

DOI:10.16136/j.joel.2022.11.0410

基于紫外光刻的双轴张应变 Ge/SiGe 多量子阱电吸收调制器

黄 强^{1,2}, 高建峰¹, 黄楚坤¹, 江佩璘¹, 孙军强^{1*}, 余长亮³

(1. 华中科技大学 武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074; 2. 邵阳学院 电气工程学院 多电源地区电网运行与控制湖南省重点实验室, 湖南 邵阳 422000; 3. 武汉飞思灵微电子有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要:采用紫外光刻工艺 (ultraviolet lithography technique, UVL), 在互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 兼容的硅基平台上制作了基于悬空微桥结构在 Ge/SiGe 多量子阱材料中引入双轴张应变的低偏振相关电吸收调制器。利用拉曼光谱测试了器件引入双轴张应变的大小, 并对器件在横电 (transverse electric, TE) 偏振和横磁 (transverse magnetic, TM) 偏振下的光电流响应、调制消光比和低频响应等性能进行了测试。器件的低偏振相关消光比在 0 V/4 V 工作电压下可达 5.8 dB, 3 dB 调制带宽在 4 V 反向偏置电压时为 8.3 GHz。与电子束光刻工艺 (electron beam lithography technique, EBL) 相比, 采用 UVL 制作的器件在调制消光比、低频响应带宽等性能上略差一点, 但具有曝光时间短、成本低和可大批量生产等优势, 应用前景广阔。

关键词:紫外光刻工艺 (UVL); Ge/SiGe 多量子阱; 双轴张应变; 低偏振相关; 电吸收调制器

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)11-1121-06

Biaxially tensile-strained Ge/SiGe multiple quantum wells electro-absorption modulator based on ultraviolet lithography

HUANG Qiang^{1,2}, GAO Jianfeng¹, HUANG Chukun¹, JIANG Peilin¹, SUN Junqiang^{1*}, YU Changliang³

(1. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Grids Operation and Control on Multi-Power Sources Area, School of Electrical Engineering, Shaoyang University, Shaoyang, Hunan 422000, China; 3. Wuhan Fisilink Microelectronics Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: A low polarization-dependent Ge/SiGe multiple quantum wells electro-absorption modulator by introducing biaxial tensile strain through suspended microbridge structure is fabricated on complementary-metal-oxide-semiconductor (CMOS) compatible silicon platform using ultraviolet lithography technique (UVL). The biaxial tensile strain of the fabricated device is measured through Raman spectroscopy, and the photocurrent response, modulation extinction ratio and high frequency response of the device are tested under both of transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) polarization. The device presents a low polarization-dependent extinction ratio of 5.8 dB under 0 V/4 V operation, together with a 3 dB modulation bandwidth of 8.3 GHz at 4 V reverse bias voltages. Compared with electron beam lithography technique (EBL), although the device fabricated through UVL performs a little worse in modulation extinction ratio and high frequency response bandwidth, it has the advantages of short exposure time, low cost and enabling mass production, which has broad application prospects.

Key words: ultraviolet lithography technique (UVL); Ge/SiGe multiple quantum wells; biaxial tensile strain; low polarization dependence; electro-absorption modulator

* E-mail: jqsun@hust.edu.cn

收稿日期: 2022-05-30 修订日期: 2022-08-29

基金项目: 湖北省重点研发计划项目 (2021BAA002) 资助项目

1 引 言

近些年来,Ⅳ族半导体材料备受瞩目,因为它们有望在互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)兼容的硅基单片集成平台上实现所有有源器件,包括激光器^[1-3]、调制器^[4,5]和光电探测器^[6-8]。对于调制器,自从2005年首次在室温下观测到 Ge/SiGe 多量子阱的量子限制斯塔克效应(quantum-confined Stark effect, QCSE)后^[9],即 Ge/SiGe 多量子阱的吸收带边在施加电场的作用下发生红移^[10], Ge/SiGe 多量子阱电吸收调制器便获得了科研人员的广泛关注。而且, Ge/SiGe 多量子阱电吸收调制器在结构紧凑性^[11]、低驱动电压^[12]、低功耗和高速率等^[5]方面都展现出独特的优势。

