

基于统一时空量子化理论的光电效应微观机制与芯片设计应用

朱成明¹, 王 玲^{1*}, 吴睿丰², 柯瑞林¹, 黄 骏¹

¹ 嘉兴市上欧科技 浙江桐乡

² 哈尔滨工业大学 山东威海

【摘要】目的 突破经典光电效应理论的局限性, 从时空量子化角度构建基本粒子模型与力统一表达式, 揭示光电效应的 3D 微观物理机制。**方法** 通过普朗克尺度时空量子化建立元子模型; 基于元子架构电磁波传播模型; 结合德布罗意驻波理论构建电子、质子及原子核结构; 推导基本作用力统一表达式 $F=n\hbar c/r^2$; 结合原子模型分析电子束缚能, 建立光电效应新判据。**结果** 提出光电效应发生条件为入射光频率满足 $\nu \geq a\nu_e$ (a 为精细结构常数, ν_e 为电子本征频率, ν 入射光频率), 表明电子脱离原子核束缚的能量阈值取决于电子自身的量子化频率共振特性。**结论** 时空量子化框架下的粒子模型与力统一理论为光电效应提供了微观 3D 动力学解释, 揭示了光-物质相互作用的深层物理本质, 为下一代软基芯片设计提供新思路。

【关键词】 时空量子化; 元子模型; 电子驻波结构; 力统一表达式; 光电效应机制

【收稿日期】 2025 年 3 月 15 日

【出刊日期】 2025 年 4 月 12 日

【DOI】 10.12208/j.pstr.20250009

Microscopic mechanism of the photoelectric effect and chip design applications based on unified space-time quantization theory

Chengming Zhu¹, Ling Wang^{1*}, Ruifeng Wu², Ruilin Ke¹, Jun Huang¹

¹ Jiaxing Shangou Technology, Tongxiang, Zhejiang

² Harbin Institute of Technology, Weihai, Shandong

【Abstract】 Objective To break through the limitations of the classical photoelectric effect theory, construct a fundamental particle model and an unified expression of forces from the perspective of spacetime quantization, and reveal the 3D microscopic physical mechanism of the photoelectric effect. **Methods** The Yuanzi (Firston) Model was established through spacetime quantization at the Planck scale; an electromagnetic wave propagation model was constructed based on the firston framework; the structures of electrons, protons, and atomic nuclei were built by combining de Broglie's standing wave theory; the unified expression of fundamental forces, $F=n\hbar c/r^2$, was derived; and a new criterion for the photoelectric effect was established by analyzing electron binding energy in combination with the atomic model. **Results** It is proposed that the condition for the occurrence of the photoelectric effect is that the incident light frequency satisfies $\nu \geq a\nu_e$ (where a is the fine-structure constant, ν_e is the intrinsic frequency of the electron, and ν is the frequency of the incident light). This indicates that the energy threshold for an electron to escape the nuclear binding depends on the electron's intrinsic quantized resonant frequency characteristics. **Conclusion** The particle model and the unified force theory within the framework of spacetime quantization provide a 3D microscopic dynamic explanation for the photoelectric effect, revealing the deep physical essence of light-matter interaction.

【Keywords】 Spacetime quantization; Firston model; Electron standing wave structure; Unified expression of forces; Mechanism of photoelectric effect

*通讯作者: 王玲

1 引言

光电效应现象中, 电子逸出与光强无关而仅取决于光频率的特性, 无法由经典电磁理论解释。爱因斯坦^[1]的光量子假说 ($E_k = h\nu - W_0$) 虽成功描述实验规律, 但未阐明微观动力学机制。本文基于时空量子化思想, 构建元子 (Planck 能量单元) $\rightarrow$ 基本粒子 $\rightarrow$ 原子结构的递进模型, 结合基本作用力统一表达式, 从粒子时空结构层面推导光电效应新公式。德布罗意^[2]等通过对光的波粒二象性的拓展研究, 提出物质波理论: 所有微观粒子 (如电子) 均具有波动特性, 其波长与动量满足 $\lambda = h/p$, 并论证了粒子运动与相波传播的内在关联, 解释了玻尔原子模型中电子稳定轨道的量子化条件 (轨道周长为物质波波长的整数倍)。这一理论首次将粒子性与波动性统一于微观粒子, 为量子力学的波动理论提供了关键支撑。物质波理论为“电子驻波结构”模型提供了直接理论依据。

