

基于化合物半导体材料高速光开关的研究

北京锦坤科技有限公司 www.jon-kon.com

摘要 高速光开关及光开关阵列是全光交换的核心器件. 首先给出全内反射型光波导光开关器件的理论分析模型, 并基于 GaAs 材料中的载流子注入效应, 采用 GaAs-AlGaAs 双异质结构, 研制了工作波长在 1.55 μm 的 X 结全内反射型和马赫曾德干涉型两种结构的光开关. 测试结果表明, 开关的消光比均超过 20 dB, 开关速度达到 10 ns 量级.

关键词: 光开关, 全内反射, 多模干涉, 载流子注入

光纤通信技术已成为当今通信网络的支柱, 并形成了巨大的应用市场. 作为光纤通信网络中关键光器件之一, 光开关及光开关阵列一直是研究与开发的重点[1], 要实现光分组交换层次上的全光通信, 高速光开关及其大规模阵列是必不可少的器件. 基于各种物理效应和原理, 已经研制出了多种光开关. 其中除了最传统的机械式光开关, 基于微机械技术(MEMS)的光开关、基于二氧化硅或有机聚合物材料热光效应的光波导开关、基于液晶技术的光开关等也已经实现产品化. 这些光开关在消光比、损耗、偏振依赖以及集成度等性能方面都已经达到相当好的水平, 然而开关速度较慢, 主要为 ms 量级. 光分组交换等全光通信网研究需要有 ns 量级光开关, 因此高速光开关及其阵列研究一直是人们非常关注的课题.

化合物半导体材料不仅用于高速微电子器件, 而且广泛用于光电子器件及高速光波导器件, 化合物半导体材料是潜在的最佳光子集成/光电子集成平台之一. 30 多年来基于 GaAs 和 InP 系列化合物半导体材料的光波导器件及相关集成技术一直是集成光波导器件领域的研究主题[2], 也是高速光开关研究的主要方向[3]. 基于化合物半导体材料的高速光波导开关, 工作原理上主要可归纳为利用材料的电光效应、载流子注入效应[4~8]. 由于化合物半导体材料的电光系数较小, 基于这一效应的光波导器件或者是尺寸相对较大, 或是驱动电压较高. 另外, 与铌酸锂的电光效应一样, 化合物半导体的电光效应也是偏振相关的. 在 1.31~1.55 μm 通信波段, 化合物半导体材料的载流子注入效应所能够产生的折射率变化比电光效应高二个数量级. 当注入载流子密度达 10^{18}cm^{-3} 量级时, 折射率变化可达 10~2[9], 而且与波长、偏振无关. 采用载流子注入效应的光开关, 其开关速度主要取决于载流子的寿命, 开关速度很容易达到 ns 量级[10].

X 结全内反射型开关具有数字响应, 波长、偏振不敏感, 工艺容差大以及器件尺寸小等优点. 基于这些优点, 人们在各种材料上对全内反射型光开关进行了研究[8, 11, 12]. 化合物半导体中的载流子注入效应很容易产生较大的折射率变化, 基于化合物半导体材料的 X 结全内反射型光开关可以采用更大的交叉角, 使得器件结构更为紧凑. 采用了多模干涉(MMI)3 dB 耦合器的马赫曾德干涉型(MZI)光开关继承了载流子注入效应和多模干涉结构偏振、波长不敏感[13]的优点, 同时具有低功耗的特点.

本文首先介绍了在全内反射型光开关的分析模型上所做的一些理论工作. 然后介绍了基于 GaAs 的载流子效应研制的 X 结全内反射型以及马赫曾德干涉型两种结构的光开关.

1 全内反射型光开关的理论分析模型全内反射型光波导开关的研究已有 30 多年的历史, 在多种材料上都设计和制作过这种结构的光开关, 但其性能一直不理想. 我们认为, 造成这种结果的一个重要原因是对其工作机制缺乏透彻的理解. 如常见采用平面波展开法来计算反射场和透射场,

这种方法对分析自由空间中光束反射问题是有效的,但它分析全内反射光波导型开关则存在以下问题:

(i) 平面波展开法要求入射光束的发散角小于光束入射角的余角, 否则展开后会有相当部分的平面波分量无法正常入射到反射区, 只能通过设置入射光束的发散角小于光束入射角的余角这一前提来回避这个问题. 然而在全内反射型光波导开关中, 由于入射光为窄光束, 且入射角接近 90° , 往往不满足这一条件.

