光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023092401

量子级联激光器热仿真与分析

林青华[1,2]，张东亮[1,3*]，王 锐[1,2]，张程程[1,2]，罗明馨[1,2]，祝连庆[1,2,3]

（北京信息科技大学 1. 光电测试技术及仪器教育部重点实验室；2. 光纤传感与系统北京实验室，北京 100016；
3. 广州南沙北科光子感知技术研究院，广州 511462）

摘 要： 针对大功率量子级联激光器对高散热能力的迫切需求，文章通过有限元法建立了常见器件结构的二维散热模型。在设置的热沉温度为 293 K、波长为 8.3 μm、波导宽为 8 μm、发热功率为 12.4 W 的器件模型中，研究了不同器件散热结构和封装结构对量子级联激光器的温度及热通量分布的影响，进而评价器件的散热能力。结果表明，正焊无电镀金双沟道脊器件、正焊有电镀金双沟道脊器件和倒焊器件的最高温度分别为 546，409 和 362 K。在掩埋异质结器件中，正焊无电镀金器件、正焊有电镀金器件、倒焊器件的最高温度分别为 404，401 和 361 K。与使用铜底座相比，使用金刚石底座的掩埋异质结倒焊器件有源区的最高温度为 355 K。对模型热通量分布进行了分析，发现掩埋异质结器件的热量分布更加均匀，有源区温度更低，这表明掩埋异质结更适合高功率器件。

关键词： 量子级联激光器；散热模型；温度分布；热通量分布

中图分类号： TN248 **文章编号：** 1001－5868(2024)01－0084－06

Thermal Simulation and Analysis of Quantum Cascade Laser

LIN Qinghua[1,2], ZHANG Dongliang[1,3], WANG Rui[1,2], ZHANG Chengcheng[1,2], LUO Mingxin[1,2], ZHU Lianqing[1,2,3]

(Beijing Information Sci & Technol Univ 1. Key Lab Minist Educ Optoelect Measurement Technol;
2. Beijing Lab Opt Fiber Sensing & Syst, Beijing 100016, CHN;
3. Guangzhou Nansha Intelligent Photonic Sensing Research Institute, Guangzhou 511462, CHN)

Abstract: Two-dimensional heat-dissipation models of common devices were established using the finite element method to improve the heat-dissipation capacity of quantum-cascade lasers (QCLs). By setting the heatsink temperature to 293 K, wavelength to 8.3 μm, waveguide width to 8 μm, and thermal power to 12.4 W, the temperature, heat flux distribution, and heat dissipation capabilities of QCLs with different device structures were studied. The results show that the highest temperatures of the epilayer-up-bonded double-channel ridge device without and with electroplated gold were 546 K and 409 K, respectively, while that of the epilayer-down-bonded device was 362 K. For buried heterostructure (BH) devices, the highest temperatures of the epilayer-up-bonded device without and with electroplated gold were 404 K and 401 K, respectively, while that of the epilayer-down-bonded device was 361 K. Compared with the copper submount, the highest temperature of the buried heterostructure epilayer-down-bonded to a diamond submount device was 355 K. Analysis of the heat flux distribution of the models shows that the heat flux of the BH devices is more uniform, and the temperature of the core area is

收稿日期：2023－09－24.

基金项目：北京学者计划研究项目(BJXZ2021-012-00046)；国家自然科学基金项目(62105039)；北京市教育委员会研究项目(KM202111232019)；北京信息科技大学研究项目(2022XJJ07).

* **通信作者：**张东亮

lower, indicating that BH structures are more suitable for high-power devices.

Key words: QCLs; heat dissipation model; temperature distribution; heat flux distribution

0 引言

量子级联激光器是一种子带间跃迁半导体激光器，其子带间跃迁机制使得它能够在红外到太赫兹波段进行单模激射，并可以通过能带工程改变其激射波长。另外，量子级联激光器体积小、响应速率高，并且能在室温条件下连续工作，使其在定向红外对抗、气体探测、自由空间光通信等方面有着广泛的应用[1-3]。

世界上首支量子级联激光器于 1994 年在美国贝尔实验室由 Faist 等研制出来[4]。自量子级联激光器发明以来，研究者们一直努力提高其电光转换效率。2007 年 Faist[5] 提出一个模型，这个模型预测量子级联激光器的电光转换效率不会超过 30%。迄今为止量子级联激光器在 3～8 μm 中红外波段室温连续工作的电光转换效率能达到 10%～25%[6-9]。还未有机构报道其研制的量子级联激光器在室温连续工作下电光转换效率超过 30%。