本文结合德布罗意驻波理论构建电子、质子的时空扭结结构, 推导光电效应的频率条件 $\nu \geq \nu_e$, 正是以物质波的波动特性为基础, 将粒子的量子化行为与波动规律相结合, 深化了对光电效应微观机制的理解。普朗克^[3]等通过对黑体辐射能量分布规律的研究, 突破经典电磁理论的连续性假设, 提出能量量子化假说: 谐振子的能量只能以离散的量子形式存在, 即 $E = nh\nu$ (n 为整数, h 为普朗克常数), 并由此推导出符合实验数据的黑体辐射公式。这一发现首次揭示了微观世界能量传递的不连续性, 为量子理论奠定了基础。威尔切克^[4]等通过对质量起源与相互作用的研究, 发现质量可由量子场的动态相互作用产生 (如 QCD 中手征对称性破缺导致核子质量), 且基本相互作用可通过底层量子机制统一, 如希格斯机制赋予粒子质量并关联力的传递。朱^[5]等通过量纲化简建立时间 (T) 与空间 (L) 的统一量纲体系 (Time-Space units), 提出时空量子化的核心单元——元子模型。该研究将普朗克尺度定义为时空量子化的最小单元 (元子能量 $E_p = 1.798298 \times 10^{-52} \text{J}$, 波长 $\lambda_p \approx 1.1 \times 10^{27} \text{m}$, 提出空间由正、反元子对架构, 能量与空间满足 $L = EC^2$ 的转换关系为粒子结构与力的传播提供了时空物质基础。

在光电效应中, 电子具有波动性, 需通过共振才能被激发, 且两个光子在三维空间中波长相位难

以同步, 所以不太可能由两个或多个光子使得电子共振。基于此微观机制的理论深化与规律揭示, 为理解优化实际场景中的广泛应用奠定了基础。Guo 等^[6]通过研究发现当 n 型砷化镓 (n-GaAs) 受到氙灯照射时, 其价带电子被激发至导带, 由于 GaAs 与铂 (Pt) 的电子功函数存在差异, 激发的电子会向 Pt 侧迁移, 这一过程增强了 Pt/GaAs 界面的接触电场和接触电势, 进而加剧了 Pt/溶液界面和 GaAs/溶液界面的极化。这种极化增强使得 GaAs 表面的阳极腐蚀反应和 Pt 表面的 MnO_4^- 还原反应得以更高效地进行, 形成了光生载流子促进界面电荷转移的循环。其中光电效应通过调控界面电荷转移过程, 显著加速了 GaAs 的电化学腐蚀, 为高效、低成本的半导体直接纳米 3D 压印技术 (直接绕过卡脖子光刻技术工序) 提供了关键支撑。

Hu^[7]等系统研究了基于二维材料横向光电效应的位置敏感探测器 (PSDs)。当光照射到石墨烯、 MoS_2 等二维材料与半导体衬底形成的结构时, 会激发产生电子-空穴对, 这些光生载流子在材料界面内建电场作用下分离, 进而发生横向扩散以平衡电场, 使两电极间的电压差与光照位置呈线性关系。其中, 光电效应是器件实现位置检测功能的核心机制: 石墨烯基 PSDs 利用其高载流子迁移率 (约 $8000 \text{cm}^2/\text{Vs}$) 和界面载流子长寿命, 通过电容耦合将位置信息转化为电信号, 实现高达 $365.85 \text{mVmm}^{-1} \text{mW}^{-1}$ 的位置灵敏度和 $0.44 \mu\text{s}$ 的响应时间; MoS_2 基 PSDs 则通过异质结内建电场调控载流子传输, 最高位置灵敏度达 183mV/mm , 响应时间低至 150ns 。这些特性使二维材料基 PSDs 在精密测量、高速轨迹跟踪等领域展现出巨大应用潜力, 为高性能位置精密传感技术提供了重要支撑。

