

# 激光与光电子学进展

## Ge/SiGe 多量子阱调制器的研究进展

黄强<sup>1,2</sup>, 张意<sup>1</sup>, 孙军强<sup>1\*</sup>, 余长亮<sup>3</sup>, 高建峰<sup>1</sup>, 江佩麟<sup>1</sup>, 石浩天<sup>1</sup>, 黄楚坤<sup>1</sup>

<sup>1</sup>华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074;

<sup>2</sup>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;

<sup>3</sup>武汉飞思灵微电子有限公司, 湖北 武汉 430040

**摘要** 硅基光子集成技术在众多领域已经取得了重大突破,但目前唯一能够实现全部硅基集成有源器件且与互补金属氧化物半导体工艺兼容的材料是锗硅材料体系。Ge/SiGe 多量子阱作为硅基光调制器在硅芯片上能够实现短距离光互连,基于量子限制斯塔克效应的 Ge/SiGe 多量子阱调制器具有低功耗、低偏压、高速率的优点。总结了基于 Ge/SiGe 多量子阱调制器的研究现状和进展,讨论对比了 Ge/SiGe 多量子阱调制器的消光比、光损耗、偏置电压、电场、光调制器的调制带宽、暗电流等性能参数,展望了 Ge/SiGe 多量子阱调制器在集成光子学中的发展方向和面临的挑战。

**关键词** 光学器件; 硅基光子学; SiGe 调制器; Ge/SiGe 多量子阱; 量子限制斯塔克效应

中图分类号 TN389

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1900003

### Research Progress on Ge/SiGe Multiple Quantum Well Optical Modulators

Huang Qiang<sup>1,2</sup>, Zhang Yi<sup>1</sup>, Sun Junqiang<sup>1\*</sup>, Yu Changliang<sup>3</sup>, Gao Jianfeng<sup>1</sup>, Jiang Peilin<sup>1</sup>,  
Shi Haotian<sup>1</sup>, Huang Chukun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of  
Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

<sup>2</sup>Hunan Provincial Key Laboratory of Grids Operation and Control on Multi-Power Sources Area, School of  
Electrical Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 422000, Hunan, China;

<sup>3</sup>Wuhan Fisilink Microelectronics Technology Co., Ltd., Wuhan 430040, Hubei, China

**Abstract** Silicon-based photonic integration technology has made breakthroughs in several fields, but the silicon germanium material system is currently the only material that can realize all silicon-based integrated active devices and is compatible with complementary metal oxide semiconductor processes. Ge/SiGe multiple quantum wells as silicon-based optical modulators can realize short-distance optical interconnections on silicon chips, and Ge/SiGe multiple quantum well modulators based on the quantum-confined Stark effect have the advantages of low power consumption, low bias voltage, and high speed. This paper summarizes the research status and progress of Ge/SiGe-based multiple quantum well modulators. The extinction ratio, optical loss, bias voltage, electric field, modulation bandwidth, dark current, and other performance parameters of Ge/SiGe multiple quantum well modulators are discussed and compared. The development direction and challenges of Ge/SiGe multiple quantum well modulators in integrated photonics are evaluated.

**Key words** optical devices; silicon-based photonics; SiGe modulator; Ge/SiGe multiple quantum well; quantum confined Stark effect

## 1 引言

在 5G 移动互联网、云计算、大数据高速发展的背景下,人们对带宽和数据容量的需求越来越高,传统的互补金属氧化物半导体(CMOS)集成电路已不能满足

高速、低功耗的需求,因此迫切需要一种革命性的数据传输技术取代电互连方案。光作为信息传输的载体,具有抗电磁干扰能力强、带宽大、损耗低、速度快等优点,在数据中心和超级计算机中光互连正逐渐替代电互连方案。同时,光互联技术已成为小空间尺度数据

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-05-30; 录用日期: 2022-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(61875063)、湖北省重点研发计划(2021BAA002)、邵阳市科技计划(2021004ZD)

通信作者: \*jqsun@mail.hust.edu.cn

通信的主流共识和趋势,如在基板对基板、芯片对芯片、芯片内部的通信。为实现光互连系统的小型化,构建多功能器件的集成光子电路具有十分重要的意义。1969年,美国贝尔实验室就提出了集成光学的概念,之后该技术被成熟应用于信号处理、光通信、光传感、生物医学光子学、光谱分析等领域<sup>[1-4]</sup>。20世纪80年代,硅基光子集成技术得到了人们的广泛关注,当时主流的集成平台是绝缘体上硅(SOI)。目前人们已经实现了硅基光源<sup>[5]</sup>、光调制器<sup>[6-10]</sup>、光探测器<sup>[11]</sup>、光波导<sup>[12]</sup>、耦合器<sup>[13]</sup>、波分复用器<sup>[14]</sup>等在无源有源光子器件,且这些光子器件的光电性能也在不断提高。

将电信号加载到光波上能使硅基光调制器实现电信号到光信号的转换。除了石墨烯和聚合物等<sup>[15-17]</sup>混合型硅基调制器,基于IV族材料的硅基光调制器主要分为基于热光效应的硅基调制器<sup>[18-20]</sup>、基于载流子色散效应<sup>[21-26]</sup>的硅基调制器和基于光吸收的硅基调制器<sup>[6, 27-31]</sup>。硅材料的热光系数较高,因此,硅基热光调制器可利用温度变化调节材料的折射率。但热光效应在本质上的反应时间较慢且功耗相对较高,难以满足现代通信应用中对高频的要求。通过改变材料中载流子的浓度实现折射率变化的载流子色散效应是目前硅基调制器中应用最广泛的调制机理,但为了将折射率调制转换为光强度调制,通常需要制作微环谐振结构<sup>[32]</sup>或马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构<sup>[33-34]</sup>。微环谐振结构的带宽窄且对温度敏感,在实际应用中受到限制,而MZI会增大器件尺寸及功耗。此外,基于光的直接吸收也能实现强度调制,且电吸收调制器不再受到少子寿命的限制,从而实现更高的调制速率和更低的功耗。半导体光吸收调制的原理主要包括弗朗兹-凯尔迪什(F-K)效应和量子限制斯塔克效应(QCSE),前者主要应用于锗硅合金体材料,后者主要应用于Ge/SiGe多量子阱(MQW)材料。

Ge是一种能增强硅基电子和光子集成电路性能的材料,具有大规模和低成本制造的前景<sup>[4, 35-36]</sup>,在实现对功耗、数据密度和单片集成等方面有较高要求的芯片级硅基光互连方面有着广阔的应用前景。室温

下,在1530~1625 nm通信波段附近Ge的直接带隙跃迁显示出很强的光学调制、发射和探测能力<sup>[37-40]</sup>。Ge的晶格结构为金刚石型,在晶格常数为 $a$ 的金刚石结构的 $k$ 空间第一布里渊区中存在坐标为 $2\pi/a(0, 0, 0)$ 的布里渊中心 $\Gamma$ 点和具有高对称性且坐标为 $2\pi/a(0.5, 0.5, 0)$ 的 $L$ 点。Ge作为一种间接带隙半导体,在区域中心 $\Gamma$ 点有一个价带全局最大值,在 $L$ 点有一个导带全局最小值,但Ge在区域中心的局部最小值非常接近全局最小值<sup>[41]</sup>。室温下Ge的直接和间接带隙跃迁能量分别约为0.8 eV<sup>[42]</sup>和0.64 eV<sup>[43]</sup>,因此,在通信波长范围内,通过在Si芯片上设计能实现光互连的Si兼容光电器件,利用0.8 eV的直接带隙跃迁是有可能的。由于量子限制效应<sup>[44]</sup>,在量子阱结构中Ge的离散能级可以进一步增强光调制和吸收特性。2005年,Kuo等<sup>[45]</sup>利用应变平衡Ge/SiGe多量子阱在室温下通过直接带隙跃迁发现了强QCSE。

本文总结了基于Ge/SiGe多量子阱且性能良好的光调制器研究现状和进展,讨论对比了Ge/SiGe多量子阱调制器的最新性能,最后展望了Ge/SiGe多量子阱调制器在集成光子学中的应用前景。