制约量子级联激光器的电光转换效率的因素有很多，其中发射光子的能量尤为重要。长波红外的光子能量较低，这是提高光电转换效率的重要限制因素。目前量子级联激光器在 8～12 μm 长波红外量子级联激光器室温连续工作的电光转换效率能达到 5%～15%[9-13]。长波量子级联激光器较低的电光转换效率意味着大部分电功率转换为了热能，热积累会导致载流子再分布以及增加载热逃逸，恶化器件性能，因此研究其散热特性具有重要意义。

为了提高器件的散热能力，量子级联激光器演化出了很多器件结构。本文通过构建各种器件的散热模型，得到了各器件的温度热通量分布，并对仿真结果进行了分析，对于指导器件散热设计提供参考。

1 器件结构

下面是量子级联激光器几种常见的器件结构。其中包括双沟道脊和掩埋异质结散热结构及正焊和倒焊封装结构。

1.1 正焊双沟道脊器件

1.1.1 无电镀金器件

如图 1 所示，这种器件结构采用蚀刻双沟槽来加强热传导，使用 SiO_2 作为绝缘层防止器件短路，衬底通过 In 焊料焊接到铜底座上。

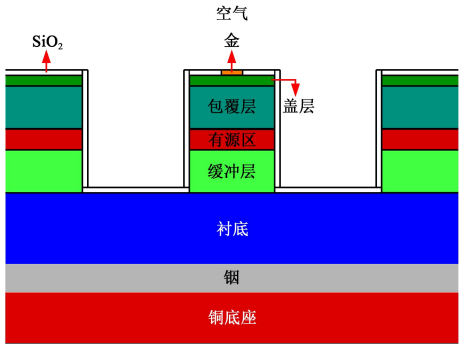


图 1　正焊无电镀金双沟道脊器件示意图

1.1.2 有电镀金器件

有电镀金器件的不同点在于其在器件上电极部分再电镀了一层数微米厚的金层来进一步增强器件的散热能力和可靠性。其器件结构如图 2 所示。

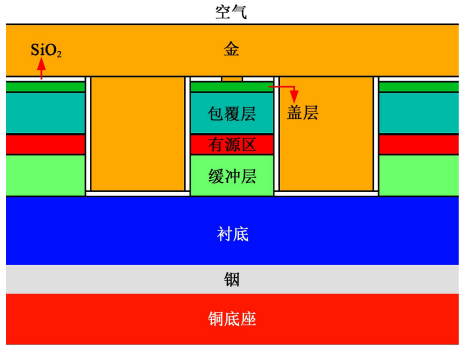


图 2　正焊有电镀金双沟道脊器件示意图

1.2 倒焊器件

不同于正焊器件，倒焊器件是电镀金层通过 In 焊料焊接到底座上。这样使有源区距离热沉更近，能进一步增强器件的散热能力。其器件结构如图 3 所示。



图 3　倒焊器件示意图

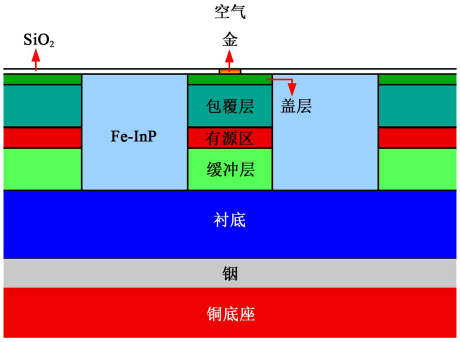
在实际器件中，底座在器件的下方，为了与正焊器件形成更直观的比较，本文构建的倒焊器件模型

