

锗硅非对称耦合量子阱相位调制器特性的研究

石浩天, 江佩璘, 张意, 黄强, 孙军强

Asymmetric Ge/SiGe coupled quantum well phase modulators

引用本文:

石浩天, 江佩璘, 张意, 黄强, 孙军强. 锗硅非对称耦合量子阱相位调制器特性的研究[J]. [激光技术](#), 2023, 47(5): 587–591.

SHI Haotian, JIANG Peilin, ZHANG Yi, et al. Asymmetric Ge/SiGe coupled quantum well phase modulators[J]. [Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays](#), 2023, 47(5): 587–591.

您可能感兴趣的其他文章

1. 熔锥型宽带光纤耦合器的研究

引用本文: 周梦薇, 任德源, 朱益清, 等. 熔锥型宽带光纤耦合器的研究[J]. [激光技术](#), 2019, 43(6): 757–762.

2. 基于级联马赫-曾德尔调制器的太赫兹通信系统

引用本文: 和亮. 基于级联马赫-曾德尔调制器的太赫兹通信系统[J]. [激光技术](#), 2016, 40(6): 787–790.

3. 光纤SPR传感器参数对折射率测量灵敏度的影响

引用本文: 陈强华, 丁锦红, 韩文远, 等. 光纤SPR传感器参数对折射率测量灵敏度的影响[J]. [激光技术](#), 2023, 47(3): 329–334.

4. 表面曲率对石英毛细管微瓶模式及传感特性影响

引用本文: 张峰, 吴根柱, 汪成程. 表面曲率对石英毛细管微瓶模式及传感特性影响[J]. [激光技术](#), 2018, 42(6): 840–844.

5. 基于长周期光纤光栅的光纤液位传感器

引用本文: 孙哲, 郭子龙, 李虎, 等. 基于长周期光纤光栅的光纤液位传感器[J]. [激光技术](#), 2023, 47(1): 41–45.

文章编号: 1001-3806(2023)05-0587-05

锗硅非对称耦合量子阱相位调制器特性的研究

石浩天, 江佩麟, 张意, 黄强, 孙军强*

(华中科技大学 武汉光电国家研究中心, 武汉 430074)

摘要: 为了研究和论证锗硅材料体系在器件的工艺制备和理论性能上的优势, 拓展锗硅量子阱结构的应用范围, 采用数值仿真结合实际器件制备的方法, 进行了理论分析和实验验证, 设计了一种基于 Ge/SiGe 非对称耦合量子阱材料的光学相位调制器, 并在实验测试中验证了该理论的正确性。结果表明, 当电场超过 40 kV/cm 时, 该材料在 1450 nm 波长处可以达到最高 0.01 的电致折射率变化; 经测试发现, 实际制备的器件在 1.5 V 的反向偏置电压下, 实现了 1530 nm 波长处 2.4×10^{-3} 的电致折射率变化, 对应的 $V_{\pi}L_{\pi} = 0.048 \text{ V} \cdot \text{cm}$, 在同类型锗硅光调制器中达到了先进水平。该研究为硅基集成光调制器的进一步发展开辟了新的方向。

关键词: 集成光学; 锗硅调制器; 非对称耦合量子阱; 相位调制

中图分类号: TN256; O455+.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.05.002

Asymmetric Ge/SiGe coupled quantum well phase modulators

SHI Haotian, JIANG Peilin, ZHANG Yi, HUANG Qiang, SUN Junqiang

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The SiGe material system demonstrates the advantages of device fabrication and performance, also the unique characteristic of Ge/SiGe multi-quantum well structure expands the application range. A design of optical integrated phase modulator based on asymmetric Ge/SiGe coupled quantum well (CQW) was proposed in this paper. According to comprehensively analysis of asymmetric Ge/SiGe CQW structure by numerical simulation, the theory was verified by implementing the fabrication and measurement. It indicates that the maximum electrorefractive index variation up to 0.01 can be achieved by using the designed asymmetric CQW, while the applied electrical field exceeds 40 kV/cm at wavelength of 1450 nm. Moreover, the fabricated device attains the electrorefractive index variation 2.4×10^{-3} with 1.5 V reverse bias voltage and optical wavelength 1530 nm, and the corresponding $V_{\pi}L_{\pi}$ is as low as $0.048 \text{ V} \cdot \text{cm}$. The asymmetric Ge/SiGe CQW phase modulator exhibits superior performance in the same type of modulators based on SiGe, and offers new opportunities to further development of optical integrated silicon modulators.