## 2 基本理论

### 2.1 锗硅能带结构

Ge和Si都是间接带隙半导体材料,其能带结构如图1所示<sup>[46]</sup>。其中, $\Gamma$ 点是Ge和Si的价带最高点, $L$ 点是Ge的导带最低点,Si的导带最低点位于 $\Delta$ 轴上靠近 $X$ 点的位置。可以发现,Ge的导带在 $\Gamma$ 点的能谷比其在 $L$ 点的能谷高136 meV,表明Ge位于 $L$ 点的间接带隙与 $\Gamma$ 点的直接带隙十分接近。这种特殊的能带结构也被称为伪直接带隙结构,可使间接带隙半导体Ge成为光通信波段常用的光探测器吸收材料。此外,也可利用张应变、锗锡合金等能带工程方法将Ge完全转变为直接带隙半导体。导带 $\Gamma$ 谷的阱深较大,对电子态的束缚作用较强,而 $L$ 谷的阱深较小,对电子态的束缚作用较弱,且间接带隙跃迁需要特定波矢声子参与,属

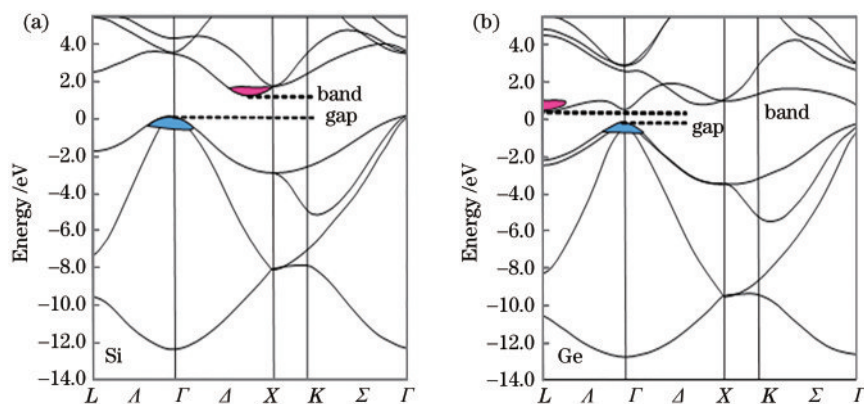


图1 不同材料的能带结构。(a)Si;(b)Ge

Fig. 1 Band structures of different materials. (a) Si; (b) Ge

于二级微扰过程,价带电子吸收光子发生直接带隙跃迁到  $\Gamma$  谷的概率大于间接带隙跃迁,因此通过 Ge/SiGe 多量子阱也可以实现由直接带隙跃迁引起的陡峭光吸收。值得注意的是,Ge/SiGe 量子阱中的 Ge 还是间接带隙材料。

## 2.2 量子限制斯塔克效应

电子带负电、空穴带正电,电荷正负电性相反。因

此,当给量子阱施加电场时,电势能的作用会使导带和价带的带边发生倾斜,同时电子和空穴会发生相向运动。这种现象造成能态波函数中电子态和空穴态波函数重叠因子减小,能量本征值差值减小,材料吸收边对应的波长发生红移,即 QCSE,其原理如图 2 所示。可以发现,施加电场后电子和空穴能量值靠近,而波函数包络分离。

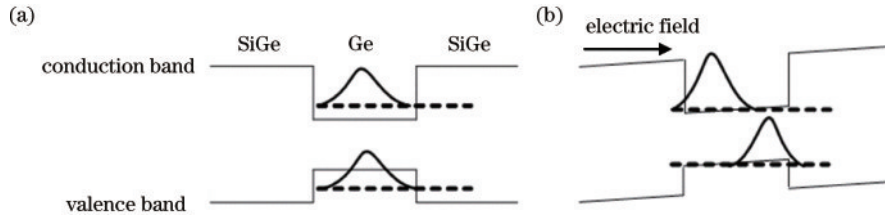


图 2 Ge/SiGe 量子阱中的 QCSE。(a) 无电场情况;(b) 施加电场后的情况

Fig. 2 QCSE in Ge/SiGe quantum well. (a) Without electric field; (b) with electric field applied

## 3 Ge/SiGe 多量子阱调制器

### 3.1 电致吸收效应调制器

20 世纪 80 年代,在 III-V 族直接带隙半导体量子阱

材料中 QCSE 就得到了验证和应用<sup>[44,47]</sup>,但在 Ge/SiGe 多量子阱中人们还没有观测到明显的 QCSE。表 1 从速率、插入损耗、消光比、量子阱结构等方面对比了近年来基于电致吸收效应 Ge/SiGe 多量子阱调制器的性能。

表 1 基于电致吸收效应的 Ge/SiGe 多量子阱调制器性能

Table 1 Performance of Ge/SiGe multiple quantum well modulators based on electroabsorption effect

Ref.	3 dB modulation bandwidth /GHz	Insertion loss /dB	Extinction ratio (wavelength)	QW structure (thickness)
[45]	-	-	-	10 periods of Ge(10 nm)/Si <sub>0.15</sub> Ge <sub>0.85</sub> (16 nm)
[48]	-	-	-	Si <sub>0.175</sub> Ge <sub>0.825</sub> (5 nm), Ge QW(12.5 nm)
[49]	-	-	7.3 dB(1457 nm)	40 periods of Ge(15.5 nm)/Si <sub>0.16</sub> Ge <sub>0.84</sub> (33 nm)
[50]	-	-	6 dB(1541 nm)	10 periods of Ge(15 nm)/Si <sub>0.16</sub> Ge <sub>0.84</sub> (33 nm)
[28]	23	-	9 dB(1435 nm)	-
[31]	-	-	5 dB(1550 nm)	Ge QW (14 nm) 18 nm (SiGe barrier thickness)
[29]	-	-	6 dB(1490 nm)	13.6 nm (QW thickness)
[51]	-	-7.4	20.3 dB(1550 nm)	-
[52]	11.3	-	17.8 dB(1550 nm)	-
[53]	8.7	-37.5	9.3 dB(1485 nm)	-

2005 年, Kuo 等<sup>[45]</sup>报道了室温下 Ge/SiGe 多量子阱材料中的 QCSE。采用减压化学气相沉积法先在硅衬底上生长一层锗硅合金缓冲层,随后在高温下进行快速热退火以改善晶体质量,然后在锗硅缓冲层上生长 10 对 Ge/Si<sub>0.15</sub>Ge<sub>0.85</sub>(10 nm/16 nm) 量子阱,从而产生高质量的硅基 Ge/SiGe 多量子阱外延材料,结构如图 3(a) 所示。用斩波器和锁相放大器对该量子阱结构进行了垂直光入射的光电流测试,获得的有效吸收系数谱如图 3(b) 所示。可以发现:当偏压为 0 V 时, Ge/SiGe 多量子阱的第一个吸收带边位于 1408 nm 波长附近,吸收系数为 6320 cm<sup>-1</sup>;当反向偏压为 4 V 时,在 QCSE 作用下, Ge/SiGe 多量子阱的吸收带边移动到 1456 nm 波长左右,吸收系数下降到 3000 cm<sup>-1</sup> 左右。2006 年, Kuo 等<sup>[48]</sup>实现了工作在 1550 nm 波长附

近的 Ge/SiGe 多量子阱。该结构中势垒区为 5 nm 厚的 Si<sub>0.175</sub>Ge<sub>0.825</sub> 合金, Ge 量子阱厚度为 12.5 nm。当工作温度从室温增加到 90 °C 时,量子阱材料的吸收边发生红移,从 1456 nm 移动到了 1508 nm 波长处。给 Ge/SiGe 量子阱调制器两端加上 2 V 的反向偏压时,材料的吸收峰将继续移到 1560 nm 工作波长附近。

2007 年, Roth 等<sup>[49]</sup>分析了从 Ge/SiGe 量子阱斜入射型 Ge/SiGe 多量子阱调制器的透射光强传输变化,其结构如图 4 所示。通过在 Ge/SiGe 多量子阱有源区之间形成的非对称法布里-珀罗(F-P)谐振腔内的多次反射获得显著的光调制。在 0~10 V 电压范围内,电压摆动为 10 V (~4.8×10<sup>4</sup> V/cm),工作波长为 1457 nm 情况下测得的最大消光比为 7.3 dB,但没有获得相应的插入损耗值。值得注意的是,通过提高谐