Guo 等^[8]通过第一性原理计算研究了 $\text{SiC}/\text{Hf}_2\text{CO}_2$ 范德华异质结的光电特性, 发现其形成直接带隙为 1.25eV 的 II 型 S 型结构, 导带底主要来自 Hf_2CO_2 , 价带顶主要来自 SiC 。当该异质结受光照射时, 光子能量被层间电子空穴对共振吸收, 价带电子被激发至导带形成光生载流子, 由于 SiC 与 Hf_2CO_2 功函数存在差异 (分别为 4.89eV 和 6.26eV), 约 $0.03|e|$ 从 SiC 转移至 Hf_2CO_2 , 形成从 SiC 指向 Hf_2CO_2 的内建电场, 促进载流子分离。这种电荷转移增强了界面极化, 使异质结在椭圆偏振光照射下,

3.0eV 光子能量时光电流达 $1.0a_0^2/\text{光子}$, 沿垂直扶手椅方向电子迁移率高达 $2.57 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{Vs}$, 且吸收光谱覆盖紫外至可见光区域。其中光电效应通过驱动光生载流子的产生与输运, 使该异质结在自供能光探测器领域展现出显著潜力, 为高性能软光电子器件设计提供了关键支撑。Chen 等^[9]利用硅微纳锥技术构建 3D 固态真空器件, 为实现高性能低维柔性场冷电子发射器件, 可穿戴电子设备、柔性高清显示与高亮低功耗发光器件等运用奠定基础。

2 时空量子化与粒子模型构建

2.1 元子模型：时空量子单元

时空能量量子化最小单元定义为元子（引力子候选）：将普朗克时间和普朗克长度代入能量量纲公式即可得到元子的能量大小与波长：

$$E_p = 1.798298 \times 10^{-52} \text{J}$$

$$\lambda_p = 1.1 \times 10^{27} \text{m}, \text{ 约 } 1168 \text{ 亿光年}。$$

空间由正、反元子对架构, 满足能量-空间关系 $L = EC^2$, 元子质量 $m_p \approx 10^{-32} \text{eV}/c^2$, 与宇宙膨胀观测估算出的引力子质量相符。

2.2 光子模型：元子架构的电磁波

电磁波是电场和磁场相互转换传播的能量, 我们将时空量子化后得到了时空能量单元：元子, 即可用元子来给电磁波建模, 如图 1 所示：

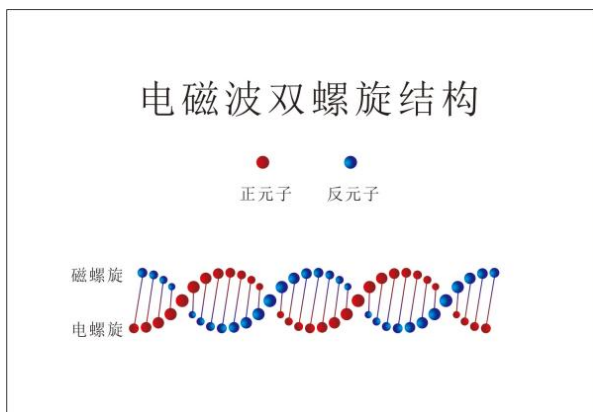


图1 电磁波 3D 结构

下面我们用电磁波模型解释光的折射, 当电磁波从一种介质以非垂直角度进入另一种介质时, 正、反元子不能同时到达界面, 由于电磁波在不同介质中波长不同, 波速不同, 先进入另一种介质的元子速度发生变化, 另一个元子则还是以原来的速度运动, 如下图所示, 当元子 a 到达 a' 时, 元子 b 到达 b', 两者运动的空间距离差造成电磁波发生折射。

如图 2 所示, 折射率 $n = bb'/aa' = \sin\theta_1/\sin\theta_2$

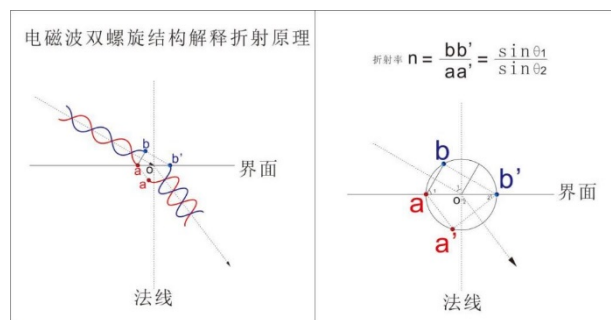


图2 折射模型

2.3 电子模型：驻波时空扭结

根据德布罗意的物质波理论, 行波是传播中的能量, 当行波首尾相连后, 能量只能在固定范围内循环流动, 行波变成了驻波, 能量态转换成粒子态, 生成初级基本粒子, 如电子, 中微子, 电磁波转换成粒子过程如图 3 所示。

