

文章编号: 2095-4980(2019)02-0184-05

GaAs/AlGaAs 太赫兹量子级联激光器的热分析

张颖娟, 沈昌乐, 王雪敏

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为研究太赫兹量子级联激光器(THz QCLs)中的热传输及有效散热方法, 建立了二维/三维有限元热分析模型, 模拟计算了 GaAs/AlGaAs THz QCLs 低温工作时的温度及热流分布; 并讨论了源区结构参数、热沉材料及散热膜层对器件热传输的影响规律。研究表明, 器件源区温度水平方向分布较均匀, 垂直方向温差大, 源区热量主要依靠热沉导出; 减小源区厚度、增加腔长与减小脊宽均有利于促进热传导并降低源区温度; 在器件顶部增加 AlN 薄膜具有显著的辅助散热效果, 当薄膜厚度大于 8 μm 时, 源区温降趋于缓慢。

关键词: 太赫兹量子级联激光器; 有限元; 热分析; 源区温度

中图分类号: TN03

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201902.0184

Thermal analysis of GaAs/AlGaAs terahertz quantum cascade lasers

ZHANG Yingjuan, SHEN Changle, WANG Xuemin

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The 2D/3D Finite Element(FE) heat dissipation model is established for calculating the temperature distribution and heat flux of GaAs/AlGaAs Terahertz Quantum Cascade Lasers(THz QCLs) in order to investigate the thermal transfer process and effective heat dissipation methods. The influences of device geometry, heat sink materials and AlN film on thermal properties of THz QCLs are studied. The results show that the horizontal temperature distribution of active region is uniform, while the perpendicular temperature difference is high. The heat generated in active region is mainly transmitted by the heat sink. Thinning the active region, increasing the cavity length and narrowing the ridge width facilitate the heat dissipation and decrease the temperature of the active region. Adding AlN films on top of the device shows a significant auxiliary heat dissipation effect. Especially, when the thickness of the film is greater than 8 μm , the drop in temperature of the active region tends to be slow.

Keywords: Terahertz Quantum Cascade Lasers; finite element method; thermal analysis; temperature of active region

太赫兹量子级联激光器(THz QCLs)以其优异的性能及潜在的应用价值, 在短短十几年内快速发展, 在 QCLs 发展过程中, 其结构不断得以优化, 性能不断提高^[1-2]。尽管如此, 由于 QCLs 一般在高阈值电流和电压下工作, 且绝大多数的输入电功率经过不同的耗散机制最终均转化为热, 同时具有低热导率的超晶格源区使得热量不能快速传输, 导致热量的积累, 最终影响器件的可靠性及稳定性^[3-4]。因此, 研究 THz QCLs 中的热传输及有效散热方法成为 THz QCLs 热管理的重要研究问题。国内外学者在 QCLs 热管理方面做了大量的研究工作, Lee 等通过建立二维热扩散模型研究了 InGaAs/InAlAs QCLs 的温度分布、热流分布及器件内部热导, 并研究了源区结构(脊宽和腔长)对于 QCLs 热导的影响^[5-6]。Satish 等利用有限元法结合实验研究了中红外量子激光器的热行为, 并研究了包括不同基体材料、绑定方式及源区结构对于器件热阻的影响^[7]。Michael 等利用电测量技术对激光器源区温度进行了检测, 根据实验结果计算源区有效热导率, 并对器件内的温度分布进行分析^[8]。虽然以上研究的 QCLs 种类各不相同, 但关注点主要集中在激光器的结构优化、绑定方式及材料选择等方面, 以期达到降低器件热阻、降低源区温度及高效散热的目的。

收稿日期: 2018-10-25; 修回日期: 2018-12-30

基金项目: 国家科技部重大仪器设备开发专项资助项目(2011YQ130018)

本文针对在低温下工作的 GaAs/AlGaAs 太赫兹量子级联激光器，理论结合实验对该器件进行了热传输研究。通过建立二维/三维有限元数值分析模型，模拟器件内部的温度分布、热流分布及器件内部总热阻，较为系统地研究了源区结构参数(脊宽、腔长和源区厚度)，热沉材料对器件传热的影响，并通过在器件顶部设计散热 AlN 薄膜，研究不同厚度 AlN 薄膜对于源区最高温度及源区温度分布的影响。