Key words: integrated optics; Ge/SiGe modulator; asymmetric coupled quantum well; phase modulation

引言

随着通信速率的不断发展, 硅基光调制器在全光信号处理和高速光通信光互连上越来越体现出不可或缺的作用^[1-2]。基于IV族材料(硅, 锗)的硅光调制器, 按其原理分类有热光型^[3-4]、载流子色散型^[5-6]和光吸收型^[7-9]。而其它新兴的材料平台, 也引起了学者们广泛的关注, 如硅与III-V族混合集成的调制器^[10-11]、结合2维材料(石墨烯)^[12]混合集成的调制器^[13-15], 以

及高性能的电光材料平台, 如氮化铝^[16-17]、薄膜铌酸锂^[18-20]等在集成光调制器中也显示出巨大的潜力。

上述新材料平台在实际器件制作中都存在与传统CMOS工艺兼容的问题, 所以选择IV族的锗硅材料体系作为研究对象。对于多量子阱体系, 研究者发现锗硅量子阱材料中显示出了较强的量子限制斯塔克效应(quantum-confined Stark effect, QCSE)^[21]。然而, 在Ge/SiGe量子阱的相关研究中, 探究吸收系数变化从而引起电致折射率变化的相关实验结果很少。

本文作者提出并设计了一种非对称耦合量子阱(coupled quantum well, CQW)结构, 来增强电致折射率的变化, 从而实现高效的相位调制。通过设计两种不同的量子阱宽度来使临近量子阱相互耦合, 可以调控耦合量子阱的波函数以及电致折射率的特性, 并且实

基金项目: 湖北省重点研发计划资助项目(2021BAA002)

作者简介: 石浩天(1997-), 男, 博士研究生, 现主要从事集成光电子器件的研究。

* 通讯联系人。E-mail: jqsun@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2022-08-30; 收到修改稿日期: 2022-11-11

验制作的器件性能优异,实现了偏置电压为 1.5 V 时,在 1530 nm 波长处的 2.4×10^{-3} 电致折射率变化,其对应的 $V_{\pi}L_{\pi}$ 在 1 V 偏置电压下低至 $0.048 \text{ V} \cdot \text{cm}$ (V_{π} 为半波电压, L_{π} 为器件的作用区长度)。

1 锗硅非对称耦合量子阱的设计与仿真

1.1 材料设计

由于关注器件的电致折射率调制的性能,仿真发现量子阱层材料结构采用非对称的结构设计可以得到更大的吸收边红移。从物理机理的层面分析,即使在没有外加电场作用的情况下,非对称耦合量子阱中电子态和空穴态天然就呈现非对称的分布,主要分布在较宽的量子阱中。由于中间的薄势垒存在,在很低的外电场作用下,电子 e_1 能态就会明显地向窄势阱移动,从而实现较大的波函数分布变化及波函数重叠因子变化,因此非对称耦合量子阱结构在参数优化后可以实现在明显的光学相位调制。仿真优化得到的锗硅量子阱材料的整体结构参数如图 1a 所示;其中关键的设计在于 8 对耦合量子阱的参数选取,如图 1b 所示。窄阱为 6 nm 宽,宽阱为 12 nm 宽,两阱中间由 1.6 nm 宽的 $\text{Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ 势垒隔开,而势阱外两边都是宽度为 12 nm 的 $\text{Si}_{0.15}\text{Ge}_{0.85}$ 势垒。非对称量子阱采用上述参数可以使得中间薄势垒两边的量子阱 (quantum well, QW) 达到较强的耦合作用,实现较好的有源区调制性能。

