

谐振腔增强带间级联中红外发光二极管的研究

张旺霖¹, 柴旭良¹, 周易^{1,2*}, 裴金狄¹

(1. 国科大杭州高等研究院 物理与光电工程学院, 浙江 杭州 310024;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘要: 本文对基于带间级联结构和谐振腔结构的中红外发光二极管进行了仿真和设计。在传统带间级联发光二极管的基础上, 从器件外部引入分布布拉格反射镜 (DBR) 谐振腔结构, 形成谐振腔带间级联发光二极管。对谐振腔参数进行仿真优化, 包括 DBR 周期数、谐振腔的腔长、有源区在谐振腔中的位置等。结果表明, 使用单周期 ZnS/Ge DBR 作为谐振腔上反射镜的器件输出功率最大, 有源区置于谐振腔内部电场强度波峰处时, 器件的输出功率最大, 三级谐振腔带间级联 LED 器件的输出功率与 55 级无谐振腔器件输出功率相当, 其光束发散角的半峰全宽可以从 92 度减小到 52 度。结合已生长的 5 级带间级联 LED 器件的测试结果, 增加谐振腔结构后的仿真结果表明, 峰值波长的辐射强度增强 11.7 倍, 积分辐射强度增强 5.43 倍, 光谱的半峰宽变窄 6.45 倍。

关键词: 发光二极管; 谐振腔; 带间级联; 辐射增强

中图分类号: TN304.2; TN305 **文献标识码:** A

Studies of resonator-enhanced mid-infrared interband cascade light emitting diode

ZHANG Wang-Lin¹, CHAI Xu-Liang¹, ZHOU Yi^{1,2*}, PEI Jin-Di¹

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China;

2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The mid-infrared light emitting diodes based on the interband cascade structure and resonant cavity structure are simulated and designed. Based on the traditional interband cascade LED, a distributed Bragg reflector (DBR) structure is introduced outside the device to form a resonant interband cascade LED. The parameters of the resonant cavity are simulated and optimized, including the number of DBR cycles, the length of the resonator, the position of the active region in the resonator, and the optimized device structure is obtained. The simulation results show that the device using ZnS/Ge DBR with one period as the upper mirror of the resonator has the highest output power. When the active region is located at the peak of the electric field intensity in the resonant cavity, the device will have the highest output power. The output power of the three-stage resonant cavity interband cascade LED device is equivalent to that of the 55-stage device without a resonant cavity. Meanwhile, the output light has a better direction, and the full width at half peak of the far field distribution can be reduced from 92 degrees to 52 degrees. Combined with the test results of the fabricated 5-stage interband cascade LED device, the simulation results after adding a resonant cavity structure indicate that the radiance of the peak wavelength is increased by 11.7 times, the integrated radiance is increased by 5.43 times, and the full-width at half-maximum is narrowed by 6.45 times.

Key words: light emitting diode, resonant cavity, interband cascade, radiation enhancement

收稿日期: 2023-03-20, 修回日期: 2023-05-04

Received date: 2023-03-20, Revised date: 2023-05-04

基金项目: 国家自然科学基金 (61904183, 61974152, 62104237, 62004205), 中国科学院青年创新促进会会员资助 (Y202057), 上海市科技启明星计划 (20QA1410500), 上海市扬帆计划 (21YF1455000)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (NSFC) (61904183, 61974152, 62104237, 62004205), the Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences (Y202057), Shanghai Rising-Star Program (20QA1410500), Shanghai Sail Plans (21YF1455000)

作者简介 (Biography): 张旺霖 (1998-), 男, 主要研究领域为带间级联光电子器件. E-mail: zhangwanglin20@mails.ucas.ac.cn

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

引言

红外发光器件被广泛应用于环境有害气体的检测和监测^[1]、医疗诊断和治疗^[2]、军事安全与防御和空间技术^[3]等,在满足高亮度、高效率和高可靠性的基础上,还需要降低成本,以满足越来越广泛的应用需求。基于带间级联结构的中红外发光二极管(Light Emitting Diode, LED)器件以其高输出功率和高提取效率得到了越来越多的关注^[4-7],并广泛用于气体探测器的中红外光源中。Ricker^[4]生长了8级带间级联LED器件,获得了 $1.04 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$ 的辐射亮度,电光转换效率约为0.4%。Kim^[6]生长了22级的带间级联LED器件,将22级有源区分成了四组,并将四组有源区均置于电场强度波峰处,室温下输出功率达到了2.9 mW,电光转换效率约0.4%。这些红外LED器件使用较多的级联级数,在室温下获得了超过1 mW的输出功率,但器件的电光转换效率依旧很低(<1%)。这是由于出射面的半导体材料折射率高,受限于全内反射,器件的提取效率^[8]只有约1.8%($\sim 1/4n^2$)。

