可以有效地使用这一系统实现能量转换，但由于高温会严重影响光电转换的效率，这种系统并不适用于外太空的近日探索。美国斯坦福大学 (Stanford University) 于 2010 年最先研发了光子增强热电子发射 (photon-enhanced thermionic emission, 简称 PETE) 太阳能电池，它将光电效应与热电子发射（电子从受热半导体中逸出而形成的热导电子流）相结合来提高发电功效，并有望成为现有供电系统的替代产品。

PETE 电池 (见图 1) 是一个三明治结构，中间为真空室，其上下分别被砷化镓一类的半导体正极和负极所包覆。负极价带中的电子受入射光子激发进入导带，其中一部分逸出到真空间隙；而另一部分电子则迁移到半导体的真空能级附近，可以通过热电子发射使其轻松地逸出。对负极加热会使更多电子“沸腾”，进入真空间隙。自由电子到达另一端的正极并在此形成电荷堆积，从而产生电能。

“增强热电子发射技术利用负极的半导体结构和正负极之间的温差将热能转换为电能，” IIT 的博士后研究员 Pierfrancesco Zilio 解释道，“与标准光电效应不同，电子发射发生能量转换时会同时利用太阳光谱的紫外—可见区域和红外区域，前者激发电子到达半导体的导带，后者激发电子逸出到真空间隙”。

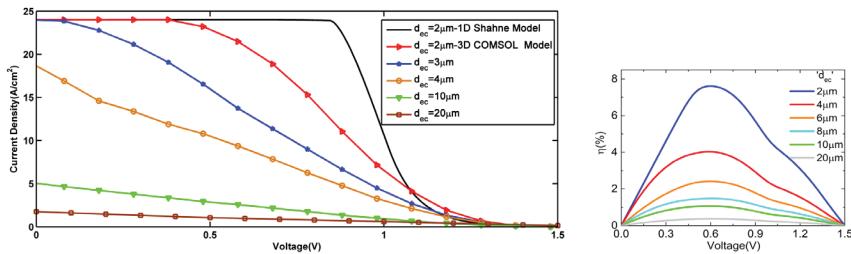


图 2. COMSOL® 软件的仿真结果，显示正负极之间距离不同、工作电压不同时计算得到的正极电流密度（左图）和功率转换效率（右图）。

但是，射出的电子会相互排斥，使部分电子回到负极或被“困”在真空间隙中。“困”在真空间隙中的电子会形成空间电荷（space charge）云，进而干扰电子通过，致使设备效率明显降低。

» 仿真提供强有力的技术支持

Zilio 和他的合作伙伴 Waseem Raja（在读博士生）、Remo Proietti（高级研究员）与 ESA 合作研究了多个不同的 PETE 系统，力图使正极的电荷堆积最大化，并据此为外太空卫星提供可靠的设计。他们使用 COMSOL Multiphysics® 软件对各种可能的 PETE 电池设计进行建模分析，借此确定其中最实用、最有效的设计。

他的团队对正负极之间的电子流动轨迹进行了追踪，并研究了空间电荷云的形成。他们先创建了一个模型，对由光子的冲击、吸收而在负极形成的电场进行计算，接着分析了电场对电子挣脱负极表面能力的影响。

“这样我们就能预测空间电荷云会对正极上的电子堆积产生怎样的影响，进而得到最终的电流输出数据。” Zilio 介绍道，“我们计算了电子在到达正极前需要克服的各种阻力，这些阻力包括电子挣脱负极束缚的能量以及电子在迁移过程中空间电荷云对其施加的减速作用力。”

他们使用数值仿真能够对电极的不同布局进行测试，通过改变两个电

极的排布以确定可使输出电流和效率最大化的设计（见图 2）。“COMSOL 软件使我们能将空间电荷的运动与负极的光吸收和载流子输送等其他相关物理效应耦合在一起。”