2012年,法国巴黎第十一大学 Papichaya Chaisakul 课题组^[5]设计并制作了波导结构式的 Ge/SiGe 多量子阱电吸收调制器,在4 V电压时吸收边波长从0 V的1420 nm移动到1432 nm,并且在3 V/5 V工作电压下,该器件在1442 nm波长处的消光比达到10 dB。2013年,斯坦福大学 DWARDS 等^[13]通过应变设计的方法将 SiGe 合金缓冲层的厚度减小到320 nm,当偏置电压为2 V且电压摆动为1 V时,在1550 nm波长处实现大于5 dB的吸收对比度。2014年,英国格拉斯哥大学 DUMAS 等^[12]实验验证了较宽的量子阱对应的吸收边波长更长,在2 V/3 V工作电压下,实现工作波长覆盖整个C波段,其中在1550 nm波长处产生3 dB的吸收对比度。然而,由于量子阱的量子限制作用只在一个空间方向上存在,这种不对称的空间限制导致量子阱器件具有偏振相关性^[14]。Ge/SiGe 多量子阱的偏振相关性已经从理论上得到了研究分析^[15],并且在实验上也得到了验证^[16]。这种偏振相关性导致 Ge/SiGe 多量子阱电吸收光调制器对于不同偏振态的电吸收调制存在差异,极大地限制了其实用性。因此,消除其偏振相关性成为 Ge/SiGe 多量子阱电吸收光调制器的一个研究热点。

华中科技大学孙军强课题组从仿真到实验的研究表明^[17-19],通过设计悬空微桥结构在 Ge/SiGe 多量子阱材料中引入适当的双轴张应变,能够减小 Ge/SiGe 多量子阱横电(transverse electric, TE)偏振和横磁(transverse magnetic, TM)偏振的基态重空穴与电子之间跃迁(e1-HH1)特性的差异,使 TE 偏振和 TM 偏振的吸收边重合,从而实现偏振相关性的削弱。此外,双轴张应变也能够使 Ge/SiGe 多量子阱的吸收带边红移,从而对

器件的工作波长进行调控,可在波长为1550 nm处实现电吸收强度调制。由于使用高精度的电子束光刻工艺(electron beam lithography technique, EBL)制作器件会导致较长的曝光时间和较高的成本,不利于大批量制作,而目前大批量生产制造均使用紫外光刻工艺(ultraviolet lithography technique, UVL),具有曝光时间短、成本低等优点。因此,本文使用 UVL 代替 EBL 来制作低偏振相关 Ge/SiGe 多量子阱电吸收调制器,然后对器件的光电流响应、调制消光比和调制带宽等性能进行表征和测试,并与 EBL 制作的器件进行比较。

2 器件设计

本文设计的基于悬空微桥双轴张应变的 Ge/SiGe 多量子阱电吸收光调制器模型的横截面和俯视图分别如图1(a)和图1(b)所示。整个器件从硅衬底自下而上外延生长300 nm厚的p型 Si_{0.15}Ge_{0.85}缓冲层、40 nm厚的 Si_{0.15}Ge_{0.85}隔离层、10个周期的10 nm/15 nm Ge/Si_{0.18}Ge_{0.82}多量子阱层、40 nm厚的 Si_{0.15}Ge_{0.85}隔离层和100 nm厚的n型 Si_{0.15}Ge_{0.85}帽层,并且在外延生长的同时中进行原位掺杂,其中p型层和n型层的掺杂浓度分别为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 和 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。接着,在波导结构制作完成之后,继续生长200 nm/100 nm Si₃N₄/SiO₂绝缘层,制作电极窗口,然后蒸镀上金属电极与p型层和n型层形成欧姆接触。最后,对微桥结构底部的硅衬底进行湿法腐蚀悬空,其中微桥长度为 $l=16 \mu\text{m}$ 和悬空区域总长度为 $L=400 \mu\text{m}$,微桥悬空后在 x 和 y 方向上引入双轴张应变 $(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy})/2$,并使用 COMSOL 软件仿真其应变分布^[17]。