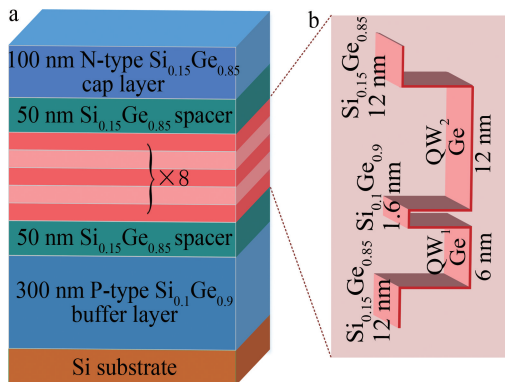


图 1 a—锗硅耦合量子阱的整体外延设计 b—锗硅非对称耦合量子阱的示意图

Fig. 1 a—epitaxy design of Ge/SiGe CQW b—sketch of Ge/SiGe asymmetric CQW

1.2 仿真结果

考虑到实际量子阱生长工艺的难度,实现非对称量子阱中心的势垒区厚度的精确控制,工艺上将势垒区厚度从 1.6 nm 提高到 2 nm,势垒区组分由 $\text{Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ 修正为 $\text{Si}_{0.17}\text{Ge}_{0.83}$ (硅组分越高,生长速度越慢,厚度更容易调控)。上述参数的微调在理论上只

会导致中间势垒两边的量子阱耦合作用轻微下降,从后面的仿真和实验结果也可看出这一调整是合理的。需要强调的是,下面涉及到量子阱参数的仿真和实验分析,都统一基于 2 nm 厚度 $\text{Si}_{0.17}\text{Ge}_{0.83}$ 的结构组分参数。依据实际生长的耦合量子阱结构,结合八能带 $k \cdot p$ 理论,可以计算得到在量子阱层的光场模式为 TE 和 TM 两种情况下的光学吸收谱线,如图 2 所示。图 2b 是图 2a 中虚线框放大图;图 2d 是图 2c 中虚线框放大图。从图中可以看出,在 TE 光模式激发下,由激子引

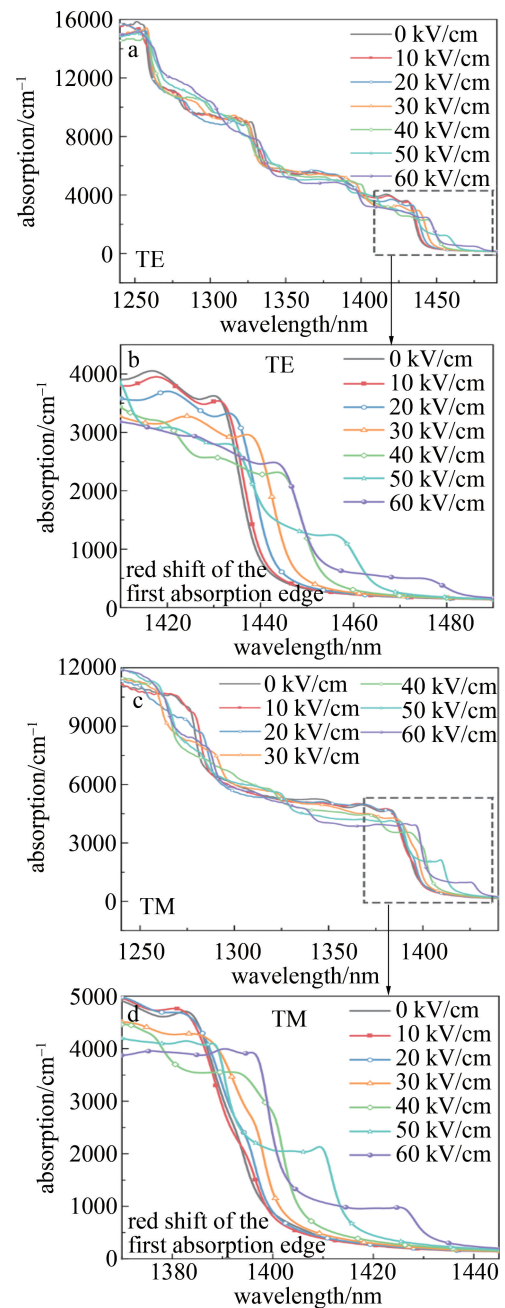


图 2 不同电场强度下锗硅非对称耦合量子阱的光吸收谱

Fig. 2 Absorption spectra of asymmetric Ge/SiGe CQW with different applied electrical field

起的吸收峰略多于 TM 模式激发的吸收峰,并且发现激子数量越多,红移越明显,对应的吸收系数变化也就越大。对比图 2b 和图 2d 可以发现,TE 模式的第一吸收带边(约 1435 nm)比 TM 模式更接近长波长。

根据 Kramers-Kronig(K-K)关系^[22],如下式所示:

$$\Delta n(\nu) = \frac{c}{\pi} \int \frac{\Delta \alpha(\nu')}{\nu'^2 - \nu^2} d\nu' \quad (1)$$