为分析真空室中的电子的发射和传播，他们将粒子追踪模型与电、热分析相耦合。“我们根据电子轨迹和电势来确定正极的电流密度，” Zilio 继续说道，“从而对我们选定的 PETE 电池设计进行计算，并得到其净电流输出值和功率转换效率。”

为尽可能减少空间电荷云的影响，他们还测试了多种不同的方案。其中一种是使负极表面形成纳米锥阵列结构，其原理为锥形尖头会形成更强的电场，从而射出更多电子。Zilio 对纳米锥的电场和电子轨迹进行了模拟（见图 3），并计算了在正极产生的电流密度。

尽管纳米锥设计可以增加负极逸出的电子数量，但无法克服空间电荷云的阻力，从而无法提高输出电流。鉴于这个原因，Zilio 的团队考虑采用新的策略。“我们在真空间隙中放置

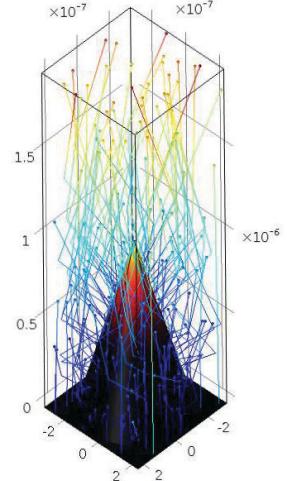


图 3. 纳米锥结构在 COMSOL 中的仿真结果。图中显示了粒子轨迹和速度大小，以及整个锥面的电场模。

了一个带正电荷的网状栅极，可以在电子逸出后吸引它们快速通过，”他说，“这个设计大幅提高了电子的提取能力，并显著减少了正极和负极之间的空间电荷云。”

“接下来，我们必须对栅极的孔径以及向栅极输入的电能进行优化，以此在总体效率、电子收集量以及减少被困在栅极中的电子数量间实现最佳的平衡。”

他们测试了不同的孔间距（相邻孔中心之间的距离），以寻找可以使正极产生最大输出电流的栅极结构。他们还考虑了向栅极输入的电能，因为该能量会影响总体转换效率。图 4 和图 5 显示了栅极采用不同结构、施加不同电压以及孔间距不同时电子的收集量以及总体转换效率。

“我们的工作需要对多个物理场进行模拟，在将粒子追踪与其他物理现象相耦合的同时，还涉及其他复杂的非线性物理现象，COMSOL 为我们提供了强大的技术支持。”

— PIERFRANCESCO ZILIO, 意大利技术研究所博士后研究员

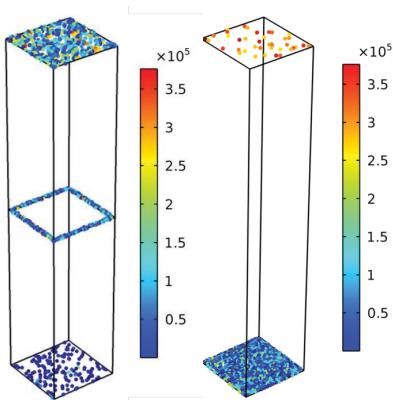


图 4. 正板上电子加速度的 COMSOL 仿真结果，左图中加了栅极，右图中未加栅极。

为提高设计的总体效率，该团队根据仿真结果针对栅极电压、孔间距和正负极之间的距离进行了选择。在完成 PETE 电池的研究后，他们使用相似的技术对应用于生物医学和神经学设备中的纳米天线进行了表面等离子激元的仿真。

» 回归人脑研究

Zilio 还利用 COMSOL 提供的分析功能研究了当纳米天线浸入与人脑相似的水相环境时电子的光电发射。这种天线由镀金或镀银的介电纳米管制成（见图 6），可被用于光刺激神经元、神经元之间电信号的研究，以及医学治疗和诊断。