在器件结构设计并仿真完成之后,采用 MJB4 型紫外曝光光刻机进行加工制作,其制作加工的器件如图2(a)~(d)所示,微桥和宽臂处的脊波导宽度分别为 $3.7 \mu\text{m}$ 和 $8.0 \mu\text{m}$,刻蚀深度为650 nm。由于采用透镜光纤与待测器件进行水平端面耦合,需要在宽臂处进行深刻蚀并解理来制作耦合端面。最终,在器件加工完成之后,通过拉曼光谱测试来测量器件不同区域双轴张应变的大小^[19]。拉曼光谱测试结果表明,空白区域处的双轴张应变为0.19%,这是由于 SiGe 合金的热膨胀系数大于 Si 衬底,在高温退火工艺后快速冷却导致残余热张应变的产生^[9,12,13];窄桥区域由于悬空微桥的作用而引入0.72%的双轴张应变,而宽臂区域由于应变弛豫作用导致张应变为0。悬空微桥引入的双轴张应变大小与底部硅衬

底的悬空区域大小有关,可以通过控制湿法腐蚀的时间来精确控制。

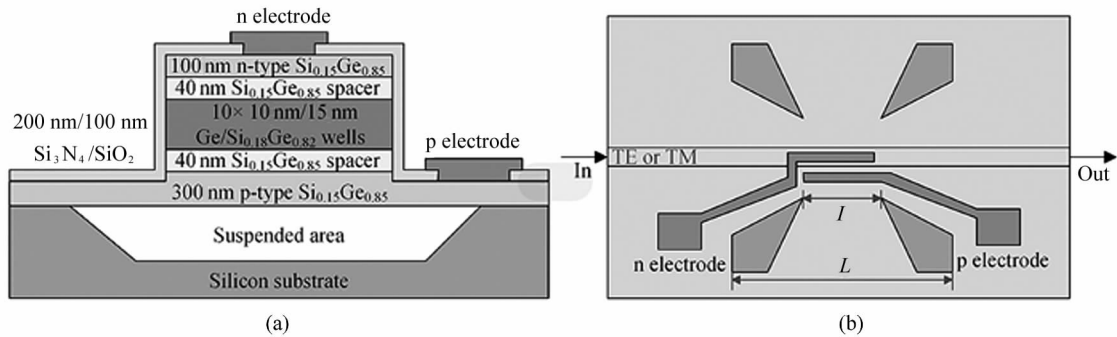


图 1 Ge/SiGe 多量子阱电吸收调制器示意图:(a) 横截面;(b) 俯视图
Fig. 1 Schematic diagram of Ge/SiGe multiple quantum wells electro-absorption modulator:
(a) Cross-sectional view; (b) Top view

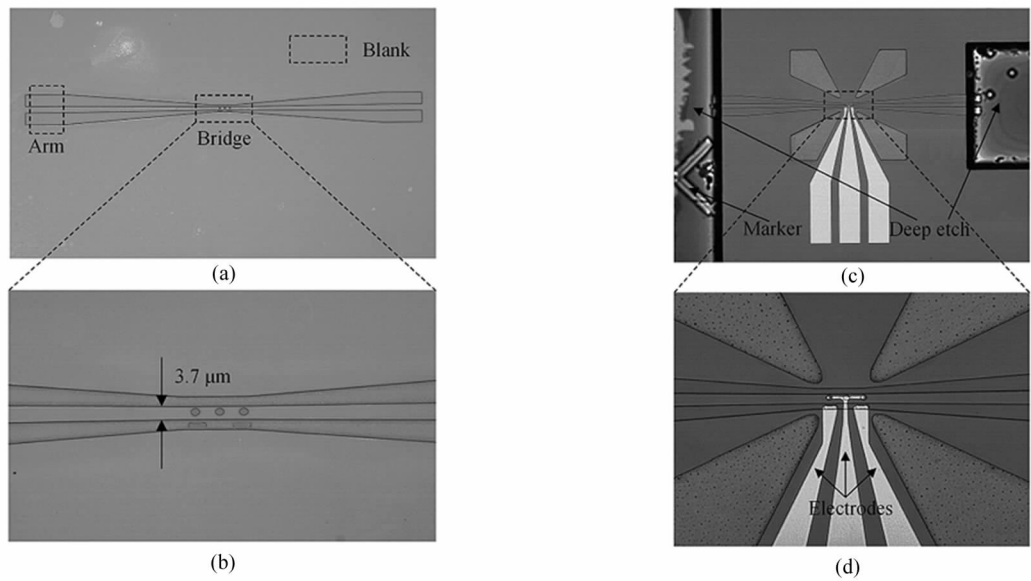


图 2 紫外光刻加工的 Ge/SiGe 多量子阱电吸收调制器显微镜图:(a) 波导与电极窗口;(b) 未悬空微桥区域放大图;
(c) 加工完成的完整器件;(d) 施加双轴张应变区域放大图