(ii) 平面波展开法的另一前提是对反射的分析必须在自由空间. 在波导型光开关中, 光束从传输到反射都受到波导的限制, 采用平面波展开法就必然忽略反射区波导的限制作用.

(iii) 平面波展开法要求反射区在垂直于法线的平面内是均匀的, 因此应用这种方法分析全内反射型光波导开关时需要将实际的三维结构等效为二维平面结构. 对于某些实际的开关, 在竖直方向上折射率的分布差异极大, 它会深刻影响光的反射行为. 针对上面的 3 个问题, 我们建立以下 3 个模型, 从本质上去理解全内反射型光波导开关的工作机理.

1.1 窄光束掠入射条件下的反射模型

根据平面波展开法, 入射波在进行傅里叶展开后, 横向波矢 k_x 大于 $k_0 n_1 \sin \theta_0$ 的平面波分量无法入射到反射面上, 这部分平面波分量的传输行为也无法由常规的平面波入射反射理论解释.

对于普通入射问题, 这部分平面波分量的幅度很小, 因而可以忽略. 但在窄光束掠入射条件下, 入射光的发散角将大于入射角的余角 ($\theta > \theta_0$, 如图 1), 这意味着相当部分的平面波分量无法直接入射. 我们通过严格的电磁场理论推导, 证明了 $k_x > k_0 n_1 \sin \theta_0$ 的平面波分量是按照入射反射模式的逆模式与反射区相互作用, 如图 1 所示.

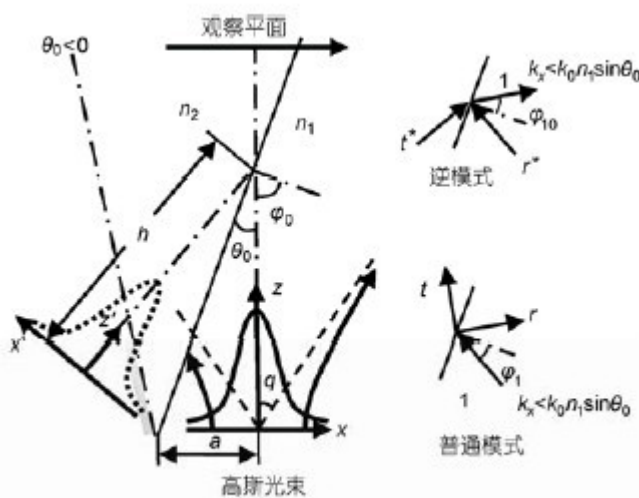


图 1 一维高斯光束入射示意图

在此基础上我们提出了广义的平面波反射和透射的研究思想(如(1)~(2)式). 并在该研究思想下, 证实掠入射极限条件下古斯汉欣位移的存在[14~16].

$$R_g(k_x) = \begin{cases} \frac{n_1 \cos \varphi_1 - \sqrt{n_2^2 - (n_1 \sin \varphi_1)^2}}{n_1 \cos \varphi_1 + \sqrt{n_2^2 - (n_1 \sin \varphi_1)^2}} & k_x < k_0 n_1 \sin \theta_0, \\ \left[\frac{n_1 \cos \varphi_1 - \sqrt{n_2^2 - (n_1 \sin \varphi_1)^2}}{n_1 \cos \varphi_1 + \sqrt{n_2^2 - (n_1 \sin \varphi_1)^2}} \right]^* & k_x > k_0 n_1 \sin \theta_0. \end{cases} \quad (1)$$

$$T_g(k_x) = \begin{cases} \frac{2n_1 \cos \varphi_1}{n_1 \cos \varphi_1 + \sqrt{n_2^2 - (n_1 \sin \varphi_1)^2}} & k_x < k_0 n_1 \sin \theta_0, \\ \left[\frac{2n_1 \cos \varphi_1}{n_1 \cos \varphi_1 + \sqrt{n_2^2 - (n_1 \sin \varphi_1)^2}} \right]^* & k_x > k_0 n_1 \sin \theta_0. \end{cases} \quad (2)$$