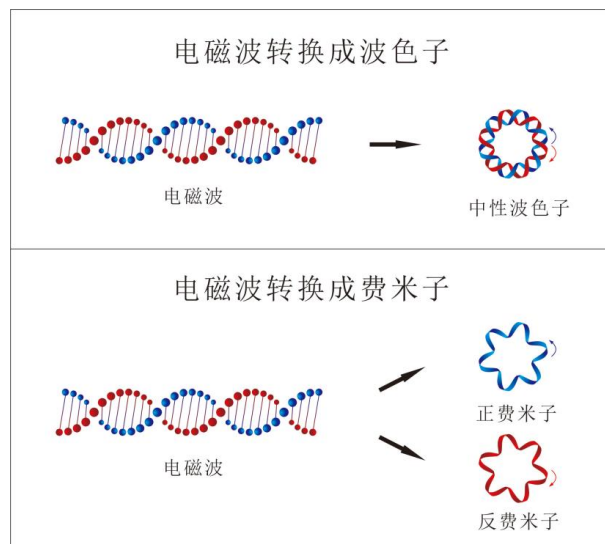


图3 波粒转换

2.4 质子模型

正电子在中微子作用下, 三维空间向内折叠生成质子, 正电子原来有四个时空维度, 再次发生三维空间折叠, 所以质子具有一个时间维度和六个折叠的空间维度。一共有七个维度, 七个自由度, 七个量子数, 可见, 除主量子数、磁量子数、角量子数、自旋量子数、色、味六个量子数外还有一个量子数没有发现。

由于质子是正电子折叠而来, 电子是莫比乌斯环结构, 所以猜想质子为三叶扭结时空结构, 如图 4 所示。

以此类推, 理论上还存在四叶扭结, 五叶扭结等粒子, 由此可见, 基本粒子是时空扭结的整体结构, 夸克并非真实(单独)存在的粒子, 只是时空扭结模型, 电子和质子都是不可再分的基本粒子。

从质子模型可以看出, 质子是一个整体, 破坏其中任何一处, 结构都会衰变解体, 这才产生“夸克禁闭”现象, 我们试图拉开三叶扭结中的任何一叶, 都会导致“弹簧”越拉越紧, 这才产生渐近自由现象。

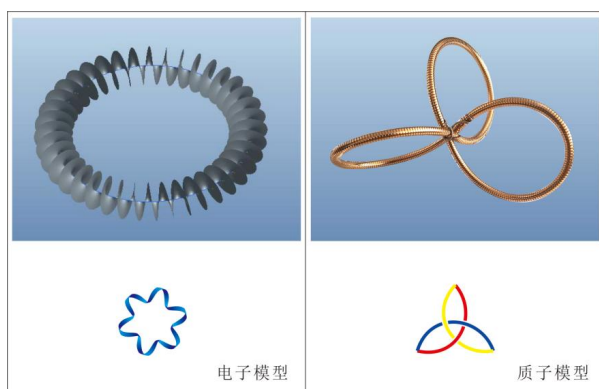


图4 扭结模型

2.5 原子核模型、中子模型

电子与中微子结合生成核内电子, 正电子与中微子结合生成质子, 原子核内只有质子和核内电子。根据泡利不相容原理, 每个能级最多只能容纳一对自旋相反的核内电子, 每个核内电子周围最多只能容纳一对自旋相反的质子。核内电子排布规律与核外电子排布规律相同。在原子核中只有单个质子和核内电子组成的不饱和结构和两个质子共用一个核内电子的饱和结构, 可见: 核子数是 $4n$ 且为饱和结构的原子最稳定。

在原子核中两个质子共用一个核内电子, 当它们被轰出原子核时两个质子其中一个带着核内电子, 带着核内电子的那个便是中子, 中子不是基本粒子, 自由状态下, 十五分钟后会释放一个中微子, 衰变成质子和电子。因为只有达到饱和结构(核子数为 $4n$)的原子核最稳定。

图5是氢、氦、氦、氦、锂、铍的原子核模型。

综上所述: 行波是传播中的能量, 当行波首尾相连后, 能量只能在固定范围内循环流动, 行波变成了驻波, 能量态转换成粒子态, 生成初级基本粒子, 如电子, 中微子。能量旋转方向不同生成不同电性的基本粒子, 如左旋生成电子, 右旋生成正电子,