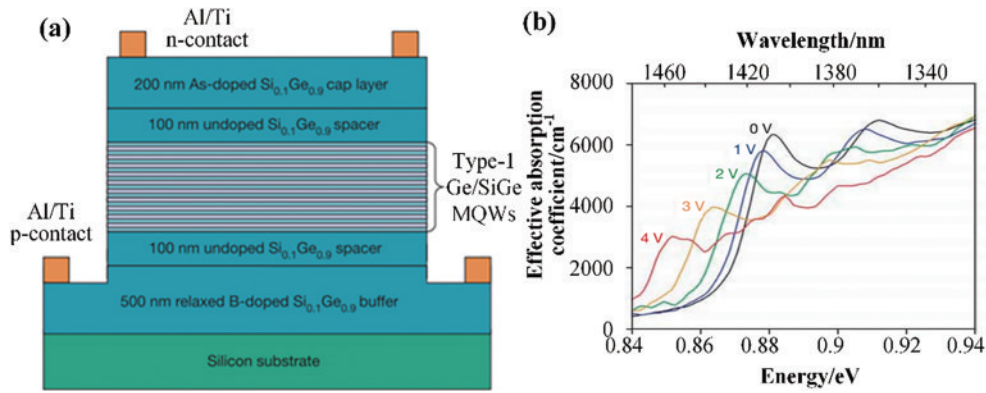


图 3 Ge/SiGe 多量子阱的外延结构和测试结果。(a)外延结构;(b) Ge/SiGe 量子阱的吸收谱<sup>[45]</sup>  
Fig. 3 Epitaxial structure and test results of Ge/SiGe multiple quantum wells. (a) Epitaxial structure; (b) absorption spectra of Ge/SiGe quantum wells<sup>[45]</sup>

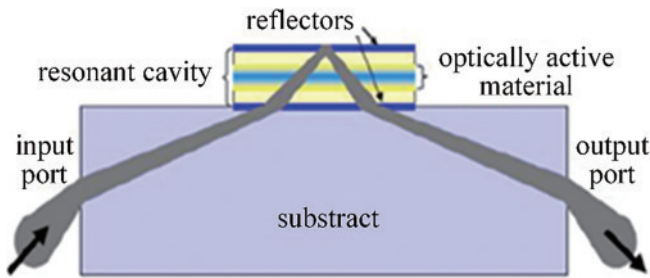


图 4 斜入射型光电调制器的原理图<sup>[49]</sup>  
Fig. 4 Schematic diagram of oblique incidence photoelectric modulator<sup>[49]</sup>

振器的质量因子和减少量子阱的数量,侧入 Ge/SiGe

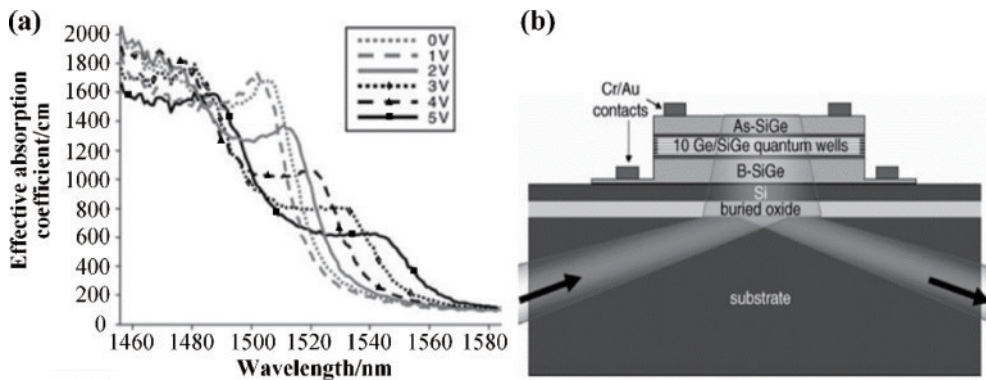


图 5 侧边斜入射型 Ge/SiGe 多量子阱调制器。(a) 100 °C 时的吸收谱;(b)结构示意图<sup>[50]</sup>  
Fig. 5 Side oblique incidence Ge/SiGe multiple quantum well modulator. (a) Absorption spectrum at 100 °C; (b) schematic diagram of the structure<sup>[50]</sup>

2012年,Chaisakul等<sup>[28]</sup>设计了波导型 Ge/SiGe 多量子阱电吸收调制器,其脊波导高度约为 800 nm,波导宽度和长度分别为 3 μm 和 90 μm,其结构及扫描电子显微镜(SEM)图像如图 6(a)和图 6(b)所示。为了提高有源区的量子阱晶体质量,在硅衬底上生长了厚度为 13 μm 的渐变锗硅合金缓冲层,将缓冲层从硅材料逐渐变为锗原子含量为 90% 的 Si<sub>0.1</sub>Ge<sub>0.9</sub> 合金。图 6(c) 为调制器在不同电压下的吸收谱。可以发现:在不加偏压情况下,该器件的吸收边波长为 1420 nm;当施加

多量子阱调制器可以在 3.6~4.6 V 范围内工作,电压摆动仅为 1 V (~1.5 × 10<sup>4</sup> V/cm),消光比为 3 dB<sup>[50]</sup>。

2008年,Roth等<sup>[50]</sup>报道了有源吸收区由 10 个周期 Ge/Si<sub>0.16</sub>Ge<sub>0.84</sub> (15 nm/33 nm) 量子阱组成的斜入射型 Ge/SiGe 多量子阱调制器,其衬底为 SOI,具体结构如图 5 所示。在量子阱生长的垂直方向上,全内反射界面和半反射界面分别由空气和外延层、外延层和衬底形成。可以发现:当埋氧层厚度为 50 nm 时,半反射界面的反射率为 70%;当电压变化 1 V 时,在 1493~1542.5 nm 波长范围内消光比均大于 3 dB。此外,当反向电压从 0.875 V 变化到 4.875 V 时,在入射光波长为 1541 nm 的情况下最大消光比为 6 dB。

4 V 的反向偏压时,器件的吸收边波长红移至 1432 nm。图 6(d) 为调制器在摆动工作电压分别为 3 V/4 V 和 3 V/5 V 时的消光比。可以发现:当摆动电压为 3 V/4 V 时,在 1435 nm 波长下的消光比大于 9 dB;施加 4.5 V 的反偏电压时,1448 nm 波长下的 3 dB 响应带宽能达到 23 GHz。

2013年,Edwards等<sup>[31]</sup>优化了 Ge/SiGe 多量子阱结构,进一步提升了电吸收调制器的性能,将硅衬底上锗硅合金缓冲层的厚度减小至 320 nm,同时将生

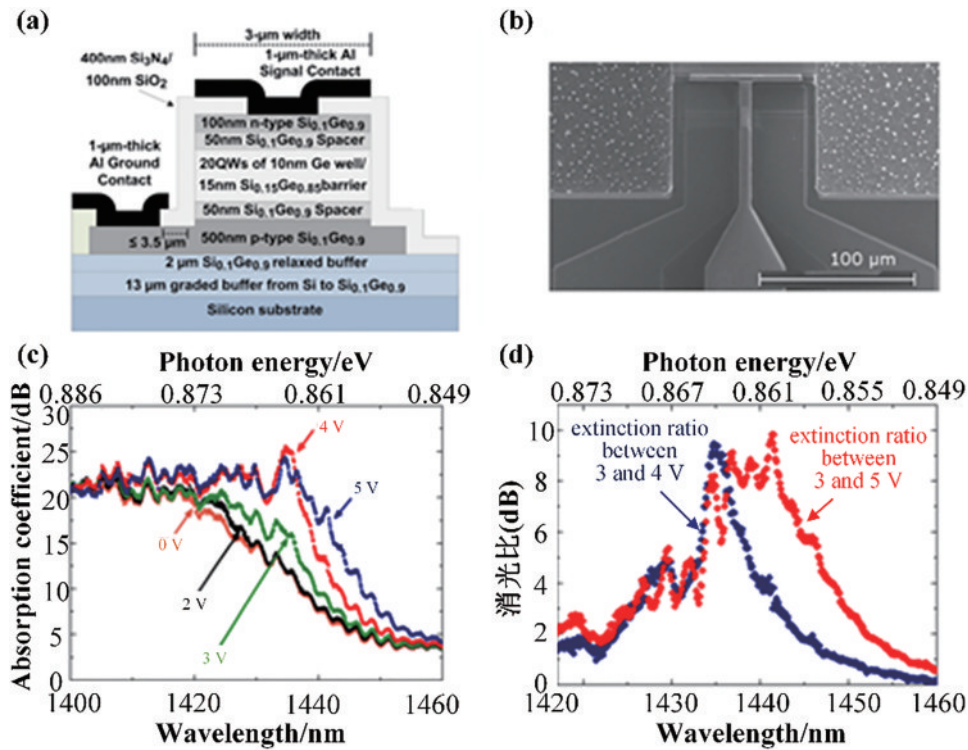


图 6 波导型 Ge/SiGe 多量子阱电吸收调制器。(a)外延结构;(b)SEM 图像;(c)不同电压下的吸收谱;(d)不同工作电压下的消光比<sup>[28]</sup>  
 Fig. 6 Waveguide type Ge/SiGe multiple quantum well electro-absorption modulator. (a) Epitaxial structure; (b) SEM image; (c) absorption spectra at different voltages; (d) extinction ratio at different operating voltages<sup>[28]</sup>