1.2 受限空间中光束的反射模型

对于一般的反射问题采用平面波展开法已经有很高的近似度和足够的指导意义，但是严格来说它只适用于自由空间的反射，全内反射型光波导光开关实际属于受限空间的反射。我们进一步采用模式展开法来分析受限空间中光束的反射问题。如图 2 所示，全内反射型光波导开关划分为输入区，反射区和输出区 3 个区域，其中反射区可视为芯区折射率能通过电极调节的 5 层波导[17]。不同于自由空间，受限空间中光束的反射依赖于奇阶模和偶阶模之间的简并。实现简并后，反射区中相邻的奇模和偶模的模场在电极的一侧完全相同，另一侧则刚好相反。因此，所有的模式叠加后，反射区光场只集中在光入射的那一侧。理论分析证明，受限空间中反射的本质是模式的简并。

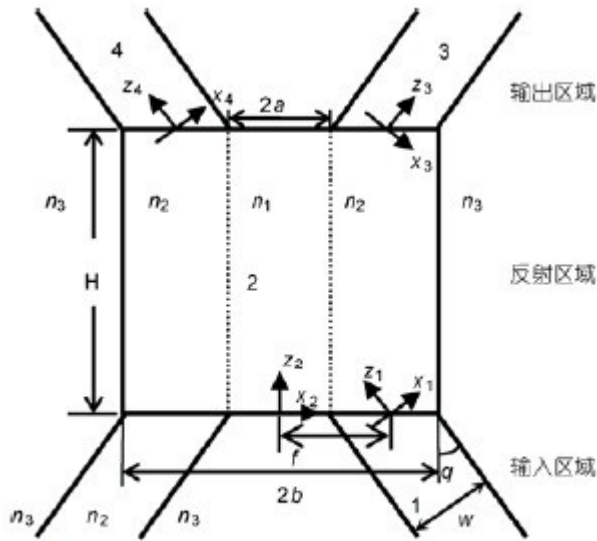


图 2 实际的全内反射型光波导开关结构图

1.3 折射率下降梯度场中的反射模型

基于载流子注入等效效应所导致材料有效折射率的变化，并非是阶跃分布而是渐变的，因此不能用简单的二维等效阶跃折射率模型来分析。因为三维波导不同层面光线反射的轨迹也不同，将导致实际反射光束会被展宽，为了获得更有效的全反射，相应的开关结构必须做出调整。为此要获得高性能的光开关特性，反射区波导也应展宽。以热光效应产生的渐变折射率分布场为例，给出了全内反射型光波导开关的定量计算结果，这一分析结果不仅与软件模拟优化值完全吻合，而且应用于有机聚合物全内反射型热光光开关器件研制[18]。实验证明常用扩展发射区结构的器件的光开关性能大幅度提高[19]。