1 计算模型

图 1(a)为 GaAs/AlGaAs THz QCLs 的 SEM 照片，器件详细结构见文献[9]，由于 THz QCLs 器件腔长远大于其脊宽及源区厚度，可假设温度分布沿器件长度方向恒定，因此，可以将 THz QCLs 的热传输计算模型简化为二维有限元模型，仅在进行器件腔长与脊宽参数化研究时扩展为三维有限元模型，模拟中对网格收敛性进行了验证，有源区厚度方向最小单元尺寸 3.3 μm，源区宽度方向最小单元尺寸 4.2 μm，由于热沉尺寸远大于源区尺寸，因此热沉区域采用过渡网格，图 1(b)为本文建立的二维有限元模型(包括源区、衬底、焊料及热沉局部)。QCLs 运行达到稳态时，器件中的热传输可以用含内热源的稳态傅里叶导热方程式(1)来描述，由于 QCLs 输出光功率较输入电功率小得多，可忽略不计，因此，源区单位体积热源可由式(2)计算：

$$\nabla \cdot (k \cdot \nabla T) + Q = 0 \tag{1}$$

$$Q = \frac{U_{th} I_{th}}{U} \tag{2}$$

式中： k 为材料热导率； T 为温度； Q 为输入功率密度； U 为源区体积； U_{th} 为阈值电压； I_{th} 为阈值电流，其中阈值电压与电流可通过实验特性曲线获取。

由于器件热沉底部与低温平台连接，因此假设热沉底面为恒定温度边界($T=10$ K)，在此问题中热辐射较热传导小得多，所以忽略器件与真空环境间的辐射换热，其他边界均为绝热边界，同时假设各材料之间接触良好无界面热阻。低温平台的温度一般保持在 10 K 左右，因此需要获取器件中各材料在低温下的热导率，图 2 为 GaAs 衬底、In 焊料及无氧铜(O.F.H.C.)热沉热导率随温度的变化曲线^[10-11]。针对源区超晶格材料采用各向异性热导率，在超晶格生长方向上由于各层材料间界面较多，增加了声子散射作用，导致材料垂直方向热导率远小于面内热导率^[12]，结合文献调研^[13-14]本文采用的法向热导率为 $5.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，面内热导率为 $22 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

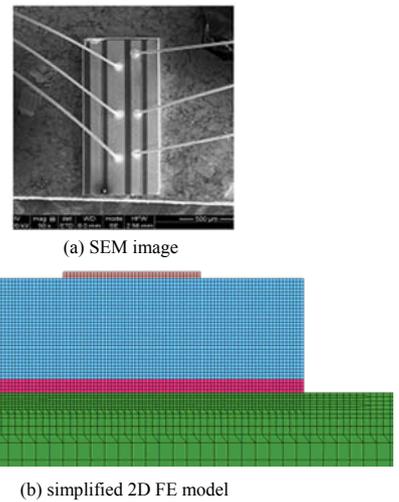


Fig.1 SEM image (a) and simplified 2D FE model (b) of the GaAs/AlGaAs THz QCLs
图 1 GaAs/AlGaAs THz QCLs 的 SEM 照片(a)及二维有限元模型(局部)(b)

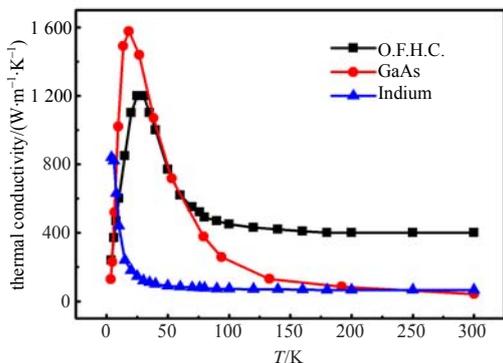


Fig.2 Temperature-dependent thermal conductivity of GaAs, Indium and O.F.H.C.
图 2 GaAs, In 及 O.F.H.C.热导率随温度变化曲线

