

# 红外近场辐射探测及超分辨温度成像

朱晓艳, 翁钱春\*

(中国科学院上海技术物理研究所 红外科学与技术全国重点实验室, 上海 200083)

**摘要:** 红外热成像技术通过探测物体自身所发出来的远场红外辐射从而感知表面温度, 在军事、民航、安防监控及工业制造等重要领域有着广泛应用。但由于光学衍射极限的限制, 红外热成像的分辨率通常在微米尺度及以上, 因此无法用于观测纳米尺度的物体。近几年, 我们开发了红外被动近场显微成像技术, 通过探测物体表面的近场辐射从而极大地突破红外衍射极限限制, 将红外温度探测及成像从传统的微米尺度拓展到了纳米尺度。本文将介绍红外被动近场显微成像技术的基本原理, 以及基于此可实现的物体表面近场辐射探测与红外超分辨温度成像研究。

**关键词:** 红外探测; 纳米热成像; 扫描探针显微镜

中图分类号: O434.3; O473

文献标识码: A

## Infrared near-field radiation detection and super-resolution temperature mapping

ZHU Xiao-Yan, WENG Qian-Chun\*

(State Key Laboratory of Infrared Science and Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** Infrared thermal imaging, which measures the surface temperature by detecting infrared radiation (IR) spontaneously emitted by the object itself, is widely used in important fields such as military, civil aviation, security monitoring, and industrial manufacturing. However, due to the diffraction limit, the spatial resolution of IR thermal imaging is usually above the micron scale and cannot be used to image nanoscale objects. In recent years, we have developed a passive-type infrared near-field (NF) microscopy. It detects the NF radiation exists on the sample surface and therefore achieves high spatial resolution well-below the diffraction limit. In this paper, we introduce the construction and detailed mechanism of this novel microscope and recently achieved research progress, i. e., sensitive detection of NF radiation and super-high resolution infrared temperature mapping of working devices.

**Key words:** infrared detection, nano-thermal imaging, scanning probe microscope

### 引言

温度高于绝对零度的任何物体都在向外发射电磁波, 通常为肉眼不可见的红外光。红外热成像技术通过吸收目标物体所辐射的红外光, 利用光电转换将其转化为可视化的温度图像, 在民航、军工、工业制造以及消防等领域已得到广泛应用。近年来, 得益于半导体工业的急速发展, 红外显微热成像技术因可对电子设备进行局域热分析而变得尤

为重要。但由于光学衍射极限的存在以及红外光的波长较长, 红外热成像显微镜的空间分辨率很难突破微米尺度这一界限(一般在  $3\ \mu\text{m}$  以上), 因此不适用于微纳电子器件中的局域热分析。

近年来, 日本东京大学和上海技术物理研究所成功研制了基于扫描探针技术的红外被动近场成像显微镜<sup>[1, 2]</sup>。该显微镜不仅可以进行物体表面的近场辐射探测, 且能够将纳米尺度的近场信号转换

收稿日期: 2023-04-30, 修回日期: 2023-07-20

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年基金

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China for Excellent Young Scientists Fund Program.

作者简介 (Biography): 朱晓艳 (1996-), 女, 江苏如皋人, 博士, 主要从事红外被动近场成像研究。E-mail: xy Zhu20191111@outlook.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: qcweng@mail.sitp.ac.cn

Received date: 2023-04-30, Revised date: 2023-07-20

为实空间的温度分布图像,一方面攻破了红外近场辐射成像的实验难点,另一方面突破了传统光学衍射极限的限制,实现了纳米尺度的超分辨红外温度成像。由于所检测到的近场辐射来源于物体内部的局域电荷扰动(噪声),该显微镜也被称为扫描噪声显微镜(Scanning Noise Microscope, SNoiM)<sup>[2,3]</sup>。

