

垂直腔面发射激光器与异质结双极型晶体管集成结构的设计和模拟

周广正 李颖 兰天 代京京 王聪聪 王智勇[†]

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

(2019年4月11日收到; 2019年6月15日收到修改稿)

垂直腔面发射激光器 (vertical cavity surface emitting lasers, VCSELs) 和异质结双极型晶体管 (heterojunction bipolar transistor, HBT) 都是纵向电流器件, 可以集成在同一外延片上, 通过 HBT 基极电流调制 VCSELs 的输出光功率. 本文设计了一种 VCSELs 与 HBT 集成结构, 该结构包括 VCSELs 和 PNP InGaP/GaAs HBT, 为直接串联结构, 并利用 PICS3D 软件模拟了该集成结构的电光特性. 为了模拟能够顺利进行, 在模型中加入了过渡集电极. 首先将 HBT 导通, 电流由发射极流向过渡集电极, 然后增大过渡集电极与 N 型电极之间的电压, 使 VCSELs 导通且把过渡集电极的电流降为零. 由于过渡集电极的电流为零, 在实际结构中可以将其移除. 模拟结果表明, 当电流增益系数为 400 时, 基极电流对输出光功率的最大调制率达到 280 mW/mA. 本文所设计的集成结构及其模拟方法对光电集成器件 (opto-electronic integrated circuit, OEIC) 具有一定的指导作用.

关键词: 垂直腔面发射激光器, 异质结双极型晶体管, 光电集成

PACS: 42.55.Px, 42.55.Sa, 73.21.Fg

DOI: 10.7498/aps.68.20190529

1 引言

垂直腔面发射激光器 (VCSELs) 以其阈值电流低、调制带宽大、易于二维集成、易与光纤耦合和成本低等优点, 广泛应用于短距离光通行和光互联领域^[1-3]. 异质结双极型晶体管 (HBT) 具有功率密度高、增益高、带宽大、相位噪声低和线性度好等特点, 是 MMIC 领域重要的三端器件之一^[4,5]. 因为 InGaP/GaAs HBT 在制备过程中可以利用 InGaP 与 GaAs 的高选择刻蚀性^[6], 提高产量和均匀性, 因此正逐步取代传统的 AlGaAs/GaAs HBT. 将 VCSELs 与 HBT 集成形成光开关集成阵列可应用于并行光处理^[7]. AT&T 贝尔实验室^[8]首次利用分子束外延 (MBE) 二次外延制备了 GaAs 量子阱激光器与 HBT 集成结构, 其输出光功率对基极

电流的调制率为 1.2 mW/mA. Zhou 等^[7]设计和制备了 GaAs/AlGaAs HBT 和 VCSELs 集成的光电开关. 光电开关的电流增益为 500—700, 在光输出功率为 0.4 和 1.2 mW 时的功率消耗分别为 27 和 55 mW, 直流偏置下的光功率-电流转换效率为 150 W/A. 将 HBT 集成在 VCSELs 中, 量子阱置于 HBT 的基区, 基极电流提供空穴载流子, 发射极电流提供电子载流子, 可以形成晶体管垂直腔面发射激光器 (transistor VCSELs, T-VCSELs)^[9-11]. Shi 等^[10]设计的 T-VCSELs 包括一个 Npn InGaP/GaAs HBT 结构和一个 6 μm 的用来限制电流和光场的氧化孔径. 当基极电流为 7 mA 时, 集电极电流约为 53 mA, 输出光功率超过 1 mW. 从数值模拟中提取的参数输入到解析模型中, 得到的大信号调制可达到 40 Gbps. 目前 VCSELs 与 HBT 集成主要有两种形式: 1) VCSELs 和 HBT 利用一次