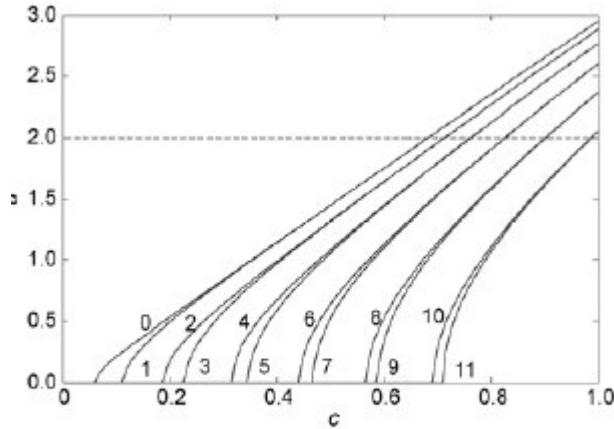


图3 反射区五层平板波导中的模式简并
变量 n 随 c 的变化, 数字标注表示导模阶数

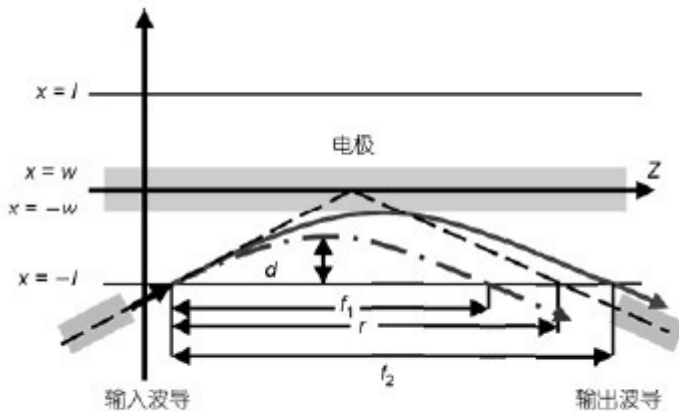


图4 折射率梯度下降场中光束的反射和展宽示意图

2 波导结构设计

GaAs 光波导是高速光开关的首选材料, 我们设计了 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 双异质结 p-i-n 结构, 在光波导全内反射区的垂直方向上进行载流子注入. 由于异质结的势垒作用, 在光波导区的纵向能够将载流子很好的限制在 i-GaAs. 而 i-GaAs 在光学上对应于光波导的芯层部分, 这样能够获得较高的调制效率. 提高 X 结全内反射型光开关性能的关键为如何实现局部的高浓度载流子注入, 为此必须实现正对电极下方的局部 p-i-n 结构, 为达到这一目标, 采用了如下方案: 在材料生长时长成 p-i-n 结构, 在设计局部 p-i-n 结附近区域进行氧离子注入隔离. 外延材料通过金属有机化学气相淀积(MOCVD)工艺生长. 综合考虑载流子注入效率以及波导的单模条件, 最终外延材料结构如图 5 所示. 结合实际的工艺条件, 最终单模波导宽度 $4\ \mu\text{m}$, 刻蚀深度 $1\ \mu\text{m}$.

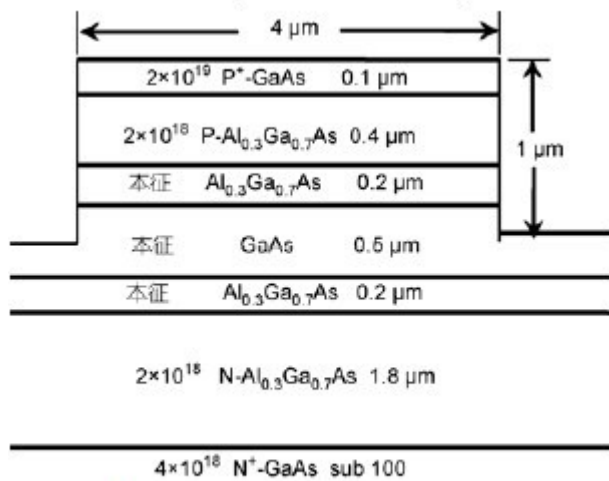


图 5 外延材料结构及波导结构示意图

3 器件结构设计

设计了两种结构的**光开关**, X 结全内反射型以及 MZI 型. X 结全内反射型开关由一个交叉的 X 结和一个电极组成. 工作原理为: 当信号从端口 1(2)输入, 电极不工作时, 信号将直通的从端口 4(3)输出, 此时开关工作在直通态. 当电极工作于正向载流子注入并产生足够大的折射率下降, 则输入信号在电极区发生全内反射, 从而信号从端口 3(4)输出, 此时开关工作在反射态. MZI 型光开关由两个 MMI 3dB 耦合器经干涉臂串联而成. 工作原理为: 信号从端口 1(2)输入, 经过第一个 3 dB 耦合器以后, 信号被分成强度相等而相位相差 $\pi/2$ 的两路信号[13], 如果电极不工作, 则两路信号经过第二个 3 dB 耦合器后从端口 4(3)输出, 此时开关工作在交叉态. 若电极工作并在该波导臂上产生足够的折射率变化, 将一路信号的相位改变 π , 则信号将切换到端口 3(4), 此时开关工作在直通态. 器件设计工作波长在通信波段 $1.55 \mu\text{m}$, 假设电极工作时能够引入最高的折射率改变为 -0.01 , 使用 3-D 光束传输法(Beam Prop)进行参数优化. 设计参数为交叉角度 3° , 电极宽度 $4 \mu\text{m}$, 氧离子注入区宽度为 $10 \mu\text{m}$, 位于电极的两侧, 如图 6(a)所示.