的底座在模型上方，这种构建方式并不影响结果。

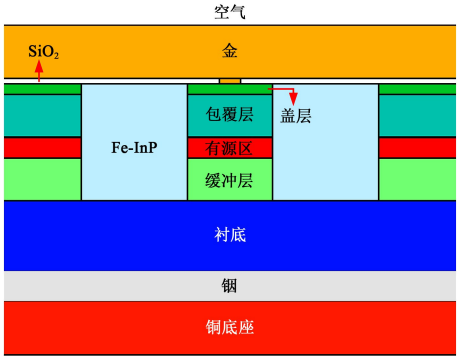
1.3 掩埋异质结器件

随着器件结构与材料工艺的改进，研究人员通过在 InP 中掺杂少量铁发明了一种新型材料(Fe-InP)。这种新型材料具有与 InP 相近的密度和热膨胀系数，以及比 InP 更高的导热系数，并且它是绝缘的。掩埋异质结通过使用 Fe-InP 二次外延工艺填充器件沟道，是高功率量子级联激光器广泛采用的技术。

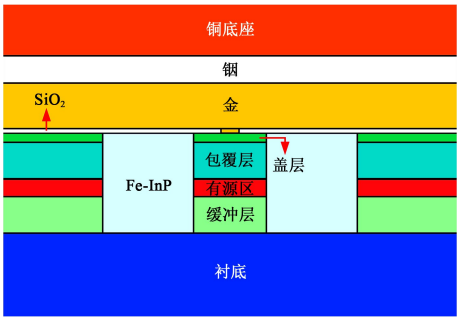
掩埋异质结正焊无电镀金器件、正焊有电镀金器件、倒焊器件结构分别如图 4(a)～(c)所示。



(a) 掩埋异质结正焊无电镀金器件示意图



(b) 掩埋异质结正焊有电镀金器件示意图



(c) 掩埋异质结倒焊器件示意图

图 4 掩埋异质结器件示意图

使用高导热能力底座能进一步减少有源区的热量累积。金刚石的导热能力很强，因此使用金刚石底座代替铜底座是制造高性能器件的一种方案。图 5 为使用金刚石底座的掩埋异质结倒焊器件结构。

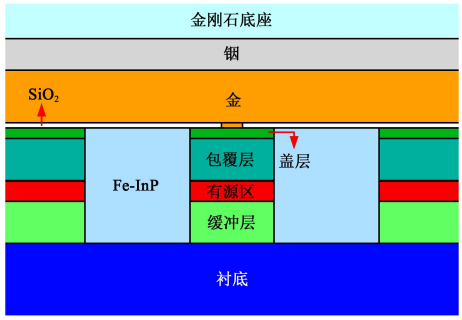


图 5 使用金刚石底座的掩埋异质结倒焊器件示意图

2 热传输模型

量子级联激光器是由不同的固体材料组成的，其热传输符合固体传热的特性。本文使用 COMSOL Multiphysics 的固体传热模块对器件进行热特性分析。为了模型能反映器件连续工作时的真实情况，本文构建的器件结构基于已报道的量子级联激光器[13]，也即器件脊宽为 8 μm，腔长为 5 mm，在环境和热沉温度均为 293 K 下，器件发射波长为 8.2 μm。为了仿真结果的可比性，各个器件核心的几何尺寸保持一致。

2.1 材料导热系数

在固体传热过程中，材料的导热系数是一个十分重要的量，组成量子级联激光器的材料导热系数差别很大。本文使用的 InP、SiO_2、金、铟、铜以及金刚石的导热系数可以从材料库中找到。

有源区的导热系数模型建构较为复杂。量子级联激光器的有源区是由几百层层厚为 0.5～10 nm 的 GaInAs(势阱)/AlInAs(势垒)交替生长的超晶格组成。半导体中由于自由电子浓度较低，材料中的传热主要靠声子来完成，交替生长的纳米级的晶格结构会导致晶格散射增强、声子的平均自由程减少。这也就导致垂直方向上的导热系数比平行方向的导热系数小。本文参考相关研究结果，采用的模型为：有源区平行方向的热导率为 4 W/(m·K)，垂直方向的热导率为 2 W/(m·K)。

2.2 器件散热模型

一个光电器件中产生的热量会经过热传导、热对流以及热辐射传向外界。

量子级联激光器的主要热量产生在有源区，假设其热功率密度为 Q，则其与热流密度 q 的换算关系为：

$$q = Q \cdot d_z \tag{1}$$

其中，d_z 为器件腔长，本文采用的热功率密度的大小为 $1.57\times10^{14}\ \mathrm{W/m^3}$。

量子级联激光器的封装由半导体、绝缘体以及金属组成，器件中的热量主要通过热沉和空气传导出去，其次通过热辐射的方式传导出去。因此其主要传热过程包括固体传热、对流传热以及辐射传热。

根据能量守恒，其传热模型满足公式(2)：

$$q=q_s+q_c+q_r \tag{2}$$

其中，q_s，q_c，q_r 分别是与器件固体传热、对流传热、辐射传热相关的热流密度，单位为 $\mathrm{W/m^2}$。

在固体传热部分，其满足公式(3)：

$$-\nabla(d_z\cdot k\cdot\nabla T)=q_s \tag{3}$$

其中，k 为材料的导热系数。

在对流传热部分，其满足公式(4)：

$$-h(T_e-T)=q_c \tag{4}$$

其中，h 为对流传热系数，本文采用的值为 20 $\mathrm{W/(m^2\cdot K)}$，T_e 是接近器件表面的温度。

在辐射传热部分，其满足公式(5)：

$$-\varepsilon\cdot\sigma(T_s^4-T^4)=q_r \tag{5}$$

其中，ε 为表面发射率，σ 为玻尔兹曼常数，T_s 为环境温度。考虑到温度小于 500 K 时，辐射传热部分很小，在该模型下，这一项可以忽略。

综上所述，得到模型应该满足的传热方程为：

$$-d_z\cdot\nabla(k\cdot\nabla T)-h(T_e-T)=d_z\cdot Q \tag{6}$$

假设器件在腔长方向的热分布是相同的，则可以通过二维仿真对器件热特性进行分析，以下是用有限元法计算热仿真的结果。

3　结果及讨论

本部分通过上文创建的热模型分析不同散热结构和封装结构量子级联激光器的散热性能。

3.1　正焊双沟道脊器件

3.1.1　无电镀金器件

量子级联激光器的热量传导应该是各个方向的，但是由于 SiO_2 与空气的热导率很低，决定了正焊器件的大多数热量应当由衬底排出。其仿真结果如图 6 所示。

器件最高温度为 546 K，其中红色箭头代表热通量，箭头的大小表示热通量的大小。由于 SiO_2 绝缘层及空气的热导率偏低导致激光器有源区和上波导部分热量聚集很严重，因此该结构不适用于连续输出工作模式的激光器。

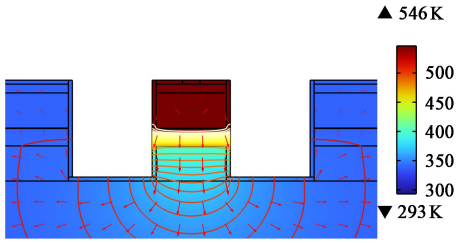


图 6　正焊无电镀金双沟道脊器件温度及热通量分布

3.1.2　有电镀金器件

金的导热系数很高，化学性质稳定，并且与现有的工艺体系兼容。根据上面的结果，在激光器上方和脊侧镀金或许能够改善激光器上波导部分的热量积累问题。其结果如图 7 所示，其中电镀金层厚度为 5 μm。

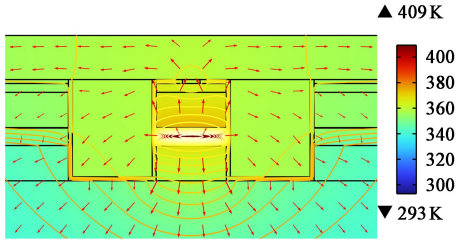


图 7　正焊有电镀金双沟道脊器件温度及热通量分布

有源区最高温度为 409 K，与无镀金器件的 546 K 相比，降低了 137 K。红色箭头可以形象地表示电镀金的存在如何将聚积在激光器核心和上波导的热量传导出激光器。这表明器件的导热性能得到了很大提升。

3.2　倒焊器件

倒焊器件更有利于有源区接近热沉，能够更有效地传导热量，其中较厚的电镀金层的存在可以避免在倒焊过程中激光器的前后端面被埋入熔融的 In 焊料中。其结果如图 8 所示。