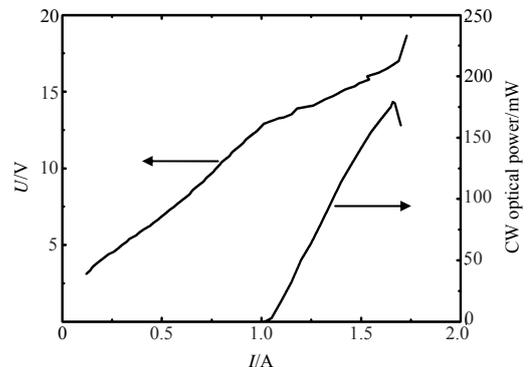


Fig.3 Voltage & power characteristics of a THz QCLs operated in CW model
图 3 连续波模式下，THz QCLs 的电流-电压及光输出功率曲线

2 结果与讨论

在连续波模式下，实验所测得 THz QCLs 的特性曲线如图 3 所示，源区厚度 10 μm，脊宽 175 μm，腔长 2.25 mm，结合阈值电流、电压与器件源区尺寸，源区单位体积的热功率为： $3.31 \times 10^3 \text{ W/mm}^3$ 。

由于热沉尺寸相对于器件源区及衬底过大,因此在后续的结果分析时均未显示热沉部分。图 4 为热沉温度 10 K 时,计算所得 GaAs/AlGaAs THz QCLs 的温度分布及热流分布,由温度分布云图 4(a)可以看出,源区内最高温度为 51.3 K,同时源区内水平方向温度分布较为均匀,而垂直方向温差达 31.4 K,这与源区超晶格材料法向热导率低有关。由热流分布云图 4(b)可以看出部分热流沿水平方向在衬底内扩散,大部分热流主要向下传输,经过衬底由热沉导出。

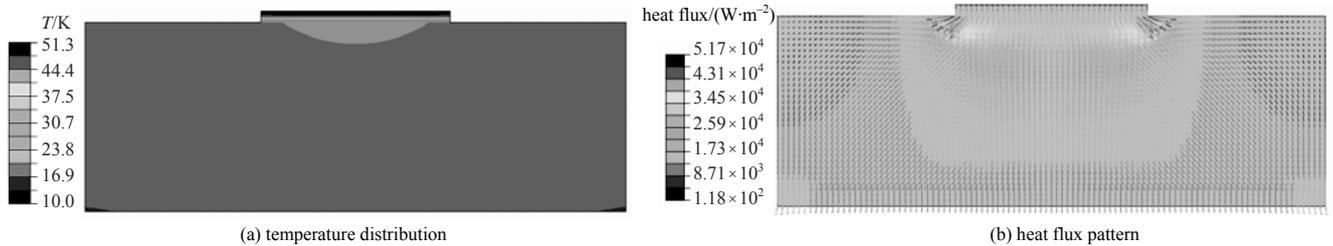


Fig.4 Temperature distribution (a) and the heat flux pattern (b) of the THz QCLs in CW model with a heat sink temperature of 10 K
图 4 热沉温度 10 K 时, THz QCLs 的温度分布(a)及热流分布(b)

2.1 光腔结构参数对源区温度的影响

光腔结构参数包括:脊宽、腔长及源区厚度,通过光腔结构参数化研究来评估脊宽、腔长与源区厚度对 QCLs 器件传热的影响。根据实验可知,通过器件源区单位横截面积上的电流恒定,因此计算中也需确保恒定的电流密度。一般利用器件热导来表征 QCLs 器件的散热能力,如式(3)所示:

$$G_{th} = (U_{th} J_{th}) / (T_{active-region} - T_{heat-sink}) \quad (3)$$

式中: $T_{active-region}$ 与 $T_{heat-sink}$ 分别为器件源区与热沉温度; U_{th} 与 J_{th} 分别为阈值电压和阈值电流密度。

图 5 为源区厚度和脊宽对于 QCLs 源区温度和器件热导的影响。对比源区厚度为 5 μm 和 10 μm 的结果可知,源区厚度减小,源区最高温度降低,器件热导增加。这与减小源区厚度后,源区材料热阻减小密切相关。随着脊宽的增加,源区的最高温度上升,器件热导减小,这是由于在定电流密度下,脊宽增加,相当于增加器件的热输入,导致源区温度上升。