[†] 通信作者. E-mail: zywang_bjut@126.com

外延或二次外延生长在同一外延片上,但相互独立,利用金线相连.此方法虽然保留了HBT高电流增益特性,但是外延和芯片工艺复杂;2) VCSELs的量子阱置于HBT的基区,形成T-VCSEL结构.因空穴是由基极提供的,基极电流对输出光功率的调制率偏低.由于VCSELs和HBT都是纵向电流器件,本文设计和模拟了一种VCSELs与HBT集成结构,将VCSELs与HBT在外延结构上直接串联,用氧化层限制电流和光场,可以集成VCSELs和HBT的优点,降低工艺复杂性,提高基极电流对输出光功率的调制率.另一方面,传统的VCSEL是两端器件,调制信号直接驱动VCSEL工作,一般需要几毫安的驱动电流,高速驱动电路较为复杂[12-14].本文设计的VCSEL与HBT集成结构是三端器件,将直流偏置与交流调制分开,调制电流可降至10 μA量级,大大降低了驱动电路的功率放大需求和驱动电路的复杂性,并可采用共N型电极(对应HBT共发射极)工作[10,15],调制信号加在基极电极,控制VCSEL光开关.通过成熟的商业软件模拟可以大大缩短研发周期[16,17],但是利用PICS3D模拟VCSEL与HBT集成结构过程中,会出现模型错误提示及计算不能自洽等问题,为此本文提出加入过渡集电极,使得模拟过程能够顺利进行.

2 理论模型

图1为VCSELs与HBT集成结构示意图,

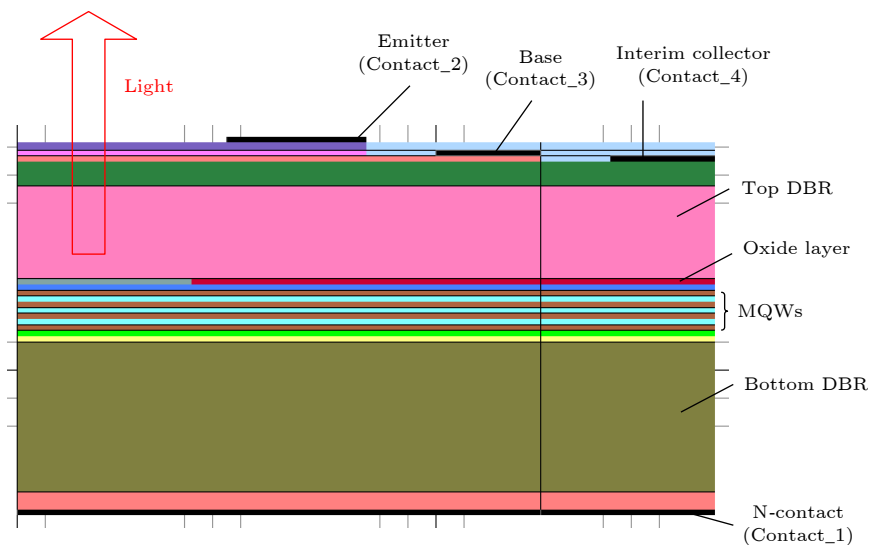


图1 VCSELs与HBT集成结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of integration of VCSELs and HBT.

VCSELs部分包括N型电极,34对Al_{0.12}GaAs/Al_{0.90}GaAs下DBR,3对In_{0.06}GaAs/Al_{0.30}GaAs量子阱有源区,20 nm Al_{0.98}GaAs氧化层,21对Al_{0.12}GaAs/Al_{0.90}GaAs上DBR;HBT部分包括P型InGaP发射区,重掺杂N型GaAs基区和P型GaAs集电区.过渡集电极的设置是为了PICS3D软件模拟能够顺利进行,N型电极、发射极、基极和过渡集电极分别记作电极1、电极2、电极3和电极4.

HBT的电流增益可表示为[5]

$$\beta = \frac{D_B N_E L_E}{D_E N_B W_B} \exp\left(\frac{\Delta E_g}{k_B T}\right) \left(1 - \frac{W_B^2}{L_B^2}\right), \quad (1)$$

其中 D_B 和 D_E 分别为基极和发射极少数载流子扩散系数, N_E 和 N_B 分别为发射区和基区的杂质浓度, L_E 为发射区少数载流子扩散长度, W_B 为基区宽度, ΔE_g 为带隙差, k_B 为玻尔兹曼常数, L_B 为基区少数载流子扩散长度.

