

激光与光电子学进展

Ge/Si_xGe_{1-x} 衬底 620 nm 半导体激光器的特性林涛^{1,2*}, 解佳男¹, 穆妍¹, 李亚宁¹, 孙婉君¹, 张霞霞¹, 杨莎¹, 米帅¹¹西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;²西安理工大学陕西省复杂系统控制与智能信息处理重点实验室, 陕西 西安 710048

摘要 短波长红光激光是激光显示、生物医学等应用领域急需开发的一种新波段光源。基于 Ge/Si_xGe_{1-x} 衬底设计并模拟分析了一种波长为 620 nm 的红光半导体激光器。该激光器使用 Ge 衬底以及 Si_xGe_{1-x} 基底层, 通过改变 Si_xGe_{1-x} 层中的 Si 摩尔分数调整激光器结构中每层 AlGaInP 系材料的晶格常数, 从而实现高 Ga 摩尔分数的 GaInP 量子阱并将 GaInP 量子阱的激光波长缩短至 620 nm。通过计算 SiGe、AlGaInP 系材料的物理参数, 研究了 GaInP 量子阱有源区结构和 Si_xGe_{1-x} 基底层组分对输出特性的影响规律, 优化了激光器的结构参数。模拟结果表明, 298 K 温度下设计的激光器输出波长为 620 nm, 阈值电流为 0.58 A, 输出功率为 1.20 W, 转换效率为 38.3%。

关键词 激光器; 半导体激光器; 短波长红光激光; 晶格调制; Ge/Si_xGe_{1-x} 衬底

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1914003

Properties of 620 nm Semiconductor Lasers with Ge/Si_xGe_{1-x} SubstrateLin Tao^{1,2*}, Xie Jianan¹, Mu Yan¹, Li Yaning¹, Sun Wanjun¹, Zhang Xiaxia¹,Yang Sha¹, Mi Shuai¹¹College of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048,

Shaanxi, China;

²Shaanxi Key Laboratory of Complex System Control and Intelligent Information Processing, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China

Abstract Short-wavelength red laser is a new wavelength light source that is urgently needed to be developed for laser display and biomedical applications. In this paper, a red light semiconductor laser with a wavelength of 620 nm has been designed and simulated based on a Ge/Si_xGe_{1-x} substrate. The laser uses a Ge substrate and a Si_xGe_{1-x} substrate layer. By changing the Si mole fraction in the Si_xGe_{1-x} layer, the lattice constant of each layer of the AlGaInP materials in the laser structure is adjusted to achieve a GaInP quantum well with a high Ga mole fraction and shorten the laser wavelength of the GaInP quantum well to 620 nm. By calculating the physical parameters of SiGe and AlGaInP materials, the influence law of GaInP quantum well active region structure and Si_xGe_{1-x} substrate layer components on the output characteristics is studied, and the structural parameters of the laser are optimized. The simulation results show that the laser designed at 298 K temperature has an output wavelength of 620 nm, a threshold current of 0.58 A, an output power of 1.20 W, and a conversion efficiency of 38.3%.

Key words lasers; semiconductor lasers; short-wavelength red laser; crystal lattice modulation; Ge/Si_xGe_{1-x} substrate

1 引言

红光波段的激光光源在激光显示^[1]、激光存储^[2]、生物医学等领域有着广泛的应用前景。在生物医学^[3-4]领域, 利用激光激发多种荧光色素可以快速测量分散

细胞的一系列生物理化特征参量, 广泛应用于临床医学、细胞学、微生物学等领域^[5]。在激光显示领域, 对于红光光源的波长选择需要考虑两个方面, 即: 根据人眼对波长的响应度选择人眼敏感的波长, 以获得较高的光视效能; 选择波长能够扩大色域的覆盖范围, 从而获

收稿日期: 2021-08-23; 修回日期: 2021-09-28; 录用日期: 2021-10-08

基金项目: 陕西省重点研发计划(2020GY-044)、陕西省创新团队支持计划(2021TD-25)、西安市科技计划(2020KJRC0077, 2019219814SYS013CG035)

通信作者: *lintao@xaut.edu.cn

得更好的色彩体验。对于红色激光,波长越短,光视效能越高^[6],如:使用波长为 620 nm 的红光时,光视效能为 0.33 lm/W,色域为 119%;使用波长为 650 nm 的红光时,光视效能为 0.16 lm/W,色域为 127%^[7]。

激光技术自发明以来发展迅速,国内外研究人员对短波长红光波段的研究也在不断创新,但目前依旧没有简单易行的解决方案来产生短波长红光。在固体激光器领域,可通过红外激光倍频^[8]、拉曼激光器^[9]、双波长激光和频^[10]、二极管抽运固体激光器^[11-12]实现红光波段的固体激光器。在半导体激光器领域,Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Hchstfrequenztechnik (FBH)研究所^[13]、三菱电机^[14]、nLight 公司^[15]报道过较小张应变的 GaInP 量子阱(QW)激光器,实现了 625 nm 以上的短波长红光。朱振等^[16]采用张应变 GaInP/AlGaInP 量子阱研制了 640 nm 红光半导体激光器,最大输出功率为 2.3 W,是目前我国自主研发的最高水平红光半导体激光器。现有的红光半导体激光器主要是基于 GaAs 衬底的 AlGaInP 系材料半导体激光器,要想激射出比 625 nm 波长更短的红光,则需采用高 Ga 摩尔分数 GaInP 量子阱,但也会产生很大的张应变,从而引入更多的材料缺陷,且 GaAs 基的高 Ga 摩尔分数张应变 GaInP 量子阱不能任意缩短激光波长至其理论值。国内外关于 620 nm 波长激光器的研究,主要还是通过拉曼激光器^[17]实现,但其实施方式复杂,输出特性较差。

本文通过改变 Si 的摩尔分数调整 SiGe 层的晶格常数,并在 Ge/Si_xGe_{1-x}(x 和 1-x 为对应组分所占的

摩尔分数)衬底上研究了波长为 620 nm 的高 Ga 摩尔分数 GaInP 单量子阱激光器。通过计算各材料的相关参数,设计出激光波长为 620 nm 的半导体激光器结构,将结构参数代入仿真软件中进行特性模拟分析,通过改变不同的结构参数进行结构优化,以确定出最终的结构参数。

2 材料参数计算与结构设计

与 GaAs 晶格匹配的 Ga_{0.516}In_{0.484}P 材料发光波长约为 652 nm,采用压应变 GaInP(Ga 的摩尔分数小于等于 0.516)量子阱成功实现了 650~680 nm 波段红光半导体激光器,在 DVD 光碟机和电脑光驱应用中取得了巨大的经济效益^[18]。Ga_yIn_{1-y}P 材料直接带隙(Γ-Ga_yIn_{1-y}P)与间接带隙(X-Ga_yIn_{1-y}P)的能量 E_g可表示为

$$E_g(\Gamma) = y \cdot 2.78 + (1 - y) \cdot 1.344 - C_r \cdot y \cdot (1 - y), \quad (1)$$

$$E_g(X) = y \cdot 2.27 + (1 - y) \cdot 2.44 - C_x \cdot y \cdot (1 - y), \quad (2)$$

式中, C_r、C_x 为 GaInP 材料相应的弯曲系数,分别为 0.65、0.20^[19]。图 1(a) 为 GaInP 材料的带隙能量与 Ga 摩尔分数的关系。计算得到直接带隙 GaInP 材料的 Ga 摩尔分数极限为 0.737,对应的带隙能量为 2.276 eV,截止波长为 544.7 nm,如图 1(b) 所示。理论上采用高 Ga 摩尔分数的张应变 GaInP 量子阱可以实现更短波长的红光激射,因此实验设计的激光器结构量子阱仍采用 GaInP 材料。

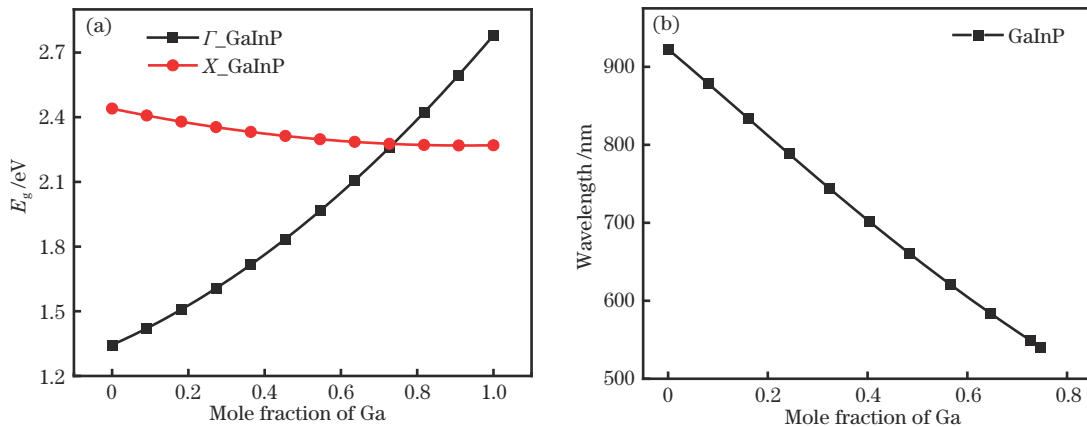


图 1 不同 Ga 摩尔分数下 GaInP 材料的带隙能量与激光波长。(a)带隙能量;(b)激光波长

Fig. 1 Band gap energy and laser wavelength of GaInP materials with different Ga mole fractions. (a) Band gap energy; (b) laser wavelength

半导体材料带隙能量的温度依赖性可由 Varshni 公式^[20]描述。带隙相对于参考温度 T_{ref} 的变化可表示为

$$E(T) = E(T_{ref}) + A \frac{T^2}{T+B} - A \frac{T_{ref}^2}{T_{ref}+B}, \quad (3)$$

式中,参考温度 T_{ref} 通常为 300 K, Ga_yIn_{1-y}P 材料的参

数 A、B 可表示为

$$A = x \cdot A_{GaP} + (1 - x) \cdot A_{InP}, \quad (4)$$

$$B = x \cdot B_{GaP} + (1 - x) \cdot B_{InP}, \quad (5)$$

式中: A_{GaP} 和 B_{GaP} 分别为 -4.10×10⁻⁴ 和 0; A_{InP} 和 B_{InP} 分别为 -4.46×10⁻⁴ 和 204。不同 Ga 摩尔分数下的系数 A、B 如图 2 所示。

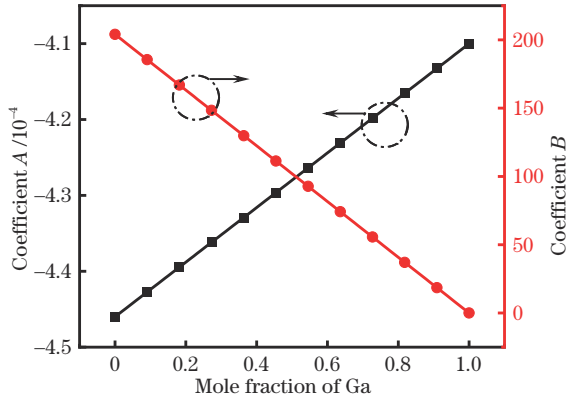


图2 GaInP 材料不同 Ga 摩尔分数时的系数 A、B

Fig. 2 Coefficients A and B for GaInP materials with different Ga mole fractions

在 Ge 衬底上通过改变 SiGe 基体层中 Si 的摩尔分数调控激光器整体结构的晶格常数,以解决高 Ga 摩尔分数 GaInP 量子阱导致的晶格失配较大问题。从图 1(b)可以发现,当 GaInP 材料的 Ga 摩尔分数为 0.57 时,激光波长约为 619 nm。因此,初步设计中将量子阱材料定为 $\text{Ga}_{0.57}\text{In}_{0.43}\text{P}$,波导层选择 AlGaInP 材料,限制层选择 AlInP 材料。设计激光器时涉及 Ge、SiGe、GaInP、AlInP、AlGaInP 五种材料,表 1 为材料 Si、Ge、GaP、InP、AlP 在 300 K 温度下的晶格常数,材料

表 1 Si、Ge、GaP、InP、AlP 材料的晶格常数

Table 1 Lattice constants of Si, Ge, GaP, InP and AlP materials

Material	Si	Ge	GaP	InP	AlP
Lattice constants /nm	0.5431	0.5658	0.5451	0.5869	0.5464

$\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ 、 $\text{Ga}_y\text{In}_{1-y}\text{P}$ 、 $\text{Al}_y\text{In}_{1-y}\text{P}$ 、 $[(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})]_y\text{In}_{1-y}\text{P}$ 的晶格常数 a 可表示为

$$a_{\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}} = x \cdot a_{\text{Si}} + (1-x) \cdot a_{\text{Ge}}, \quad (6)$$

$$a_{\text{Ga}_y\text{In}_{1-y}\text{P}} = y \cdot a_{\text{GaP}} + (1-y) \cdot a_{\text{InP}}, \quad (7)$$

$$a_{\text{Al}_y\text{In}_{1-y}\text{P}} = y \cdot a_{\text{AlP}} + (1-y) \cdot a_{\text{InP}}, \quad (8)$$

$$a_{[(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})]_y\text{In}_{1-y}\text{P}} = x \cdot a_{\text{AlInP}} + (1-x) \cdot a_{\text{GaInP}} \quad (9)$$

图 3 为 SiGe、GaInP、AlInP、AlGaInP 材料不同组分摩尔分数下的晶格常数,计算 AlGaInP 材料时将 In 摩尔分数分别设定为 0.3、0.4、0.5、0.6。可以发现:SiGe 材料的晶格常数随着 Si 摩尔分数的增加而减小;GaInP、AlInP 材料的晶格常数随着 In 摩尔分数的增加而增大;不同 In 摩尔分数下 AlGaInP 材料的晶格常数随着 Al 摩尔分数的增加而增大。当 Ga 的摩尔分数为 0.57 时,GaInP 的晶格常数约为 0.5630 nm,因此,先将 AlInP、AlGaInP、SiGe 材料的晶格常数定为 0.5630 nm,使这几层材料之间无应变,最后确定出的材料为 $\text{Al}_{0.588}\text{In}_{0.412}\text{P}$ 、 $\text{Al}_{0.180}\text{Ga}_{0.395}\text{In}_{0.425}\text{P}$ 、 $\text{Si}_{0.12}\text{Ge}_{0.88}$ 。

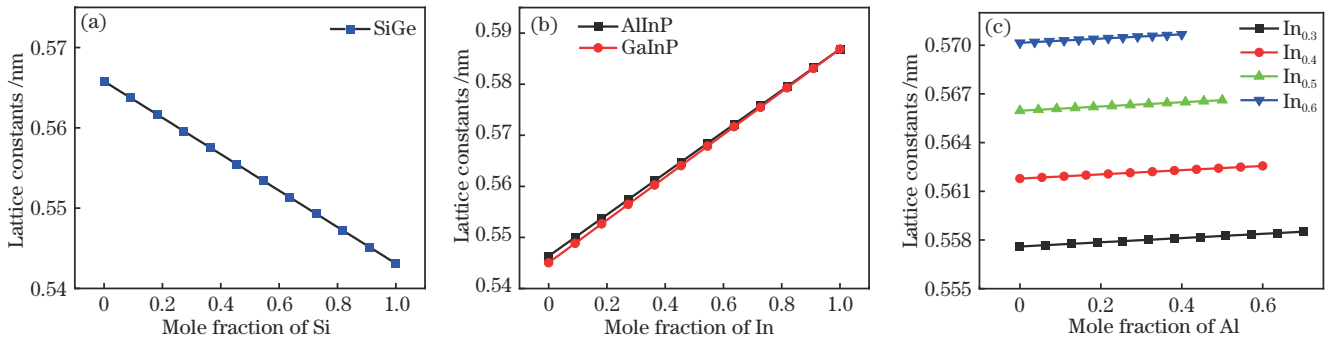


图 3 不同材料的晶格常数。(a) SiGe; (b) GaInP、AlInP; (c) AlGaInP

Fig. 3 Lattice constants of different materials. (a) SiGe; (b) GaInP, AlInP; (c) AlGaInP

实际材料生长中存在着晶格失配和热失配的问题,因此,计算了 SiGe、GaInP、AlInP、AlGaInP 材料晶格常数和温度的关系。晶格常数与温度的关系可表示为

$$a(T) = a(0) \cdot (1 + \alpha T), \quad (10)$$

式中: $a(0)$ 和 $a(T)$ 分别表示温度为 0 和 T 时的晶格常数; α 为膨胀系数。表 2 为 Si、Ge、GaP、InP、AlP 材料的膨胀系数, $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ 、 $\text{Ga}_y\text{In}_{1-y}\text{P}$ 、 $\text{Al}_y\text{In}_{1-y}\text{P}$ 、 $[(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})]_y\text{In}_{1-y}\text{P}$ 材料的膨胀系数可表示为

$$\alpha_{\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}} = x \cdot \alpha_{\text{Si}} + (1-x) \cdot \alpha_{\text{Ge}}, \quad (11)$$

$$\alpha_{\text{Ga}_y\text{In}_{1-y}\text{P}} = y \cdot \alpha_{\text{GaP}} + (1-y) \cdot \alpha_{\text{InP}}, \quad (12)$$

$$\alpha_{\text{Al}_y\text{In}_{1-y}\text{P}} = y \cdot \alpha_{\text{AlP}} + (1-y) \cdot \alpha_{\text{InP}}, \quad (13)$$

$$\alpha_{[(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})]_y\text{In}_{1-y}\text{P}} = x \cdot y \cdot \alpha_{\text{AlP}} + (1-x) \cdot y \cdot \alpha_{\text{GaP}} + (1-y) \cdot \alpha_{\text{InP}} \quad (14)$$

图 4 为 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ 、 $\text{Ga}_y\text{In}_{1-y}\text{P}$ 两种材料膨胀系数随着 Si 与 Ga 摩尔分数增加的变化情况。由于 AlP 与 GaP 的膨胀系数相同,采用差值公式计算得到 $\text{Al}_y\text{In}_{1-y}\text{P}$ 和 $[(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})]_y\text{In}_{1-y}\text{P}$ 两种材料的膨胀系数与 $\text{Ga}_y\text{In}_{1-y}\text{P}$ 的膨胀系数相同,且其数值仅与 y 值有关。

表 2 Si、Ge、GaP、InP、AlP 的膨胀系数 α

Table 2 Expansion coefficients α for Si, Ge, GaP, InP and AlP

Material	Si	Ge	GaP	InP	AlP
α / K^{-1}	2.60×10^{-6}	5.91×10^{-6}	9.16×10^{-7}	5.05×10^{-6}	9.16×10^{-7}

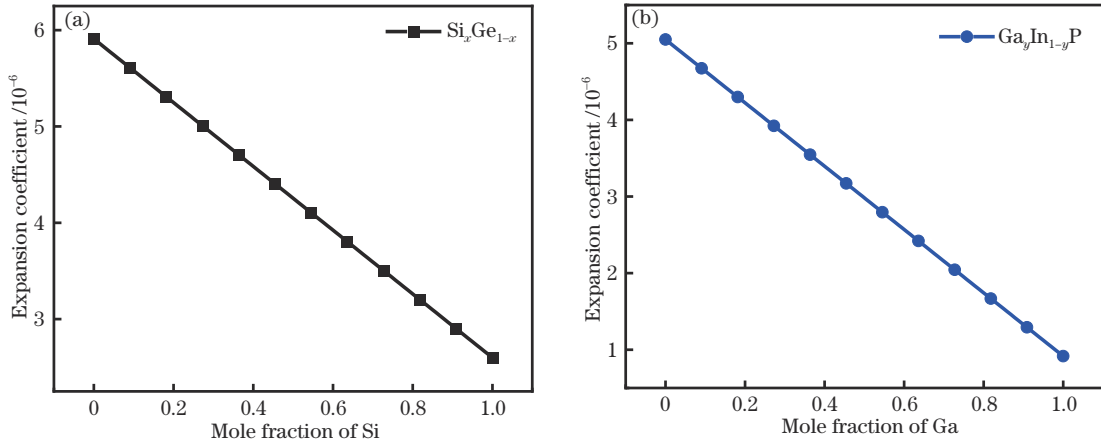


图 4 SiGe 与 GaInP 材料的膨胀系数。(a) SiGe; (b) GaInP

Fig. 4 Expansion coefficients of SiGe and GaInP materials. (a) SiGe; (b) GaInP

根据式(10)计算 Ge、Si_xGe_{1-x}、Ga_yIn_{1-y}P、Al_yIn_{1-y}P、[(Al_xGa_{1-x})_yIn_{1-y}]P 材料组分已经确定的条件下,晶格常数随温度的变化关系。表 3 为 Ge、Si_{0.12}Ge_{0.88}、Ga_{0.57}In_{0.43}P、Al_{0.588}In_{0.412}P、Al_{0.180}Ga_{0.395}In_{0.425}P 五种材料的膨胀系数。

图 5 为 Ge、Si_{0.12}Ge_{0.88}、Ga_{0.57}In_{0.43}P、Al_{0.588}In_{0.412}P、

Al_{0.180}Ga_{0.395}In_{0.425}P 材料的晶格常数与温度的变化关系。表 3 中 Ga_{0.7}In_{0.43}P、Al_{0.588}In_{0.412}P、Al_{0.180}Ga_{0.395}In_{0.425}P 材料的膨胀系数与温度为 0 K 时的晶格常数相差不大,即这三种材料的晶格常数在 0~1000 K 范围内有着较好的匹配程度。Ge、Si_{0.12}Ge_{0.88} 材料的膨胀系数大于其他材料,这两种材料的晶格常数随温度的变化也更大。

表 3 材料的膨胀系数

Table 3 Expansion coefficients of materials

Material	Ge	Si _{0.12} Ge _{0.88}	Ga _{0.57} In _{0.43} P	Al _{0.588} In _{0.412} P	Al _{0.180} Ga _{0.395} In _{0.425} P
α / K^{-1}	5.91×10^{-6}	5.51×10^{-6}	2.69×10^{-6}	2.62×10^{-6}	2.67×10^{-6}

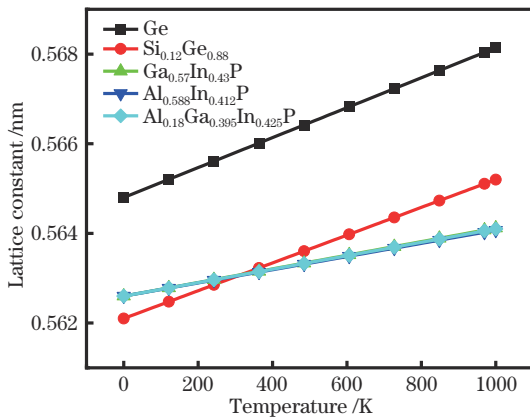


图 5 不同晶格常数随温度的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of different lattice constants with temperature

根据参数计算结果,设计的 Ge/Si_xGe_{1-x} 衬底 620 nm 半导体激光器结构由下至上依次是厚度为 500 nm 的 Ge 衬底、厚度为 15 nm 的 Si_{0.12}Ge_{0.88} 基底层、厚度为 200 nm 的 Ga_{0.57}In_{0.43}P 缓冲层 1、厚度为 50 nm 的 Ga_{0.57}In_{0.43}P 缓冲层 2、厚度为 200 nm 的 Ga_{0.57}In_{0.43}P 缓冲层 3、厚度为 1000 nm 的 Al_{0.588}In_{0.412}P 下限制层,厚度为 200 nm 的 Al_{0.180}Ga_{0.395}In_{0.425}P 下波导层、厚度为 7 nm 的 Ga_{0.57}In_{0.43}P 量子阱、厚度为 200 nm 的 Al_{0.180}Ga_{0.395}In_{0.425}P 上波导层、厚度为 1000 nm 的 Al_{0.588}In_{0.412}P 上限制层以

及厚度为 150 nm 的 Ga_{0.57}In_{0.43}P 势垒层。

3 结果与分析

3.1 仿真模型确定

为了确定仿真模型的准确性,根据短波长红光半导体激光器相关文献中的激光器结构参数进行建模和特性仿真,并对比模拟结果与相关文献中的结果。建模采用的结构参数为朱振等^[16]报道的大功率 640 nm 红光半导体激光器,该激光器结构由下至上依次是厚度为 900 nm 的 N 型 Al_{0.5}In_{0.5}P 限制层、厚度为 200 nm 的 (Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.5}In_{0.5}P 波导层、厚度为 12 nm 的张应变 Ga_{0.6}In_{0.4}P 单量子阱、厚度为 100 nm 的 (Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.5}In_{0.5}P 波导层、厚度为 900 nm 的 P 型 Al_{0.5}In_{0.5}P 限制层、厚度为 50 nm 的 P 型 Ga_{0.5}In_{0.5}P 带隙过渡层以及厚度为 200 nm 的 P 型 GaAs 欧姆接触层。

图 6 为参考现有报道中 640 nm 红光半导体激光器结构参数模拟出的光功率、转换效率与电流的关系。文献^[16]中测得的阈值电流约为 0.5 A,仿真得到的阈值电流同样在 0.5 A 附近。文献^[16]中电流为 1.5 A 时的输出功率可达到 1.10 W,转换效率为 31.5%,而模拟结果显示,当电流为 1.5 A 时,光功率为 1.07 W,转换效率为 36.0%。文献^[16]中激光器的峰值波长约为 640 nm,模拟的激光器结构光谱峰值波

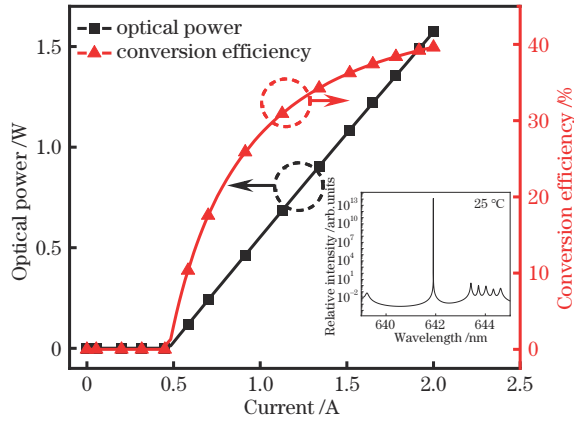


图 6 640 nm 半导体激光器的光功率与转换效率

Fig. 6 Optical power and conversion efficiency of 640 nm semiconductor laser

长约为 642 nm,如图 6 中的插图所示。对比发现,仿真建立的模型与文献[16]报道的结果相差不大,这表明仿真模型是符合实际的。

3.2 Ge/Si_xGe_{1-x} 衬底 620 nm 半导体激光器的光电特性

根据文献[16]建立仿真模型,再代入相关结构参数进行特性仿真分析。初步设计的 Ge/Si_xGe_{1-x} 衬底 620 nm 激光器光功率、转换效率与电流的关系如图 7 所示,插图为其光谱图。可以发现,该结构的激光波长在 620 nm 左右符合设计要求,阈值电流约为 0.58 A,当电流为 1.6 A 时,光功率可达到 1.20 W,斜率效率为 0.76 W/A,转换效率为 38.3%。

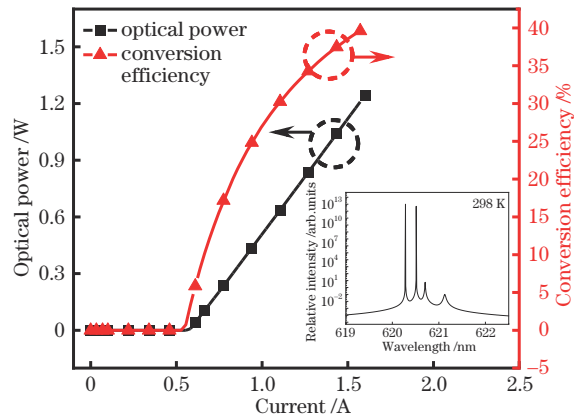


图 7 Ge/Si_xGe_{1-x} 衬底 620 nm 半导体激光器的输出特性

Fig. 7 Output characteristics of 620 nm semiconductor laser on Ge/Si_xGe_{1-x} substrate

初步设计的结构中 GaInP 材料的 Ga 摩尔分数为 0.57,在图 2 中提取相应的系数 A、B 后计算出 Ga_{0.57}In_{0.43}P 的带隙在 278~338 K 温度范围内的变化曲线。对初步设计的结构进行相应的变温仿真,在温度分别为 278、288、298、318、328、338 K 时根据激光波长推算出 Ga_{0.57}In_{0.43}P 量子阱在不同温度下的带隙如图 8 所示。可以发现,在 278~338 K 温度范围内,根

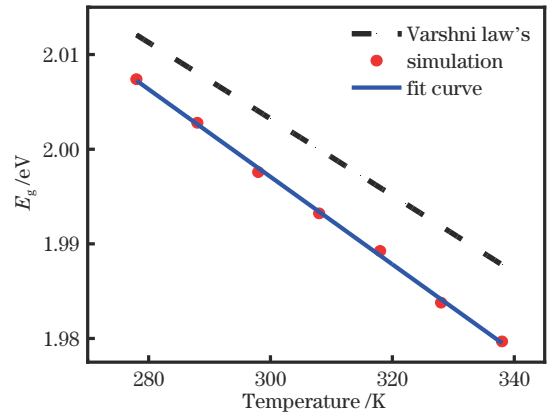


图 8 Ga_{0.57}In_{0.43}P 带隙随温度的变化曲线

Fig. 8 Variation curve of Ga_{0.57}In_{0.43}P band gap with temperature

据 Varshni 公式计算的 GaInP 材料带隙变化率约为 0.41 meV/K,拟合得到的变化率为 0.46 meV/K,仿真的 Ga_{0.57}In_{0.43}P 量子阱带隙随温度的变化趋势与 Varshni 公式计算的变化趋势基本一致。

3.3 GaInP 量子阱组分的优化

为了确定 GaInP 量子阱中 Ga 的摩尔分数,将 GaInP 量子阱的 Ga 摩尔分数分别设置为 0.55、0.56、0.57、0.58,通过调整量子阱的厚度^[21]使激光波长为 620 nm,得到四种不同组分 GaInP 的晶格常数分别为 0.5638、0.5634、0.5630、0.5626 nm。不同 GaInP 量子阱参数及相应结构的输出特性如表 4 所示。根据四种不同组分 GaInP 的晶格常数调整 SiGe 基体层中的 Si 摩尔分数,使 SiGe 层的晶格常数与 GaInP 量子阱层相同,并对波导层、限制层、缓冲层和势垒层的材料组分进行相应调整,使晶格常数与量子阱相同。

表 4 不同 GaInP 量子阱的参数及输出特性

Table 4 Parameters and output characteristics of different GaInP quantum wells

Structure	1	2	3	4
Mole fraction of Ga	0.55	0.56	0.57	0.58
Lattice constant /nm	0.5638	0.5634	0.5630	0.5626
QW thickness /nm	4	5.2	7	10
Threshold current /A	0.77	0.67	0.58	0.62
Conversion efficiency /%	28.1	34.4	38.3	37.3

对四种结构进行了仿真分析,得到不同激光器的电流-电压(I-V)曲线以及电流-功率(I-P)曲线如图 9 所示。可以发现:结构 1 的阈值电流为 0.77 A,转换效率为 28.1%;结构 2 的阈值电流为 0.67 A,转换效率为 34.4%;结构 3 的阈值电流为 0.58 A,转换效率达到了 38.3%;结构 4 的阈值电流为 0.62 A,转换效率为 37.3%。从输出特性来看,结构 3 在四种结构中有着较好的输出特性,因此量子阱采用的材料仍为 Ga 摩尔分数为 0.57 的 GaInP。

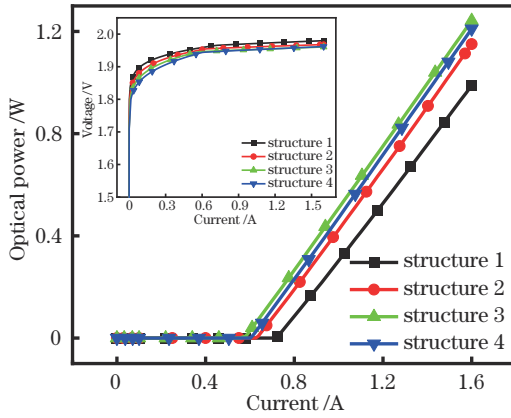


图 9 不同量子阱结构的输出特性

Fig. 9 Output characteristics of different quantum well structures

表 5 不同 QW 应变结构的仿真结果

Table 5 Simulation results for different QW strain structures

Structure	1	2	3	4	5
Mole fraction of Si	0.08	0.1	0.12	0.16	0.18
QW strain / %	0.16 (tensile)	0.09 (tensile)	0	0.16 (compressive)	0.23 (compressive)
QW thickness / nm	5.6	6.2	7	9.5	10
Peak gain / cm^{-1}	3127	3230	4035	3141	3149
Threshold current / A	0.68	0.64	0.58	0.61	0.65
Conversion efficiency / %	32.1	35.2	38.3	37.1	34.4

图 10(a)为五种结构的峰值增益与载流子浓度的关系。可以发现,当载流子浓度为 $8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 时,结构 3 的峰值增益可以达到 4035 cm^{-1} ,其余结构的峰值增益均小于结构 3。图 10(b)为五种结构的 I-P 曲线。可以发现:结构 1 的阈值电流为 0.68 A,转换效率为 32.1%;结构 2 的阈值电流为 0.64 A,转换效率为

3.4 不同 SiGe 基体层的输出特性

确定 GaInP 量子阱的 Ga 摩尔分数后,对 SiGe 基体层的 Si 摩尔分数进行优化。通过改变 SiGe 基体层中 Si 的摩尔分数调整晶格常数,并将除 Ge 衬底和量子阱层外其余各层材料的晶格常数均调整至与 SiGe 基体层一致,使 $\text{Ga}_{0.57}\text{In}_{0.43}\text{P}$ 量子阱产生不同的应变。表 5 为五种结构中 SiGe 基体层的 Si 摩尔分数,为使每种结构的激光波长均为 620 nm,使不同结构的量子阱厚度分别为 5.6、6.2、7.0、8.5、10.0 nm。可以发现:当 Si 的摩尔分数为 0.08 时,量子阱的张应变为 0.16%;当 Si 的摩尔分数为 0.1 时,量子阱的张应变为 0.09%;当 Si 的摩尔分数为 0.16 时,量子阱的压应变为 0.16%;当 Si 的摩尔分数为 0.18 时,量子阱的压应变为 0.23%。

35.2%;结构 3 的阈值电流为 0.58 A,转换效率为 38.3%;结构 4 的阈值电流为 0.61 A,转换效率为 37.1%;结构 5 的阈值电流为 0.65 A,转换效率为 34.4%。综上所述,结构 3 具有最高的增益、最低的阈值电流和最高的转换效率。这表明量子阱具有过大的张应变或压应变都会使器件的输出特性变差。

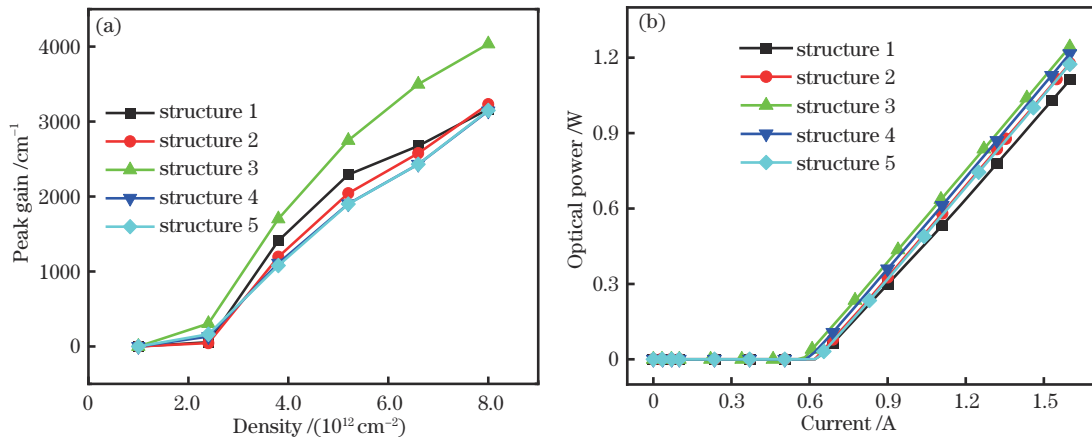


图 10 五种结构的峰值增益与 I-P 曲线。(a) 峰值增益;(b) I-P 曲线

Fig. 10 Peak gain and I-P curve for five structures. (a) Peak gain; (b) I-P curve

4 结 论

通过相关材料的参数计算设计了基于 Ge/Si_xGe_{1-x} 衬底的 620 nm 半导体激光器,通过改变 Si_xGe_{1-x} 基体层的 Si 摩尔分数调整晶格常数,用高 Ga 摩尔分数的

GaInP 材料作为量子阱实现了更短波长的红光激发。通过模拟软件对设计的结构进行了特性仿真,通过改变量子阱中 Ga 的摩尔分数和 SiGe 基体层中 Si 的摩尔分数进行对比分析,最终确定的结构用厚度为 7 nm 的 $\text{Ga}_{0.57}\text{In}_{0.43}\text{P}$ 作为量子阱材料。仿真结果表明,该结构的

激光波长在 620 nm 左右,输出功率可以达到 1.20 W, 阈值电流约为 0.58 A,转换效率可以达到 38.3%。

参 考 文 献

- [1] 陈良惠, 杨国文, 刘育衍. 半导体激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500001.
Chen L H, Yang G W, Liu Y X. Development of semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500001.
- [2] 朱振, 张新, 肖成峰, 等. 高可靠性瓦级 660 nm 半导体激光器研制[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0501002.
Zhu Z, Zhang X, Xiao C F, et al. Fabrication of highly reliable watt-level 660 nm semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0501002.
- [3] 尚林, 吴华, 王翔宇, 等. 无热损伤剂量的 620 nm 红光对骨髓间充质干细胞增殖的生物学效应[J]. 中国激光医学杂志, 2016, 25(3): 123-127, 171.
Shang L, Wu H, Wang X Y, et al. 620 nm red-light without thermal damage irradiation on proliferation of mesenchymal stem cells[J]. Chinese Journal of Laser Medicine & Surgery, 2016, 25(3): 123-127, 171.
- [4] 李昆朋, 许涛, 杜宇, 等. 波长 620 nm 红光促进前软骨干细胞向软骨细胞分化的实验研究[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2012, 34(3): 172-176.
Li K P, Xu T, Du Y, et al. Enhancing chondrogenic differentiation in precartilaginous stem cells with 620 nm red light[J]. Chinese Journal of Physical Medicine and Rehabilitation, 2012, 34(3): 172-176.
- [5] 赵书涛, 武晓东, 王策, 等. 流式细胞仪的原理、应用及最新进展[J]. 现代生物医学进展, 2011, 11(22): 4378-4381.
Zhao S T, Wu X D, Wang C, et al. Principles, applications and latest developments of flow cytometer [J]. Progress in Modern Biomedicine, 2011, 11(22): 4378-4381.
- [6] 孟雪, 宁永强, 张建伟, 等. 面向激光显示的红光半导体激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 180001.
Meng X, Ning Y Q, Zhang J W, et al. Research progress of red semiconductor laser diodes for laser display[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 180001.
- [7] Buckley E. Laser wavelength choices for pico-projector applications[J]. Journal of Display Technology, 2011, 7(7): 402-406.
- [8] Castellano-Hernández E, Kalusniak S, Metz P W, et al. Diode-pumped laser operation of $Tb^{3+} : LiLuF_4$ in the green and yellow spectral range[J]. Laser & Photonics Reviews, 2020, 14(2): 1900229.
- [9] Mao T W, Duan Y M, Chen S M, et al. Yellow and orange light selectable output generated by Nd: YAP/YVO₄/LBO Raman laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(13): 1112-1115.
- [10] Kapoor V, Karpov V, Linton C, et al. Solid state yellow and orange lasers for flow cytometry[J]. Cytometry. Part A: the Journal of the International Society for Analytical Cytology, 2008, 73(6): 570-577.
- [11] 张玉霞, 于浩海, 张怀金, 等. 蓝光激光二极管抽运 $Pr^{3+} : GdLiF_4$ 固体红光激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(s1): s102010.
Zhang Y X, Yu H H, Zhang H J, et al. Blue laser-diode pumped solid-state red laser of $Pr^{3+} : GdLiF_4$ [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(s1): s102010.
- [12] 于永吉, 金光勇, 王超, 等. 高功率连续激光二极管阵列侧面抽运 Nd: YAP/LBO 红光激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(s1): 68-72.
Yu Y J, Jin G Y, Wang C, et al. High-Power continuous-wave laser diode array side-pumped Nd: YAP/LBO red laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(s1): 68-72.
- [13] Kaspari C, Zorn M, Weyers M, et al. Growth parameter optimization of the GaInP/AlGaInP active zone of 635 nm red laser diodes[J]. Journal of Crystal Growth, 2008, 310(23): 5175-5177.
- [14] Shimada N, Ohno A, Abe S, et al. High-power 625-nm AlGaInP laser diode[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(6): 1723-1726.
- [15] Bao L, Grimshaw M, DeVito M, et al. High power diode lasers emitting from 639 nm to 690 nm[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8965: 896512.
- [16] 朱振, 肖成峰, 夏伟, 等. 大功率 640 nm 红光半导体激光器的设计及制备[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 081403.
Zhu Z, Xiao C F, Xia W, et al. Design and fabrication of high power 640 nm red laser diodes[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 081403.
- [17] Nikkinen J, Härkönen A, Guina M. Sub-50 ps pulses at 620 nm obtained from frequency doubled 1240 nm diamond Raman laser[J]. Optics Express, 2017, 25(24): 30365.
- [18] Sumpf B, Fricke J, Ressel P, et al. 100, 000 h estimated lifetime of 100- μ m-stripe width 650 nm broad area lasers at an output power of 1.2 W[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8277: 237-244.
- [19] Vurgaftman I, Meyer J R, Ram-Mohan L R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 89(11): 5815-5875.
- [20] Varshni Y P. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors[J]. Physica, 1967, 34(1): 149-154.
- [21] 宁永强, 陈泳屹, 张俊, 等. 大功率半导体激光器发展及相关技术概述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114001.
Ning Y Q, Chen Y Y, Zhang J, et al. Brief review of development and techniques for high power semiconductor lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114001.