长的量子阱数量减小到 5 个。锗量子阱和锗硅势垒区厚度分别为 14 nm 和 18 nm。为了使 Ge/SiGe 多量子阱的吸收带边向长波长方向移动,增大了阱宽并在一定的电压下获得更大的斯塔克红移,减小了器件的厚度。通过光电流测试了器件在不同电压下的吸收

谱与吸收消光比,结果如图 7 所示。可以发现:在不加偏压情况下,Ge/SiGe 多量子阱的吸收带边波长约为 1425 nm;对器件施加工作电压摆幅为 1 V 的 2 V 反向偏置电压时,调制器在 1550 nm 处的调制消光比大于 5 dB。

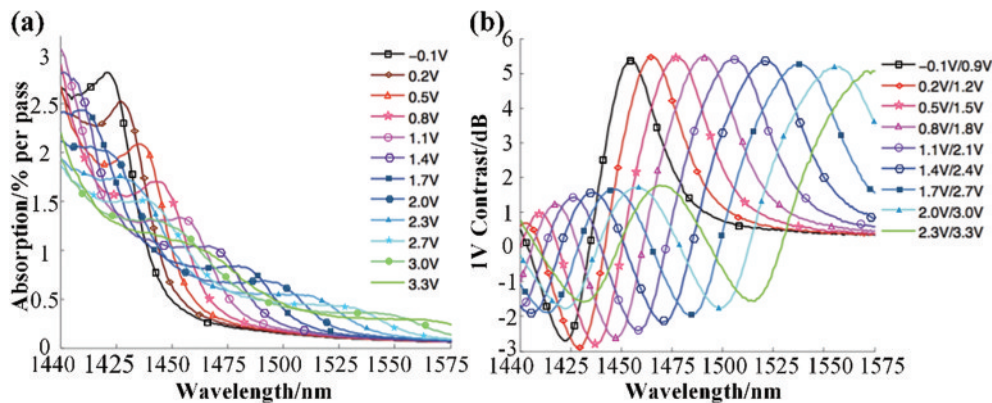


图 7 Ge/SiGe 多量子阱的测试结果。(a)吸收谱;(b)不同工作电压下的消光比<sup>[31]</sup>  
 Fig. 7 Test results of Ge/SiGe multiple quantum wells. (a) Absorption spectrum; (b) extinction ratio at different working voltages<sup>[31]</sup>

2014 年, Dumas 等<sup>[29]</sup>设计了阱宽分别为 6.6、11.3、13.6 nm 的 Ge/SiGe 多量子阱调制器,并测试了其光吸收谱,结果如图 8 所示。可以发现,Ge/SiGe 量子阱的阱宽越大,器件吸收带边对应的工作波长越大,吸收强度会随之减小;当阱宽为 13.6 nm 时,Ge/SiGe 量子阱的吸收带边波长为 1490 nm;当 Ge/SiGe 量子阱的阱宽为 11.3 nm 时,在 0 V/1 V 的工作电压下,器

件最大吸收消光比可达到 6 dB;在 2 V/3 V 的工作电压下,该器件可工作在 整个光通信中的 C 波段,在 1550 nm 波长下的吸收消光比可达到 3 dB。

2017 年, Gao 等<sup>[31]</sup>提出了一种低偏置电压 Ge/SiGe 多量子阱电吸收调制器,其工作波长为 1550 nm。设计的调制器结构参数和仿真结果如图 9 所示。其中, TM 表示横磁模, TE 表示横电模。通过优化多量



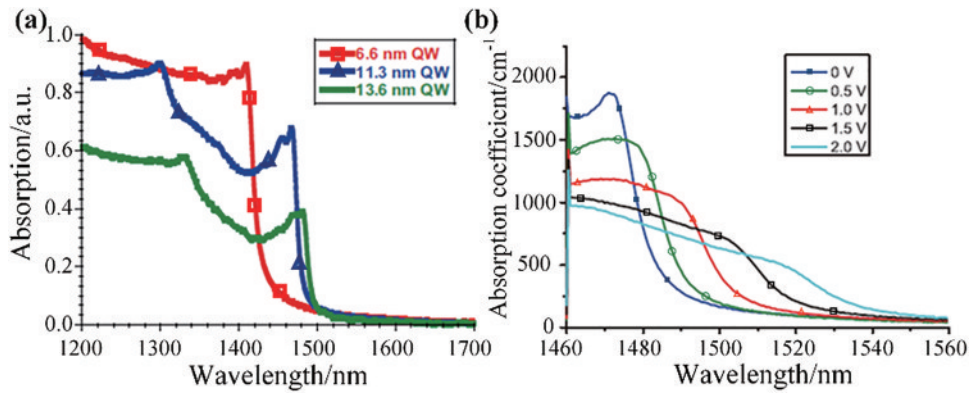


图 8 Ge/SiGe 多量子阱的吸收谱。(a)不同阱宽 Ge/SiGe 多量子阱的吸收谱;(b)不同电压下 Ge/SiGe 多量子阱的吸收谱<sup>[29]</sup>

Fig. 8 Absorption spectra of Ge/SiGe multiple quantum wells. (a) Absorption spectra of Ge/SiGe multiple quantum wells with different well widths; (b) absorption spectra of Ge/SiGe multiple quantum wells at different voltages<sup>[29]</sup>

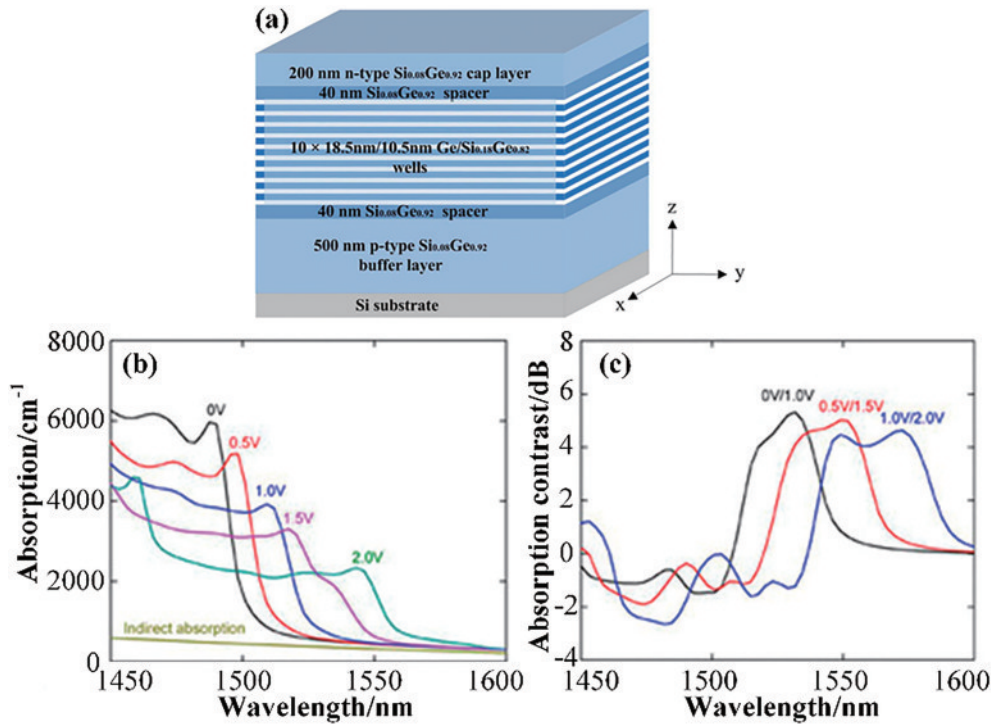


图 9 低偏置电压 Ge/SiGe 多量子阱电吸收调制器的结构和仿真结果。(a)结构设计;(b)TM 偏振吸收系数;(c)TE 偏振在不同电压下的吸收对比度<sup>[51]</sup>