为了提高器件的光子提取效率,研究者对表面粗糙化^[9]、光子晶体^[10]、谐振腔^[11-12]等技术进行了研究。Montealegre DA^[9]等人通过将衬底表面进行减薄和粗糙化后,在室温下的输出功率是原结构的2~3倍,达到6.8 mW。Binbin Weng^[10]等人报道的光子晶体红外发光器件,与没有光子晶体结构的器件相比,发光效率提高了26.5倍,获得的输出功率高达7.68 mW。谐振腔结构也是提高中红外LED提取效率的一种有效方法,谐振腔发光二极管(Resonant Cavity Light Emitting Diode, RCLED)是通过将LED置于由两个分布式布拉格反射镜(Distributed Bragg Reflector, DBR)组成的法布里-珀罗微腔(FP腔)内实现的。其增强原理是利用谐振腔的谐振效应,光波在谐振腔内来回反射形成驻波,抑制非谐振波长,使谐振波长的光尽可能多地从出射角范围内发射出来。谐振腔结构已经成功应用于可见光和近红外波段的LED,可以实现高达22%的提取效率^[13]。与传统LED相比,谐振腔LED可以实现更窄的线宽、更高的亮度和更大的辐射功率,并且可以实现更好的出射方向性。谐振腔对光的增强效果,取决于上下反射镜的反射率、光源在腔中的位置、腔长等诸多因素。如果LED本征辐射为高斯光束,谐振腔的整体增强因子 G_{int} 可以用式(1)表示^[8]:

$$G_{int} = \frac{\xi}{2} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1 - R_1}{1 - \sqrt{R_1 R_2}} \cdot \sqrt{\pi \ln 2} \cdot \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \cdot \frac{\lambda_{cav}}{L_{cav}} \cdot \frac{\tau_{cav}}{\tau}, \quad (1)$$

其中, R_1 、 R_2 分别为上下反射镜的反射率, λ 、 λ_{cav} 分别为真空中和腔内有源区的发射波长, $\Delta\lambda$ 为线宽, L_{cav} 为谐振腔腔长, ξ 表示驻波效应,其大小取决于偶极子在腔中的位置, τ_{cav} 、 τ 分别为有无腔时载流子的自发辐射寿命。将有源区设计在波峰处时, $\xi = 2$,驻波效应最大,可以得到最大的谐振增强。Al-Saymari等人^[11]报道的RCLED室温下输出功率是无谐振腔结构的13倍,D. A. Díaz-Thomas等人^[12]报道的RCLED在室温下的最大外量子效率为0.91%。这两个器件虽然使用谐振腔结构,但器件中所有的量子阱有源区均生长在一起形成一个大的有源区,并置于其中一个电场强度波峰处,但其他波峰处没有放置有源区,谐振腔对辐射的增强效果没有被完全利用。而Kim等人^[6]虽然将22级有源区分成四组并置于场强波峰处,但是没有生长谐振腔结构,其辐射增强效果不显著。所以,本文将带间级联结构和谐振腔结构结合起来一体化设计。通过对结构中DBR周期数、腔长、有源区位置等参数进行优化设计,得到了谐振腔LED输出功率、远场分布等性能参数,确定了最优的多级谐振腔带间级联LED结构。然后结合已生长的5级带间级联器件的测试结果,仿真了其生长谐振腔结构后主要性能参数的变化。

1 器件结构设计

器件的基本结构如图1(a)所示,其中带间级联LED的基本结构如下:InAs/GaAsSb超晶格材料为有源区,GaAsSb/AlAsSb超晶格材料为隧穿区,InAs/AlAsSb多量子阱材料为电子注入区,隧穿区和电子注入区同时作为电子和空穴势垒,阻挡载流子直接从一个有源区运动到另外一个有源区,增大辐射复合速率,详细结构见文献[7]。将衬底完全去除,两侧分别生长金属Au与ZnS/Ge DBR形成谐振腔,Au在全波段拥有良好的全反射特性,所以将其当作谐振腔的底部反射镜;顶部DBR使用ZnS和Ge两种折射率相差较大的材料交替生长而成。通过调节带间级联LED各结构的厚度来调整腔长,从而调整谐振波长,同时与LED的自发辐射形成耦合。

CO₂气体探测器的红外光源需要4.2 μm的红外光源,本文以峰值波长为4.2 μm的RCLED为例,通过有限元方法^[14]进行计算仿真,分析谐振腔的设计参数对LED输出功率的影响。如图1(b)所示,使用电偶极子^[15]放置在谐振腔内正中央来模拟LED

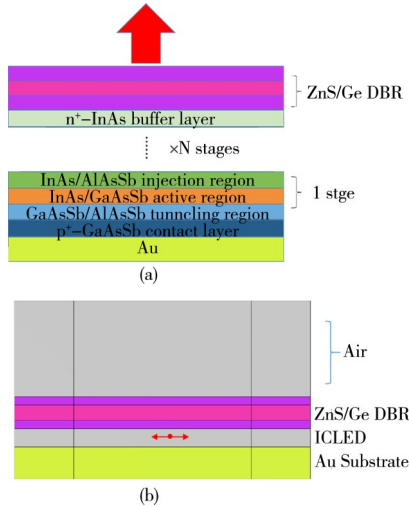


图1 (a)谐振腔带间级联LED结构示意图,(b)谐振腔LED仿真结构示意图

Fig. 1 (a) The schematic diagram of resonant cavity inter-band cascade LED structure, (b) the schematic diagram of resonant cavity LED simulation structure

的自发辐射,其自发辐射波长为 $4.2 \mu\text{m}$ 。仿真区域为 $6 \times 6 \mu\text{m}^2$,在外层加上完美匹配层用来模拟无限大的器件。带间级联LED的有源区为InAs/GaAsSb II类超晶格材料,折射率为3.6,ZnS和Ge在中红外波段的折射率分别为2.2和4^[16]。

我们对无谐振腔结构的单级LED器件进行了仿真和对比。单个有源区被放置在一块半导体材料中,偶极子放在相同的位置,该结构的半导体材料下面添加一层完美匹配层,以模拟底部无限长的半导体辐射。将该结构的辐射功率作为参考基准,定义一个参数辐射增强因子 $G(\lambda)$,表示特定波长下,只有一个偶极子作为光源时,有无谐振腔结构的器件输出功率之比: $G(\lambda) = P(\lambda)/P_0(\lambda)$ 。其中, $P(\lambda)$ 为有谐振腔结构的LED输出功率, $P_0(\lambda)$ 为无谐振腔结构的LED输出功率。

2 结果和分析

本节内容仿真了DBR的周期数、谐振腔腔长、光源在腔中位置对谐振腔LED输出功率的影响,并确定了器件的相关参数。

2.1 DBR周期数对谐振腔LED输出功率的影响

DBR由ZnS/Ge周期性交叠生长而成,且每层膜的光学厚度均为 $\lambda/4$,即: $n_H d_H = \lambda/4$, $n_L d_L = \lambda/4$ 。其中, n_H 、 n_L 分别为两种材料的折射率, d_H 、 d_L 分别为两种材料的厚度。

DBR的中心波长反射率由式(2)给出^[8]:

$$R = \left(\frac{1 - \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^{2N} \frac{n_H^2}{n_a n_s}}{1 + \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^{2N} \frac{n_H^2}{n_a n_s}} \right)^2, \quad (2)$$

其中, N 为DBR的周期数, n_a 、 n_s 分别为DBR两侧材料的折射率。DBR中心波长的反射率主要与材料折射率和DBR周期数有关。

不同周期数DBR会影响谐振腔上反射镜的反射率,从而改变谐振腔LED的辐射强度。图2(a)计算了DBR周期数从1至7时,DBR的中心波长反射率变化和腔长为 $\lambda/2$ 的器件辐射增强因子 G 的变化。可以看到,DBR的中心波长反射率会随着周期数的增大而增大,增大的幅度趋向缓慢。而器件的辐射增强因子会随着DBR周期数的增大而减小,在DBR周期数为1时,谐振腔的增强效果最好。由式(1)可以知道,辐射增强因子与反射率之间的关系主要受 $t = \frac{1 - R_1}{1 - \sqrt{R_1 R_2}}$ 所影响,图2(b)给出了 t 与

R_1 、 R_2 之间的关系。理想情况下,Au的反射率 R_2 为1, t 的大小随着 R_1 的增大而增大。但实际情况下,金属反射镜会吸收部分光子。从图中可以看出, $R_2 < 1$ 时, t 会随着 R_1 的增加,先增加达到峰值后快速减小,当下反射镜存在吸收损耗时,最佳的上DBR反射率的大小会减小。当DBR周期为1时,其反射率 R_1 为76.13%,当DBR周期数达到两对及以上时, R_1 超过了90%并无限接近于1,此时 t 的大小远小于 R_1 为76.13%时 t 的大小。出现这种现象是因为过高的反射率导致光的透过率减小,LED发出的光被反射回有源区并被有源区重新吸收,大大地减小了器件辐射到自由空间中的功率。同时,还仿真了只生长金属Au,无上DBR反射镜,即DBR周期数为0时器件的辐射增强因子进行对比,此时出射界面为半导体-空气界面,根据菲涅尔定理计算其出射面的反射率为31.9%,其 t 的大小与DBR周期数为3时所对应的 t 大小相当。因此,使用单周期的ZnS/Ge DBR结构作为谐振腔的上反射镜为最优结构。

2.2 谐振腔腔长对谐振腔LED输出功率的影响

谐振腔的腔长会显著影响器件的纵模分布,通常腔长由式(3)给出^[17]:

$$L_{cav} = \frac{m\lambda}{2n_{cav}}, \quad (3)$$

其中, L_{cav} 为谐振腔的腔长, n_{cav} 为腔内材料折射率, λ 为谐振腔的谐振波长,整数 m 称为腔阶, n_{cav} 、 λ 为固

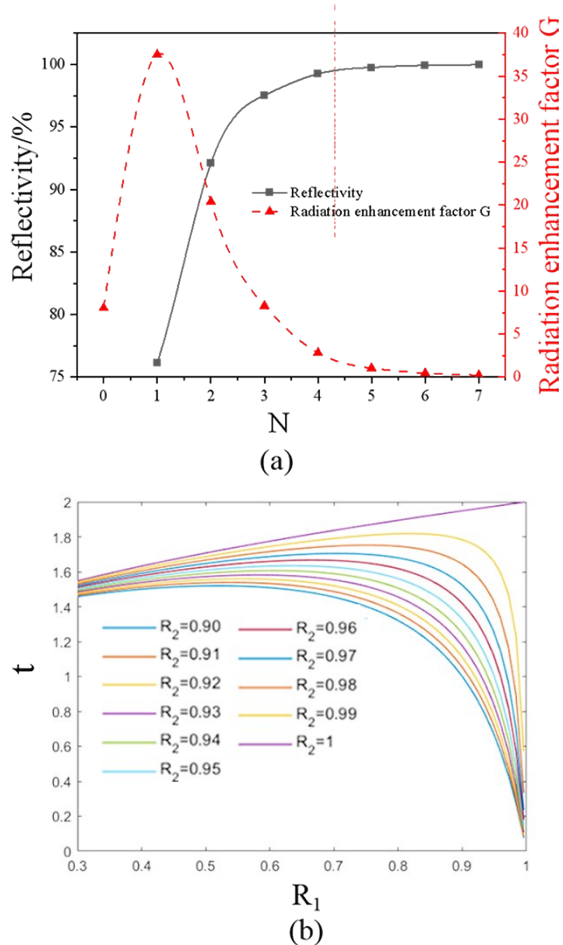


图2 (a)腔长为 $\lambda/2$ 时, DBR反射率和辐射增强因子 G 随DBR周期数的变化, (b) t 与 R_1 、 R_2 之间的关系

Fig. 2 (a) The dependence of the reflectivity and the radiation enhancement factor G on the different periods of DBR when the cavity length is $\lambda/2$, (b) the relationship between R_1 , R_2 and t

定值,所以可以用腔阶 m 描述谐振腔的腔长。通过仿真计算不同厚度条件下形成稳定谐振的纵模波长,使其谐振波长为 $4.2 \mu\text{m}$ 。本文设计了腔阶 m 为1、2、3和4的四种结构,即腔长为 $\lambda/2$ 、 λ 、 $3\lambda/2$ 、 2λ ,得到这四种结构在谐振波长为 $4.2 \mu\text{m}$ 时,谐振腔的腔长分别为 $0.578 \mu\text{m}$ 、 $1.165 \mu\text{m}$ 、 $1.754 \mu\text{m}$ 和 $2.342 \mu\text{m}$ 。图3给出了 $m=1$ 和 $m=2$ 两种结构的折射率以及电场分布。可以发现,在谐振腔内部,腔内电场强度波峰数量等于腔阶 m 。

图4(a)给出了腔阶 $m=2$ (即腔长为 λ)时,谐振腔LED的输出功率随偶极子位置的变化图,可以看到,输出功率最大值时,偶极子所在的位置与图3(b)中电场强度最大值的位置重合。因此,光源在电场强度波峰处可以使谐振腔的增强效果最大。

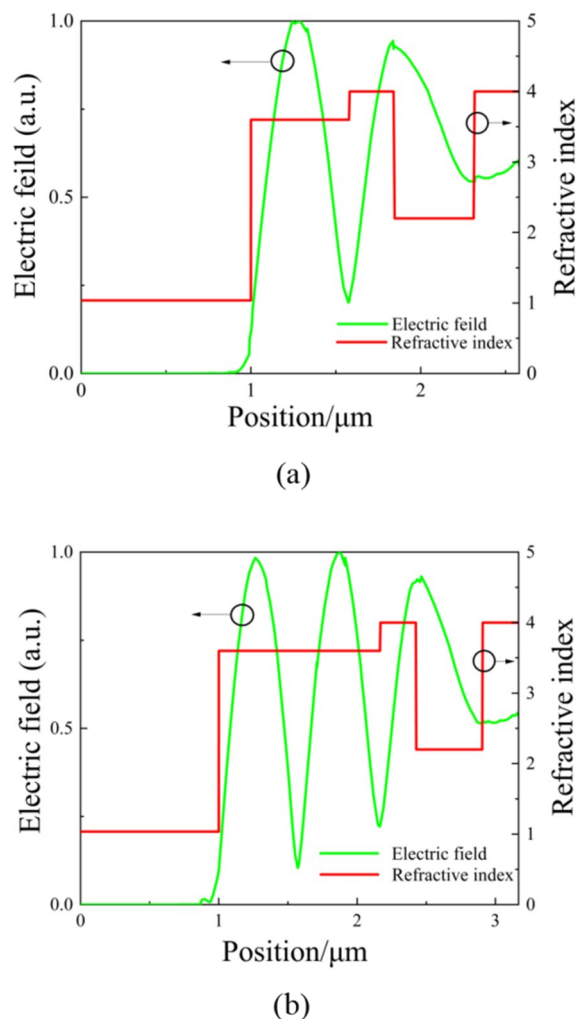


图3 不同腔长下的谐振腔内部电场强度分布:(a) $\lambda/2$, (b) λ

Fig. 3 The distribution of the electric field intensity in the cavity at different cavity lengths: (a) $\lambda/2$, (b) λ

四种结构的第一个波峰位置均在距离Au表面 $0.28 \mu\text{m}$ 处,将偶极子放置在这个位置进行仿真,可以模拟出谐振腔结构对LED的增强作用。图4(b)给出了辐射增强因子随腔阶 m 的变化图,在谐振波长 $4.2 \mu\text{m}$ 处,四种腔长结构的辐射增强因子分别为37.53、26.18、19.26和13.90。随着腔长的增加,辐射增强因子逐渐减小且辐射增强因子大小与腔阶 m 近似成反比。模式计数法^[18-19]可以在理论上解释这个规律。在理想的谐振腔中,提取效率为: $\eta = 1/m$,提取效率与腔阶 m 成反比,所以在腔阶 $m=1$,腔长为 $\lambda/2$ 时提取效率最大,辐射增强因子也最大。由式(1)可以知道,在理想情况下,腔长最小为 $\lambda/2$ 时,辐射增强因子最大。但这种情况下,由于腔长太小,腔中的有源区和金属之间的距离很短,从偶极子到

金属之间的非辐射性能量转移,会造成很大的损耗^[19],导致腔阶 $m=1$ 时的实际辐射增强因子偏小。

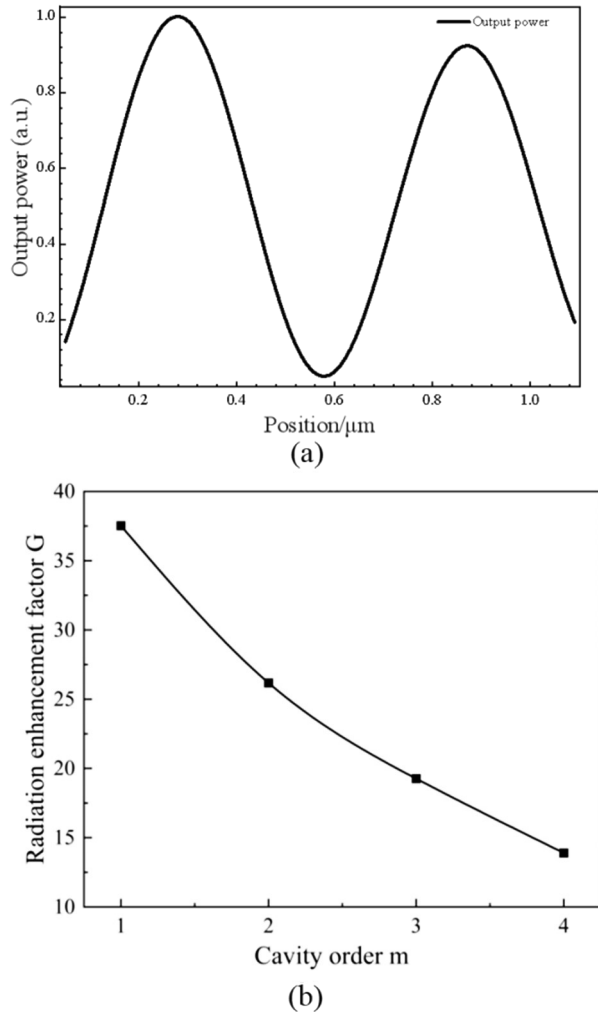


图4 (a)腔长为 λ 时,谐振腔LED输出功率与偶极子在腔内位置的关系,(b)辐射增强因子 G 与腔阶 m 的关系

Fig. 4 (a) The dependence of the output power of resonant cavity LED on the position of dipolar in the cavity for the case when the cavity length is λ , (b) the dependence of the radiation enhancement factor G on the cavity order m

当 $m>1$ 时,谐振腔内部的电场强度会存在多个波峰,而带间级联结构LED本身就有多个有源区,因此可以通过带间级联结构设计,调节各区域的厚度,使带间级联的每一级有源区均处于各个波峰处。例如腔阶为 m 的谐振腔LED结构,腔内部可以生长 m 级带间级联结构,这样就可以得到最大的输出功率。

通过仿真计算获得了四种腔长($m=1, 2, 3, 4$)的带间级联谐振腔结构总辐射增强因子。带间级联LED的有源区为非相干面源,腔阶 $m>1$ 的结构中会有多个光源,将每个光源的输出功率都单独仿真计

算最后进行相加。从图5中可以看到,当 $m=1$ 时,在谐振波长处总辐射增强因子较小,为37.53。而当 $m>2$ 时,在谐振波长处总辐射增强因子相近,约为55。腔阶 m 为1和2时,有源区和金属之间的距离很短,存在很大损耗,而当腔阶 m 为3时,损耗减小,辐射增强因子达到最大。继续增加级数,总辐射增强因子不会增加,但会增加器件的厚度,导致器件的开启电压、串联电阻增大,损失发光效率。因此,谐振腔增强的带间级联LED可以设计为3级,相比于不加谐振腔的单级结构,输出功率理论上可提高55倍。

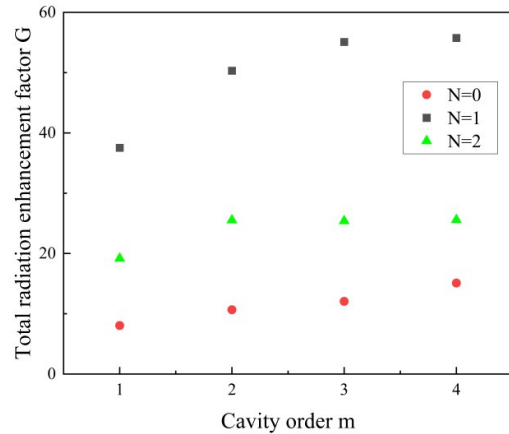


图5 不同DBR周期下,总辐射增强因子 G 与腔阶 m 的关系
Fig. 5 The dependence of the total radiation enhancement factor G on the cavity order m at different periods of DBR

图5还仿真了不同周期数DBR结构下的总辐射增强因子与腔长 m 的关系。从图5中的结果可以看到,DBR周期数为1时,总辐射增强因子是周期数为0(无DBR)结构的4倍左右。即在理论上,文献[6]中的结构去掉衬底并生长上DBR形成谐振腔后,输出功率可以提高约4倍。而DBR周期数为2时,总辐射增强因子约为25,低于1个周期DBR结构的总辐射增强因子。

2.3 谐振腔对LED辐射远场分布的影响

谐振腔可以调节LED自发辐射的远场分布,让自发辐射光子的优先传播方向产生改变,从而使光辐射中心的角功率分布发生改变,让更多的光进入辐射立体角内,使其比无谐振腔结构具有更好的光束方向性。图6给出了腔长为 $3\lambda/2$ 器件的发光波长为 $4.2 \mu\text{m}$ 时,有无谐振腔结构的远场强度分布图,可以看到加谐振腔前,器件辐射的光束发散角的半峰全宽为 92° ,而加谐振腔之后,器件辐射的光束发散角的半峰全宽减小为 52° 。

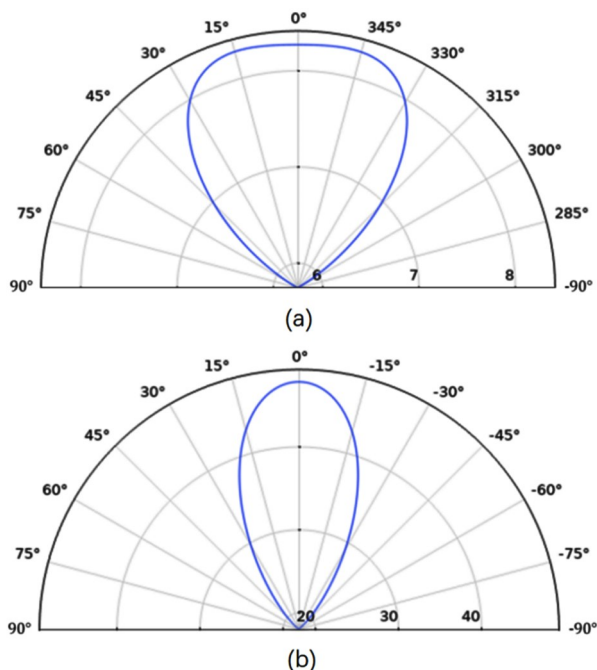


图6 远场强度分布:(a)无谐振腔,(b)有谐振腔
Fig. 6 The far field angular profile of the emission: (a) without the resonant cavity, (b) with the resonant cavity

2.4 谐振腔对LED发光光谱的影响

前期生长并测试了5级的带间级联LED结构^[7],在室温下,注入电流为100 mA时,峰值波长为4.39 μm ,半峰宽为710 nm,器件的最大辐射达到0.73 $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{Sr}^{-1}$ 。结合该器件发光性能的测试结果,在加上谐振腔结构之后,考虑到实际器件存在波长展宽,图7给出了谐振腔结构的总辐射增强因子随波长分布以及RCLED辐射光谱的仿真结果。RCLED有源区自发辐射出来的光子会被限制在谐振腔的光模(即谐振波长)中,其他波长的辐射会被抑制。在谐振波长处,总辐射增强因子达到最大,其他波长的辐射增强因子较小。通过仿真得到峰值波长的辐射功率可以提高11.7倍,全波段积分辐射功率可以提高5.43倍,器件的辐射波长半峰宽减小为110 nm,变窄了6.45倍。

此外,使用本文的仿真计算模型,对已报道的谐振腔LED器件的结构参数进行仿真计算。如表1所示,峰值波长处辐射增强因子的仿真结果为2.9,与文献报道中给出的测试结果有较高的吻合度,验证了仿真模型的准确性。

3 结论

使用有限元分析的方法进行仿真,将带间级联结构与谐振腔的辐射增强特点结合起来,设计了谐

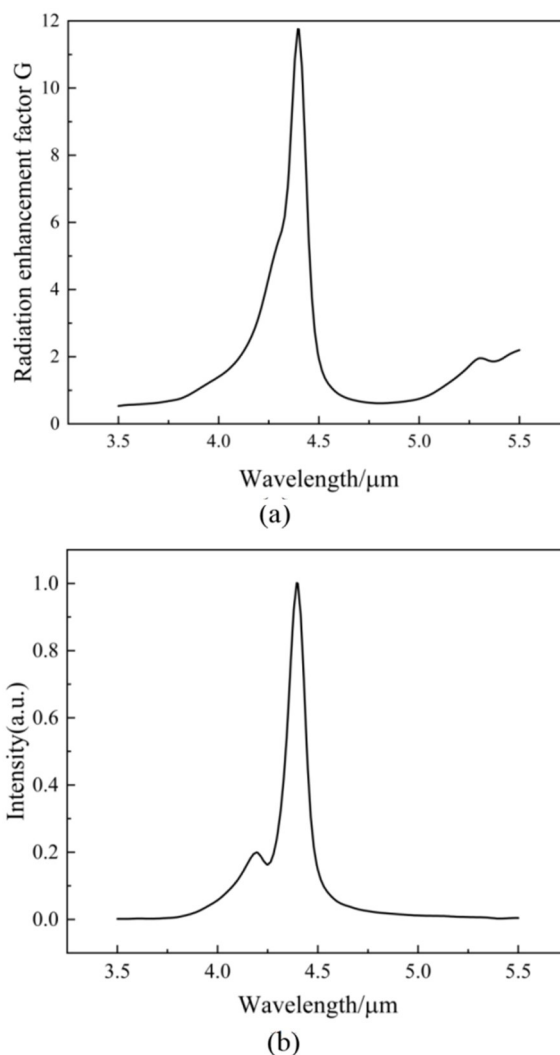


图7 (a)辐射增强因子G随波长的分布,(b)300 K时,RCLED的辐射光谱
Fig. 7 (a) The dependence of G on the wavelength, (b) the electroluminescence spectra of RCLED at 300 K

表1 已报道的RCLED器件仿真与测试值对比

Table 1 The comparison of simulation and test values of reported RCLED devices

	峰值波长/ μm	腔阶 m	R_1	R_2	峰值波长处的辐射增强因子	
					实验值	仿真值
Laura Meriggi ^[20]	4.2	8	0.34	0.65	3	2.9
This article	4.39	5	0.76	1		11.7

振腔带间级联LED结构。仿真结果显示,用单个周期的ZnS/Ge DBR作为谐振腔上反射镜时,谐振腔的输出功率最大。当有源区置于谐振腔内部电场强度波峰处,谐振效应达到最大。谐振腔对单级LED的辐射增强效果与腔长成反比,但是在腔阶 m 为1和2

时存在非辐射性能量转移导致的损耗,会降低谐振腔的增强效果。结合带间级联结构的多个有源区,当级联级数为3时,其总辐射增强因子达到最大,继续增加级数,总辐射增强因子不会增加。因此,使用3级谐振腔带间级联结构为最优的设计方案,此时输出功率能增加18.3倍,达到约55级无谐振腔带间级联LED输出功率。同时,谐振腔能使LED辐射的光束发散角从 92° 减小到 52° 。针对前期已制备的5级带间级联LED器件,在增加谐振腔结构之后,通过仿真可以使得峰值波长辐射功率增强约11.7倍,全波段积分辐射可以增强约5.43倍,光谱半峰宽变窄6.45倍。设计的谐振腔带间级联LED结构具有高辐射功率、窄光谱线宽、小光束发散角等特点,在气体传感器红外光源的应用中具有广泛的应用前景。

References

- [1] Bui D A, Hauser P C. Analytical devices based on light-emitting diodes – a review of the state-of-the-art [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2015, **853**: 46–58.
- [2] Tsai S R, Hamblin M R. Biological effects and medical applications of infrared radiation [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B–Biology*, 2017, **170**: 197–207.
- [3] Jung D, Bank S, Lee M L, et al. Next-generation mid-infrared sources [J]. *Journal of Optics*, 2017, **19**(12): 123001.
- [4] Ricker R J, Provence S R, Norton D T, et al. Broadband mid-infrared superlattice light-emitting diodes [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, **121**(18): 185701.
- [5] Ermolaev M, Lin Y X, Shterengas L, et al. GaSb-Based Type-I Quantum Well 3–3.5 μm Cascade Light Emitting Diodes [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, **30**(9): 869–872.
- [6] Kim C S, Bewley W W, Merritt C D, et al. Improved mid-infrared interband cascade light-emitting devices [J]. *Optical engineering*, 2018, **57**(1): 011002.
- [7] Zhou Y, Lu Q, Chai X L, et al. InAs/GaSb superlattice interband cascade light emitting diodes with high output power and high wall-plug efficiency [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, **114**(25): 253507.
- [8] Schubert E F. Light-Emitting Diodes [M]. 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 163–190.
- [9] Montealegre D A, Schrock K N, Walhof A C, et al. High-power mid-wave infrared LED using W-superlattices and textured surfaces [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, **118**(7): 071105.
- [10] Weng B B, Qiu J J, Shi Z S. Continuous-wave mid-infrared photonic crystal light emitters at room temperature [J]. *Applied Physics B–Lasers and Optics*, 2017, **123**(1): 29.
- [11] Al-Saymari F A, Craig A P, Lu Q, et al. Mid-infrared resonant cavity light emitting diodes operating at 4.5 μm [J]. *Optics Express*, 2020, **28**(16): 23338–23353.
- [12] Diaz-Thomas D A, Stepanenko O, Bahriz M, et al. 3.3 μm interband-cascade resonant-cavity light-emitting diode with narrow spectral emission linewidth [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2020, **35**(12): 125029.
- [13] Blondelle J, Neve H D, Borghs G, et al. High efficiency (> 20%) microcavity LEDs [J]. *IEEE Colloquium*, 1996, **267**: 12–14.
- [14] Jin J-M. The Finite Element Method [M]. Theory and Computation of Electromagnetic Fields. 2010: 342–398.
- [15] Benisty H, Stanley R, Mayer M. Method of source terms for dipole emission modification in modes of arbitrary planar structures [J]. *Journal of the Optical Society of America a–Optics Image Science and Vision*, 1998, **15**(5): 1192–1201.
- [16] Mao H F, Silva K, Martyniuk M, et al. MEMS-Based Tunable Fabry-Perot Filters for Adaptive Multispectral Thermal Imaging [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2016, **25**(1): 227–235.
- [17] Zhmakin A I. Enhancement of light extraction from light emitting diodes [J]. *Physics Reports–Review Section of Physics Letters*, 2011, **498**(4–5): 189–241.
- [18] Yeh P. Optical waves in layered media [M]. New York (N. Y.): Wiley, 1988: 58–82.
- [19] Baets R G, Delbeke D G, Bockstaele R, et al. Resonant-Cavity Light-Emitting Diodes: A review [J]. *Proceedings of SPIE–The International Society for Optical Engineering*, 2003, **4996**: 74–86.
- [20] Meriggi L, Steer M J, Ding Y, et al. Development of mid-infrared light-emitting diodes for low-power optical gas sensors [C]. Proceedings of the 2015 11th Conference on PhD Res in Microelect & Elect PRIME, 2015: 180–183.