式中, ν 是光波频率; ν' 是对应积分 ν 变量的范围; c 是光速。

从(1)式可知,吸收系数的变化 $\Delta \alpha$ 对应电致折射率的变化 Δn ,可以由上述吸收谱线变换得到折射率的变化曲线,并进一步分析该调制器的相位调制性能。

锗硅非对称耦合量子阱的电致折射率变化谱线如图 3 所示。从仿真曲线可以看出,TE 光模式情况下的电致折射率变化的峰值波长更靠近长波段,并且随着外加电场强度的增加,电致折射率变化的峰值呈现出先增加后减少的趋势。显然,在入射光波长为 1450 nm,电场强度为 40 kV/cm 的情况下,TE 光模式入射导致的最大电致折射率变化可达 0.01,并且显著大于通常的锗硅耦合量子阱。由上述仿真数值可以计算得到,当波长大于 1450 nm 时,该相位调制器的 $V_{\pi}L_{\pi}$ 可以接近 0.01 V · cm 量级。值得注意的是,当电场强度达到 60 kV/cm 时,TE 和 TM 模式在相应第一吸收带波长范围内都呈现两个局部极值。这一现象在图 2 中也

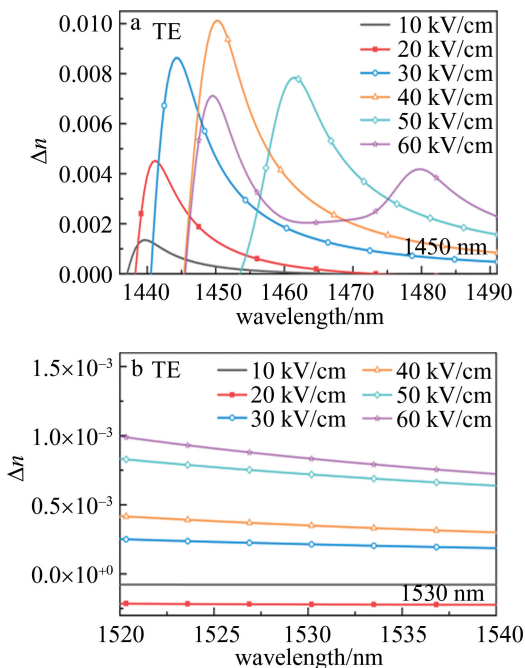


图 3 不同电场强度下锗硅非对称耦合量子阱的电致折射率变化谱线
Fig. 3 Electrorefractive index variation of asymmetric Ge/SiGe CQW with different applied electrical field

有所反映,这是因为在较强的电场强度下,原先的第二激子峰红移很多,接近原第一吸收带的位置,从而形成两个明显的吸收带,第一和第二吸收带边在不同波长处就会导致两个折射率变化峰值。

2 器件的制备和相位调制测试

锗硅非对称耦合量子阱的整体外延方案如图 1b 所示,这里采用减压化学气相沉积(reduced pressure chemical vapour deposition, RPCVD)的方法来逐层外延量子阱层材料。外延得到的基片材料经过波导刻蚀,电极生长,端面刻蚀,划片解理后就可以用于测试,测试的器件示意图和系统装置如图 4 所示。这里采用放大自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE)宽谱光源来测试调制器的宽谱响应,数字源表(digital source meter, DSM)连接的直流探针用来给调制器施加直流偏压,同时计算机连接光谱仪(optical spectrum analyzer, OSA)直接采集光谱数据。

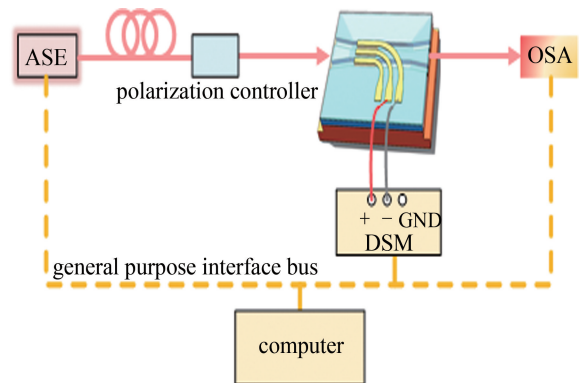


图 4 相位调制测试的系统装置图

Fig. 4 Experimental setup of phase modulation

由于整个器件在直波导两端面正对的方向上可以看作一个法布里-珀罗(Fabry-Pérot, F-P)干涉仪,因此光谱响应呈现出与波长相关的干涉波纹,从干涉峰波长的漂移变化 $\Delta \lambda$ 就可以导出有效折射率 Δn_{eff} 的变化,如以下公式所示:

$$\Delta n_{\text{eff}}(\lambda) = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} n_g(\lambda) \quad (2)$$

$$n_g(\lambda_m) = \frac{\lambda_m^2}{2L\Delta \lambda_m} \quad (3)$$

式中, n_g 为光模式的群折射率; L 表示整个器件的长度,包括被调制部分和两端锥形波导的长度之和,约为 360 μm , L 越短,实验中能观测到的干涉峰波长间隔(纵模间隔) $\Delta \lambda_m$ 就越明显, λ_m 的下标 m 表示整数,对应不同的纵模波长。

如图 5 所示,给出了光波长在 1520 nm ~ 1540 nm

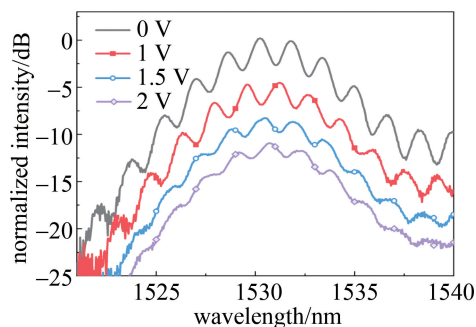


图5 在反向偏置电压变化时,光通信 C 波段的光谱响应

Fig. 5 Spectral response at optical communication C-band under different reverse bias voltage

范围内,光谱响应随着施加偏置电压的变化。已将不同曲线的纵坐标基准做适当整体偏移,以便于比较。随着反偏电压的增加,干涉峰的波长逐步漂移,当电压达到 1.5 V 附近时,干涉峰的漂移接近一个周期。从

表 1 锗硅调制器性能对比

Table 1 Comparison of this work and other reported Ge/SiGe modulators

	structural composition	bias voltage/V	wavelength/nm	index variation	$V_{\pi}L_{\pi}/(\text{V} \cdot \text{cm})$
reference [23]	Ge/Si _{0.15} Ge _{0.85} MQW	8	1475	1.3×10^{-3}	0.46
reference [24]	7×[7 nm Ge QW+1.5 nm Si _{0.15} Ge _{0.85} inner barrier+7 nm Ge QW+26 nm Si _{0.15} Ge _{0.85} outer barrier]	1.5	1420	2.3×10^{-3}	0.046
our study	8×[6 nm Ge QW+2 nm Si _{0.17} Ge _{0.83} inner barrier+12 nm Ge QW+12 nm Si _{0.15} Ge _{0.85} outer barrier]	1.5	1530	2.4×10^{-3}	0.048

C 波段,依然能体现出优越的器件性能。

3 结论

提出了一种锗硅非对称耦合量子阱的设计,用于实现高效的电致折射率相位调制,不仅在理论仿真上给出锗硅非对称耦合量子阱调制器的理想调制性能,并且在实验上成功制备了对应的器件,实验结果与理论高度吻合。结果表明,相比于同类型的硅基调制器,设计的锗硅非对称耦合量子阱调制器在 1530 nm 波段的电致折射率变化达到 2.4×10^{-3} ,其工作波段范围理论上可以覆盖 1450 nm~1530 nm,这给未来硅基光调制器的发展开辟了新的方向。