Fig. 9 Structure and simulation results of low bias voltage Ge/SiGe multiple quantum well electroabsorption modulator. (a) Structural design; (b) TM polarization absorption coefficient; (c) TE polarization absorption contrast at different voltages<sup>[51]</sup>

子阱的结构参数能有效降低阱中的压应变能,使量子阱吸收边波长发生红移。为增大吸收边在电场作用下的斯塔克平移量,该器件采用了较大的阱宽。同时为提高有效吸收系数,减小了垒区宽度,从而增大量子阱中阱区所占的比例。采用锥形耦合器与无源波导进行耦合,使结构更加紧凑,进而提高了器件的集成度。最终使整个调制器的长度只有 104  $\mu\text{m}$ ,在横电偏振波长为 1550 nm,0.5 V 偏置电压和 1 V 电压摆动下,能获得 20.3 dB 的消光比,总插入损耗为 -7.4 dB。

2017 年,Gao 等<sup>[52]</sup>首次提出并实现了一种单轴张应变的 Ge/SiGe 多量子阱波导集成电吸收调制器,其

结构和仿真结果如图 10 所示。为改变 Ge/SiGe 多量子阱材料的带隙大小在悬空微桥结构中引入单轴张应变,使器件的工作波长可控。可以发现,当引入的单轴张应变为 1.6% 时,材料的吸收边波长变化到 1550 nm 处,器件在 0 V/2 V 电压条件下能获得 17.8 dB 的调制消光比。拉曼表征结果表明,该结构引入了 1.52% 的单轴张应变,对比无悬空微桥结构和有悬空微桥结构器件的光电流谱发现,悬空微桥结构的器件吸收边波长移动到了 1530 nm 处。这表明利用应变能实现对工作波长的调控。设计得到器件的总长度为 300  $\mu\text{m}$ ;当波长为 1558 nm 时,在 1 V/2 V 电压条

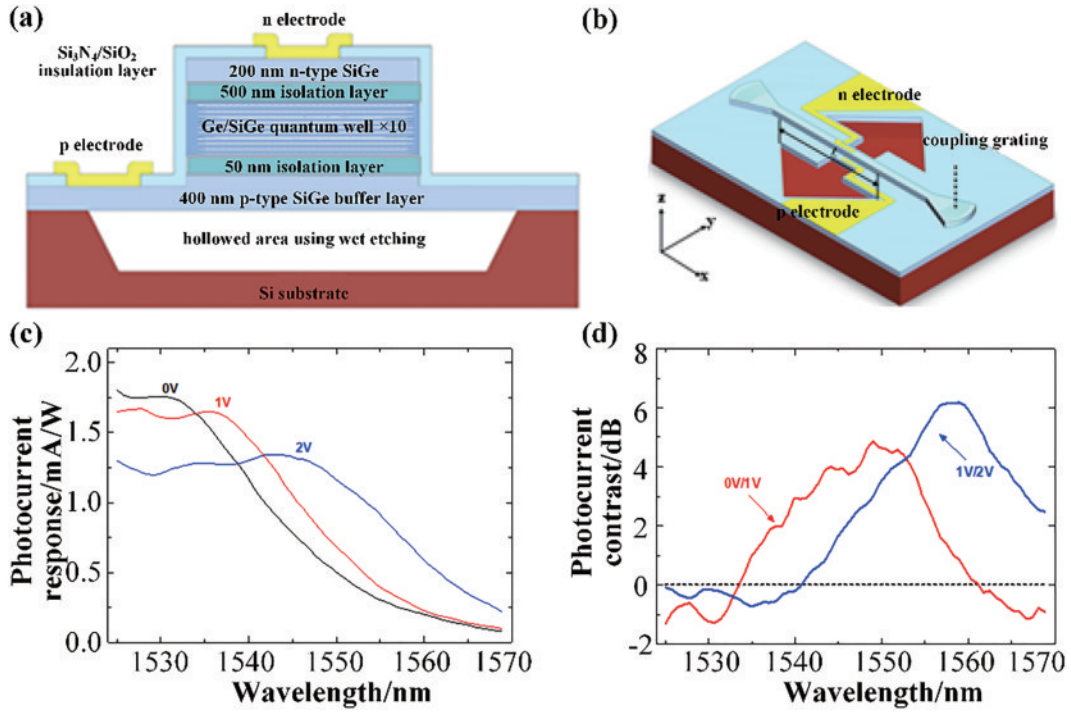


图 10 Ge/SiGe 多量子阱电吸收调制器的仿真结果。(a)波导结构;(b)整体结构;(c)引入单轴张应变时不同电压下的光电流响应;(d)不同电压下的光电流对比度<sup>[52]</sup>

Fig. 10 Simulation results of Ge/SiGe multiple quantum well electro-absorption optical modulator. (a) Waveguide structure; (b) overall structure; (c) photocurrent response at different voltages when uniaxial tensile strain is introduced; (d) photocurrent contrast at different voltages<sup>[52]</sup>

件下产生的光电流对比度最大值达到 6.3 dB;当波长为 1550 nm 时,光电流对比度为 4.8 dB;在无偏压下,器件的 3 dB 响应带宽能达到 11.3 GHz。

2020 年, Gao 等<sup>[53]</sup> 提出并实现了一种基于双轴张应变原理的 Ge/SiGe 多量子阱波导集成低偏振相关性电吸收光调制器,其结构如图 11 所示。其中:电吸收光调制器的总长度为 400 μm;微桥长度为 16 μm,  $\epsilon_{xx}$  和  $\epsilon_{yy}$

分别为微桥在  $x$  和  $y$  方向上的应变值。在 Ge/SiGe 多量子阱材料中设计特殊的悬空微桥从而引入双轴张应变。Ge/SiGe 多量子阱材料的偏振相关性可以通过双轴张应变调节。仿真结果表明,当器件在 0 V/2 V 电压条件下,同时双轴张应变大小为 0.78% 时,对波长为 1485 nm 的光能产生 7.6 dB 的低偏振相关消光比。实验测试结果如图 12 所示。可以发现:在 0 V/4 V 电压

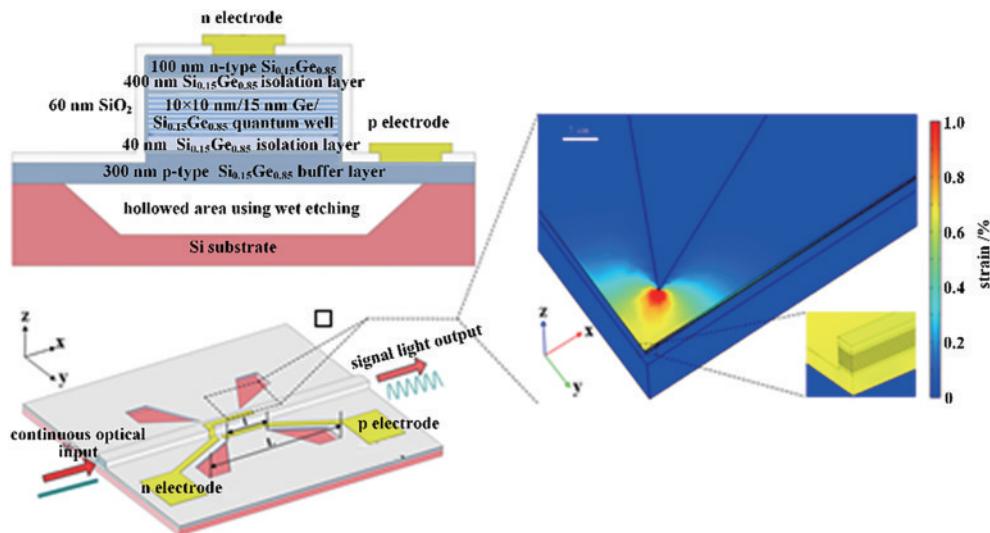


图 11 调制器的结构。(a)多量子阱的外延设计;(b)器件的整体结构;(c)双轴张应变的分布<sup>[53]</sup>

Fig. 11 Structure of the modulator. (a) Epitaxial design of multiple quantum wells; (b) overall structure of the device; (c) distribution of biaxial tensile strain<sup>[53]</sup>

