

单纳米天线光感应电场的生成和探测

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/25502.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！

单纳米天线光感应电场的生成和探测。近日，俄罗斯ITMO大学物理学院Dmitry Zuev, Pavel Belov教授课题组展示了一种共振金属-半导体单颗粒结构(MSN)，通过飞秒激光激励产生的载流子在金属-半导体界面上生成了静电场。由于所产生的静电场 E_{dc} 与MSN半导体纳米结构的三阶极化率 $\chi^{(3)}$ 相互作用对有效二阶极化率 $\chi^{(2)eff}$ 有调制作用，利用二次谐波实验探测生成的静电场，揭示了在这个金属-半导体纳米系统中二次谐波信号(SHG)是时间相关的，并具有非二次信号/激发功率依赖性。同时，研究人员还引入漂移-扩散模型展示了不同金属功函数、半导体表面缺陷密度以及金属-半导体界面构型如何影响该场的形成，估算出这个纳米天线中全光激励产生的静电场值高达108V/m。

研究背景

在固态电子学中，电场对不同过程的控制技术被广泛应用于工业片上基本元件的制造，例如场效应晶体管、电容器和存储器。现代设备的技术进步趋向于微型化以及从电信号操作向光信号操作的转变，促进了集成光学芯片的诞生。此外，信息处理的速度主要由材料的响应时间决定。潜在光学芯片的构建元件（单个共振纳米天线）可以在皮秒和飞秒时间尺度进行调制，使得这种概念在计算速度方面有着很好的前景。因此，寻找快速光信号处理的新方法决定了现代光子学研究的方向。

在纳米光子学中，局域电场被认为是探索各种纳米天线特征的关键，这些特征源自固态材料和光学谐振特性。这种具有双重光电功能的纳米天线对于未来的纳米光子处理器至关重要。因此，纳米光子学发展的下一个具有挑战性的阶段是在单个谐振纳米天线内以光学方式创建、探测和控制电场。一旦实现，将由基于电光操纵的亚波长元件构成的紧凑型设备的世界开辟道路。

研究创新

(1) 共振金属-半导体纳米天线的选材和制备

设计具有光感应电场的纳米天线应包括高效吸收光感应电荷载流子及其跨界面传输以进行电荷分离的元件。研究人员利用飞秒激光脉冲模式逐点辐射加工光刻创建的均匀金-硅纳米天线，改变金属-半导体纳米天线界面（图1a-e），同时非晶硅在激光激励下在界面处诱导形成偶极子表面源，转变为多晶态（图1d），从而增强了SHG信号。