对于VCSELs器件,耗散功率可表示为[18]

$$P_D = I_{th}^2 \cdot R_s + I \cdot V_d, \quad (2)$$

其中 I_{th} 为阈值电流, R_s 为串联电阻, V_d 为开启电压.

温升可表示为

$$\Delta T = P_D \cdot Z_T, \quad (3)$$

其中 Z_T 为等效热阻.

阈值电流和微分效率随温度的变化可表示为

$$I_{th} = I_{th0} e^{T/T_0}, \quad (4)$$

$$\eta_d = \eta_{d0} e^{-T/T_\eta}. \quad (5)$$

输出功率可表示为

$$P_0 = \eta_d \frac{h\nu}{q} (I - I_{th}). \quad (6)$$

所以对 VCSELs 与 HBT 集成结构, 输出功率可表示为

$$P_0 = \eta_d \frac{h\nu}{q} \left\{ \frac{D_B N_E L_E}{D_E N_B W_B} \exp\left(\frac{\Delta E_g}{k_B T}\right) \left[1 - \frac{W_B^2}{L_B^2}\right] I_B - I_{th} \right\}. \quad (7)$$

由 (7) 式可以看出, 基极电流对输出光功率的调制率与 HBT 的电流增益成正比, 同时由于阈值电流和微分效率随温度变化, 使得调制率随基极电流的增大而减小. 集成结构的调制响应传递函数可表示为 [5,19]

$$H(f) = \left| A \cdot \frac{\beta_0}{1 + jf\beta_0 r_e (C_{in} + C_{BC})} \times \frac{f_r^2}{f_r^2 - f^2 + j[f/(2\pi)]\gamma} \times \frac{1}{1 + j(f/f_p)} \right|^2, \quad (8)$$

其中 β_0 为 HBT 的直流电流增益, r_e 为发射极电阻, C_{in} 为输入电容, C_{BC} 为基极和集电极间电容, f_r 为弛豫振荡频率, γ 为阻尼系数, f_p 为寄生极点频率. 等式右边第 1 项为 HBT 的交流增益, 第 2 项为 VCSEL 的本征响应, 第 3 项表达了 VCSEL 的寄生效应.

3 模拟结果

首先利用 TFCa1 软件模拟了加入 HBT 对上 DBR 反射率的影响 (图 2). 设置光从量子阱有源区入射, 从上表面出射, 在激射波长 850 nm 处上 DBR 的反射率为 99.72%, 加入 HBT 会对 DBR 最上层的相位产生影响 [19,20], 加入 HBT 后反射率为 99.57%, 所以加入 HBT 对上 DBR 的在激射波长处的反射率影响较小. 在小于 850 nm 时反射率下降较多, 因此实际结构中可以适当增大腔模波长, 避免反射率下降而影响器件性能.

图 3 为平衡态时的能带, 为了简化模型, 采用等效材料代替整个 DBR, 所以 DBR 处的能带为水平直线. PICS3D 软件模拟过程中需要满足一些自洽条件, 若直接在基极或 N 型电极加电压, 电流不能直接由发射极流到 N 型电极, 因此模拟过程

中在旁边加入一个过渡集电极. 首先, 在过渡集电极和基极加电压让 HBT 导通, 电流从发射极流向过渡集电极, 且过渡集电极与 N 型电极的电压在 VCSELs 阈值电压以下. 图 4(a) 显示了 HBT 导通时集成结构的能带图, E-B 结正偏导通, 空穴在基区的扩散长度远大于基区厚度, E-B 结注入基区的空穴通过扩散进入 B-C 结, 由于 B-C 反偏, 空穴很快被扫入集电区, 过渡集电极与 N 型电极所加电压小于 P-N 结开启电压, VCSEL 不能导通, 因此电流流向过渡集电极. 图 4(b) 显示了 HBT 导通时的集成结构内部电流分布, 从图 4(b) 可以看出电流由发射极经过基区、集电区和 P-DBR 流向过渡集电极. 电流会经过 P-DBR 是因为 P-DBR 掺杂较高, 电阻率较低.

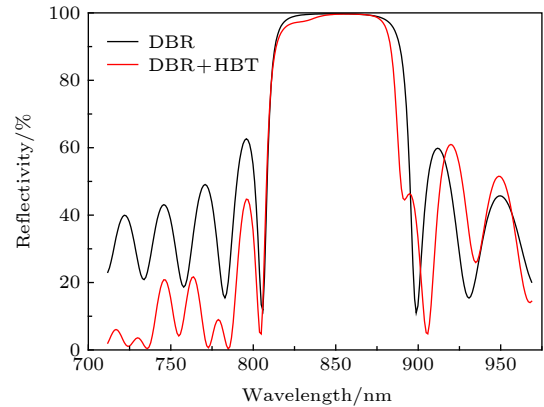


图 2 不同结构 DBR 反射率
Fig. 2. Reflectivity of different DBRs.

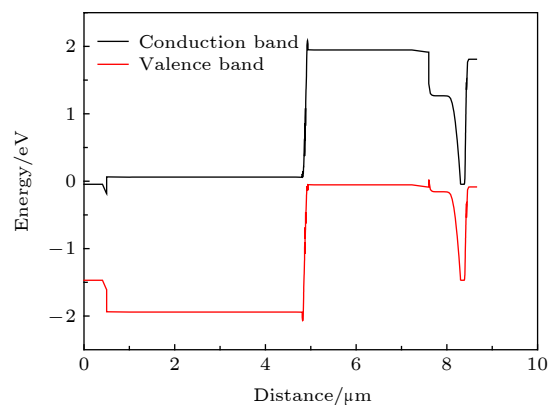


图 3 平衡态时集成结构的能带
Fig. 3. Band diagram of integrated structure at equilibrium.

逐渐增大过渡集电极和 N 型电极之间的电压, 同时开启光子密度与漂移-扩散耦合模型, 量子阱产生光增益, VCSELs 达到激射条件. 图 5(a) 为集

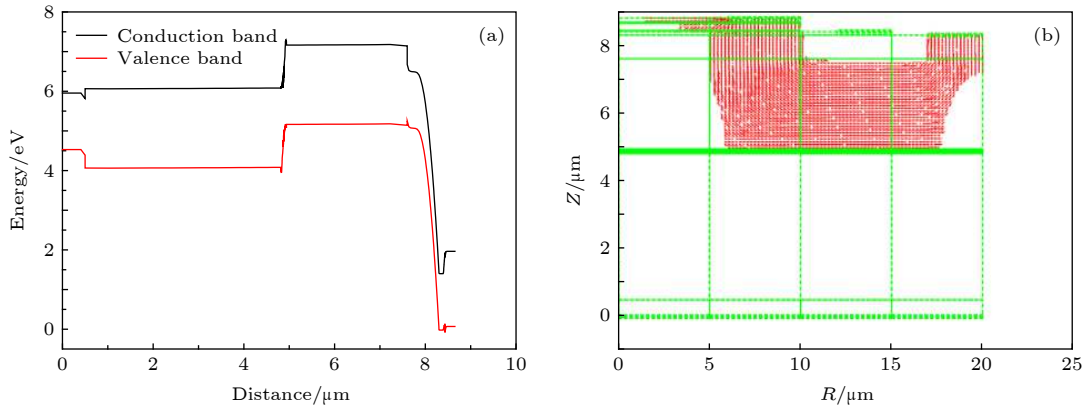


图 4 HBT 处于放大状态时的 (a) 能带图, (b) 集成结构内部电流分布

Fig. 4. Integrated structure when HBT is in an amplified state: (a) Band diagram; (b) current distribution.

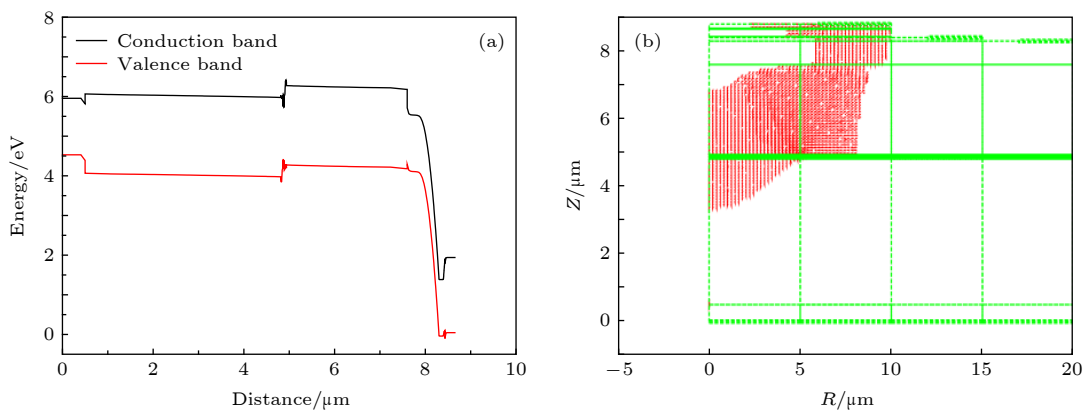


图 5 HBT 和 VCSEL 同时导通时的集成结构 (a) 能带图; (b) 内部电流分布

Fig. 5. Integrated structure when both HBT and VCSELs were conducted: (a) Band diagram; (b) current distribution.

成结构导通时的能带结构, 同样 E-B 结正偏, B-C 结反偏, 过渡集电极与 N 型电极所加电压大于 VCSEL 的开启电压. 图 5(b) 显示了导通时集成结构内部的电流分布, 从图 5(b) 可以看出, 电流从发射极经基区、集电区和 VCSEL 流向 N 型电极, 氧化孔径对电流有明显的限制作用. 图 6 显示了过渡集电极和 N 型电极电流随过渡集电极电压的变化 ($V_1 = -6$ V). 随着过渡集电极电压增大, 其电流减小, N 型电极电流增大, 在 $V_4 = -4.1$ V, 即过渡集电极与 N 型电极的电压约 1.9 V 时, 过渡集电极电流为零, 此时可以移除过渡集电极, 而不影响集成结构的电光特性.

保持过渡集电极电流为零, 进一步模拟了 N 型电极电流和输出光功率随电压的变化. 图 7 为不同基极电流下 N 型电极的电流随电压的变化, 电流增益约为 400. 当基极电流为 22 μ A 时, N 型电极电流约为 9 mA. 图 8 为不同基极电流下输出光功率随 N 型电极所加电压的变化, 当基极电流

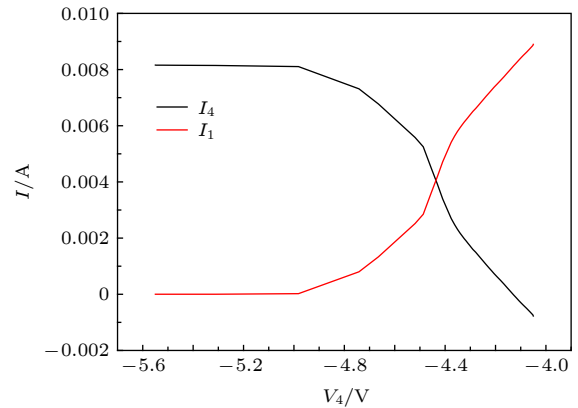


图 6 过渡集电极和 N 型电极电流随过渡集电极电压的变化

Fig. 6. Relations of interim collector current with voltage of interim collector.

为 22 μ A 时, 输出光功率超过 4 mW, 基极电流对输出光功率的最大调制率达 280 mW/mA. 模型中加入了热模型, 热源包括焦耳热、光吸收、非辐射复合和 Thomson 热. 图 9(a) 显示了基极电流为 10 μ A

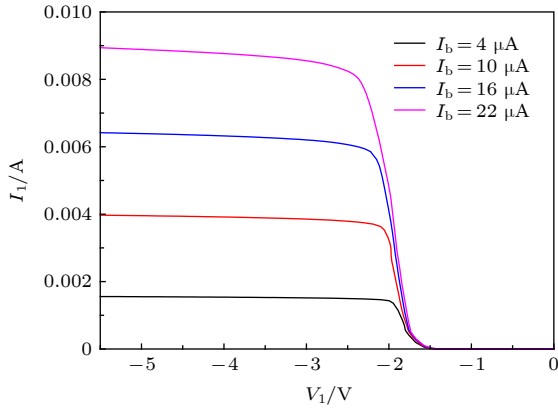


图 7 不同基极电流下 N 型电极电流随电压的变化
Fig. 7. I_1 varying with V_1 at different base currents.

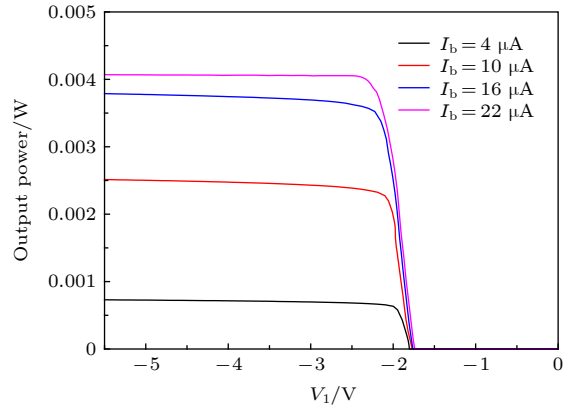


图 8 不同基极电流下输出光功率随 N 型电极电压的变化
Fig. 8. Output power varying with V_1 at different base currents.

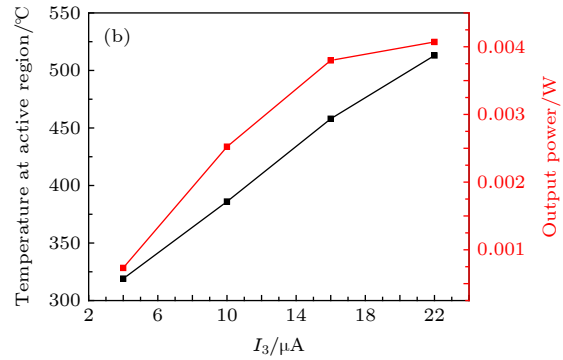
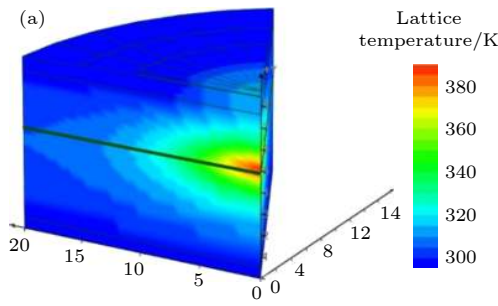


图 9 (a) 基极电流为 $10 \mu\text{A}$ 时器件内部温度分布; (b) 有源区温度和输出光功率随基极电流的变化 ($V_1 = -6 \text{ V}$)

Fig. 9. (a) Temperature distribution of the device at a $10 \mu\text{A}$ base current; (b) temperature in active region and output power varying with the base current ($V_1 = -6 \text{ V}$).

时器件内部的温度分布, 量子阱有源区处最高温度达 $386 \text{ }^\circ\text{C}$. 图 9(b) 显示了有源区最高温度和输出光功率随基极电流的变化. 从图 9(b) 可以看出, 随着基极电流的增大, 有源区最高温度增加, 输出光功率先增大后趋于饱和, 一方面随着温度的升高量子阱对载流子的限制作用减小, 另一方面增益-腔

模失配增大, 阈值电流增大, 微分效率减小, 导致输出光功率降低.

本文利用 PICS3D 模拟了集成结构的交流光增益特性. 图 10 显示了基极电流为 $10 \mu\text{A}$ 时交流光增益的模拟结果, 从图 10 可以看出其截至频率超过 1 GHz . 单独模拟 VCSEL 得到其调制响应的 -3 dB 带宽为 25 GHz , 由 (8) 式可知加入 HBT 限制了集成结构的调制速率, 需进一步优化 HBT 结构参数和几何尺寸来提高调制速率.

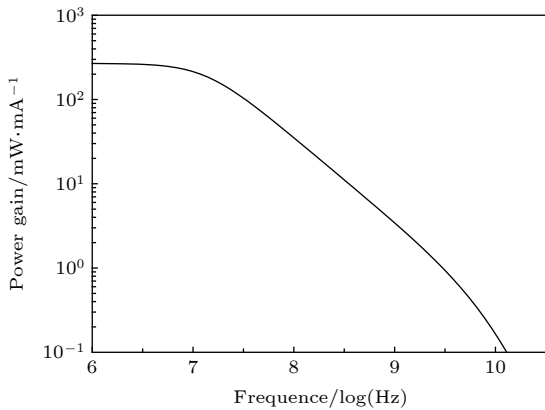


图 10 集成结构的交流光增益

Fig. 10. The ac power gain of integration structure.

4 结 论

本文设计和建立了 VCSELs 与 InGaP/GaAs HBT 集成结构模型, 利用 PICS3D 软件模拟了集成结构的光电特性, 模拟过程中加入过渡集电极, 通过先开启 HBT, 再改变过渡集电极与 N 型电极之间的电压使 VCSELs 导通, 之后保持过渡集电极电流为零. 模拟结果表明, 集成结构的电流增益

达到 400, 基极电流对输出光功率的最大调制率达到 280 mW/mA. 当基极电流为 22 μ A 时, 输出光功率超过 4 mW. 由交流光增益的模拟结果可知截至频率超过 1 GHz. 本文建立的集成结构和模拟方法还可用于 LED, LD 和 DFB 等发光器件与 HBT 的集成, 对光电集成具有一定的指导作用.

参考文献

- [1] Zhang X, Zhang Y, Zhang J W, Zhang J, Zhong C Y, Huang Y W, Ning Y Q, Gu S H, Wang L J 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 134204 (in Chinese) [张星, 张奕, 张建伟, 张建, 钟础宇, 黄佑文, 宁永强, 顾思洪, 王立军 2016 物理学报 **65** 134204]
- [2] Hao Y Q, Feng Y, Wang F, Yan C L, Zhao Y J, Wang X H, Wang Y X, Jiang H L, Gao X, Bao B X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 064201 (in Chinese) [郝永芹, 冯源, 王菲, 晏长岭, 赵英杰, 王晓华, 王玉霞, 姜会林, 高欣, 薄报学 2011 物理学报 **60** 064201]
- [3] Peng H L, Han Q, Yang X H, Niu Z C 2006 *Acta Phys. Sin.* **56** 863 (in Chinese) [彭红玲, 韩勤, 杨晓红, 牛智川 2006 物理学报 **56** 863]
- [4] Yang W, Liu X C, Zhu M, Wang R M, Shen H J 2006 *Chin. J. Semicond.* **27** 1603 (in Chinese) [杨威, 刘训春, 朱旻, 王润梅, 申华军 2006 半导体学报 **27** 1603]
- [5] Mishra U K, Singh J 2008 *Semiconductor Device Physics and Design* (Dordrecht: Springer) p246
- [6] Liu X, Yuan J S, Liou J J 2008 *Microelectron. Reliab.* **48** 1212
- [7] Zhou P, Cheng J L, Zolper J C, Lear K L, Chalmers S A, Vawter G A, Leibenguth R E, Adams A C 1993 *IEEE Photonic. Tech. L.* **5** 1035
- [8] Berger P R, Dutta N K, Sivco D L, Cho A Y 1991 *Appl. Phys. Lett.* **59** 2826
- [9] Feng M, Qiu J Y, Holonyak N 2018 *IEEE J. Quantum Elect.* **54** 2000514
- [10] Shi W, Faraji B, Greenberg M, Berggren J, Xiang Y, Hammar M, Lestrade M, Li Z Q, Li Z M S, Chrostowski L 2011 *Opt. Quant. Electron.* **42** 659
- [11] Xiang Y, Hedlund C R, Yu X, Yang C, Zabel T, Hammar M, Akram M N 2015 *J. Opt. Soc. Am.* **23** 15680
- [12] Kuchta D M, Rylyakov A V, Doany F E, Schow C L, Proesel J, Baks C W, Westbergh P, Gustavsson J S, Larsson A 2015 *IEEE Photonic Tech. L.* **27** 577
- [13] Kishi T, Nagatani M, Kanazawa S, Kobayashi W, Nosaka H 2017 *J. Lightwave Technol.* **35** 75
- [14] Rylyakov A V, Larsson A, Baks C W, Schow C L, Kuchta D M, Gustavsson J S, Proesel J E, Westbergh P 2015 *J. Lightwave Technol.* **33** 802
- [15] Han W T, Feng M, Holonyak N, Han W T, Holonyak N 2013 *Proc. IEEE* **101** 2271
- [16] Dems M, Beling P, Gębski M, Piskorski L, Czyszanowski T 2015 *Proc. SPIE* **9381** 98310K-1
- [17] Hui L, Jia X 2018 *Opt. Commun.* **415** 1
- [18] Coldren L A, Corzine S W, Milan L M 2012 *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* (2nd Ed.) (Hoboken: John Wiley & Sons) p80
- [19] Westbergh P, Gustavsson J S, Kögel B, Haglund A, Larsson A 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **17** 1603
- [20] Larisch G, Moser P, Lott J A, Bimberg D 2016 *IEEE Photonic Technol. L.* **28** 2327

Design and simulation of integration of vertical cavity surface emitting lasers and heterojunction bipolar transistor

Zhou Guang-Zheng Li Ying Lan Tian Dai Jing-Jing
Wang Cong-Cong Wang Zhi-Yong[†]

(*Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

(Received 11 April 2019; revised manuscript received 15 June 2019)

Abstract

Vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) are widely used in the field of short-range optical communication and optical interconnection because of their advantages such as low threshold current, large modulation bandwidth, easy two-dimensional integration, easy coupling with optical fibers and low cost. The VCSELs and heterojunction bipolar transistor (HBT) are longitudinal current devices, so they can be well integrated on the same wafer, and the output light power can be modulated by the HBT base current. Integration of VCSELs and HBT are designed in this paper. The VCSELs and PNP InGaP/GaAs HBT form a direct series structure. The reflectivity of DBR is 99.72% at a resonant wavelength of 850 nm and 99.57% after adding HBT separately. Therefore, the addition of HBT has little influence on the reflectivity of DBR at the resonant wavelength. The electro-optical characteristics of the integrated structure are simulated by using PICS3D software. An interim collector is added into the model in order to ensure that the simulation can be carried out smoothly. Firstly, HBT is conducted and the current flows from the emitter to the interim collector. Then, the voltage across the interim collector and the N-type electrode is increased to make VCSELs conducted and the current of the transition collector drop to zero. The interim collector can be removed from the actual structure because the current is zero. The simulation results show that the current gain coefficient is 400, and the maximum modulation rate of the base current to the output light power rises up to 280 mW/mA. The maximum temperature in the active region increases with the base current increasing, and the output light power first increases and then tends to be saturated. The ac optical gain characteristics of the integrated structure is simulated by PICS3D, and the simulation result shows that cutoff frequency exceeds 1 GHz. The addition of HBT limits the modulation rate of the integrated structure, and further optimization of HBT structure parameters and geometric dimension are needed to improve the modulation rate. The integrated structure and simulation method established in this paper can also be used to integrate LED, LD, DFB or other luminescent devices with HBT.

Keywords: vertical cavity surface emitting lasers, heterojunction bipolar transistor, opto-electronic integrated circuits

PACS: 42.55.Px, 42.55.Sa, 73.21.Fg

DOI: 10.7498/aps.68.20190529

[†] Corresponding author. E-mail: zywang_bjut@126.com