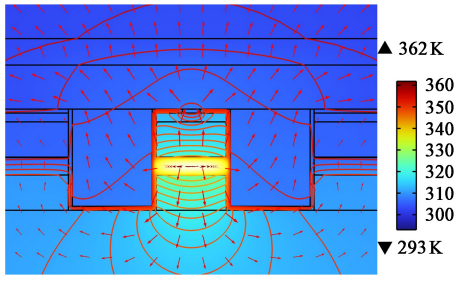


图 8　倒焊器件温度及热通量分布

有源区最高温度为 362 K，相比于正焊有电镀金双沟道脊器件的 409 K 降低了 47 K。通过热通量分布的结果可以看出大部分热量通过电镀金向底

座方向导出。

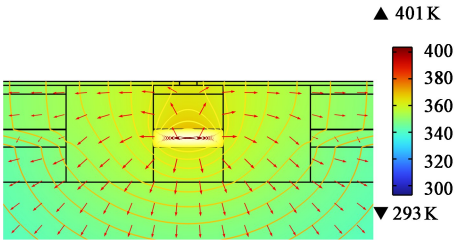
结果中的曲线为等温线，正焊和倒焊器件都在 SiO_2 绝缘层处等温线的密集表明其对散热有着显著的影响。

3.3 掩埋异质结器件

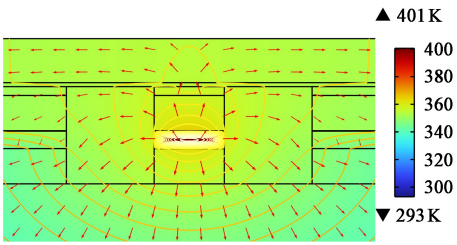
掺铁掩埋异质结具有较高的热导率，同时绝缘性能很好，对光有较好的限制作用，与其他器件相比，掩埋异质结器件能减少器件中低导热系数的 SiO_2 的用量，从而有很大可能提高器件的散热水平。

为了比较掩埋异质结与用金填充沟脊器件散热能力的差别，本文分别构建了其正焊、倒焊的掺铁掩埋沟道器件模型。

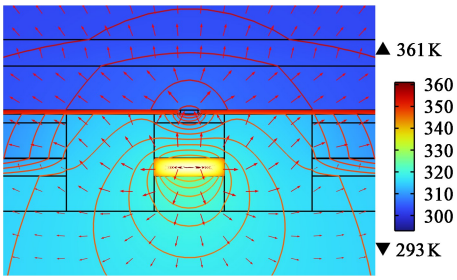
图 9 为掩埋异质结器件的结果。其中正焊无镀金器件、正焊有镀金器件、倒焊器件的结果分别如图 9(a)～(c)所示。



(a) 掩埋异质结正焊无电镀金器件



(b) 掩埋异质结正焊有电镀金器件



(c) 掩埋异质结倒焊器件

图 9 掩埋异质结器件温度及热通量分布

掩埋异质结正焊无电镀金器件有源区最高温度为 404 K，相比于正焊有电镀金双沟道脊器件下降了 5 K；掩埋异质结正焊有镀金器件的有源区最高温度为 401 K，相比于正焊有电镀金双沟道脊器件下降了 8 K。掩埋异质结倒焊器件有源区最高温度为 361 K，相比于用金填充沟脊的倒焊器件下降了 1 K，虽然两者最高温度相差不大，但金的热膨胀系数是 InP 的两倍多，高温下会产生显著的剪切应力，二次外延掺铁 InP 材料与 InP 衬底、波导包层和 GaInAs/AlInAs 有源层材料的晶格常数、热膨胀系数比较接近，而导热率比较高，特别是其较高的绝缘性能保证注入电流更集中，因此掺铁 InP 掩埋异质结广泛应用于高性能量子级联激光器结构中。

3.4 热沉类型对散热性能的影响

底座的导热性能对于散热也非常关键，用金刚石底座的掩埋异质结倒焊器件的结果如图 10 所示。

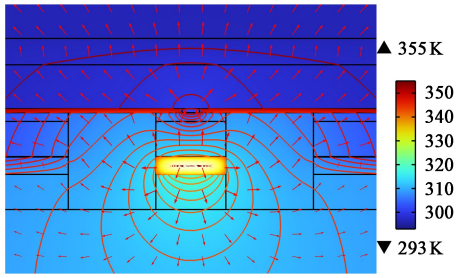


图 10 使用金刚石底座的掩埋异质结倒焊器件

使用金刚石底座的掩埋异质结倒焊器件的有源区最高温度为 355 K，相比于用铜底座下降了 6 K。

通过观察其热通量分布，可以看出倒焊器件的热量有相当一部分比例通过电注入窗口传导出有源区，而掩埋异质结器件传热比较均匀，这意味着掩埋异质结技术在高功率器件中有更好的应用前景。

4 结论

本文通过构建正焊无电镀金双沟道脊器件、正焊有电镀金双沟道脊器件、倒焊器件、掩埋异质结器件的二维散热模型，研究了量子级联激光器的温度及热通量分布，为量子级联激光器的设计提供了有效指导。通过对仿真结果的分析，可以得到以下结论。第一，电镀金层的使用能够有效地导出积累在器件有源区和上波导的热量，显著提高器件的导热能力，进一步提高器件的性能。第二，倒焊器件相比正焊器件在降低有源区工作温度方面更有优势。第三，掩埋异质结器件是这些器件中导热能力最强的。高功率器件应当使用掩埋异质结技术。最后，具有高导热能力的底座的使用能进一步提高器件的散热能力。

参考文献：

[1] Seminara M, Gabbrielli T, Corrias N, et al. Characterization of noise regimes in mid-IR free-space optical communication based on quantum cascade lasers[J]. Opt. Express, 2022, 30(25): 44640-44656.

[2] 黄　彦，张宇露，高志强，等. 用于定向红外对抗的高功率量子级联激光器发展综述[J]. 遥测遥控，2019，40(5)：1-6.
Huang Yan, Zhang Yulu, Gao Zhiqiang, et al. Overview of high power quantum cascade lasers for directional infrared countermeasures [J]. J. of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(5): 1-6.

[3] 李亚繁，江超超，崔潇汉，等. 基于量子级联激光光谱技术的 HONO 和 N_2O_4 气体检测[J]. 光学学报，2023，43(11)：282-290.
Li Yafan, Jiang Chaochao, Cui Xiaohan, et al. HONO and N_2O_4 measurement method based on mid-infrared quantum cascade laser spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(11): 282-290.

[4] Faist J, Capasso F, Sivco D L, et al. Quantum cascade laser [J]. Science, 1994, 264(5158): 553-556.

[5] Faist J. Wallplug efficiency of quantum cascade lasers: Critical parameters and fundamental limits[J]. Appl. Phys. Lett., 2007, 90(25): 253512.

[6] Bai Y, Bandyopadhyay N, Tsao S, et al. Room temperature quantum cascade lasers with 27% wall plug efficiency[J]. Appl. Phys. Lett., 2011, 98(18): 181102.

[7] Fei T, Zhai S, Zhang J, et al. 3 W continuous-wave room temperature quantum cascade laser grown by metal-organic chemical vapor deposition[J]. Photonics, 2023, 10(1): 47.

[8] Razeghi M, Slivken S, Bai Y, et al. High power quantum cascade lasers[J]. New J. of Physics, 2009, 11(12): 125017.

[9] Wang F, Slivken S, Wu D, et al. Room temperature quantum cascade lasers with 22% wall plug efficiency in continuous-wave operation[J]. Opt. Express, 2020, 28(12): 17532-17538.

[10] Fei T, Zhai S, Zhang J, et al. High power $\lambda\sim8.5$ μm quantum cascade laser grown by MOCVD operating continuous-wave up to 408 K[J]. J. of Semiconductors, 2021, 42(11): 112301.

[11] Oresick K, Kirch J, Mawst L, et al. Highly efficient～8 μm-emitting, step-taper active-region quantum cascade lasers[J]. AIP Advances, 2021, 11(2): 025004.

[12] Sun Y, Yin R, Zhang J, et al. High-performance quantum cascade lasers at $\lambda\sim9$ μm grown by MOCVD[J]. Opt. Express, 2022, 30(21): 37272-37280.

[13] Zhou W, Lu Q Y, Wu D H, et al. High-power, continuous-wave, phase-locked quantum cascade laser arrays emitting at 8 μm[J]. Opt. Express, 2019, 27(11): 15776-15785.

作者简介：

林青华(1997—)，男，河南省漯河市人，硕士研究生，主要研究方向为大功率量子级联激光器结构设计；

张东亮(1986—)，男，河南省信阳市人，工学博士，副高级研究员，主要研究方向为低维量子结构红外光电子器件物理、材料外延技术、器件开发，以及新型红外光电系统应用开发。