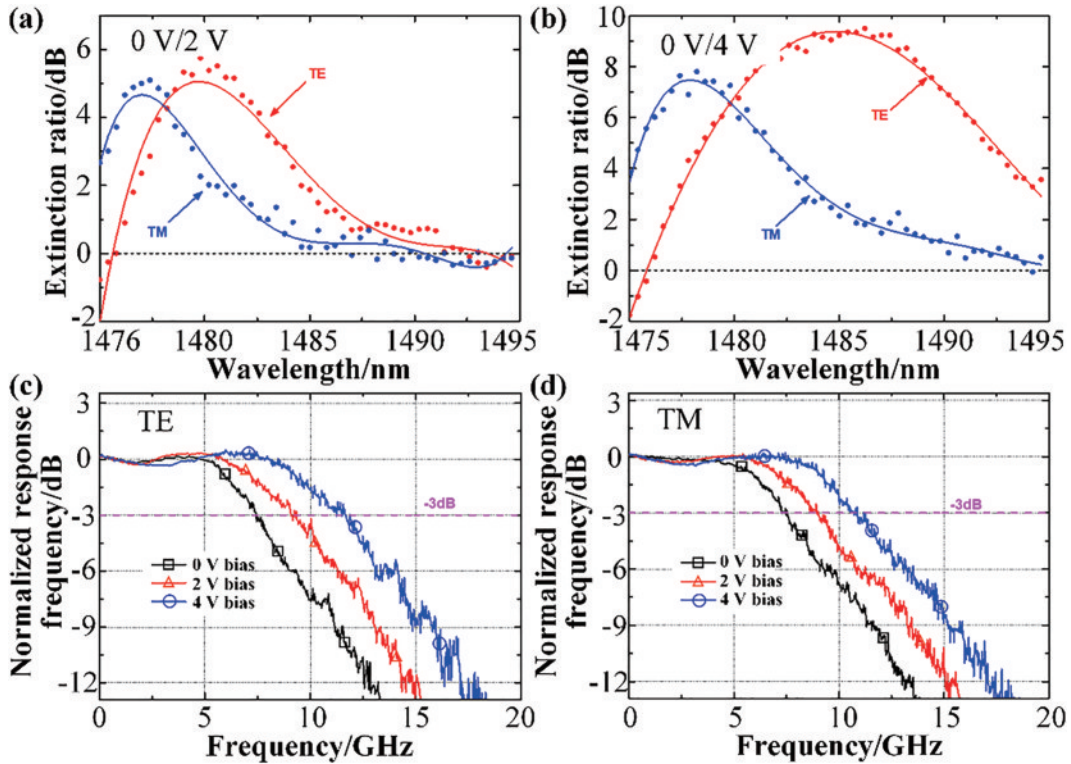


图 12 不同反向电压下器件的电吸收光调制消光比。(a) 0 V/2 V; (b) 0 V/4 V; (c) TE 偏振下器件的高频响应特性曲线; (d) TM 偏振下器件的高频响应特性曲线<sup>[53]</sup>

Fig. 12 Electroabsorption light modulation extinction ratio of the device under different reverse voltages. (a) 0 V/2 V; (b) 0 V/4 V; (c) high frequency response characteristic curve of the device under TE polarization; (d) high frequency response characteristic curve of the device under TM polarization<sup>[53]</sup>

条件下,设计的器件峰值消光比能达到 9.3 dB;当波长为 1479 nm 时,在 0 V/2 V 电压条件下,能实现 -37.5 dB 的插入损耗和 4.6 dB 的低偏振相关消光比;施加 2 V 的反向偏压时,器件的 3 dB 响应带宽能达到 8.7 GHz。此外,该器件的制作工艺与 CMOS 的兼容性较强。

### 3.2 电致折射率效应调制器

近年来,除了对电吸收强度调制研究外,人们也探索了 Ge/SiGe 多量子阱中的电致折射率效应。表 2 从速率、插入损耗、消光比、量子阱结构、电致折射率变化等方面对比了近年来基于电致折射率效应 Ge/SiGe 多量子调制器。

表 2 基于电致折射率效应的 Ge/SiGe 多量子阱调制器性能比较

Table 2 Performance comparison of Ge/SiGe multiple quantum well modulators based on electrorefractive index effect

Ref.	3 dB modulation bandwidth /GHz	Insertion loss /dB	Extinction ratio (wavelength)	QW structure	Electrorefractive index (wavelength)
[54]	-	-	-	width (100 μm), length (64 μm)	$1.3 \times 10^{-3}$ (1475 nm)
[55]	-	-	-	Ge well (7 nm), Si <sub>0.15</sub> Ge <sub>0.85</sub> internal barrier (1.5 nm)	$2.3 \times 10^{-3}$
[56]	-	-	-	-	$9 \times 10^{-3}$ (1461 nm)
[57]	32	-	7.8 dB (1530 nm)	-	$3.2 \times 10^{-3}$ (1530 nm)

2013年,Frigerio等<sup>[54]</sup>利用 Ge/SiGe 多量子阱制作了宽为 100 μm、长为 64 μm 的平板波导结构,并对波导两侧端面进行深刻蚀,研究了 Ge/SiGe 多量子阱中的电致折射率效应。施加不同偏置电压,通过测试器件 F-P 干涉条纹的移动反映折射率的变化,结果如图 13 所示。可以发现,在 1475 nm 波长处施加 8 V 的反向偏压时,Ge/SiGe 多量子阱能引起约  $1.3 \times 10^{-3}$  的电致折射率变化,对应的  $V_{\pi}L_{\pi}$ (半波电压  $V_{\pi}$  与相移区长度  $L_{\pi}$

的乘积)为 0.46 V·cm。2015年,Frigerio等<sup>[55]</sup>利用 Ge/SiGe 对称型耦合量子阱加强电致折射率效应,Ge/SiGe 耦合量子阱结构依次为 Ge 势阱(7 nm)、Si<sub>0.15</sub>Ge<sub>0.85</sub> 内部势垒(1.5 nm)、Ge 势阱(7 nm)、Si<sub>0.15</sub>Ge<sub>0.85</sub> 两侧外部势垒(26 nm)。实验结果表明,在 1.5 V 偏压下 Ge/SiGe 对称耦合量子阱能获得高达  $2.3 \times 10^{-3}$  的电致折射率变化,相应的  $V_{\pi}L_{\pi}$  为 0.046 V·cm。

2017年,Zhang等<sup>[56]</sup>设计了一种非对称 Ge/SiGe



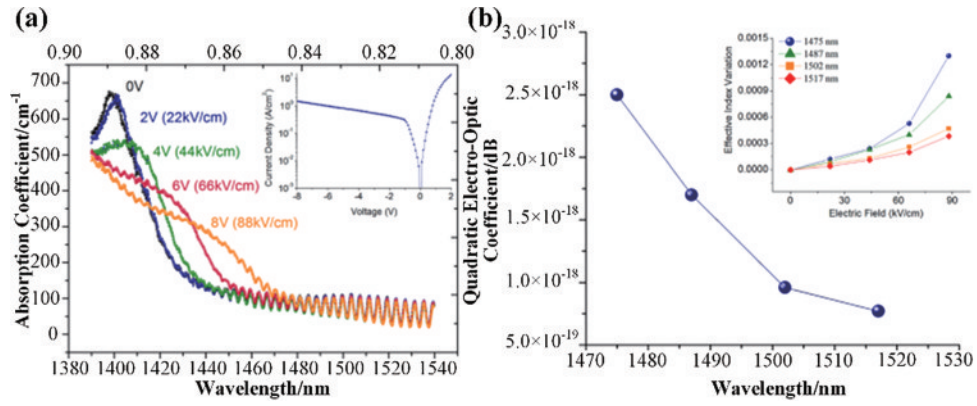


图 13 不同偏压下 Ge/SiGe 多量子阱的测试结果。(a) 吸收谱; (b) 二次电光系数<sup>[54]</sup>

Fig. 13 Test results of Ge/SiGe multiple quantum wells under different bias voltages. (a) Absorption spectrum; (b) secondary electro-optic coefficient<sup>[54]</sup>

耦合多量子阱结构,并计算分析了其光电性质。非对称 Ge/SiGe 耦合多量子阱相比普通 Ge/SiGe 多量子阱的吸收带边红移现象更显著,能引起更明显的电致折射率变化。可以发现,当外加电场强度达到 30 kV/cm 时,在 1461 nm 波长处其电致折射率的变化能获得一个局部极大值(约为  $9 \times 10^{-3}$ ),对应的  $V_{\pi}L_{\pi}$  约为 0.01 V·cm,相比其他硅基相位调制器具有明显