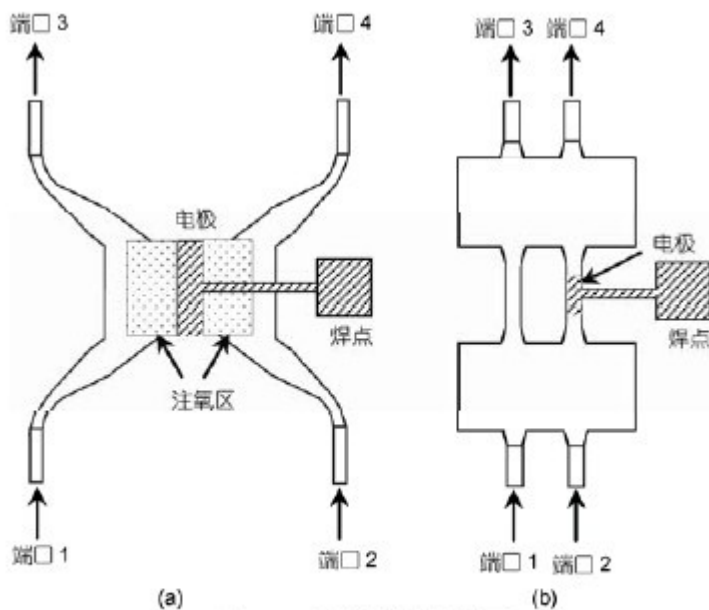


图 6 开关结构示意图

(a) X 结全内反射型; (b) MZI 型

对于 MZI 结构, 3 dB 耦合器的尺寸为宽 $36\ \mu\text{m}$, 长 $1920\ \mu\text{m}$, 两个干涉臂中心间距为 $12\ \mu\text{m}$. 单模波导与多模区的连接处引入长度 $700\ \mu\text{m}$, 宽度由 $4\ \mu\text{m}$ 线性展宽到 $7\ \mu\text{m}$ 的锥形波导, 用于减小 3 dB 耦合器的插入损耗. 电极区长度设计为 $100\ \mu\text{m}$, 如图 6(b)所示.

4 工艺过程及测试结果

首先使用等离子增强化学气相沉积(PECVD)工艺生长一层 $300\ \text{nm}$ 厚的 SiO_2 作为干法刻蚀的掩膜, 然后光刻、湿法腐蚀出干法刻蚀的掩膜, 使用反应离子刻蚀工艺形成基本的光开关波导结构, 刻蚀深度 $1\ \mu\text{m}$. 接着使用 PEVCD 工艺生长 $1\ \mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 作为注氧掩膜, 然后光刻, 干法刻蚀出注氧掩膜. 随后进行氧离子注入. 注氧工艺完成以后, 湿法腐蚀去掉注氧掩膜, 再溅射一层 $200\ \text{nm}$ 厚的 SiO_2 用于防止引线的漏电流, 光刻腐蚀开出电极窗口. 紧接着使用剥离工艺制作 P 型电极, 在整个外延片的背面蒸镀 N 型电极, 最后一步合金化完成工艺制作 $[20].1.55\ \mu\text{m}$ 波段对器件特性进行测试, 分别使用两根拉锥光纤将光信号从激光器耦合到输入波导, 将信号从输出波导耦合到光功率计进行测量. 在测试中未使用偏振控制装置, 输入光信号为 TE 和 TM 混合模式. X 结全内反射型光开关的开关特性如图 7(a)所示, 在注入电流为 $70\ \text{mA}$ 时, 器件消光比超过 $20\ \text{dB}$. MZI 型的开关特性如图 7(b)所示,