Fig. 2 Microscope images of Ge/SiGe multiple quantum wells electro-absorption modulator fabricated by ultraviolet lithography:
(a) Waveguide and electrode window; (b) Zoomed-in view of non-suspended bridge area;
(c) Completed device; (d) Zoomed-in view of the biaxial tensile strain area

3 实验结果

Ge/SiGe 多量子阱电吸收调制器的测试装置原理图如图 3 所示。可调谐激光器产生一束激光后,通过光纤准直耦合和线性偏振片来控制其偏振态,再经由保偏光纤和透镜光纤与待测器件进行水平端面耦合;然后,直流电压源输出的直流偏置电压和矢量网络分析仪输出的射频信号通过 T 型偏置器混合后通过射频探针加载到待测器件的电极上,经过电吸收调制后的信号光再经透镜光纤从待测器件中输

出,通过光放大器放大之后由光电探测器将光信号转化成电信号;最终,电信号再输入至矢量网络分析仪,通过通用接口总线(general purpose interface bus,GPIB)实现电脑控制测试装置自动化扫频并进行数据记录。

光电流响应曲线直观反映了电吸收材料的吸收特性,电吸收材料在施加电压后发生能带倾斜使吸收谱线红移,可用于实现电吸收强度调制。光电流响应定义为 $R(\lambda) = [I(\lambda) - I(0)]/P(\lambda)$,其中 $I(\lambda)$ 为输入光波长 λ 时产生的光电流, $I(0)$ 为未通光时的

暗电流, $P(\lambda)$ 为输入光波长 λ 时的输入光功率。Ge/SiGe 多量子阱电吸收调制器的光电流响应测试结果如图 4(a) 所示, 从光电流响应曲线中可以观测到显著的吸收谱边缘的 e1-HH1 跃迁吸收峰和 QCSE 现象。在 0 V 偏置电压下, TE 偏振和 TM 偏振吸收谱边缘的极大值点基本重叠, 然而由于在施加电压后 TE 偏振的斯塔克平移量比 TM 偏振更大, 导致无法完全消除器件的偏振相关性。在 4 V 反向偏置电压下, 从光电流响应曲线中可以得出 TE 偏振和 TM 偏振 e1-HH1 跃迁吸收峰处的斯塔克平移量分别为 9.2 meV 和 4.5 meV。

图 4(b) 所示为该器件在不同偏置电压下的电吸收调制消光比, 即在两种不同偏置电压下输出光功率的比值。在 0 V/2 V 工作电压下, 该器件对处于 1479—1483 nm 波长范围的 TE 偏振和处于 1478—1481 nm 波长范围的 TM 偏振输入光的电吸收调制消光比均超过 4 dB; 当波长为 1479 nm 时, 该器件的电吸收调制消光比基本与偏振无关, 且达到低偏振相关消光比的最大值 4.6 dB。在 0 V/4 V 工作电压

下, 该器件对处于 1483—1488 nm 波长范围的 TE 偏振和处于 1479—1482 nm 波长范围的 TM 偏振输入光的电吸收调制消光比均超过 6 dB, 由于 TE 和 TM 偏振在反向偏置电压下的斯塔克平移量上存在差异, 导致在此波长范围内无法实现完全的低偏振相关电吸收调制; 当波长为 1483 nm 时, 该器件的电吸收调制消光比达到最大的低偏振相关消光比 5.8 dB。此外, 当输入光波长为 1480 nm 时, 对该器件进行高频响应测试, 其结果如图 4(c) 所示。当输入光处于 TE 偏振时, 在 0 V、2 V、4 V 反向偏置电压下的 3 dB 带宽分别为 5.9 GHz、7.3 GHz、8.2 GHz; 当输入光处于 TM 偏振时, 在 0 V、2 V、4 V 反向偏置电压下的 3 dB 带宽分别为 6.2 GHz、7.4 GHz、8.3 GHz。

如表 1 所示, 与采用 EBL 制作的器件(曝光分辨率约为 50 nm, 微桥的脊波导宽度为 $3.0 \mu\text{m}$) 相比, 除了曝光工艺不同之外, 其余各项工艺条件以及实验测试条件均相同, UVL 制作的器件(曝光分辨率约为 $1 \mu\text{m}$, 微桥的脊波导宽度由设计值 $3.0 \mu\text{m}$ 变为

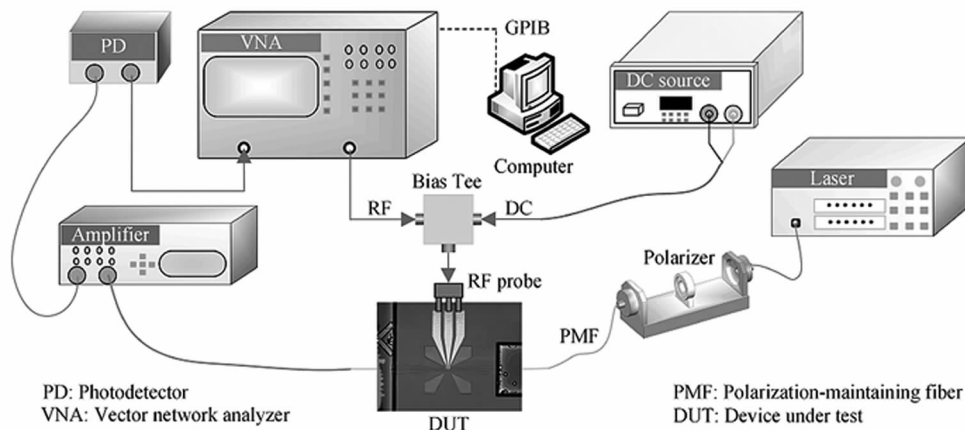
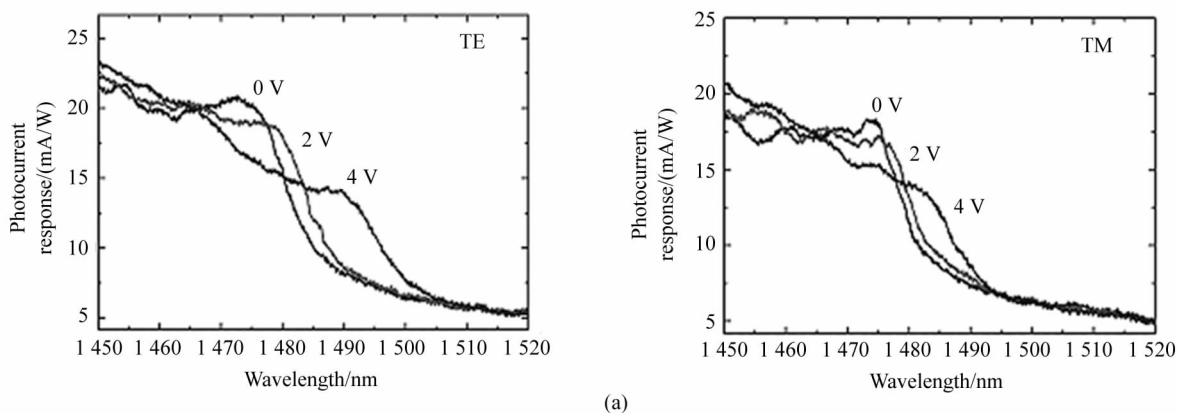


图 3 Ge/SiGe 多量子阱电吸收调制器测试实验装置

Fig. 3 Experimental setup for Ge/SiGe multiple quantum wells electro-absorption modulator measurement



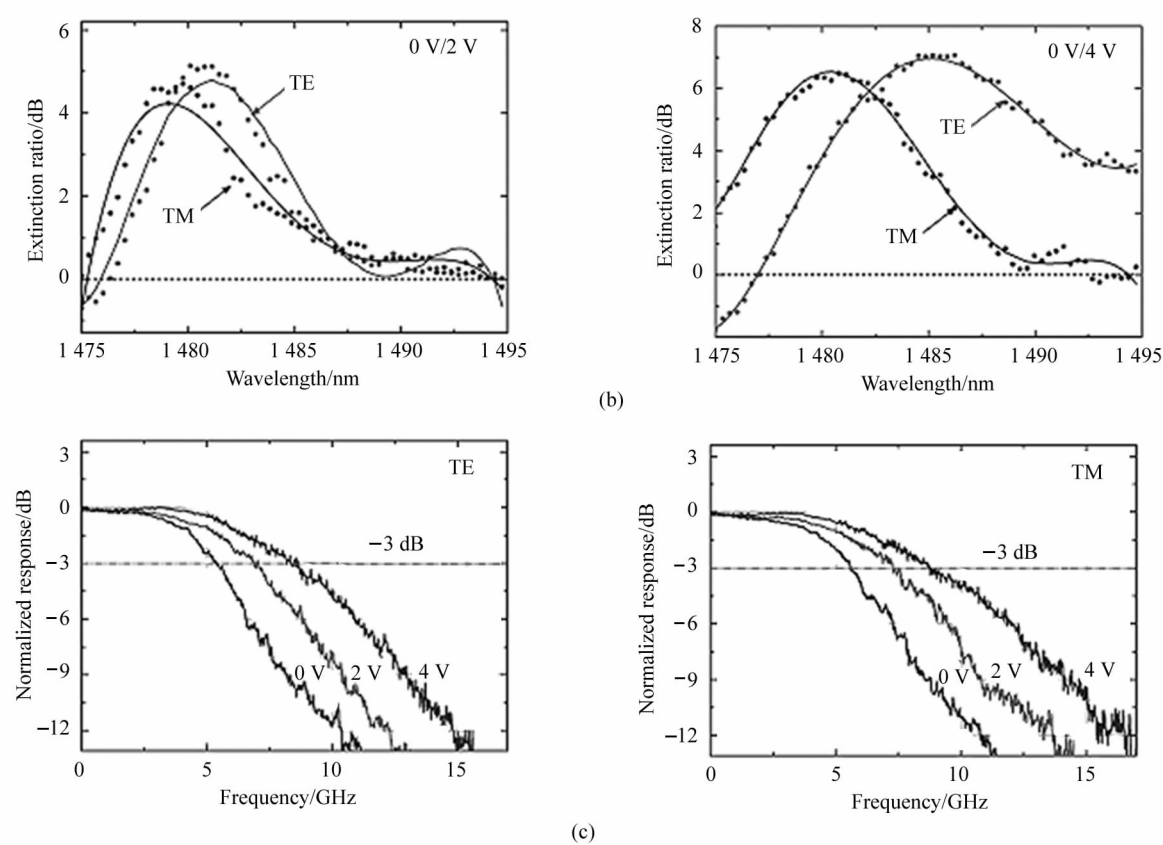


图 4 Ge/SiGe 多量子阱电吸收调制器测试结果:(a) 光电流响应;(b) 消光比;(c) 波长为 1480 nm 处的高频响应

Fig. 4 Measurement results of Ge/SiGe multiple quantum wells electro-absorption modulator:

(a) Photocurrent response; (b) Extinction ratio; (c) High frequency response at 1480 nm

表 1 UVL 与 EBL 制作器件的测试性能对比

Tab. 1 Comparison of the measurement performances of the devices fabricated through ultraviolet lithography and electron beam lithography technique

Fabrication technique	Polarization	Low polarization-dependent extinction ratio/dB		High frequency 3-dB bandwidth at 1480 nm/GHz		
		0 V/2 V	0 V/4 V	0 V	2 V	4 V
UVL	TE	4.6	5.8	5.9	7.3	8.2
	TM			6.2	7.4	8.3
EBL ^[19]	TE	4.3	6.5	7.4	8.8	12.1
	TM			7.5	8.7	11.4

3.7 μm)的低偏振电吸收调制消光比基本接近,但其高频响应 3 dB 带宽则小一些,主要原因在于紫外光刻的工艺误差导致了此器件具有更大的电容和电阻。因此,在实际生产制作过程中,可以选用曝光分辨率更小的紫外曝光光刻机进行曝光,并根据工艺流程的参数对器件的设计尺寸进行调制和校正,进而提高器件的高频响应带宽。

4 结 论

本文采用 UVL 制作了基于悬空微桥的双轴张应变 Ge/SiGe 多量子阱电吸收调制器,在波长为 1480 nm 附近实现了低偏振相关的电吸收调制。该器件的低偏振相关消光比在 0 V/4 V 工作电压下可达 5.8 dB,3 dB 调制带宽随着反向偏置电压的增大

而增大,在 4 V 反向偏置电压下为 8.3 GHz。与 EBL 相比,UVL 的精度较低,所制作的器件在调制消光比、高频响应带宽等性能的测试中稍显逊色,但具有曝光时间短、成本低和可大批量生产等优势,并且整个制作工艺流程具有良好的 CMOS 工艺兼容性,可在集成波导中实现低偏振相关的强度调制,具有良好的可行性和应用前景。

参考文献:

- [1] GATTI E, GRILLI E, GUZZI M, et al. Room temperature photoluminescence of Ge multiple quantum wells with Ge-rich barriers[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(3): 031106.
- [2] CAMACHO-AGUILERA R E, CAI Y, PATEL N, et al. An electrically pumped germanium laser[J]. Optics Express, 2012, 20(10): 11316-11320.
- [3] CAI Y, HAN Z H, WANG X X, et al. Analysis of threshold current behavior for bulk and quantum-well germanium laser structures[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 1901009.
- [4] LIU J F, BEALS M, POMERENE A, et al. Waveguide-integrated, ultralow-energy GeSi electro-absorption modulators[J]. Nature Photonics, 2008, 2(7): 433-437.
- [5] CHAISAKUL P, MARRIS-MORINI D, ROUIFIED M-S, et al. 23 GHz Ge/SiGe multiple quantum well electro-absorption modulator[J]. Optics Express, 2012, 20(3): 3219-3224.
- [6] SPLETT A, ZINKE T, PETERMANN K, et al. Integration of waveguides and photodetectors in SiGe for 1.3 μm operation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1994, 6(1): 59-61.
- [7] FIDANER O, OKYAY A K, ROTH J E, et al. Ge-SiGe quantum-well waveguide photodetectors on silicon for the near-infrared[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(20): 1631-1633.
- [8] VIVIEN L, OSMOND J, FEDELI J M, et al. 42 GHz pin Germanium photodetector integrated in a silicon-on-insulator waveguide[J]. Optics Express, 2009, 17(8): 6252-6257.
- [9] KUO Y-H, LEE Y K, GE Y, et al. Strong quantum-confined Stark effect in germanium quantum-well structures on silicon[J]. Nature, 2005, 437(7063): 1334-1336.
- [10] MILLER D A B, CHEMLA D S, DAMEN T C, et al. Band-edge electroabsorption in quantum well structures: the quantum-confined Stark effect[J]. Physical Review Letters, 1984, 53(22): 2173-2176.
- [11] CHAISAKUL P, MARRIS-MORINI D, FRIGERIO J, et al. Integrated germanium optical interconnects on silicon substrates[J]. Nature Photonics, 2014, 8(6): 482-488.
- [12] DUMAS D C S, GALLACHER K, RHEAD S, et al. Ge/SiGe quantum confined Stark effect electro-absorption modulation with low voltage swing at $\lambda = 1\,550\text{ nm}$ [J]. Optics Express, 2014, 22(16): 19284-19292.
- [13] EDWARDS E H, LEVER L, FEI E T, et al. Low-voltage broad-band electroabsorption from thin Ge/SiGe quantum wells epitaxially grown on silicon[J]. Optics Express, 2013, 21(1): 867-876.
- [14] YAMANISHI M, SUEMUNE I. Comment on polarization dependent momentum matrix elements in quantum well lasers[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1984, 23(1): 35-36.
- [15] PAUL D J. 8-band k.p modeling of the quantum confined Stark effect in Ge quantum wells on Si substrates[J]. Physical Review B, 2008, 77(15): 155323.
- [16] CHAISAKUL P, MARRIS-MORINI D, ISELLA G, et al. Polarization dependence of quantum-confined Stark effect in Ge/SiGe quantum well planar waveguides[J]. Optics Letters, 2011, 36(10): 1794-1796.
- [17] GAO J F, SUN J Q, JIANG J L. Analysis of biaxially tensile strained Ge/SiGe multiple quantum wells for electro-absorption modulators with low polarization sensitivities[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(4): 1-10.
- [18] GAO J F. Research of strain engineered Ge/GeSi multiple quantum wells electro-absorption modulators[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. 高建峰. 应变调控 Ge/SiGe 多量子阱电吸收光调制器研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [19] GAO J F, SUN J Q, JIANG J L, et al. Demonstration of biaxially tensile-strained Ge/SiGe multiple quantum well (MQW) electroabsorption modulators with low polarization dependence[J]. Nanophotonics, 2020, 9(14): 4355-4363.

作者简介:

孙军强 (1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤非线性集成光电子器件方面的研究。