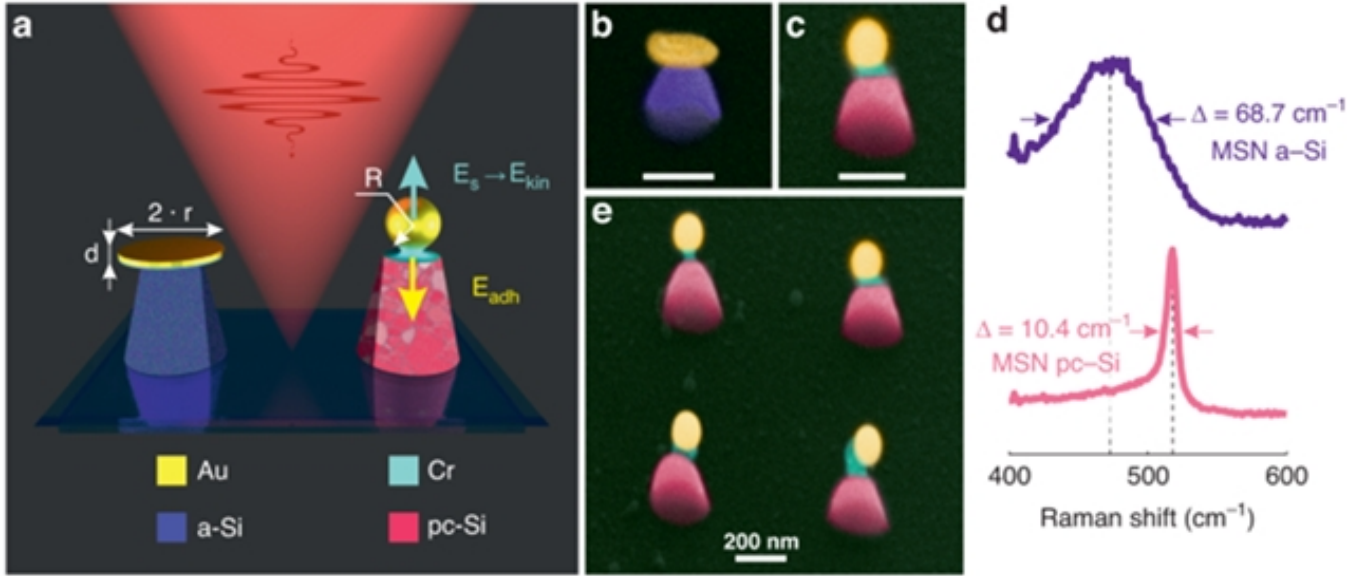


图1. 飞秒激光加工金-硅纳米天线。(a) 金外形改变；(b) 和(c) 加工前后的扫描电镜图；(d) 加工前后的硅结构拉曼光谱，紫色为非晶硅，粉色为多晶硅；(e) 加工阵列

(2) 利用电场诱导二次谐波产生 (EFISH) 探测电场

在中心对称材料中，由于晶体结构的对称性，在偶极近似下，体积晶体的二阶非线性极化率 $\chi^{(2)}$ 为零。但是当系统置于静电场 E_{dc} 中，破坏了晶体对称性，可观察到电场诱导二次谐波产生 (electrical-field-induced second harmonic generation, EFISH) 三阶非线性过程。EFISH效应通过四阶三次非线性磁化率张量 $\chi^{(3)}$ 的非零元素调制二阶非线性磁化率 $\chi^{(2)}$ 的有效值，具体表示为: $\chi^{(2)}(2\omega) = \chi^{(2)} + \chi^{(3)} E_{dc}$ $2 \text{ ISHG}(\omega) = \chi^{eff(2)} 2 \text{ ISHG}(\omega)$ ，因此SHG信号对激发强度的依赖性变为非二次。值得注意的是，肖特基势垒在EFISH效应中起到了重要作用。如图2e所示，当使用1047nm/1.18eV的飞秒激光器激发Si样品表面时，由于肖特基势垒的存在，EFISH效应无法实现。然而，由于金属-半导体纳米天线 (MSN) 具有较低的金属-半导体势垒能量，因此EFISH效应成为可能。硅纳米球和硅纳米薄膜的SHG信号对激发强度的依赖性皆约为2，而MSN的依赖性随着激光强度和时间的变化处于2.48-4.0之间。研究人员利用与理论计算对应的散射实验光谱监控纳米天线的形态变化 (图2b-c)，发现MSN在EFISH作用下，不仅SHG的强度得到了增强 (图2d)，损伤阈值也非常高 (图2c)。