中微子只有左旋结构, 正电子在中微子作用下再一次发生空间折叠, 生成质子, 质子是二级基本粒子, 电子与中微子结合生成核内电子, 质子与核内电子生成原子核, 原子核与电子生成原子, 原子组合成宇宙万物, 如图6所示。

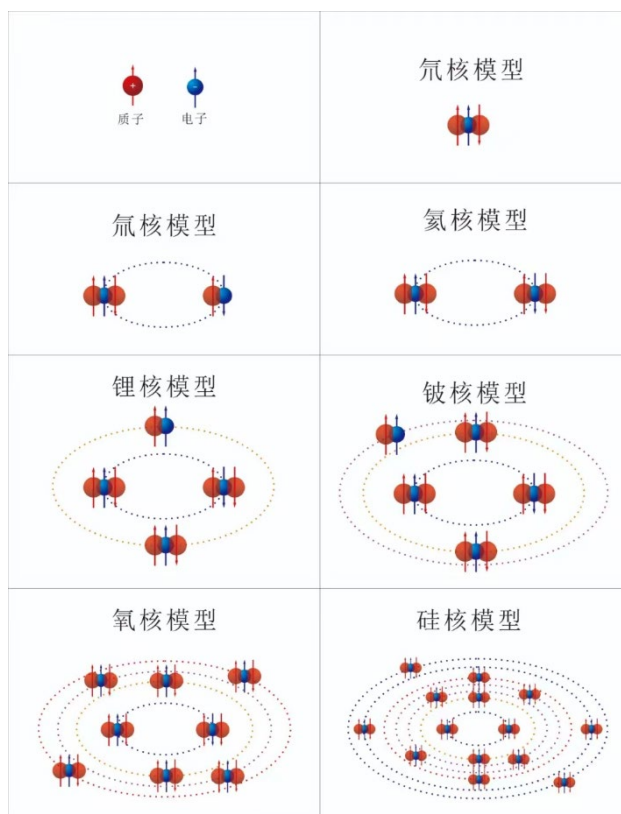


图5 常用核模型

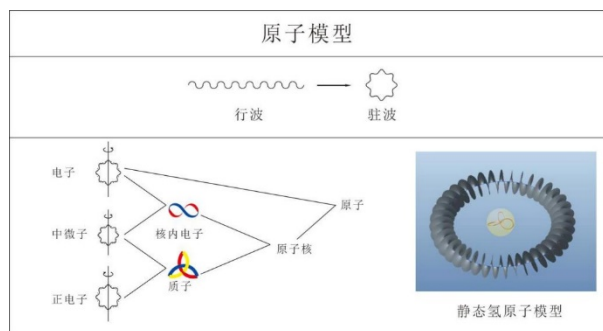


图6 原子模型

3 基本作用力统一表达式

根据能量公式:

$$E = n h \nu \quad (1)$$

光速公式:

$$c = \lambda \nu \quad (2)$$

根据德布罗意驻波理论, 电磁波波长等于驻波

周长:

$$\lambda=2\pi r \quad (3)$$

将公式②, ③代入公式①可得能量公式:

$$E=n\hbar\nu=n\hbar c/r \quad (4)$$

根据力与功关系式:

$$E=FS \quad (5)$$

物体所获得的能量等于力所做的功, 运动距离等于物体离质心的高度, 即圆周运动半径。

$$r=S \quad (6)$$

联合公式④, ⑤, ⑥代可得到公式

$$F=n\hbar c/r^2$$

可根据 n 的不同取值推导出基本作用力, 如下表 1 所示。

表 1 基本力的比对

万有引力	$F=GMm/r^2$	$n=Mm/m_0^2$	$G=\hbar c/m_0^2$	m_0 普朗克质量
库仑力	$F=KQ_1Q_2/r^2$	$n=Q_1Q_2/e_0^2$	$K=\hbar c/e_0^2$	e_0 普朗克电量
强相互作用力		$n=ee/e^2$		e 基本电荷电量