为了消除输入功率密度不同对于结果带来的影响,研究中固定激光器源区的截面积,在这种情况下需要将脊宽和腔长综合考虑。图 6 所示为在波导区横截面积锁定情况下,源区厚度一定,脊宽和腔长对 QCLs 源区温度的影响。由图 6 可知,随着 QCLs 腔长增加与脊宽减小,源区最高温度非线性下降。主要原因是在 QCLs 中,腔长的增加,意味着衬底长度相应增加,从而增加了器件散热的横截面积,减小了器件热阻,使得源区温度下降。

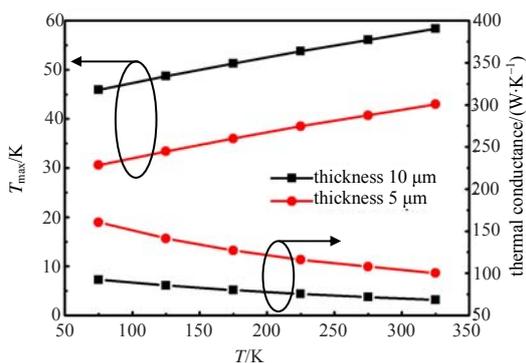


Fig.5 Effect of ridge width and thickness of the active region on the T_{max} and thermal conductance of the device
图 5 源区厚度和脊宽对于源区温度和器件热导的影响

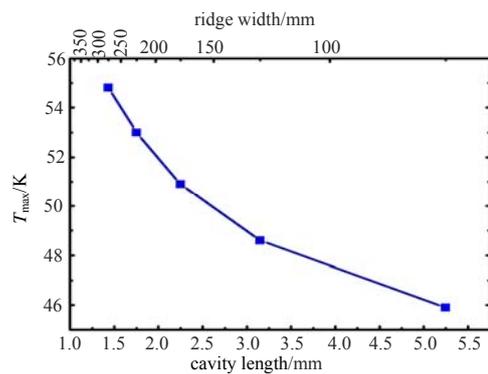


Fig.6 Effect of the ridge width and cavity length on the T_{max}
图 6 脊宽和腔长对于源区温度的影响

2.2 不同衬底材料对源区温度的影响

由于 QCLs 热沉底部与低温平台连接,器件中产生的绝大多数热量由热沉导出,因此热沉材料对器件散热影响较大,在选取热沉材料时应注重材料的低温热导特性。本文选取 3 种在低温下具有良好热导特性的热沉材料,研究其对于器件散热效果的影响,这 3 种材料分别为无氧铜、高纯无氧铜和硅,其热导率随温度变化的曲线如图 7 所示^[11]。

由于低温平台制冷功率并非无限，因此热沉温度会随器件连续工作有所上升，而热沉温度的升高会导致源区的温度升高，进而使得光输出功率下降。图 8 所示为随着热沉温度的升高，3 种热沉材料对应的源区温度变化曲线。从图中可以看出：源区最高温度随热沉温度升高而升高；当热沉温度低于 35 K 时，高纯无氧铜为热沉时源区温度最低，当热沉温度高于 35 K 时，硅为热沉时源区温度最低，这种现象与 3 种材料热导率随温度变化的规律密不可分。由图 7 热导率曲线可知，硅材料在 30 K 以上较其他 2 种材料具有更好的热导率。

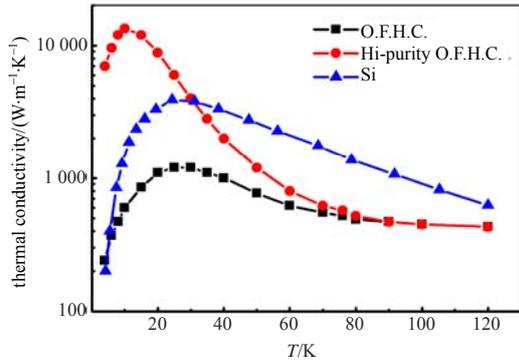


Fig.7 Curves of thermal conductivity of three heat sink materials varying with temperature
图 7 三种热沉材料热导率随温度变化的曲线

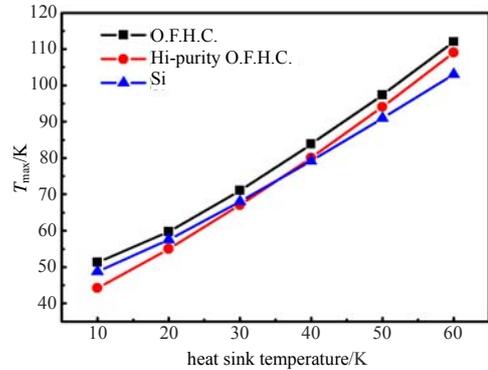


Fig.8 Influence of different heat sink materials on active region temperature
图 8 不同热沉材料对于源区温度的影响

2.3 散热膜层对源区温度的影响

在导热模式下，源区绝大部分的热量通过热沉导出，这种单一的散热模式使得源区热量不能快速散出。而在源区顶部增加一层高热导率材料，将会在源区形成辅助散热条件。基于此，本研究选取的高热导率薄膜材质为 AlN。AlN 材料不仅具有高热导率，且能够起到很好的绝缘作用。AlN 薄膜热导率具有尺寸效应，其热导率随厚度的变化关系参考 Aissa 等^[15]的研究。

图 9 所示为在器件顶部增加不同厚度 AlN 薄膜时，在不同热沉温度下，源区最高温度随薄膜厚度的变化曲线。可以看出：增加不同厚度的 AlN 薄膜时，源区最高温度不同程度地降低，当薄膜厚度小于等于 8 μm 时，随着薄膜厚度增加，源区降温较快；当薄膜厚度大于 8 μm 时，源区降温趋于缓慢。图 10 所示为热沉温度为 10 K，AlN 薄膜为 8 μm 时，QCLs 的温度分布及热流分布。从图 10(a)可以看出，AlN 薄膜不仅能够有效降低源区温度，对于源区水平方向温度分布也会有影响。由于增加了源区热量向两侧的扩散，因此与薄膜直接接触的源区侧面降温明显；从图 10(b)所示的热流方向可知热量同时向四周传输，因此增加 AlN 薄膜对于器件散热具有良好的辅助作用。

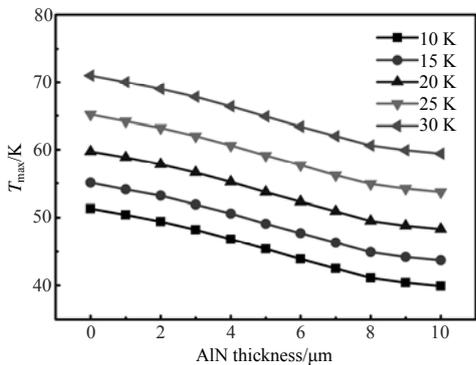


Fig.9 Effect of the AlN thickness on T_{max}
图 9 薄膜厚度对源区最高温度的影响

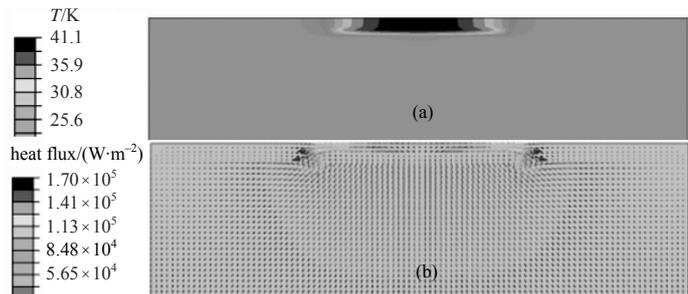


Fig.10 After adding 8 μm AlN, the temperature distribution (a) and the heat flux pattern (b) of the THz QCL with a heat sink temperature of 10 K

图 10 热沉温度为 10 K，AlN 薄膜为 8 μm 时，THz QCLs 的温度分布(a)及热流分布(b)