的竞争优势。

2021 年, Zhang 等<sup>[57]</sup> 设计并制作了一种基于 Ge/SiGe 非对称耦合多量子阱结构的硅基波导型调制器,实验结果如图 14 所示。可以发现,器件的 PN 结特性明显、暗电流较小,且具有明显的 QCSE。施加 2 V 和 1 V 的反向偏压下可分别实现最高 7.8 dB 和 5 dB 的调制消光比,在 1 V/2 V 电压摆幅下,可获得约 5.7 dB 的

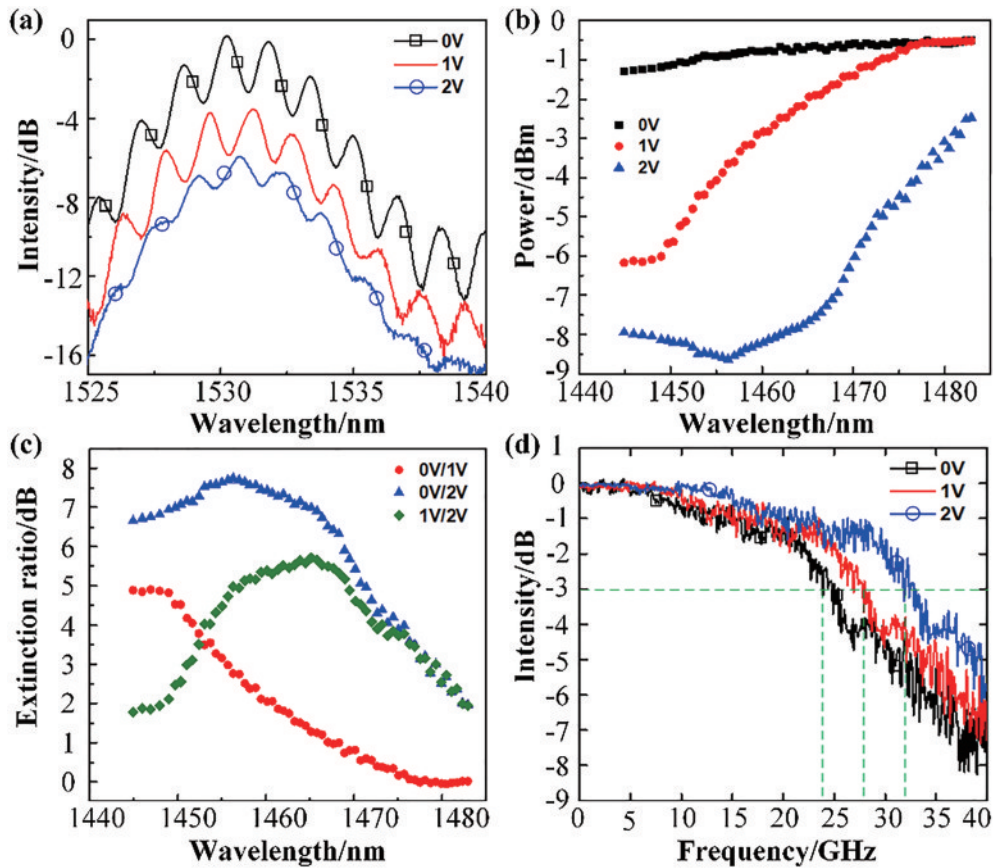


图 14 Ge/SiGe 非对称耦合多量子阱的测试结果。(a) 不同偏置电压下的 FP 干涉梳状谱; (b) 不同偏压下的光功率谱; (c) 不同工作电压摆幅下的调制消光比; (d) 归一化高频响应曲线<sup>[57]</sup>

Fig. 14 Test results of Ge/SiGe asymmetrically coupled multiple quantum wells. (a) FP interference comb spectra at different bias voltages; (b) optical power spectra at different bias voltages; (c) modulation extinction ratios at different operating voltage swings; (d) normalized high-frequency response curve<sup>[57]</sup>

消光比。对于相位调制,施加 1 V 和 2 V 的反向偏置电压下,该器件在 1530 nm 波长处可分别获得  $1.4 \times 10^{-3}$  和  $3.2 \times 10^{-3}$  的电致折射率变化,对应的  $V_{\pi}L_{\pi}$  分别为  $0.055 \text{ V} \cdot \text{cm}$  和  $0.024 \text{ V} \cdot \text{cm}$ ,相比其他硅基相位调制器较小。对器件分别施加 0 V、1 V 和 2 V 的反向偏置电压,获得的 3 dB 响应带宽分别约为 24 GHz、27 GHz 和 32 GHz,明显高于现有 Ge/SiGe 多量子阱调制器的 3 dB 带宽。该器件还同时具备强度调制与相位调制功能,在更加简单紧凑的片上系统有希望实现高级调制格式。

## 4 结 论

目前,硅基集成光子学取得了巨大进展,尤其是在以 SOI 为主要材料的领域中,但硅基光子集成的有源器件仍然是研究者们要突破的重点和难点。尺寸小、功耗低是 Ge/SiGe 多量子阱电吸收调制器的优点,考虑到未来集成硅基光子芯片势必与 CMOS 电路相集成,如何调控 Ge/SiGe 多量子阱电吸收调制器的偏振相关性和工作波长等问题也亟待解决。现有研究结果表明,小尺寸、高消光比、低偏置电压、高速率、低功耗且能同时实现相位调制和强度调制是锗硅非对称耦合多量子阱调制器的优势,在硅基光子集成中具有广泛的应用前景。但其受限于 Ge/SiGe 耦合多量子阱的能带结构,工作波长仍位于光通信中的 S 波段,与目前主流通信工作波长 (1550 nm) 尚有一定的距离。引入应变同时优化锗硅耦合多量子阱结构可以使材料的带隙发生改变,从而将 Ge/SiGe 多量子阱调制器的工作波长移动到 C 波段。现有的电子束光刻存在曝光时间长、成本高以及测试锗硅器件时端面耦合损耗较大等缺点,要实现低成本大规模生产和降低耦合损耗还需改善现有的工艺水平。通过制作 MZI 结构、微环结构以及二者的级联系统也能实现丰富的调制效果。同时在单个芯片上制作锗硅光源、锗硅调制器、锗硅探测器等有源器件,实现锗硅材料体系的硅基单片光子集成也是后续的发展方向。

## 参 考 文 献

- [1] Agrell E, Karlsson M, Chraplyvy A R, et al. Roadmap on optical communications[J]. Journal of Optics, 2016, 18(6): 1-40.
- [2] Estevez M C, Alvarez M, Lechuga L M. Integrated optical devices for lab-on-a-chip biosensing applications[J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(4): 463-487.
- [3] Khilo A, Spector S J, Grein M E, et al. Photonic ADC: overcoming the bottleneck of electronic jitter[J]. Optics Express, 2012, 20(4): 4454-4469.
- [4] O'Brien J L, Furusawa A, Vučković J. Photonic quantum technologies[J]. Nature Photonics, 2009, 3(12): 687-695.
- [5] Wirths S, Geiger R, von den Driesch N, et al. Lasing in direct-bandgap GeSn alloy grown on Si[J]. Nature