因为弱力是非本组质子与电子的引力, 非本组质子与质子的斥力, 非本组电子与电子的斥力, 三力之和, 弱力是重组力。

4 光电效应产生机制

电子要想从原子中脱离出来就必须挣脱原子核电磁力的束缚, 电子吸收的能量必须要大于或等于电子的电势能, 即入射光的能量必须大于或等于电子的电势能。在原子中核外电子与核内正电荷数量相等, 我们即可视正、负电荷一一对应, 于是核外电子受到的库仑力的统一作用力表达式:

$$F=n\hbar c/r^2=Q_1Q_2\hbar c/e_0^2r^2$$

其中 Q 为基本电荷电量、 e 为普朗克电量、 r 为电子离核半径、 c 为光速、 $\hbar$ 为约化普朗常数。而 $Q_1Q_2/e_0^2=a$, a 为宇宙精细结构常数。所以电子受到的库仑力公式可写成:

$$F=a\hbar c/r^2 \quad (1)$$

电子需要克服的电热能:

$$E=Fr \quad (2)$$

其中 E 为电热能、 F 为库仑力、 r 为电子离核半径。

连立公式①②得到电子需要克服的电热能 $E=a\hbar c/r$, 光子要把电子打出来, 光子必须克服电子的电热能, 即光子对电子做的功 $W \geq E$, 光子的能量

$$E_0=\hbar\nu \quad (3)$$

即光子的能量

$$E_0 \geq a\hbar c/r \quad (4)$$

连立③④得到

$$\hbar\nu \geq a\hbar c/r \quad (5)$$

根据电子模型, 电子驻波周长等于伽玛射线波长:

$$\lambda=2\pi r \quad (6)$$

光速

$$c=v\lambda \quad (7)$$

根据德布罗意的物质波理论, 电子也是波, 电子频率

$$\nu_e=c/\lambda \quad (8)$$

连立公式⑤⑥⑦⑧得到入射光频率 $\nu \geq a\nu_e$, 连其中 ν 为入射光频率、 a 为宇宙精细结构常数、 ν_e 为电子频率。关于微观粒子的空间结构, 通过 7Be 电子俘获衰变中 7Li 核的反冲能谱精密测量, 直接对中微子波包的空间展开程度进行了限制, 得到空间尺度下限 σ_v , $x \geq 6.2\text{pm}$ (95%置信区间) [10]。

5 结论与后续工作

(1) 粒子本质: 电子/质子为时空扭结驻波, 原子核由质子-核内电子对构成。

(2) 力统一: $F=n\hbar c/r^2$ 描述引力库仑力强力的统一, 弱力的重组修正公式正在研究当中。

(3) 光电机制: 电子脱离原子核束缚的阈值条件由电子本征 (原子共振) 频率 ν_e 与精细结构常数 a 共同决定, 揭示光电效应的量子化时空根源。

(4) 元子模型解说的光引发的原子驻波共振形成的光电 (与电光) 效应, 为下一代穿戴式芯片设计奠定运用基础。

参考文献

- [1] Einstein A. *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* [J]. Annalen der Physik, 1905.
- [2] de Broglie L. *Recherches sur la théorie des quanta* [D]. Université de Paris, 1924.
- [3] Planck M. *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum* [J]. Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, 1900.
- [4] Wilczek F. *Origins of Mass* [J]. Physical Review Letters, 2012.
- [5] Unified theory based on dimensional analysis. 物理科学与技术研究, 2025.
- [6] Guo C, Zhang L, Sartin M M, et al. Photoelectric effect accelerated electrochemical corrosion and nanoimprint processes on gallium arsenide wafers[J]. Chemical Science, 2019.
- [7] Hu C, Wang X, Song B. High-performance position-sensitive detector based on the lateral photoelectrical effect of two-dimensional materials[J]. Light: Science & Applications, 2020.
- [8] Guo M, Cui Z, Zhao T. SiC/Hf₂CO₂ vdWs heterojunction: Type-II narrow-bandgap heterojunction with excellent carrier mobility and photogalvanic effect[J]. Surfaces and Interfaces, 2025.
- [9] Y. Chen, Y. Huang, N. Xu, J. Chen, S. Deng and J. She, "P-Type Doped Si-Tip With Modulation and Extraction Gates for Precise Active Control of Stable Field Electron Emission," in IEEE Electron Device Letters, vol. 46, no. 7, pp. 1211-1214, July 2025.
- [10] Smolsky J, Leach K G, Abells R, et al. Direct experimental constraints on the spatial extent of a neutrino wavepacket [J]. Nature, 2025, 638: 640–644.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS