

综述

## 硅基光电子器件的辐射效应研究进展\*

周悦<sup>1)2)</sup> 胡志远<sup>1)2)</sup> 毕大炜<sup>1)2)</sup> 武爱民<sup>1)2)†</sup>

1) (中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

2) (中国科学院大学, 材料与光电研究中心, 北京 100049)

(2019年4月15日收到; 2019年6月19日收到修改稿)

硅基光电子器件与芯片技术是通信领域的下一代关键技术, 在光通信、高性能计算、数据中心等领域有广阔的市场, 在生物传感领域也有广泛应用. 根据硅光器件高集成度、重量小等特性, 可以预见硅基光电子芯片在空间通信、核电站、高能粒子实验等辐射环境中也极具应用前景. 本文综述了硅基光电子器件在高能粒子环境下的辐射效应研究工作, 阐述了电离和非电离辐射效应; 针对无源器件和有源器件分别介绍了辐射效应和响应机理, 包括波导、环形谐振器、调制器、探测器、激光器、光纤等. 高能辐射对无源器件的影响主要包括结构加速氧化、晶格缺陷、非晶结构致密化等. 对于光电探测器和激光器, 辐射引起的位移损伤占主导地位, 其中点缺陷引入的深能级会影响载流子响应导致器件性能变化, 而电光调制器在辐射环境下的主要损伤机制是电离损伤, 产生的缺陷电荷会影响载流子浓度从而改变有效折射率. 本文最后展望了硅基光电集成器件的辐射加固思路和在空间环境中的应用前景.

**关键词:** 硅基光电子, 辐射效应, 电离辐射, 非电离辐射

**PACS:** 42.82.-m, 61.82.-d, 61.80.Az, 61.72.J-

**DOI:** 10.7498/aps.68.20190543

## 1 引言

硅基光电子技术是将微电子领域低成本、批量化、高集成度的大规模集成电路制造技术与光电子芯片的大带宽、高速率和高抗干扰能力等优势结合起来的一种新兴技术<sup>[1]</sup>. 基于硅基光电子集成的片上光互连被认为是后摩尔时代突破集成电路技术发展所面临的功耗、带宽和延时等瓶颈的理想方案之一. 硅基光电集成技术在光通信和数据中心互连等数据通信领域已经得到了广泛的运用, 而自动驾驶、生物传感和微波光子等领域也受到了硅基光电子技术发展的推动, 开始向集成芯片的方案迈进. 根据硅光器件的高集成度、重量小等特性, 可以预见这项技术一个非常重要的应用场景将是空间和

辐射等复杂环境中的光互连, 如卫星、航天器和空间站等. 与普通环境中应用的硅基光电器件和集成芯片相比, 工作在这些环境中的器件必须能够长期承受各种辐射粒子, 因为器件一旦受损或失效, 便难以进行维修和更换. 因此, 硅基光电子器件和集成芯片在发射入轨之前, 必须对器件在辐射环境下的性能进行评估, 研究其稳定性及可靠性以确保器件性能在整个使用周期内正常工作. 除了太空环境, 硅基光电器件在高能物理实验、近核反应堆和高能粒子碰撞器等环境中也会受到辐射的作用. 所以, 研究硅基光电子器件在恶劣的辐射环境中性能受损的物理机理对进一步扩大硅基光电芯片的应用范围(如航空航天、核工业等)具有重要的科学意义和使用价值. 在过去几十年, 辐射对集成电路芯片<sup>[2-4]</sup>、III-V族光电子器件<sup>[5-7]</sup>和光纤器件<sup>[8-16]</sup>

\* 国家科技重大专项 02 专项 (批准号: 2017ZX02315004-002-003) 和科技部重点研发计划 (批准号: 2016YFE0130000) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wuaimin@mail.sim.ac.cn

的影响研究较多,但是关于硅基光电器件的辐射效应研究较少.

## 2 辐射源与物质的相互作用

一般来说,辐射源主要有 X 射线、 $\gamma$  射线、中子、质子和  $\alpha$  粒子等. 应用领域不同,器件遇到的辐射源类型和辐射强度也不同. 按照辐射源的性质通常可分为带电粒子、不带电粒子和光子三类.

带电粒子主要包括质子、 $\alpha$  粒子以及重离子.  $\alpha$  粒子是带 2 个单位正电荷、质量数为 4 的氦离子;质子是带 1 个单位正电荷、质量数为 1 的氢离子. 硅基光电器件辐射效应研究中常用的  $\alpha$  粒子、质子与物质相互作用的形式主要是与靶原子核外电子发生非弹性碰撞逐渐损失能量,使靶材料电离和激发.

不带电粒子主要是指中子. 中子与质子的质量相等,但中子与电子之间没有静电作用,不能直接使物质电离. 所以当中子与物质发生相互作用时,是与原子核内的核力相互作用. 相互作用的方式为弹性散射、非弹性散射和吸收.

光子主要是指 X 射线和  $\gamma$  射线. 它们具有很强的穿透力,在与物质原子的碰撞中会损失大部分或全部能量. 光子与物质相互作用的形式主要是光电效应、康普顿效应和电子对效应. 图 1 表示光子能量和物质原子序数与三种效应的关系. 当光子能量较低且原子序数较高时,主要发生光电效应;当光子能量较高且原子序数高时,主要发生电子对效应;当能量处于中间状态且原子序数较低时,主要发生康普顿散射效应. 这三种效应都会使物质的原子电离或激发产生次级电子.

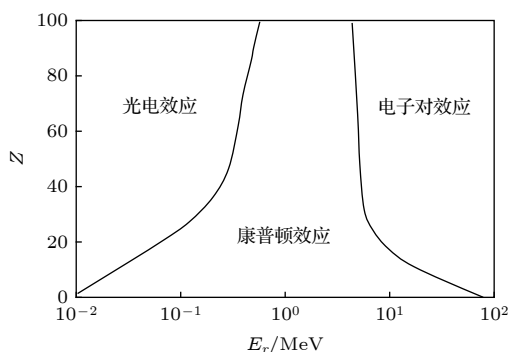


图 1 光子能量和原子序数与三种效应的关系

Fig. 1. Relationships between photon energy, atomic number and three effects.

材料在辐射环境中产生的损伤形式分为电离损伤和位移损伤. 电离损伤是指辐射引起靶材料原子电离或激发,从而产生电子空穴对. 入射的射线散射在靶材料中的原子上,由于光电效应、康普顿效应、电子对效应或辐射粒子的碰撞使靶原子的电子激发或碰撞出来成为自由电子,失去电子的原子成为带正电荷的离子,产生了电子空穴对;当自由电子能量足够高时,会穿过材料并进一步散射而损失能量产生新的电子空穴对. 电离损伤取决于粒子的类型和粒子能量<sup>[5]</sup>. 在器件内部沉积的能量长时间累积最终导致器件的各种性能变化的效应称为总电离剂量效应<sup>[17]</sup>.

位移损伤是指靶原子获得入射粒子的全部或者部分能量之后离开原本的晶格位置并留下空位,离开晶格位置的原子如果移动到一个非晶格位置,则被称为间隙原子,与空的晶格位置一起被称为弗伦克尔缺陷对. 移位的原子还可能撞击其他原子,产生缺陷簇. 位移损伤是由非电离辐射产生的累积效应引起,非电离辐射源主要包括质子、离子、能量高于 150 keV 的电子、中子或二次粒子等.

## 3 硅基光电器件的辐射效应

硅基光电器件按照工作原理和功能可以分为无源器件和有源器件,图 2 所示为一个典型的采用单路光源的光互连体系的工作过程:光源产生光信号,进入电光调制器后将电信号加载到光波上,光信号在硅基光波导内传输,通过耦合器(低损耗耦合器件包括倒锥形耦合波导和光栅耦合器)对外输出,根据片内互连和片外互连应用场景的不同通过波导或光纤输出. 在接收端,光信号进入光电探测器完成光电转换后进行信号处理. 为增加物理通道的信息传输容量,会采用波分复用、偏振复用、空分复用等各种复用方式,因此会在芯片上集成相关的复用/解复用无源器件,考虑硅基光电器件的偏振特性和模式特征,无源器件还包括偏振相关器件,如偏振旋转器件和偏振分束器等. 实现光电/电光转换核心功能的高速调制器和探测器在工作机理上依赖于光和电的相互作用,因此在研究中也这类有源器件与单纯实现传输、复用、偏振和耦合等功能的无源器件区分,两类器件在辐射环境中也有不同的作用机理.

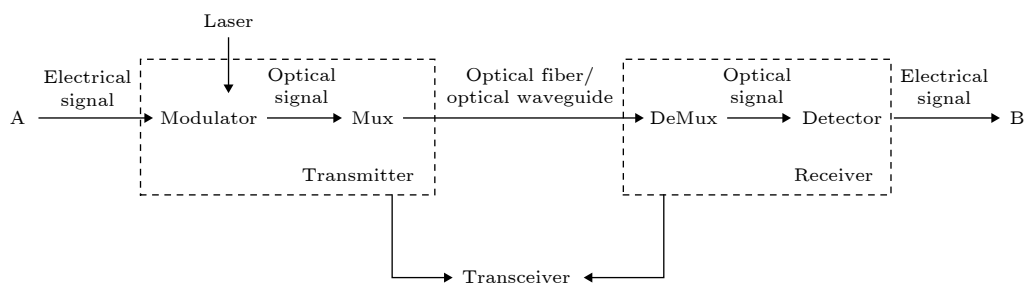


图 2 硅光系统的信息传输过程

Fig. 2. Information transmission process of silicon optical system.