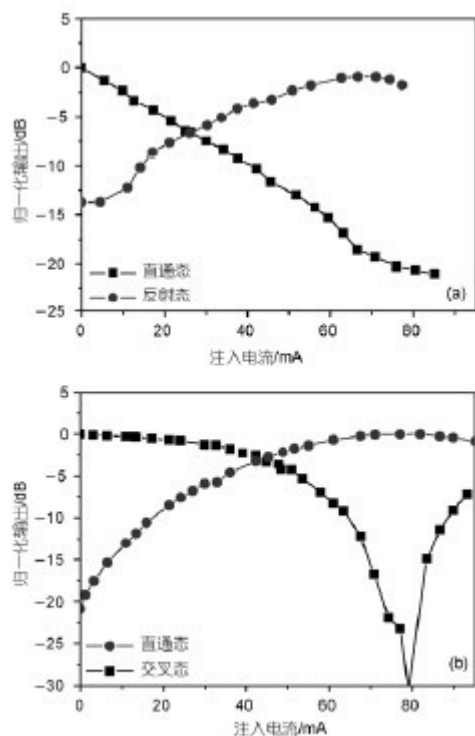


图 7 开关特性曲线 归一化输出与注入电流的关系
(a) X 结全内反射型; (b) MZI 型

在注入电流为 $80\ \text{mA}$ 时, 完成了光路的完全切换, 消光比超过 $25\ \text{dB}$. 同时, 我们还对 MZI 型的光开关进行了波长、偏振特性的测试. 使用宽带光源和光谱分析仪对器件的波长特性进行测试, 在 $1542\sim 1562\ \text{nm}$ 波段, 器件具有较平坦的波长响应, 变化幅度 $(\pm 1.5)\ \text{dB}$. 使用窄带激光器和偏振控制器对器件的偏振特性进行了测试, 器件的偏振相关性为 $(\pm 0.5)\ \text{dB}$. 使用 $1\ \text{MHz}$ 的方波电压信号替换直流电压作为开关的驱动信号, 同时用高速光探测器替换光功率计进行 X 结全内反射型光开关的速度测试, 测试结果如图 8(a)所示. 根据测试结果, 示波器显示开关的上升下降沿均在 $30\ \text{ns}$ 左右. 使用的测试装置中, 信号源的上升沿在 $10\ \text{ns}$ 左右, 如图 8(b)所示,

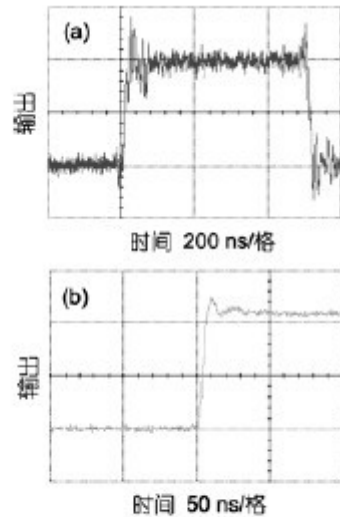


图 8 光开关的响应速度测试

(a) 总体的上升、下降时间; (b) 驱动信号的上升时间

下降沿类似。测试中使用的示波器及光探测器也存在一定时延，延时估算为 10 ns 左右。同时使用的测试电路也为普通的电路，未进行匹配设计。综合考虑，认为光开关的实际上升、下降沿约为 10 ns。对 MZI 型光开关也做了同样的测试，测试与结果与 X 结型相吻合。

5 结论

本文首先介绍了我们在全内反射型光波导开关分析模型方面的研究工作，重点报道了在 GaAs 基底上研制了工作波长在 1.55 μm 的 X 结全内反射型以及马赫曾德干涉型(MZI)两种结构的光开关。根据初步的测试结果，驱动电流在 70 mA 左右，两种光开关的消光比均超过 20 dB，开关的上升下降沿小于 10 ns。

参考文献

- 1 Papadimitriou G I, Papazoglou C, Pomportsis A S. Optical switching: Switch fabrics, techniques, and architectures. J Lightwave Technol, 2003, 21: 384—405[DOI]
- 2 Razeghi M. Optoelectronic devices based on III-V compound semiconductors which have made a major scientific and technological impact in the past 20 years. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2000, 6: 1344—1354[DOI]
- 3 Renaud M, Bachmann M, Erman M. Semiconductor optical space switches. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 1996, 2: 277—288[DOI]
- 4 Komatsu K, Hamamoto K, Sugimoto M, et al. 4×4 GaAs/AlGaAs optical matrix switches with uniform device characteristics using alternating $\Delta\beta$ electrooptic guided-wave directional couplers. J Lightwave Technol, 1991, 9: 871—878[DOI]
- 5 Agashe S S, Shiu K T, Forrest S R. Compact polarization-insensitive InGaAsP-InP 2×2 optical switch. IEEE Photon Technol Lett, 2005, 17: 52—54[DOI]
- 6 Yanagawa H, Ueki K, Kamata Y. Polarization- and wavelength-insensitive guided-wave optical switch

with semiconductor Y junction.

J Lightwave Technol, 1990, 8: 1192—1197[DOI]

7 Ito F, Matsuura M, Tanifuji T. A carrier injection type optical switch in GaAs using free carrier plasma dispersion with wavelength

range from 1.06 to 1.55 μm . IEEE Quantum Electron, 1989, 25: 1677—1681[DOI]

8 庄婉如, 林雯华, 杨培生, 等. 载流子注入全内反射型 GaAs/GaAlAs 光波导开关. 半导体学报, 1993, 14: 1—5

9 Bennett B R, Soref R A, Del Alamo J A. Carrier-induced change in refractive index of InP, GaAs and InGaAsP. IEEE Quantum

Electron, 1990, 26: 113—122[DOI]

10 Wakao K, Nakai K, Kino M, et al. InGaAsP/InP optical switches embedded with semi-insulating InP current blocking layers. IEEE J

Sel Area Comm, 1988, 6: 1199—1204[DOI]

11 Thomson D, Knights A P, Walters D, et al. High performance total internal reflection type optical switches in silicon-on-insulator. In: