

文章编号:1001-5078(2023)09-1350-10

· 激光器技术 ·

大功率量子级联激光器的光学与热学协同优化设计

杨若珂^{1,2}, 张东亮^{1,2}, 郑显通^{1,2}, 田旺^{1,2}, 柳渊^{1,2}, 鹿利单^{1,2}, 祝连庆^{1,2}, 王伟平³

(1. 北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心, 北京 100016; 2. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100016; 3. 中国电子科技集团公司智能科技研究院, 北京 100015)

摘要:针对大功率量子级联激光器存在热积累严重的问题, 本文基于 MBE 与 MOCVD 结合的二次外延生长 InP 基量子级联激光器结构的工艺方法, 设计优化中波单管 4W 连续光输出的大功率量子级联激光器光学与散热性能。通过 COMSOL 软件对器件结构进行建模, 设计器件光学和热学结构模型, 分析不同结构参数对器件性能的影响, 得到最优结构参数: 在 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 层厚度为 50 nm, 波导下包层 InP 为 1 μm , 上包层 InP 为 2 μm , 封装金层厚度为 3 μm 时, 器件光学和热学综合性能最优, 其中波导光限制因子为 0.74, 核心区温度为 378 K。本文研究相关结论可为后续大功率中波量子级联激光器结构与工艺设计提供指导。

关键词:量子级联激光器; 二次外延; 波导结构; 热学结构; 协同优化

中图分类号: TN242; O436 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.09.008

Optics and thermal co-optimal design of high-power quantum cascade lasers

YANG Ruo-ke^{1,2}, ZHANG Dong-liang^{1,2}, ZHENG Xian-tong^{1,2}, TIAN Wang^{1,2},

LIU Yuan^{1,2}, LU Li-dan^{1,2}, ZHU Lian-qing^{1,2}, WANG Wei-ping³

(1. Beijing Engineering Research Center for Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China; 2. Instrumentation Science and Optoelectronic Engineering College, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China; 3. Intelligent Technology Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: To address the serious problem of thermal accumulation in high-power quantum cascade lasers, the optical and thermal performance of high-power quantum cascade lasers with 4 W continuous optical output from a single tube in medium wave is designed and optimized based on the process method of MBE and MOCVD combined with secondary epitaxial growth of InP-based quantum cascade laser structures in this paper. The device structure is modeled by COMSOL software, and the optical and thermal structural models are designed to analyze the effects of different structural parameters on the device performance, and the optimal structural parameters are obtained: $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ layer thickness of 50 nm, waveguide lower cladding InP of 1 μm , upper cladding InP of 2 μm , and encapsulated gold layer thickness of 3 μm , the device has the best combined optical and thermal performance, where the waveguide optical limiting factor is 0.74 and the core region temperature is 378 K. The results of this study can provide guidance for the structure and process design of subsequent high-power medium-wave quantum cascade lasers.

Keywords: quantum cascade lasers; secondary epitaxy process; waveguide structure; thermal structure; Co-optimization

基金项目: 北京学者基金项目 (No. 74A2111113); 北京教育委员会研究项目 (No. KM202111232019); 国家自然科学基金项目 (No. 62105039); 北京信息科技大学研究项目 (No. 2022XJJ07) 资助。

作者简介: 杨若珂 (1998 -), 女, 硕士研究生, 主要从事大功率中波红外量子级联激光器器件仿真与工艺开发方面的研究。E-mail: yrkkry@163.com

通讯作者: 张东亮 (1986 -), 男, 副教授, 博士, 主要从事三五族半导体低维光电材料与光电器件方面的研究。E-mail: zdl_photonics@bistu.edu.cn

收稿日期: 2022-11-29

1 引言

量子级联激光器(QCL)是一种新型单极半导体激光器,其利用量子能带工程调节导带子带间的能级结构,在子带间的传输跃迁来实现辐射发光。QCL具有波长覆盖范围广、转换效率高、体积紧凑、可靠性高等优势,在定向红外对抗、红外激光制导、危化品检测、气体传感器等诸多领域都有重要的应用。由于QCL有源区是由多周期纳米量级的外延层交叠组成的超晶格结构,其工作时需外加偏压才能形成所需的能带结构以及足够的注入电流,激发子带间电子跃迁,注入的电流会在有源区产生大量的焦耳热,严重的热积累会影响器件的工作温度和输出功率,恶化器件性能^[1]。目前,QCL输出功率的提升主要通过新型有源区设计提升电光转换效率,以及通过波导结构设计与封装工艺降低热积累效应,但将单模QCL输出功率扩展到多瓦甚至更高功率仍然是一个极大的挑战。

在有源区设计方面,各研究团队先后提出了三阱垂直跃迁有源区、超晶格有源区、应变补偿量子阱有源区、束缚-连续跃迁有源区、四阱双声子共振有源区、非声子共振设计结构等有源区设计方案^[2]。在波导设计方面,掩埋式异质结构被证明是提高器件性能非常成功的方法。2007年,Razeghi团队首次采用窄脊掩埋异质结波导和新的封装工艺,用沟道宽度为6 μm的掺铁InP双沟道,实现了器件在150 K下连续波输出功率超过1 W,电光转换效率超过18%^[3]。2011年,哈佛大学Capasso团队采用锥形波导结构减轻QCL材料中的增益饱和效应,实现了在4.5 μm下连续输出功率超过4.5 W^[4]。2012年,Lyakh团队采用锥形掩埋异质结构波导制备了发射波长为4.7 μm的QCL,该器件在283 K下产生超过4.5 W连续输出功率^[5]。2020年,国内中国科学院及长春理工大学等研究机构采用半绝缘掩埋异质结构,使长波器件输出功率较传统结构提升85%,室温最大输出功率从280 mW提高到520 mW^[6]。在封装散热设计方面,美国西北大学Razeghi团队研究证明,在激光器脊周围电镀金可以使器件热阻减少43%^[7]。国内刘锋奇团队等的研究表明,采用倒装焊封装方式,可使产生热的有源区更接近热沉的接触面,减少热阻,可显著提升QCL散热性能^[8]。

目前美国西北大学报道了世界上最高输出功率的单管基横模QCL,其激射波长为4.6 μm,室温下连续波输出功率为5.1 W,脉冲工作模式下电光转化效率高达27%^[9],该器件结构是通过气体源与固态源结合的分子束外延设备(Gas-MBE)生长完成。由于此类生长设备非常特殊,商业化设备很少见,国际上报道的另一种方法是采用固态源MBE生长核心层结构与MOCVD生长波导层结构相结合的方法生长完整的器件结构,该方法能够通过常规设备实现InP即QCL的外延生长,也是本文采用的方法。但这种方法存在的问题是:在MBE中进行有源区生长前,需对衬底进行脱氧,而通常固态MBE没有磷源,InP衬底直接脱氧无磷保护的情况下会破坏材料表面,影响下一步外延材料的表面粗糙度,进而降低器件效率。为了避免这个问题,本课题组提出在使用MBE生长有源核心区前采用MOCVD外延生长一层晶格匹配In_{0.53}Ga_{0.47}As层,一方面便于在无磷源的固态MBE内进行As保护下的脱氧,另一方面MBE生长有源核心区后再外延生长一层晶格匹配In_{0.53}Ga_{0.47}As层,以保护完成外延的有源区,避免在向MOCVD转移过程中污染或破坏有源区。

基于以上提到的材料外延工艺设计,本文研究针对大功率的中波红外量子级联激光器的波导结构与散热结构协同设计方法,并进行封装设计仿真优化,目标是在提高光限制因子、降低波导损耗的同时提高散热效果,为基于二次外延工艺的大功率量子级联激光器结构与工艺设计提供理论依据。

2 器件模型建模分析

本文设计仿真的目标器件性能参数为:QCL激射波长为4.6 μm,在室温下单管输出功率能够达到4 W,电光转换效率(WPE)达到15%,预计热输出功率需要大于25 W。为实现这一目标功率,需要对QCL进行有源区设计和器件结构设计。其中有源区设计包括了材料体系的选择和能带结构设计,器件结构设计包括器件光学和热学结构的设计,以及二者设计兼容性考虑。本器件的有源区设计参考目前世界上最高输出功率的单管基横模QCL^[10],在此基础上进行能带结构调整与优化,进一步提升了增益和注入效率,优化后的有源区浅阱设计的能带结构和波函数分布如图1所示。该器件有源区由六种不同材料组成的浅阱设计构成,分别是应变的

$\text{Ga}_{0.31}\text{In}_{0.69}\text{As}$ (势阱) 和 $\text{Al}_{0.64}\text{In}_{0.36}\text{As}$ (势垒), InAs/AlAs 插入层, 有源区接近晶格匹配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 和 $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ 。因为有源区结构设计不属于本文研究的内容, 只是作为结构参数输入到光学与热学设计仿真模型中, 在此不做详细论述。

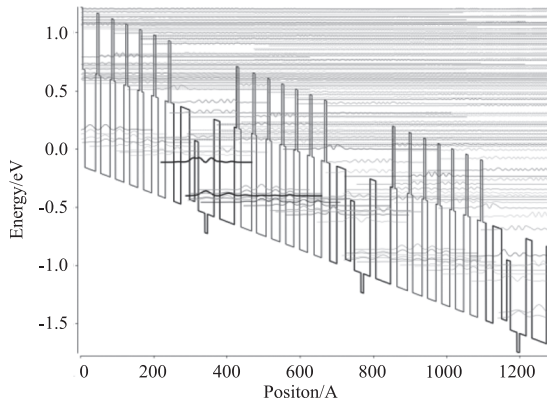


图 1 设计的浅阱有源区能带结构和波函数分布图

Fig. 1 Energyband and wave function diagram for shallow well design in active area

器件波导结构的设计考虑以下方面:一、设计的波导能有效地限制光场且有足够低的光学吸收损耗、模式损耗;二、波导材料和结构的选择要综合考虑光学性能和散热性能。如前所述,本器件在有源区上下分别外延生长晶格匹配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 包层,之后再生长 InP 波导包层。由于 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 导热系数为 $5.23 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, InP 导热系数为 $68 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, InP 的折射率为 $3.091 + 0.000i$, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 折射率为 $3.061 + 0.000i$, 因此包层和波导层结构的厚度会对器件的光学和热学特性同时产生影响,结构优化要兼顾两种特性。此外,还通过采用掺 Fe 的 InP 绝缘散热沟道层,以及波导包覆金层的设计,来提升器件核心区的散热效果。

综上所述,本研究提出如图 2 所示的器件结构: n 型掺杂的 InP ($2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) 基底, InP 下包层 ($2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 下包层 ($2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), 有源区结构(平均掺杂 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 上包层 ($2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), InP 上包层 ($2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) 和 InP 盖层 ($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$), SiO_2 绝缘层,掺 Fe 的 InP 散热沟道层, Au 层。本文通过 COMSOL 有限元分析软件对器件进行结构建模,假设沿激光器长度方向是均匀的,采用二维波导建模。图 3 为器件结构图。图 4 为器件结构仿真优化流程图。通过仿真优化器件结构模型,获得满足设计目

标的器件结构参数。

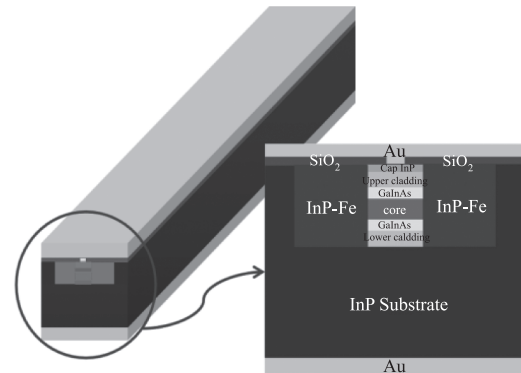


图 2 器件整体结构模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of overall structure model of the device

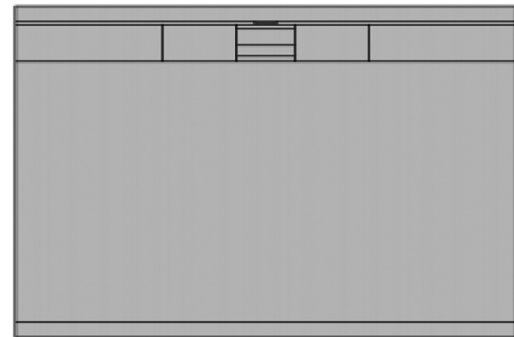


图 3 基于 COMSOL 的器件结构模型图

Fig. 3 Device model based on COMSOL

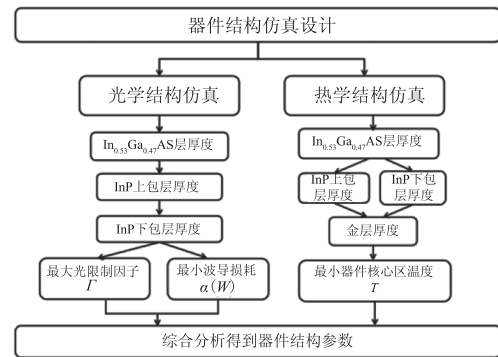


图 4 器件结构仿真优化总体流程

Fig. 4 Overall process of device structure simulation and optimization

3 基于有限元的光学结构分析

3.1 仿真分析流程及参数设置

在光学仿真中,首先定义有源区及各层的几何参数及光学参数,之后设置边界条件,再求解方程。由于在波导横截面方向建模,几何参数只需考虑波导宽度及各层厚度,波导宽度设置为 $8 \mu\text{m}$,其中影响波导光限制因子的因素有 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 层和 InP 上下包层厚度参数,将其分别设置为变量 H_g 、 H_{up} 、 H_{lo} ,

其余各层参数对于光学性能的影响较小,其中 InP 衬底、InP 盖层、SiO₂ 绝缘层及 Au 层的厚度值来源于参考文献[11]。此外,QCL 有源区是由多层不同厚度的超薄层材料组成,为简化模型,可看作是具有特定折射率的单体积层。本文通过 ErWinJr 开源软件获取有源区整体的等效折射率参数以及各波导包层材料的折射率参数^[12]。如表 1 所示,为模型中各层材料的光学参数设置。

表 1 各层波导材料的几何参数和折射率参数

Tab. 1 Geometric parameters and refractive index parameters of each layer of waveguide materials

Material	Refractive index	Thickness/ μm
Substrate InP/($2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)	$3.091 + 0.000i$	100
Upper cladding InP/($2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)	$3.091 + 0.000i$	H_{up}
In _{0.53} Ga _{0.47} As/($2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)	$3.393 + 0.000i$	H_g
Core/($2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)	$3.237 + 0.000i$	1.98
In _{0.53} Ga _{0.47} As/($2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)	$3.393 + 0.000i$	H_g
Lower cladding InP/($2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)	$3.091 + 0.000i$	H_{lo}
Cap InP/($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)	$2.678 + 0.011i$	1.0
SiO ₂	$1.45 + 0.000i$	0.5
Au	$3.319 + 28.411i$	3.0

3.2 光学仿真结果分析

本节将通过光学模型的仿真,得到不同参数设计下的波导光场分布、波导光限制因子(Γ)及波导损耗 $\alpha(w)$ 。这里将讨论以下几组数据:In_{0.53}Ga_{0.47}As 层厚度分别为 50、100、200、400 nm,下包层 InP 厚度分别为 0.3、0.5、0.8、1、2、3 μm,上包层 InP 厚度分别为:0.3、0.5、0.8、1、2、3 μm。

首先讨论 In_{0.53}Ga_{0.47}As 层厚度对波导光场的影响,固定上下包层 InP 厚度为 1 μm,对 In_{0.53}Ga_{0.47}As 层厚度进行参数扫描,得到如图 5 所示结果。由图可得,In_{0.53}Ga_{0.47}As 层厚度的变化对光场的影响程度较小,随着厚度增加光场无明显泄露。其次,固定 In_{0.53}Ga_{0.47}As 层厚度为 50 nm,下包层厚度为 1 μm,对上 InP 包层厚度进行参数扫描,得到波导 TM 模式分布,如图 6 所示。最后,固定 In_{0.53}Ga_{0.47}As 层厚度为 50 nm,上包层厚度为 2 μm,对下包层 InP 厚度进行参数扫描,得到如图 7 所示结果,由图可知,下包层厚度在 0.3~0.8 μm 时,光场泄露至衬底层。

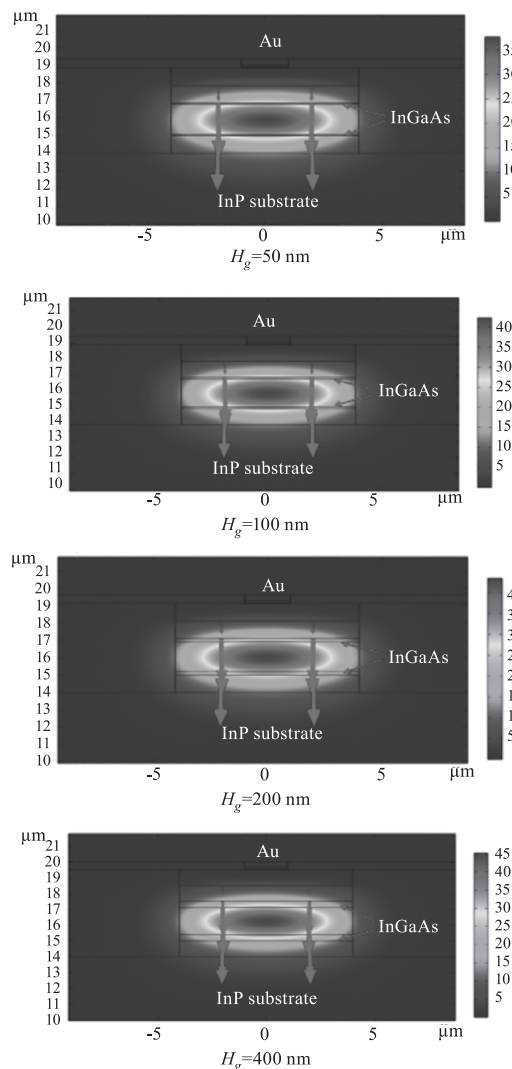
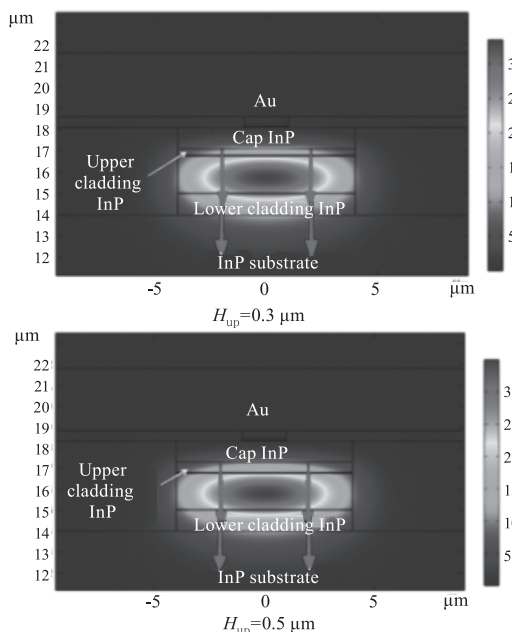


图 5 不同 In_{0.53}Ga_{0.47}As 厚度对应的波导的 TM 模式分布图
Fig. 5 TM mode analysis of waveguides corresponding to different In_{0.53}Ga_{0.47}As thicknesses



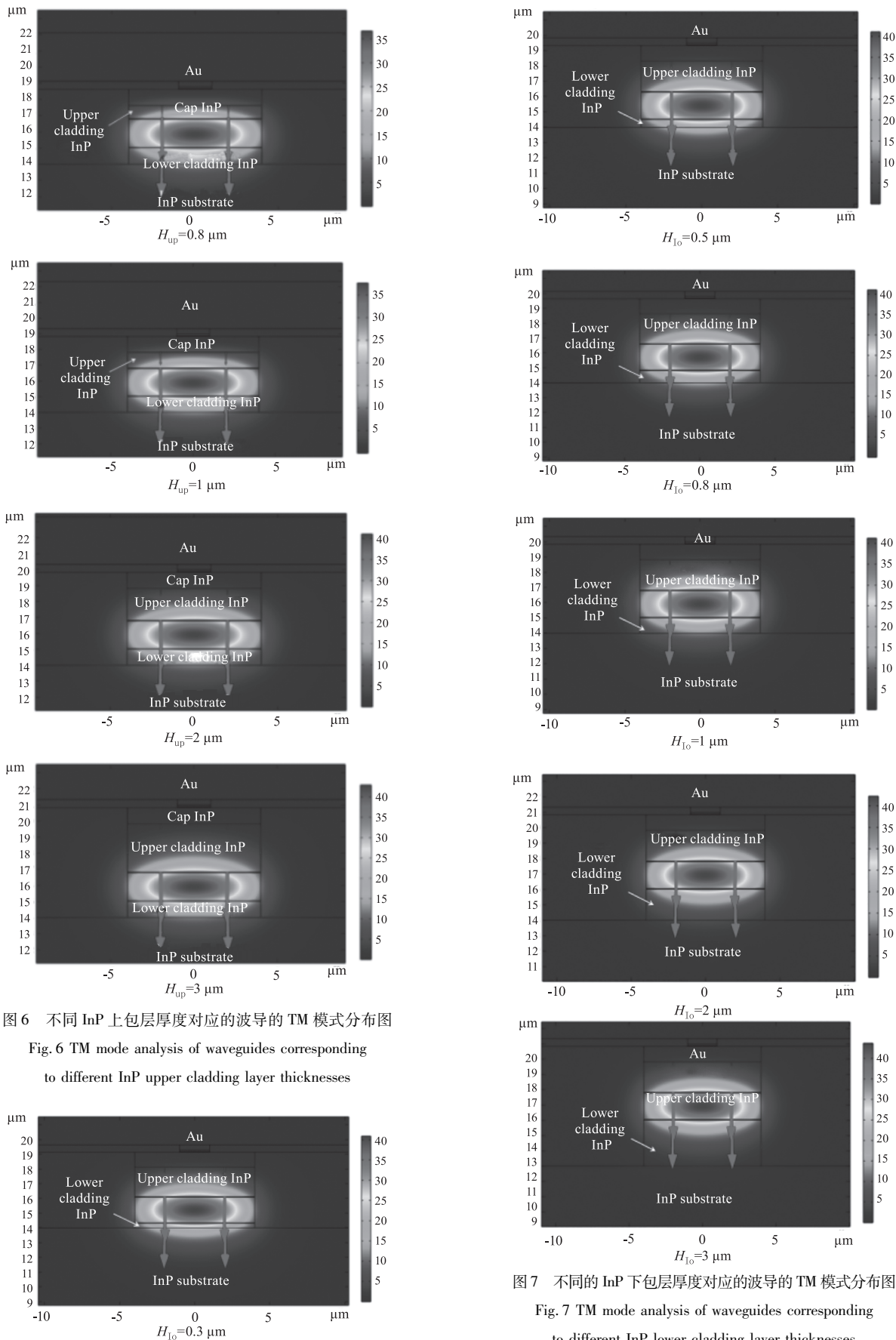


图 6 不同 InP 上层厚度对应的波导的 TM 模式分布图

Fig. 6 TM mode analysis of waveguides corresponding to different InP upper cladding layer thicknesses

图 7 不同的 InP 下层厚度对应的波导的 TM 模式分布图

Fig. 7 TM mode analysis of waveguides corresponding to different InP lower cladding layer thicknesses

为了确定不同参数下波导对光的限制程度,还需求解波导的光限制因子,如公式(1)所示^[13]:

$$\Gamma_{TM,L} = \int_{core} |E_{y,L}|^2 / \int_{all} |E|^2 \quad (1)$$

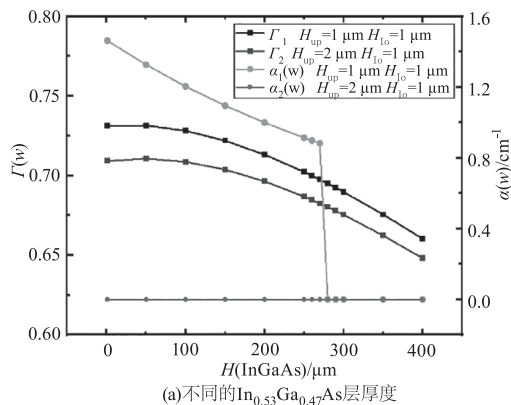
其中, Γ_{TM} 为 TM 模式的光学限制因子,E 的模平方为功率流。在 COMSOL 中,利用表面积分公式可直接求解波导的光限制因子。

同时,通过模式分析得到有效折射率参数,根据公式(2)求解对应模式的波导损耗:

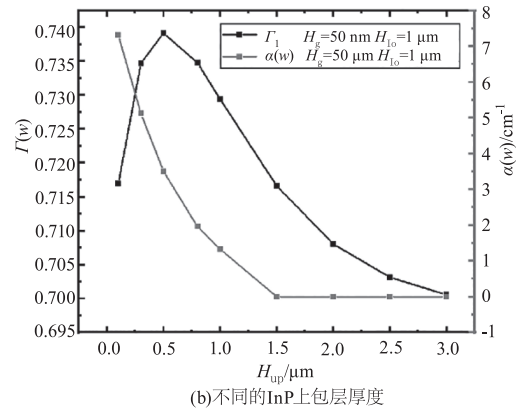
$$\alpha(w) = 4\pi k(w) / \lambda_0 \quad (2)$$

其中, $k(w)$ 为消光系数, λ_0 为波长。图8(a)~(c)为通过参数扫描计算得到的光限制因子及波导损耗随着各功能层厚度参数的变化曲线。图8(a)展示了 Γ 及 $\alpha(w)$ 值随 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 层厚度的变化趋势:当上、下包层厚度为 $1\mu m$ 时, Γ_1 随着 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 厚度的增加逐渐减小,在厚度为 400 nm 时, Γ 值为 0.66 ; $\alpha_1(w)$ 值也随着 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 波导厚度的增加而减小,当大于 250 nm 时快速下降为 0 ;在上包层厚度为 $2\mu m$,下包层厚度为 $1\mu m$ 时, Γ_2 随着 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 厚度的增加逐渐减小,在厚度为 400 nm 时, Γ 值为 0.65 ,而 $\alpha_2(w)$ 不随 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 波导厚度变化而变化,保持为 0 。

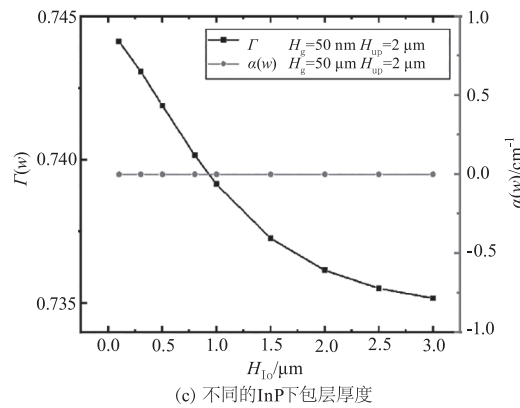
图8(b)展示了InP上包层厚度对 Γ 及 $\alpha(w)$ 值的影响,由图可得,上包层厚度为 $0.5\mu m$ 时, Γ 最大为 0.74 ,与最小值仅相差 0.04 ; $\alpha(w)$ 值随着上包层InP厚度的增加而减小,在上包层厚度为 $0.5\mu m$ 时, $\alpha(w)$ 值为 3.5 ,与最小值相差 3 。 $\alpha(w)$ 变化幅度大。图8(c)展示了InP下包层厚度对 Γ 及 $\alpha(w)$ 值的影响,由图可得,在固定 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 厚度为 50 nm ,上包层InP厚度为 $2\mu m$ 时, Γ 随着下包层厚度的增加而减小,但幅度仅为 0.01 ,可忽略。 $\alpha(w)$ 值固定不变为 0 。



(a)不同的 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 层厚度



(b)不同的InP上包层厚度



(c)不同的InP下包层厚度

图8 光学限制因子及波导损耗随不同功能层厚度参数变化

Fig. 8 The optical limiting factor varies and waveguide loss with different parameters

通过以上分析可知, $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 层厚度变化对 Γ 值影响大,上包层InP厚度变化对 $\alpha(w)$ 值影响大,而下包层厚度对 Γ 及 $\alpha(w)$ 影响很弱。因此,在光学模型中选取 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 层厚度为 50 nm ,上包层InP厚度为 $2\mu m$,下包层InP厚度为 $1\mu m$,波导损耗最小,波导限制效果较好。

4 基于有限元的热学结构分析

4.1 仿真分析流程及参数设置

本节将基于COMSOL软件热学仿真模块对器件热特性进行精确求解。首先需要对QCL的传热机制进行分析,以便于进行热学模型的边界条件设置。因为大部分电压在激光器的有源区域下降^[13],QCL器件热量的产生主要在于核心层,可忽略波导层和基底层中电流的焦耳加热效应。在QCL中各材料之间的传热方式是固体传热,固体热传导方程如式:

$$-\nabla \cdot (k \nabla T) = Q(W \cdot m^{-2}) \quad (3)$$

式中, K 为导热系数。激光器和散热器的表面与周围的气体环境会发生由对流引起的热传递,由公式描述:

$$-h(T_{\text{ext}} - T) = Q(W \cdot m^{-2}) \quad (4)$$

式中, h 为对流传热系数, 设置为 $20 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$; T_{ext} 是固体的表面温度; T 是远离表面的气体的温度。第三种传热方式是辐射的, 用公式描述:

$$-\varepsilon\sigma(T_{\text{ssur}}^4 - T^4) = Q(W \cdot m^{-2}) \quad (5)$$

式中, ε 是表面发射率, σ 是斯蒂芬-玻尔兹曼常数 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; T_{ssur} 为远离表面的周围背景温度; T 为表面温度。在 QCL 温度小于 500 K 时, 可以忽略辐射^[14]。

分析 QCL 器件的传热机制后, 通过固传热模块中的热通量设置、固体传热设置、热源和初始温度、边界条件设置, 求解计算获取在不同结构参数下的器件温度分布。热学模型参数包括几何参数、材料的热导率、热容参数以及边界条件参数, 对于二维热学结构模型, 其波导几何结构与光学波导结构基本一致, 不同点在于在两边添加了掺铁 InP 散热掩埋沟道层, 沟道层的宽度设置为 $10 \mu\text{m}$, InP 热学参数来源于已有研究结果^[15]。有源区多层薄膜结构, 其导热系数与体材料有很大差异, 由于界面效应, 应考虑各向异性导热系数 ($k_{//} \neq k_{\perp}$)^[16], SiO_2 和金的热学参数来源于已有研究结果^[17], 所用到的材料的热学参数设置如表 2 所示。

表 2 热学模型中材料参数

Tab.2 Material parameters in the thermal model

Materials	Thermal conductivity coefficient/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Heat capacity/ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
InP	68	4810	310
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	5.23	5500	300
Core	$k_{\perp} = 1 \text{ k}_{//} = 5$	5550	500
SiO_2	$9.74 \times 10^{-4} + 5.38 \times 10^{-5}T - 4.69 \times 10^{-8}T^2$	2270	1000
Au	301	19320	128

有源核心区设置为发热源, 通过目标激光器功率和电光转换效率计算得到, 发热功率需设置为 25 W 。边界条件中, 设置热沉温度为 280 K , 其他外部边界都设置绝热, 封装方式采取倒装焊结构, 即外延面朝下与铜热沉接触。

4.2 热学与光学仿真结果协同分析

本研究中选取波导层 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 厚度分别为: $50, 100, 200, 400 \text{ nm}$, 波导下包层 InP 厚度分别为: $0.3, 0.5, 0.8, 1, 2, 3 \mu\text{m}$, 上包层 InP 厚度分别为: $0.3, 0.5, 0.8, 1, 2, 3 \mu\text{m}$ 。固定上包层 InP 厚度为 $2 \mu\text{m}$, 下包层 InP 厚度为 $1 \mu\text{m}$, 金层厚度为 $3 \mu\text{m}$, 对 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 厚度进行扫描, 得出如图 9 所示的结

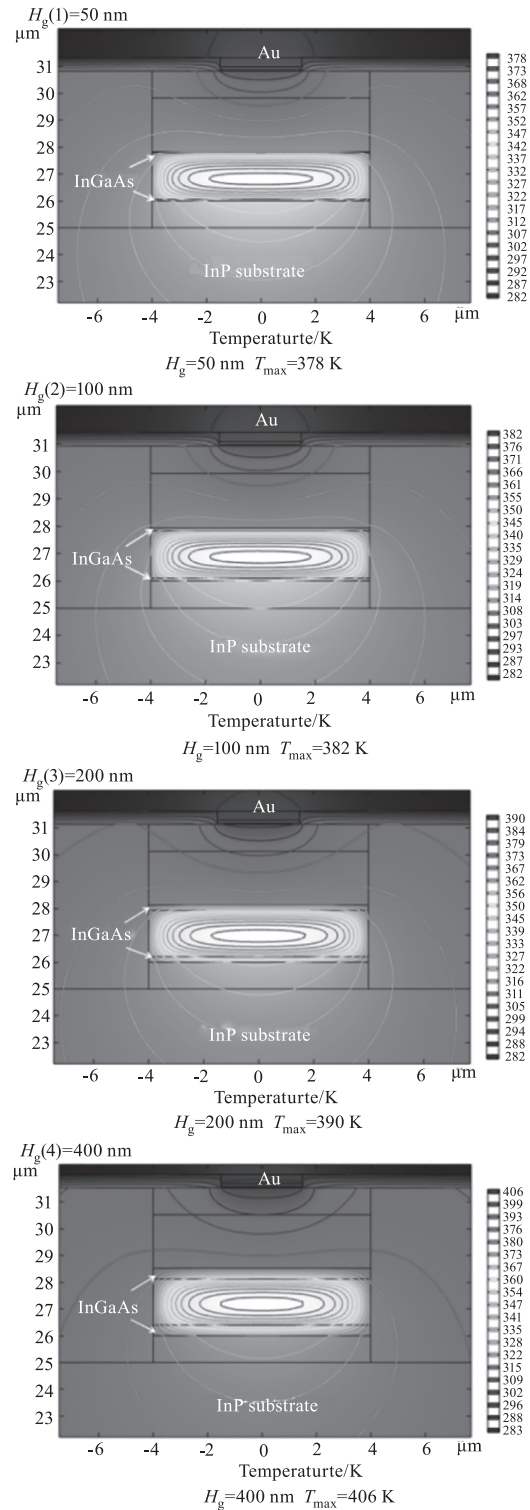


图 9 不同 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 厚度对器件温度的影响

Fig.9 Effect of different $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ layer thickness on device temperature

果, 随着 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 厚度层的增加, 核心区温度逐渐上升, 在 400 nm 时, 温度最高达到 406 K 。之后, 固定 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 厚度为 50 nm , 下包层厚度为 $1 \mu\text{m}$, 金层厚度为 $3 \mu\text{m}$, 对上包层 InP 参数进行扫描, 得到图 10 所示的结果, 由图可知, 上包层厚

度由 0.3 μm 增加至 3 μm , 器件核心区温度由 371K 上升至 381 K。最后, 固定 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 厚度为 50 nm, 上包层厚度为 2 μm , 金层厚度为 3 μm , 对下包层 InP 厚度参数进行扫描, 得到如图 11 所示结果, 由图可得, 下包层 InP 厚度增加对核心区温度无明显影响。

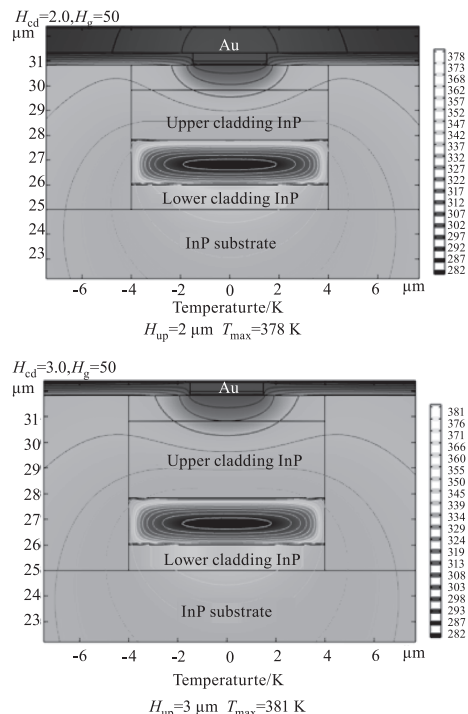
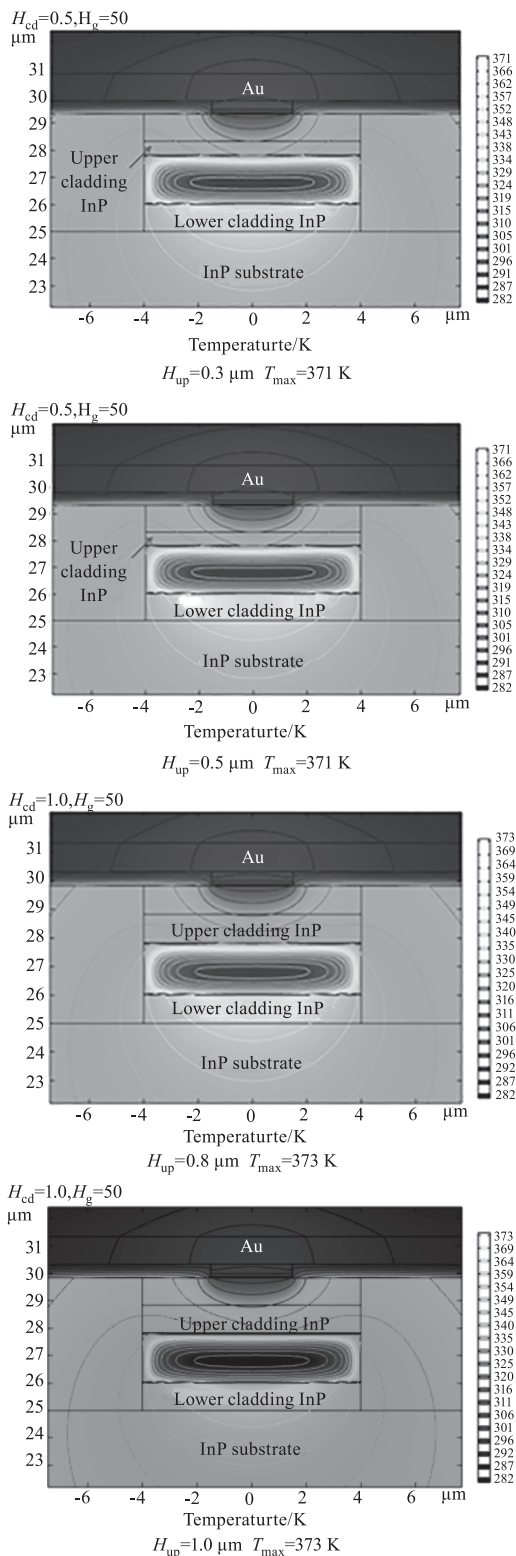
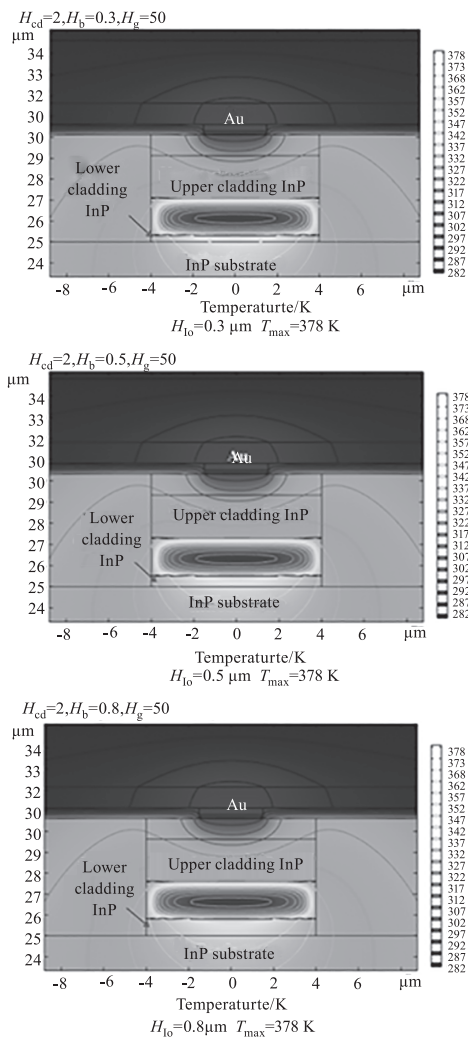


图 10 不同上包层 InP 厚度对器件温度的影响

Fig.10 Effect of InP different upper cladding layer thickness on device temperature



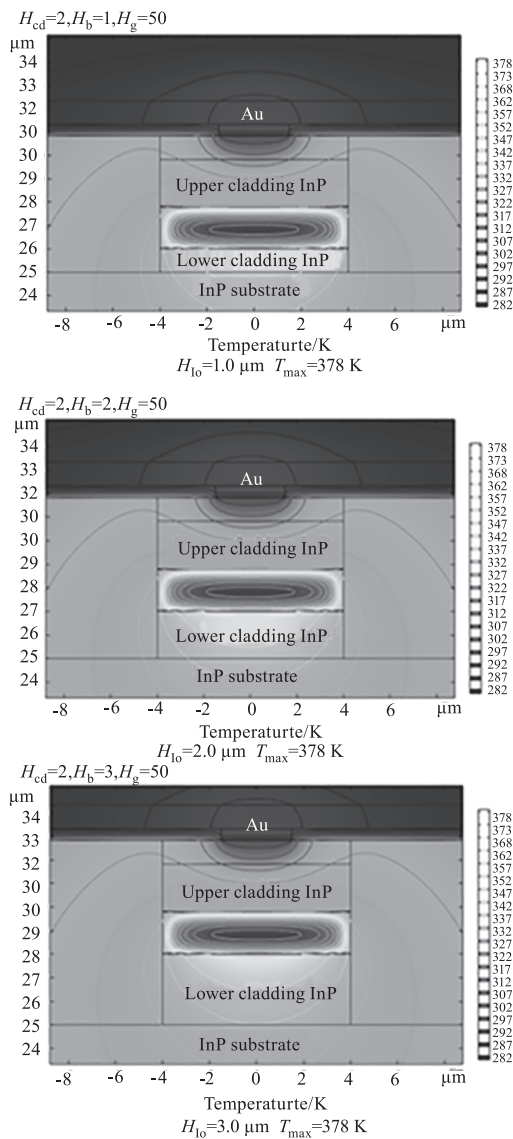


图 11 不同下包层 InP 厚度对器件温度的影响

Fig. 11 Effect of different InP lower cladding layer thickness on device temperature

结合上述光学与热学仿真结果分析可知, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 层厚度变化对描述器件光学和散热性能的三个参数 (Γ 、 $\alpha(w)$ 、 T) 值有明显的影响, 该层趋向于越薄越有利于器件性能提升; InP 上包层的厚度变化对 $\alpha(w)$ 和 T 值有明显的影响, 该层趋向于越厚越有利于器件性能提升; InP 下包层的厚度变化对器件光学及散热效果影响较小。考虑到材料外延工艺, 综合分析得到, 在波导 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 层厚度保持在 50 nm, 波导上包层厚度为 2 μm , 下包层厚度为 1 μm , 器件光学和散热综合性能较好, 得到优化后的参数可为后续工艺提供指导。最后, 通过参数扫描分析封装金层厚度对器件温度的影响, 在固定各功能层厚度之后, 金层的厚度分别设置为: 1、3、5、8 μm , 获得器件整体温度分布如图 12 所示。由图

可知, 在金层厚度为 1 ~ 8 μm 时, 核心层温度几乎不变。

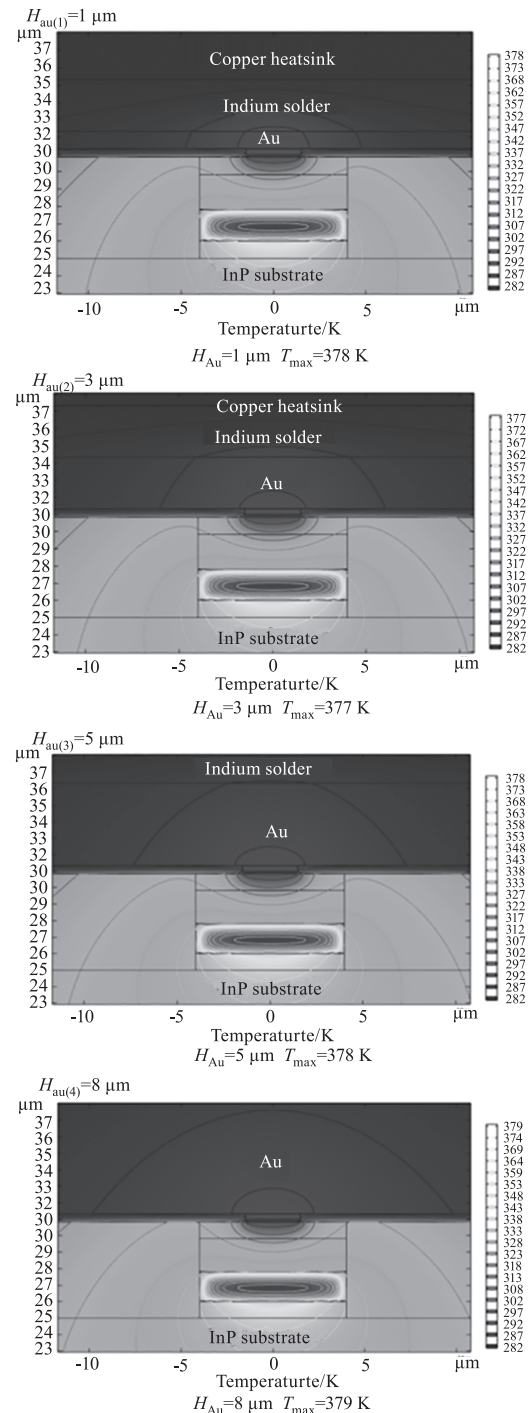


图 12 不同金层厚度对器件温度的影响

Fig. 12 Effect of different Au layer thickness on device temperature

5 总结及展望

本文利用多物理场耦合仿真有限元分析软件 Comsol Multiphysics 5.6, 结合目前世界上最高单管基横模 QCL 的浅阱高势垒有源区能带结构的改进设计, 基于二次外延工艺限制, 采用新型波导设计, 对 QCL 进行了光学和热学结构的建模与仿真优化。

通过仿真得到在不同参数设计下器件的光场分布及整体温度分布,确定了适用于本器件结构的各层波导参数和散热结构参数。仿真得出:对于倒装焊结构, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 层厚度的变化影响着器件光学和热学性能,在厚度取 50 nm 时,效果最佳;上包层 InP 厚度的变化,主要影响波导损耗的大小,从而影响器件性能,在厚度大于 2 μm 时,波导损耗低至 0;下包层 InP 厚度的变化对器件光学及散热性能影响几乎可忽略;在封装结构中,随着金层厚度的增加,器件核心层温度无明显变化。此外,在 QCL 的仿真模拟中,由于器件温度会影响材料折射率的变化,可能存在一定的不准确性,但这不会影响变化趋势。因此,在后续的研究中会结合实验数据,对本研究中的器件结构进一步迭代优化。

参考文献:

- [1] Zhang Z H, Jiang T, Zhan Z Q, et al. The progress of quantum cascade lasers thermal management [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021, 19(2): 193 - 200. (in Chinese)
张泽涵, 蒋涛, 湛治强, 等. 量子级联激光器的热管理研究进展 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19(2): 193 - 200.
- [2] Mao D S. Connotation of quantum cascaded lasers technology and application prospect [J]. Journal of China Academy of Electronic Science, 2015, 10(4): 333 - 340. (in Chinese)
毛登森. 量子级联激光器技术内涵及其应用前景 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(4): 333 - 340.
- [3] Evans A, Darvish S R, Slivken S, et al. Buried heterostructure quantum cascade lasers with high continuous-wave wall plug efficiency [J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(7): 553.
- [4] Menzel S, Diehl L, C Pflügl, et al. Quantum cascade laser master-oscillator power-amplifier with 1.5 W output power at 300 K [J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16229 - 16235.
- [5] Lyakh A, Maulini R, Tsekoun A, et al. Tapered 4.7 μm quantum cascade lasers with highly strained active region composition delivering over 4.5 watts of continuous wave optical power [J]. Optics Express, 2012, 20(4): 4382.
- [6] Sun Y Q, Zhang J C, Cheng F M, et al. Beam steering characteristics in high-power quantum-cascade lasers emitting at 4.6 μm [J]. Chinese Physics B, 2021, 30(3): 119 - 122.
- [7] Razeghi M. High-Performance InP-based Mid-IR quantum cascade lasers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(3): 941 - 951.
- [8] 李路. InGaAs/InAlAs/InP 量子级联激光器材料生长与器件研究 [J]. 中国科学院半导体研究所, 2008.
- [9] Y Bai, N Bandyopadhyay, S Tsao, et al. Room temperature quantum cascade lasers with 27 % wall plug efficiency [J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(18): 181102.
- [10] Y Bai, N Bandyopadhyay, S Tsao, et al. Highly temperature insensitive quantum cascade lasers [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(25): 553.
- [11] Wang F, Slivken S, Wu D, et al. Room temperature quantum cascade lasers with 22% wall plug efficiency in continuous-wave operation [J]. Optics Express, 2020, 28(12).
- [12] ErWin Jr [CP/OL]. <http://erwinjr.org/>
- [13] Christopher A. Sigler. 2-D Coherent power scaling of mid-infrared quantum cascade lasers [D]. University of Wisconsin-Madison, 2018.
- [14] 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]. WILEY-VCH Verlag, 2009(2).
- [15] Brice J C. Basic physical properties of InP [M]. New York: Knovel, 1991.
- [16] Evans A J. Gas MBE growth and characterization of strained layer indium phosphide-gallium indium arsenide-aluminum indium arsenide quantum cascade lasers [J]. Dissertations & Theses-Gradworks, 2008.
- [17] Chaparala S C, Xie F, Caneau C, et al. Design guidelines for efficient thermal management of Mid-infrared quantum cascade lasers [J]. Components, Packaging and Manufacturing Technology, IEEE Transactions, 2011, 1(12): 1975 - 1982.