天线浸入液体环境后电子的逸出功会减少，即电子从金属逸出所需

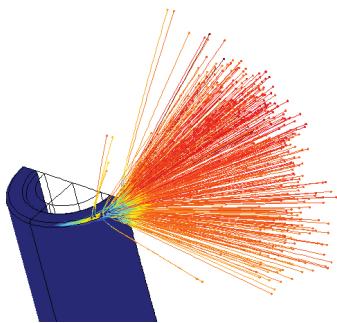


图 7. 电子从金属逸出时的粒子轨迹。

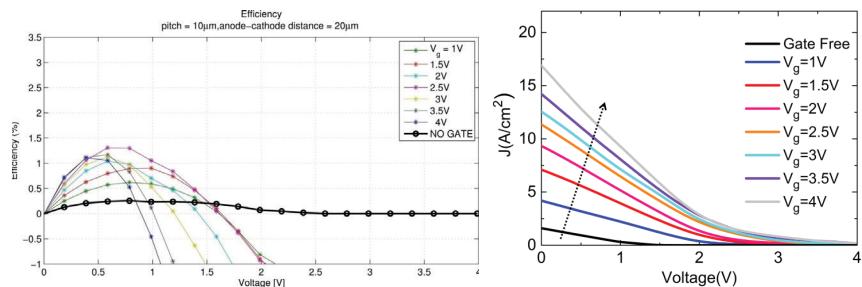


图 5. 左图中的仿真结果显示了对栅极施加不同电压且正负极距离为 20 μm 时的功率转换效率。右图显示了栅极电压和孔间距不同时正极堆积的电流密度。

的能量减少了。“这使电子更容易逸出，然而如果天线周围的电子密度持续增大并超过一定数值后，水分子的电离作用会呈指数增长，天线将无法继续工作。” Zilio 解释道。对天线施加飞秒激光脉冲会引起表面等离子共振，使金属表面的电场增强，从而提高电子发射后的加速度。

Zilio 的团队对天线的光响应进行了仿真，将其与电子发射和运动轨迹模型相耦合，还在局部增强的电场与放射电子的分布间建立了联系。接着，他的团队还研究了“电热点”，即电子密度最高的区域，并分析了水分子与放射电子发生碰撞产生的催化反应。“COMSOL 提供的碰撞模拟功能满足了我们的所有需求，”他评论道，“我能够同时模拟电子激发、水分子的电离作用以及它们之间的弹性碰撞”。

仿真结果（见图 7）揭示了天线和“电热点”周围的电场水平，并预测了电子在逸出过程中的密度和运动轨迹。通过研究天线随长度和激光功率变化而引起的不同光响应，团队确定了天线的工作范围。在该范围内电离作用会受到最大程度的抑制，并将天线失效风险降至最低。

» 展望新技术

在对外太空卫星设备及纳米天线的性能进行优化的过程中，多物理场分析为 IIT 研究团队的工作提供了极为

宝贵的帮助。“我们的工作需要对多个物理场进行模拟，例如将粒子追踪与其他现象相耦合以及相关的强非线性物理现象，COMSOL 软件为我们提供了极大的支持。” Zilio 评论道。从对外太空无止境的探索到有朝一日尝试刺激单个神经元，IIT 的工程师们计划将继续将仿真应用于极端环境下的技术开发中。🌐

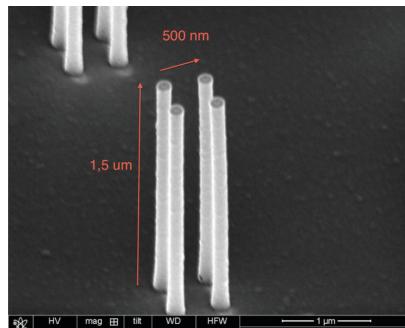


图 6. 由二次电子曝光技术制备的金纳米管天线的放大图。这种天线能在可见光谱范围和近红外光谱范围内产生强烈的等离子热点。



Pierfrancesco Zilio, 意大利技术研究所博士后研究员。