3 结论

本文建立了 GaAs/AlGaAs THz QCLs 二维/三维热传导模型，研究了光腔结构参数、衬底材料及散热膜层对器件热传输的影响，结论如下：

1) 根据 QCLs 器件光腔结构参数优化结果可得: 在定电流密度下, 减小源区厚度、增加腔长与减小脊宽均有利于降低源区温升。

2) 对比研究无氧铜、高纯铜、硅 3 种热沉材料可得: 源区最高温度随热沉温度升高而升高; 当热沉温度低于 35 K 时, 高纯铜为衬底时源区温度最低, 当热沉温度高于 35 K 时, 硅为衬底时源区温度最低。

3) 对于散热膜层的研究可得: 在器件顶部增加散热膜层是源区散热的有效途径, 8 μm 厚的 AlN 薄膜就能够有效降低源区温度。

参考文献:

- [1] FATHOLOLOUMI S, DUPONT E, BAN D, et al. Time-resolved thermal quenching of THz quantum cascade lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(3): 396–404.
- [2] 蒋涛, 湛治强, 沈昌乐, 等. 低阈值连续波工作的 2.9 THz 量子级联激光器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(5): 657–660. (JIANG Tao, ZHAN Zhiqiang, SHEN Changle, et al. Fabrication of continuous-wave-work 2.9 THz quantum cascade laser with low threshold[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016, 14(5): 657–660.)
- [3] ZHANG Q D, LIU F Q, ZHANG W, et al. Thermal induced facet destructive feature of quantum cascade lasers[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(14): 141117-1–141117-3.
- [4] HU Y Z, ZHANG Q D, LI J H. The thermal failure process of the quantum cascade laser[J]. Optical and Quantum Electronics, 2015, 47(10): 3419–3426.
- [5] LEE H K, CHUNG K S, YU J S, et al. Thermal analysis of buried heterostructure quantum cascade lasers for long-wavelength infrared emission using 2D anisotropic heat-dissipation model[J]. Physica Status Solidi A—Applications and Materials Science, 2009, 206(2): 356–362.
- [6] LEE H K, CHUNG K S, YU J S. Thermal analysis of InP-based quantum cascade lasers for efficient heat dissipation[J]. Applied Physics B, 2008, 93(4): 779–786.
- [7] CHAPARALA S C, XIE F, CANEAU C, et al. Design guidelines for efficient thermal management of mid-infrared quantum cascade lasers[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2011, 1(12): 1975–1982.
- [8] KRALL M, BACHMANN D, DEUTSCH C, et al. All-electrical thermal monitoring of terahertz quantum cascade lasers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(14): 1470–1473.
- [9] WANG X M, SHEN C L, JIANG T, et al. High-power terahertz quantum cascade lasers with ~ 0.23 W in continuous wave mode[J]. AIP Advances, 2016, 6(7): 075210-1–075210-5.
- [10] CARLSON R O, SLACK G A, SILVERMAN S J. Thermal conductivity of GaAs and GaAs_{1-x}P_x laser semiconductors[J]. Journal of Applied Physics, 1965, 36(2): 505–507.
- [11] JENSEN J E, TUTTLE W A, STEWART R B, et al. Brookhaven national laboratory selected cryogenic data notebook[M]. New York: Brookhaven National Laboratory, 1980.
- [12] VITIELLO M S, SCAMARCIO G, SPAGNOLO V. Temperature dependence of thermal conductivity and boundary resistance in THz quantum cascade lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2008, 14(2): 431–435.
- [13] PIERSKIŃSKI K, PIERSKIŃSKA D, IWIŃSKA M, et al. Investigation of thermal properties of mid-infrared AlGaAs/GaAs quantum cascade lasers[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 112(4): 043112-1–043112-12.
- [14] SCAMARCIO G, VITIELLO M S, SPAGNOLO V, et al. Nanoscale heat transfer in quantum cascade lasers[J]. Physica E, 2008, 40(6): 1780–1784.
- [15] AISSA Ait K, SEMMAR N, De SOUSA M D, et al. Thermal conductivity measurement of AlN films by fast photothermal method[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2012, 395(1): 012089-1–8.

作者简介:



张颖娟(1985–), 女, 陕西省咸阳市人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为器件热管理. email: zyj5977@126.com.

沈昌乐(1981–), 男, 江西省宜春市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹量子器件开发.

王雪敏(1975–), 男, 四川省泸州市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为太赫兹量子器件的相关研究和功能薄膜材料.