参考文献

- [1] REED G T, MASHANOVICH G, GARDES F Y, *et al.* Silicon optical modulators[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(8): 518-526.
- [2] REED G T, JASON PNG C E. Silicon optical modulators[J]. *Materials Today*, 2005, 8(1): 40-50.
- [3] CHUNG S, NAKAI M, HASHEMI H. Low-power thermo-optic silicon modulator for large-scale photonic integrated systems[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 13430-13459.
- [4] SUN J, KUMAR R, SAKIB M, *et al.* A 128 Gb/s PAM4 silicon microring modulator with integrated thermo-optic resonance tuning[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(1): 110-115.
- [5] BASAK J, LIAO L, LIU A Sh, *et al.* Developments in gigascale silicon optical modulators using free carrier dispersion mechanisms[J]. *Advances in Optical Technologies*, 2008, 2008(1): 1-10.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] DUMAS D C S, GALLACHER K, RHEAD S, *et al.* Ge/SiGe quantum confined stark effect electro-absorption modulation with low voltage swing at $\lambda = 1550 \text{ nm}$ [J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19284-19292.
- [10] CHEN H W, KUO Y H, BOWERS J E. 25 Gb/s hybrid silicon switch using a capacitively loaded traveling wave electrode[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1070-1075.
- [11] LIU L, van CAMPENHOUT J, ROELKENS G, *et al.* Carrier-injection-based electro-optic modulator on silicon-on-insulator with a heterogeneously integrated III-V microdisk cavity[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(21): 2518-2520.
- [12] LI C W, BIAN L A. Design of graphene double-mode absorber

波长漂移量可以导出折射率的变化。结果显示,在 1.5 V 偏压的情况下,波长 1530 nm 处的电致折射率变化分别是 2.4×10^{-3} ,该调制器对应的 $V_{\pi}L_{\pi}$ 低至 $0.048 \text{ V} \cdot \text{cm}$,显示该器件具有高效的光调制性能。由于实验设备的限制,光源波长限定在光通信 C 波段,而没有给出 1450 nm 波段附近器件的相位调制性能,但从仿真结果中分析可知,1450 nm 波段的电致折射率变化远大于 1530 nm 处,可以得到更优的相位调制效果。

下面将实验结果与前人的工作进行对比,如表 1 所示。可以发现,本文中的实验结果相对于普通锗硅耦合量子阱^[23]的工作能耗很低,只需要 1.5 V 偏压就可以带来很明显的调制效果;相对于对称的锗硅耦合量子阱^[24]的调制波长范围更广,不仅在 1450 nm 处有很强的吸收变化,甚至可以将调制波段扩展至光通信

- based on F-P resonance and SPP resonance[J]. *Laser Technology*, 2021, 45(4): 507-510(in Chinese).
- 李从午, 卞立安. 基于 F-P 谐振与 SPP 共振的石墨烯双模吸波体设计[J]. *激光技术*, 2021, 45(4): 507-510.
- [13] LIU M, YIN X B, ULIN-AVILA E, *et al.* A graphene-based broadband optical modulator[J]. *Nature*, 2011, 474(7349): 64-67.
- [14] QIU C Y, GAO W L, VAJTAI R, *et al.* Efficient modulation of 1.55 μm radiation with gated graphene on a silicon microring resonator[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(12): 6811-6815.
- [15] GAN S, CHENG C T, ZHAN Y H, *et al.* A highly efficient thermo-optic microring modulator assisted by graphene [J]. *Nanoscale*, 2015, 7(47): 20249-20255.
- [16] XIONG C, PERNICE W H, TANG H X. Low-loss, silicon integrated, aluminum nitride photonic circuits and their use for electro-optic signal processing[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(7): 3562-3568.
- [17] KITTLAUS E A, JONES W M, RAKICH P T, *et al.* Electrically driven acousto-optics and broadband non-reciprocity in silicon photonics[J]. *Nature Photonics*, 2020, 15(1): 43-52.
- [18] WANG C, ZHANG M, CHEN X, *et al.* Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at cmos-compatible voltages[J]. *Nature*, 2018, 562(7725): 101-104.
- [19] ZHANG M, BUSCAINO B, WANG C, *et al.* Broadband electro-optic frequency comb generation in a lithium niobate microring resonator[J]. *Nature*, 2019, 568(7752): 373-377.
- [20] CHENG R, HUANG Sh, XU Q, *et al.* Research progress of lithium niobate quantum devices [J]. *Laser Technology*, 2022, 46(6): 722-728(in Chinese).
- 成然, 黄帅, 徐强, 等. 铌酸锂量子器件研究进展[J]. *激光技术*, 2022, 46(6): 722-728.
- [21] 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.
- [22] WEINER J S, MILLER D A B, CHEMLA D S. Quadratic electro-optic effect due to the quantum-confined Stark effect in quantum wells[J]. *Applied Physics Letters*, 1987, 50(13): 842-844.
- [23] 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): 1-4.
- [24] FRIGERIO J, VAKARIN V, CHAISAKUL P, *et al.* Giant electro-optic effect in Ge/SiGe coupled quantum wells[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15398.