- Photonics, 2015, 9(2): 88-92.
- [6] 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.
- [7] 孔祥壮, 李金花, 罗晓曼, 等. 基于偏置纳米线的石墨烯表面等离子体调制器[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 1923001.
- Kong X Z, Li J H, Luo X M, et al. Graphene surface plasmon polariton modulator based on biased nanowires[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 1923001.
- [8] 许增华, 戴世勋, 林常规, 等. 声光晶体和玻璃材料及其调制器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(15): 1516007.
- Xu Z H, Dai S X, Lin C G, et al. Research progress of acousto-optic crystals, glass materials and modulators[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(15): 1516007.
- [9] 易凌俊, 李长红. 基于宇称-时间对称结构的磁光调制器[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0223001.
- Yi L J, Li C H. Mag-optical modulator based on parity-time symmetric structure[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 0223001.
- [10] 段雨飞, 李峰, 杨直, 等. 基于液晶空间光调制器进行光谱调制的飞秒啁啾脉冲放大系统[J]. 中国激光, 2021, 48(11): 1101001.
- Duan Y F, Li F, Yang Z, et al. Femtosecond chirped pulse amplification system with liquid crystal spatial light modulator for spectral modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1101001.
- [11] Assefa S, Xia F N, Vlasov Y A. Reinventing germanium avalanche photodetector for nanophotonic on-chip optical interconnects[J]. Nature, 2010, 464(7285): 80-84.
- [12] Dong P, Qian W, Liao S R, et al. Low loss shallow-ridge silicon waveguides[J]. Optics Express, 2010, 18(14): 14474-14479.
- [13] Vermeulen D, Selvaraja S, Verheyen P, et al. High-efficiency fiber-to-chip grating couplers realized using an advanced CMOS-compatible silicon-on-insulator platform[J]. Optics Express, 2010, 18(17): 18278-18283.
- [14] Bogaerts W, Selvaraja S K, Dumon P, et al. Silicon-on-insulator spectral filters fabricated with CMOS technology[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2010, 16(1): 33-44.
- [15] Hu Y T, Pantouvaki M, van Campenhout J, et al. Broadband 10 Gb/s operation of graphene electro-absorption modulator on silicon[J]. Laser & Photonics Reviews, 2016, 10(2): 307-316.
- [16] Liu M, Yin X B, Ulin-Avila E, et al. A graphene-based broadband optical modulator[J]. Nature, 2011, 474(7349): 64-67.
- [17] Alloatti L, Palmer R, Diebold S, et al. 100 GHz silicon-organic hybrid modulator[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(5): e173.
- [18] Reed G T, Jason Png C E. Silicon optical modulators[J]. Materials Today, 2005, 8(1): 40-50.
- [19] Corte F G D, Merenda M, Cocorullo G, et al. Modulation speed improvement in a Fabry-Perot thermo-

- optical modulator through a driving signal optimization technique[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(7): 074601.
- [20] Seo S Y, Lee J K, Shin J H, et al. The thermo-optic effect of Si nanocrystals in silicon-rich silicon oxidethin films[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(13): 2526-2528.
- [21] Basak J, Liao L, Liu A S, et al. Developments in gigascale silicon optical modulators using free carrier dispersion mechanisms[J]. *Advances in Optical Technologies*, 2008, 2008: 678948.
- [22] You J B, Park M, Park J W, et al. 12.5 Gbps optical modulation of silicon racetrack resonator based on carrier-depletion in asymmetric p-n diode[J]. *Optics Express*, 2008, 16(22): 18340-18344.
- [23] Gardes F Y, Reed G T, Emerson N G, et al. A sub-micron depletion-type photonic modulator in silicon on insulator[J]. *Optics Express*, 2005, 13(22): 8845-8854.
- [24] Park J W, You J B, Kim I G, et al. High-modulation efficiency silicon Mach-Zehnder optical modulator based on carrier depletion in a PN Diode[J]. *Optics Express*, 2009, 17(18): 15520-15524.
- [25] Xiao X, Xu H, Li X Y, et al. 60 Gbit/s silicon modulators with enhanced electro-optical efficiency[C]// 2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), March 17-21, 2013, Anaheim, CA. New York: IEEE Press, 2013.
- [26] Yi H X, Long Q F, Tan W, et al. Demonstration of low power penalty of silicon Mach-Zehnder modulator in long-haul transmission[J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27562-27568.
- [27] Feng D Z, Liao S R, Liang H, et al. High speed GeSi electro-absorption modulator at 1550 nm wavelength on SOI waveguide[J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 22224-22232.
- [28] Chaisakul P, Marris-Morini D, Rouifed M S, et al. 23 GHz Ge/SiGe multiple quantum well electro-absorption modulator[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 3219-3224.
- [29] Dumas D C S, Gallacher K, Rhead S, et al. Ge/SiGe quantum confined Stark effect electro-absorption modulation with low voltage swing at  $\lambda=1550$  nm[J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19284-19292.
- [30] Edwards E H, Audet R M, Fei E T, et al. Ge/SiGe asymmetric Fabry-Perot quantum well electroabsorption modulators[J]. *Optics Express*, 2012, 20(28): 29164-29173.
- [31] 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.
- [32] Baba T, Akiyama S, Imai M, et al. 50-Gb/s ring-resonator-based silicon modulator[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 11869-11876.
- [33] Thomson D J, Gardes F Y, Fedeli J M, et al. 50-Gb/s silicon optical modulator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(4): 234-236.
- [34] Li M F, Wang L, Li X, et al. Silicon intensity Mach-Zehnder modulator for single lane 100 Gb/s applications [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(2): 109-116.
- [35] Liu J F, Camacho-Aguilera R, Bessette J T, et al. Ge-on-Si optoelectronics[J]. *Thin Solid Films*, 2012, 520(8): 3354-3360.
- [36] Wang X X, Liu J F. Emerging technologies in Si active photonics[J]. *Journal of Semiconductors*, 2018, 39(6): 5-33.
- [37] Assefa S, Xia F N, Bedell S W, et al. CMOS-integrated high-speed MSM germanium waveguide photodetector [J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 4986-4999.
- [38] Feng N N, Feng D Z, Liao S R, et al. 30 GHz Ge electro-absorption modulator integrated with 3  $\mu\text{m}$  silicon-on-insulator waveguide[J]. *Optics Express*, 2011, 19(8): 7062-7067.
- [39] Srinivasan S A, Verheyen P, Loo R, et al. 50 Gb/s C-band GeSi waveguide electro-absorption modulator[C]// 2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 20-24, 2016, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016.
- [40] Vivien L, Polzer A, Marris-Morini D, et al. Zero-bias 40 Gbit/s germanium waveguide photodetector on silicon [J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 1096-1101.
- [41] Cardona M, Pollak F H. Energy-band structure of germanium and silicon: the  $k \cdot p$  method[J]. *Physical Review*, 1966, 142(2): 530-543.
- [42] MacFarlane G G, McLean T P, Quarrington J E, et al. Fine structure in the absorption-edge spectrum of Ge[J]. *Physical Review*, 1957, 108(6): 1377-1383.
- [43] Dash W C, Newman R. Intrinsic optical absorption in single-crystal germanium and silicon at 77 °K and 300 °K [J]. *Physical Review*, 1955, 99(4): 1151-1155.
- [44] 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.
- [45] Kuo Y H, Lee Y K, Ge Y S, et al. Strong quantum-confined Stark effect in germanium quantum-well structures on silicon[J]. *Nature*, 2005, 437(7063): 1334-1336.
- [46] Grosso, Piermarocchi. Tight-binding model and interactions scaling laws for silicon and germanium[J]. *Physical Review B, Condensed Matter*, 1995, 51(23): 16772-16777.
- [47] Arad U, Redmard E, Shamay M, et al. Development of a large high-performance 2-D array of GaAs-AlGaAs multiple quantum-well modulators[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(11): 1531-1533.
- [48] Kuo Y H, Lee Y K, Ge Y S, et al. Quantum-confined Stark effect in Ge/SiGe quantum wells on Si for optical modulators[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, 12(6): 1503-1513.
- [49] Roth J E, Fidaner O, Schaevitz R K, et al. Optical modulator on silicon employing germanium quantum wells[J]. *Optics Express*, 2007, 15(9): 5851-5859.
- [50] Roth J E, Fidaner O, Edwards E H, et al. C-band side-entry Ge quantum-well electroabsorption modulator on SOI operating at 1 V swing[J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(1): 49-50.



- [51] Gao J F, Zhou H, Jiang J L, et al. Design of low bias voltage Ge/SiGe multiple quantum wells electro-absorption modulator at 1550 nm[J]. AIP Advances, 2017, 7(3): 035317.
- [52] Gao J F, Sun J Q, Jiang J L, et al. Design and analysis of electro-absorption modulators with uniaxially stressed Ge/SiGe multiple quantum wells[J]. Optics Express, 2017, 25(10): 10874-10884.
- [53] 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.
- [54] Frigerio J, Chaisakul P, Marris-Morini D, et al. Electro-refractive effect in Ge/SiGe multiple quantum wells[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(6): 061102.
- [55] Frigerio J, Vakarin V, Chaisakul P, et al. Giant electro-optic effect in Ge/SiGe coupled quantum wells[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 15398.
- [56] Zhang Y, Sun J Q, Gao J F. Theoretical analysis of electro-refractive index variation in asymmetric Ge/SiGe coupled quantum wells[J]. Optics Express, 2017, 25(24): 30032-30042.
- [57] Zhang Y, Gao J F, Qin S B, et al. Asymmetric Ge/SiGe coupled quantum well modulators[J]. Nanophotonics, 2021, 10(6): 1765-1773.