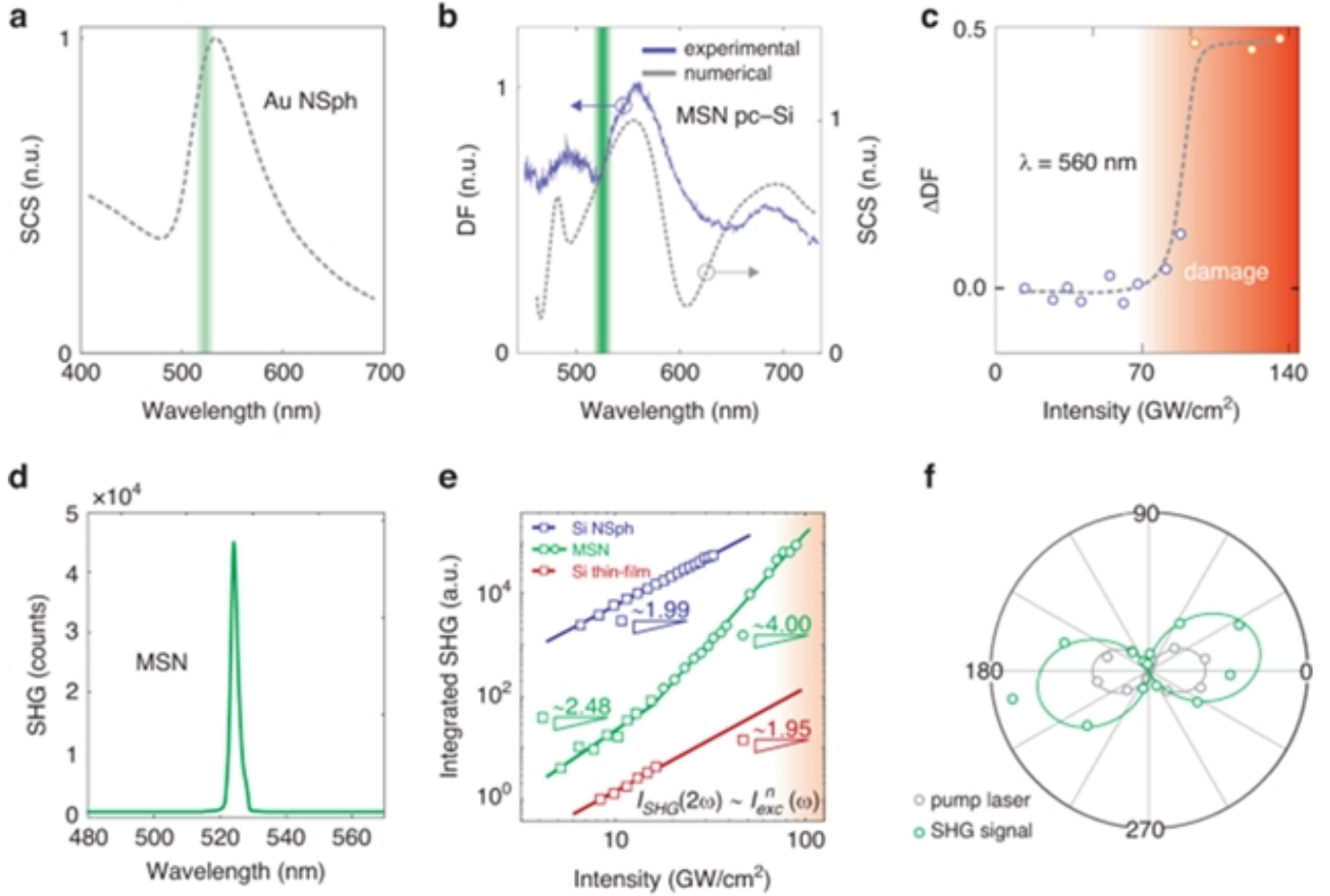


图2. 用于 探测EFISH 的金属-半导体纳米结构的设计。(a) 金纳米球的散射谱；(b) 实验和仿真的MSN散射图；(c) 利用散射谱监控SHG测量过程中的形态变化；(d) SHG信号；(e) MSN、Si球、Si膜的SHG信号/激发功率依赖性；(f) MSN的SHG信号与激光辐射图。

(3) 漂移扩散模型模拟EFISH效应的影响因素

研究人员应用费米-狄拉克统计的热生载流子流动的漂移-扩散模型 (drift-diffusion model) 模拟EFISH的过程。如图3所示，在低脉冲强度下，SHG信号的主要贡献来自硅表面的缺陷，此时EFISH信号对激发功率的依赖关系是二次的。当强度超过7GW/cm²时，光生载流子通过Si/Au界面形成了静电场，EFISH效应占主导，信号对激发功率的依赖关系变为非二次，与MSN的实验变化一致 (2.48-4.0)。感应电场在半导体的体积上是不均匀的，主要局部化在边缘处。在低脉冲强度下，场强度不随泵浦功率变化。然而，一旦超过阈值，场强度开始随着激发强度增加迅速增长，达到108V/m。