本文将围绕 SNoiM 技术的实验原理及其应用,详细介绍如何通过自主研发的红外被动近场显微镜,突破红外热成像的衍射极限限制,实现纳米级红外温度成像。

## 1 近场辐射

我们首先从黑体辐射的本源入手。如图 1(a) 所示,绝大多数物体内部都包含大量带正电荷和负电荷的粒子,这些带电粒子永远不会静止不动,而是一直处于随机扰动状态(热运动)。我们所熟知的热辐射就源自物体内部的这种带电粒子热运动,辐射特征可由普朗克黑体辐射定律描述<sup>[4]</sup>。但鲜为人知的是,物体内的电荷扰动不仅在距离物体辐射波长尺度以外的区域产生红外热辐射(远场辐射),而且在物体近表面处会生成一种能量密度极高的表面扰动电磁波(以倏逝波形式存在),可称之为近场辐射。理论很早就预言了这种表面电磁波(近场辐射)的存在<sup>[5]</sup>,并发现针对远场辐射所建立的认知及

规律(如普朗克辐射定律等)将不再适用于近场辐射,但相关实验研究由于探测难度极高而一直未有明显突破。2009 年,美国麻省理工学院和法国 CNRS 的研究组取得重要进展,先后在实验上验证了纳米尺度下近场辐射热传输效率可远超黑体辐射极限<sup>[6,7]</sup>。尽管该实验验证了物体表面近场倏逝波的存在,但相关物理现象仍然缺少更直接的实验手段对其进行更进一步的研究。

## 2 红外被动近场显微镜(SNoiM)的实验原理及其应用

### 2.1 SNoiM 技术的实验原理

物体表面的近场辐射由于其倏逝波特性(即强度随着远离物体表面急剧衰退)而难以探测。在 SNoiM 中,利用扫描探针技术有效地解决了这一问题<sup>[1]</sup>。如图 1(b)所示,当不引入纳米探针(或探针远离物体表面)时,物体近表面的近场倏逝波无法被探测,该显微镜工作于传统红外热成像模式,即仅获得其远场辐射信号。SNoiM 技术的关键是,将探针靠近样品近表面(比如 10 nm 以内),近场倏逝波可以被针尖有效散射出来。该探测模式下,探测器所获取的样品信号中同时存在近场和远场分量。因此,通过控制探针至物体表面的间距  $h$ ,即可获得近场、远场混合信号( $h < 100$  nm,称为近场模式)或

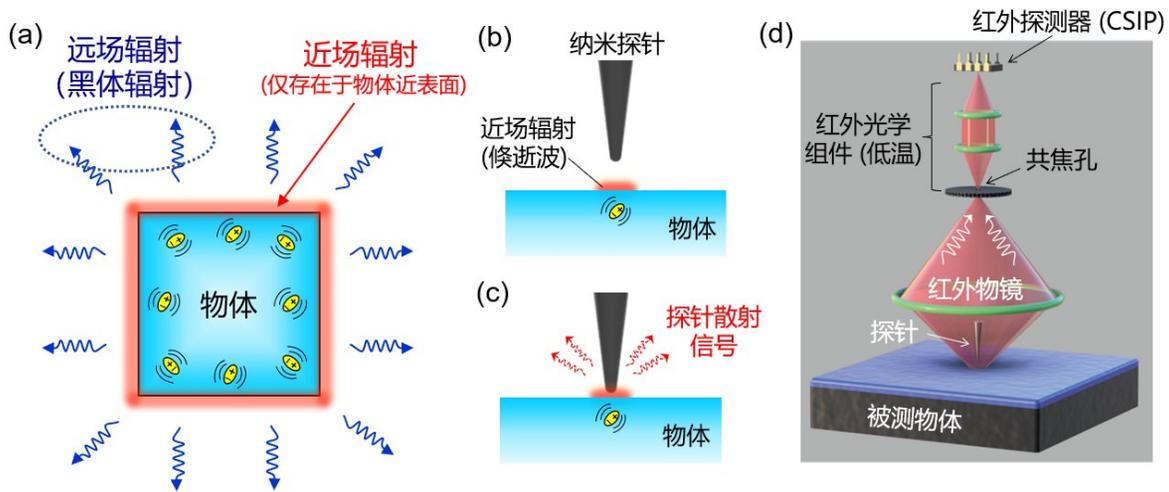


图 1 物体表面存在的近场辐射及其探测方式 (a) 物体表面存在的远场辐射及近场辐射; 探针调制技术: (b) 当探针远离样品时不会散射物体表面的近场倏逝波、(c) 当探针靠近物体近表面时可以散射近场倏逝波; (d) 红外被动近场显微镜(SNoiM)的示意图

Fig. 1 Near-field radiatio on the sample surface and its detection method (a) Far-field radiation and near-field radiation emitted from the surface of the material; Tip-height modulation technique: (b) when increasing the tip-height: near-field radiation cannot be scattered; (c) when decreasing the tip-height: near-field radiation can be scattered; (d) Diagram of the passive infrared scanning near-field microscopy (SNoiM).

单一的远场信号( $h \gg 100$  nm或撤去探针,称为远场模式)。最终,利用探针高度调制及解调技术即可从远场背景中提取物体的近场信息。

图1(d)展示了SNoiM系统探测近场信号的示意图。探针所散射的近场信号首先由一个高数值孔径的红外物镜进行收集。但在该过程中,无法消除来自环境、被测物体及仪器自身的远场辐射信号,它们随近场信号一同被红外物镜收集,导致被测物体微弱的近场信号湮没于巨大的远场背景辐射之中。为了最大程度降低远场背景信号,研究人员在红外物镜上方设计了一个孔径极小的共焦孔(约100  $\mu\text{m}$ ),通过此共焦结构可以缩小收集的光斑,有效抑制背景辐射信号。然而,即使是这样,是否有足够灵敏的红外探测器能够检测到纳米探针所散射的微弱近场信号也是一大难点。为此,本团队研发了一款超高灵敏度红外探测器<sup>[8]</sup>,攻克了这一技术壁垒。

图2(a)展示了首套SNoiM设备实物图。其中,金色圆柱腔体为低温杜瓦,内部搭载了自主研发的超高灵敏度红外探测器(CSIP)及一些低温光学组件;白色方框内为实验室内组装的基于音叉的原子力显微镜(AFM)、红外收集物镜及样品台区域,具体细节参照图2(b)、(c)。红外近场图像的空间分辨率不再受探测波长限制,而是由探针尖端尺寸决定。如图2(b)中插图所示,通过电化学腐蚀方法,可制备出形貌优良的金属(钨)纳米探针,其中,针尖直径可小至100 nm以内。

## 2.2 基于SNoiM的超分辨红外成像研究

利用SNoiM技术探测物体表面的近场辐射可极大突破红外衍射极限,实现超分辨红外成像。首先以亚波长金属结构的成像结果为例进行展示。图3(a)为Au薄膜样品在普通光学显微镜下所拍摄的图像。其中,亮金色区域为Au薄膜(约50 nm厚),其他区域为 $\text{SiO}_2$ 衬底。使用SNoiM系统可同时获取该样品的远场和近场红外图像(获取远场图像时只需将探针挪离样品表面)。如图3(b)所示,由于成像波长较长( $\sim 14$   $\mu\text{m}$ ),远场红外图像的分辨率远不如普通光学显微图像。比如,Au与衬底( $\text{SiO}_2$ )的边界无法清晰区分以及中间细小金属条状结构无法识别等(图中黑色虚线所示)。然而,在相同探测波长下,如图3(c)所示的近场红外图像则展现了超高的空间分辨率,其图像清晰度可完全与普通光学显微镜所获取的图像相比拟。为了进一步理清上述三种显微成像技术的区别,图3示意图中给出了探测到的信号来源:对于光学显微图像,其信号来自于可见光的反射。由于金属的反射能力较强,因而Au上的信号远比 $\text{SiO}_2$ 强。可见光波长范围为400~760 nm,因而光学显微镜可清晰分辨该样品表面的细微结构。远场红外成像不依赖于外界光源照射,直接通过红外物镜收集物体自身所发射出来的辐射信号,并对其进行成像。在探测波长为14  $\mu\text{m}$ 情况下,受衍射极限的限制,系统的实际空间分辨率也只有约14  $\mu\text{m}$ 。近场红外成像则检测探针尖端所散射的样品表面近场辐射信号,因此不受远场光学衍射极限限制,可获得超分辨红外图像(图3c)。

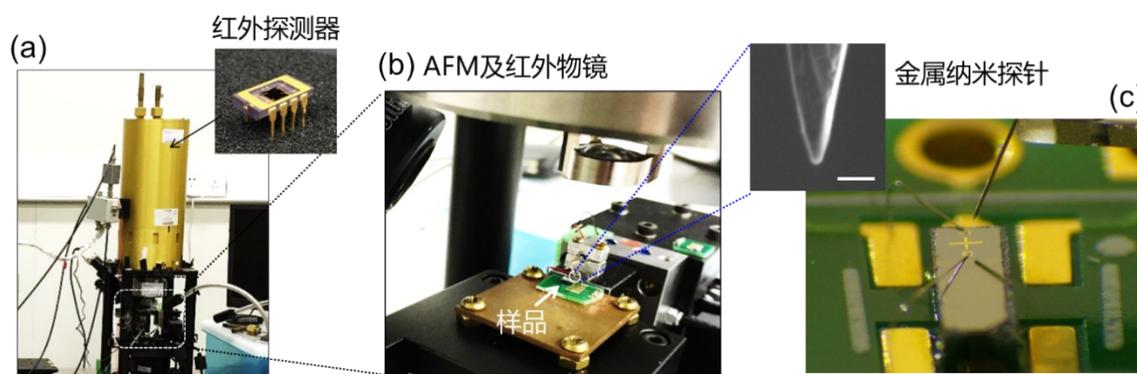


图2 红外被动近场显微镜SNoiM的实物图(a) 红外被动近场显微镜SNoiM的实物图,其中搭载了超高灵敏度红外探测器;(b)AFM及红外收集物镜;插图为通过电化学腐蚀制备的金属(钨)纳米探针;(c)探针与样品的显微照片

Fig. 2 The passive infrared scanning near-field microscopy (SNoiM): (a) The photo of the passive infrared scanning near-field microscopy (SNoiM), equipped with an ultrahigh sensitive infrared detector; (b) The diagram of atomic force microscope (AFM) and the infrared objective; The inset shows a metal (tungsten) nanoprobe tip prepared by electrochemical etching; (c) Micrograph of the probe with the sample

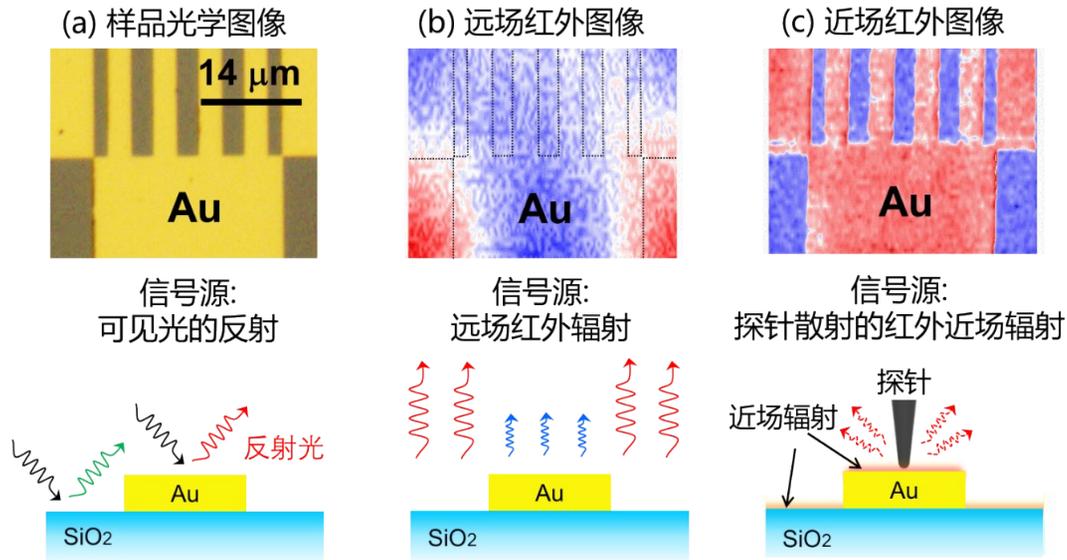


图3 样品 Au(SiO<sub>2</sub>衬底)的几种显微图像及成像原理示意图:(a)光学显微、(b)远场红外和(c)近场红外

Fig. 3 The microscope images and their imaging schematics of Au film patterned on the SiO<sub>2</sub> substrate: (a) optical image, (b) far-field infrared thermal image and (c) near-field infrared thermal image.

另外,值得注意的一点是,图3(c)所示的红外近场图像不仅仅在分辨率上有所提高,而且在金属与衬底的信号强度对比上出现了明显反转(由远场切换至近场后,Au由弱信号方(蓝色)转变为强信号方(红色))。针对上述现象的解释如下:远场成像时,Au是高反射物体,因此吸收红外光的能力极弱,根据基尔霍夫定律,则其红外发射率也很低。因而远场红外成像中其信号弱于衬底SiO<sub>2</sub>;而在近场成像中,室温金属(Au)中的自由电子存在剧烈的热运动(热噪声),从而在金属表面产生极强的表面电磁波<sup>[9-10]</sup>,因而Au上的信号远强于SiO<sub>2</sub>。由此可见,SNiM技术不仅突破了红外衍射极限限制,而且能够检测远场显微镜所无法探测的物理过程。

### 2.3 基于SNiM的微观载流子输运及能量耗散可视化研究

基于SNiM技术的另一项创新与突破在于纳米尺度下通电器件中微观载流子输运及局域能量耗散的直接可视化<sup>[2, 11-13]</sup>。值得指出,SNiM所检测的近场辐射信号来自于物体近表面的传导电子,因此其成像结果所反映的是物体表面的局域电子温度( $T_e$ )<sup>[2]</sup>。目前仅SNiM技术可实现纳米尺度下电子温度分布的直接成像<sup>[13-14]</sup>。下面将以通电微小金属线(NiCr合金)为例进行说明<sup>[11]</sup>。

图4(a)为NiCr金属线的光学显微图像(上)及

其通电后的红外远场热图像(下)。红外远场成像检测通电器件的远场辐射,从而估算出器件的表面温度。比如,器件中心处出现明显热斑,该处温度最高,表明电流流经微小弯曲金属线时能量耗散最大。而受衍射极限限制,远场红外热成像无法分辨微小金属线(宽度约 $3.3\ \mu\text{m}$ )上不同区域的温度分布,因此无法有效反映微观尺度上载流子的能量耗散特性。与之相比,近场红外热成像则可清晰展示器件中心区域微观载流子的输运及能量耗散行为。如图4(b)所示,当电流经过器件凹形弯折区时,近场红外热成像下,该区域内存在极其不均匀的温度分布,而且在凹形内侧出现显著热斑。该现象表明,通电NiCr器件的凹形区内存在非均匀局部焦耳热,且内侧区域电子能量耗散最大,这是由于电流的拥挤效应所造成的。此外,该温度分布图像似乎表明,通电时,载流子倾向于避开直角拐角处,并趋于沿着U形路径分布。为验证这一猜想,该实验进一步设计了中心区域呈U形弯折的通电NiCr金属线,并对其进行了近场红外热成像表征。图4(c)显示,U形区域温度均匀分布,无明显局域热斑,这表明载流子倾向于沿着U形路径均匀输运。基于SNiM纳米热分析研究而提出的新设计大大缓解了电流拥挤效应可能对器件造成的局部热损伤,具有重要的指导意义。

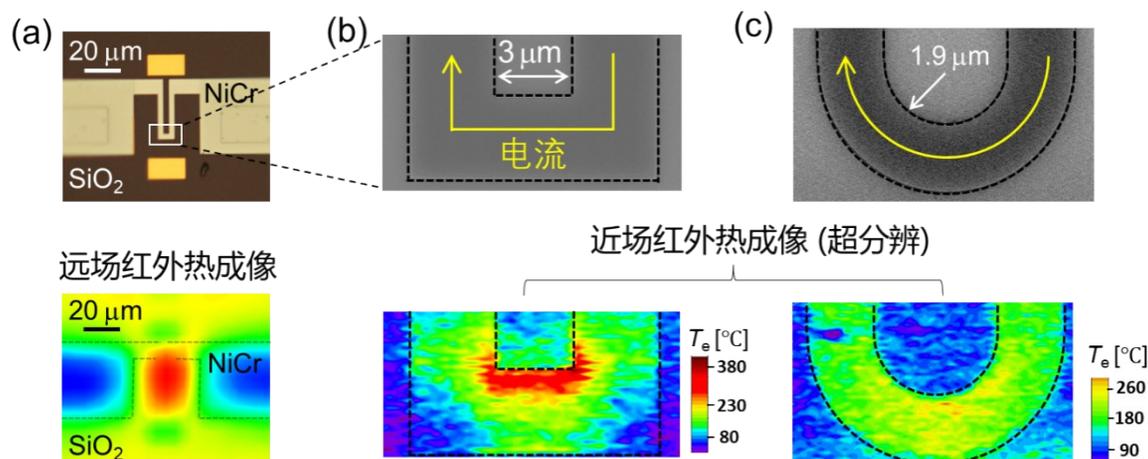


图4 NiCr金属线在不同测试模式下的红外热成像结果:(a)通电金属线显微图像及远场热成像;器件弯折区域分别为(b)凹形、(c)U形的扫描电镜图像及超分辨红外近场热成像

Fig. 4 Infrared thermal images of NiCr wire using various techniques: (a) The optical microscope and far-field images of the current-carrying metal wire; the scanning electron microscopy image and the super-high resolution infrared images of the device bending region in (b) “凹”-and (c) “U”- shape, respectively.

### 3 总结与展望

综上所述,利用SNoiM技术,可以实现物体表面的近场辐射探测及红外超分辨温度成像。该技术是目前国际上唯一能够进行局域电子温度成像的科学仪器,不仅突破了红外远场热成像的衍射极限限制,且首次实现了纳米尺度下通电器件中载流子输运行为与能量耗散的直接可视化。该研究内容均基于第一代室温SNoiM系统,目前,第二代低温SNoiM系统已被成功搭建,有望进一步突破后摩尔时代信息和能源器件的功耗降低及能效提升难题,探索物理新机制,并推动纳米测温技术新的发展。

#### References

- [1] Kajihara Y, Kosaka K, Komiyama S. A sensitive near-field microscope for thermal radiation [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, **81**(3): 033706.
- [2] Weng Q, Komiyama S, Yang L, *et al.* Imaging of nonlocal hot-electron energy dissipation via shot noise [J]. *Science*, 2018, **360**(6390): 775-778.
- [3] Komiyama S. Perspective: Nanoscopy of charge kinetics via terahertz fluctuation [J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, **125**(1): 010901.
- [4] Planck M. The theory of heat radiation [M]. New York, 1959.
- [5] Polder D, Van Hove M. Theory of Radiative Heat Transfer between Closely Spaced Bodies [J]. *Physical Review B*, 1971, **4**(10): 3303-3314.
- [6] Shen S, Narayanaswamy A, Chen G. Surface phonon polaritons mediated energy transfer between nanoscale gaps [J]. *Nano Letters*, 2009, **9**(8): 2909-2913.
- [7] Rousseau E, Siria A, Jourdan G, *et al.* Radiative heat transfer at the nanoscale [J]. *Nature Photonics*, 2009, **3**(9): 514-517.
- [8] Komiyama S. Single-Photon Detectors in the Terahertz Range [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, **17**(1): 54-66.
- [9] Kajihara Y, Kosaka K, Komiyama S. Thermally excited near-field radiation and far-field interference [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(8): 7695-7704.
- [10] Komiyama S, Kajihara Y, Kosaka K, *et al.* Near-field Nanoscopy of Thermal Evanescent Waves on Metals [J]. *arXiv: Mesoscale and Nanoscale Physics*, 2016.
- [11] Weng Q, Lin K-T, Yoshida K, *et al.* Near-Field Radiative Nanothermal Imaging of Nonuniform Joule Heating in Narrow Metal Wires [J]. *Nano Letters*, 2018, **18**(7): 4220-4225.
- [12] Lin K T, Nema H, Weng Q C, *et al.* Nanoscale probing of thermally excited evanescent fields in an electrically biased graphene by near-field optical microscopy [J]. *Applied Physics Express*, 2020, **13**(9): 096501.
- [13] Weng Q, Yang L, An Z, *et al.* Quasiadiabatic electron transport in room temperature nanoelectronic devices induced by hot-phonon bottleneck [J]. *Nature Communications*, 2021, **12**(1): 4752.
- [14] Weng Q, Panchal V, Lin K-T, *et al.* Comparison of active and passive methods for the infrared scanning near-field microscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, **114**(15): 153101.