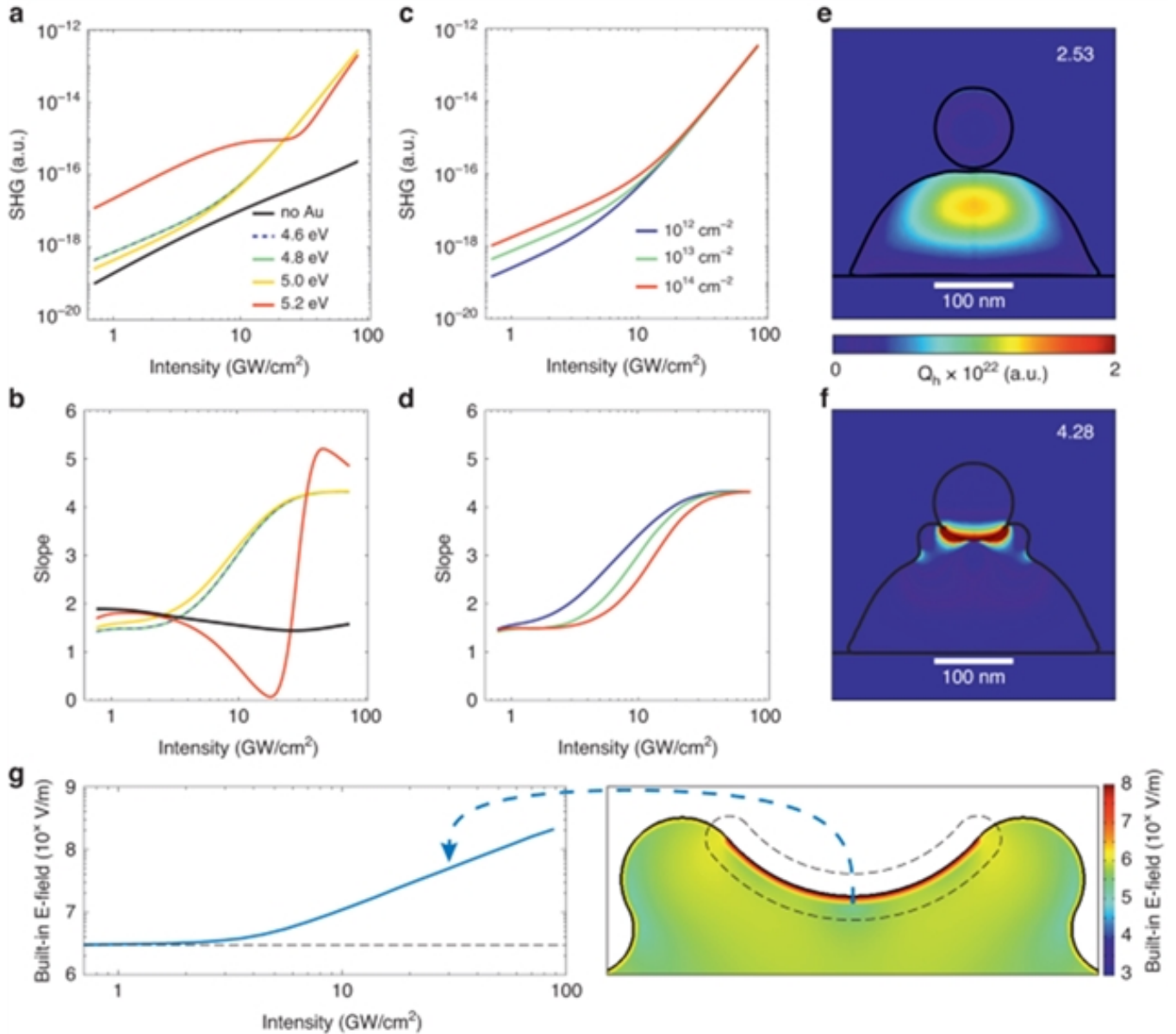


图3. EFISH 的模拟结果。(a) 不同金属功函数下的SHG信号与(b) 相对应的信号/激发强度的依赖性；(c) 不同表面态密度下的SHG信号与(d) 相对应的信号/激发强度的依赖性；(e) 和(f) 金属-半导体界面对应的吸收能量和相对应的信号/激发强度的依赖性；(g) 感应电场的强度。

总结展望

研究团队设计了一种全光激励生成电场的金属-半导体纳米天线，总结了在单个纳米天线内实现光生静电场的原理：首先，材料选择和制造方法发挥着重要作用，因为未来它可以将设计集成到实际设备中；此外，还需要：(1) 创建金属-半导体界面，将吸收能量直接定位在金属-半导体界面上；(2) 在损伤阈值以下选择适当的激励方式；(3) 电场探针，可通过一些光学过程，如倍频效应。这项发现为基于电光操纵的亚波长元件的光学存储、可编程逻辑和神经形态等设备的创造铺平了道路。

该文章以 All-optical generation of static electric field in a single metal-semiconductor

nanoantenna为题发表在Light: Science Applications 期刊上。该研究工作得到了俄罗斯科学基金会和俄罗斯联邦科学和高等教育部的大力支持。ITMO大学物理学院助理教授孙雅丽博士和Artem Larin博士为该论文的共同第一作者，Dmitry Zuev教授为论文通讯作者，该工作得到Pavel Belov教授的悉心指导。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://www.nature.com/articles/s41377-023-01262-8#Ack1>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：Dmitry Zuev 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