器件长期处在辐射环境下, 材料的折射率会发生变化, 材料发生致密化以及表面化学键变化等, 这些变化会导致光波导器件的传输损耗增加, 从而导致谐振器件的品质因数变化以及谐振波长漂移, 器件性能下降甚至失效. 辐射诱导的变化取决于材料组成、总剂量、剂量率、辐射期间的温度和湿度以及辐照后样品的退火程度等<sup>[10]</sup>.

### 3.1 无源器件的辐射效应

硅基光波导是硅基光电子学芯片中最基本的无源器件, 通过芯区和包层的折射率对比度将光的传输限制在芯区传导, 波导层的折射率高于包层的折射率, 基本原理是全内反射. 在硅基光电子学中, 通常用 Si 作为波导芯层材料,  $\text{SiO}_2$  作为波导包层材料来实现折射率的高对比度.

针对光波导的辐射效应的早期研究主要集中在  $\text{LiNbO}_3$  波导、聚合物波导、氮氧化硅 ( $\text{SiON}$ ) 波导、非晶硅波导以及氮化硅 ( $\text{SiN}_x$ ) 波导的辐射效应. 2007 年, Lai 等<sup>[18]</sup> 研究了以 Ti 扩散、Ni 扩散、Zi/Ni 扩散、质子交换和退火质子交换五种方法制作的  $\text{LiNbO}_3$  波导在总剂量为 10 Mrad(Si) (单位质量物质吸收电离辐射的平均能量, 本文的总剂量全部校准至拉德硅) 的  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线辐射下的变化, 实验表明, 在  $\gamma$  射线照射后, 随着总剂量的增加,  $\text{LiNbO}_3$  波导的传输损耗变大, 其中退火质子交换法制作的  $\text{LiNbO}_3$  波导的传输损耗较低, 保持在 1.2 dB/cm 的水平. 因为退火质子交换法制作的波导在退火后受损的结构会部分恢复, 抗辐照能力较其他四种好. 随后, 他们又研究了聚合物波导的折射率在  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线辐射下的变化, 随着辐射剂量增加, 折射率线性增加, 当辐射剂量超过 7.5 Mrad, 折射率随着辐射剂量的继续增加反而降低<sup>[19]</sup>.

微环谐振器 (micro ring resonator, MRR) 作为光学集成应用中重要的器件, 其工作原理是当谐振器的光学长度是波长的整数倍时发生谐振, 由于其对折射率变化很敏感, 折射率的微小变化会由于光在结构中循环而放大光谱结果. MRR 目前主要应用在光频梳<sup>[20]</sup>、光学滤波器<sup>[21]</sup> 以及高速电光调制器<sup>[22]</sup> 上. MRR 通常是由一个波导环和一根直波导组成, 如图 3 所示. 对其辐射实质上是对波导进行辐射.

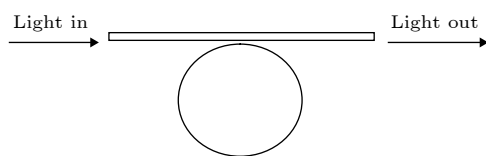


图 3 微环谐振器的结构示意图

Fig. 3. Schematic diagram of micro ring resonator.

2005 年, IMEC 的 Dumon 等<sup>[23]</sup> 用  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线辐照硅微环谐振器. 在 300 krad 的总剂量下, 标准的 SOI 波导制作的硅微环谐振器在被辐照后共振波长变化接近 0.4 pm/krad. 2015 年, Bhandaru 等<sup>[24]</sup> 将硅微环谐振器暴露于总剂量 11.5 Mrad 的 10 keV X 射线和 253 krad 的 662 keV  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  射线, 研究未钝化的硅材料在辐射环境下折射率的变化情况. 高能辐射使得未钝化的硅材料表面加速被氧化生成二氧化硅, 由于二氧化硅的折射率小于硅的折射率, 辐射之后谐振器波导的有效折射率减小, 共振波长发生蓝移, 对于已经有天然氧化层的钝化的硅微环谐振器, 透射光谱没有变化. 2017 年, 麻省理工学院的 Du 等<sup>[25]</sup> 研究了非晶硅 ( $\alpha\text{-Si}$ ) 和  $\text{SiN}_x$  波导在  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线辐照下的性能变化, 总剂量为 10 Mrad, 如图 4 所示, 当辐照发生在空气中时, 器件的折射率增加缓慢甚至减少, 而在氩气中器件的折射率随着辐照剂量增加而增加.

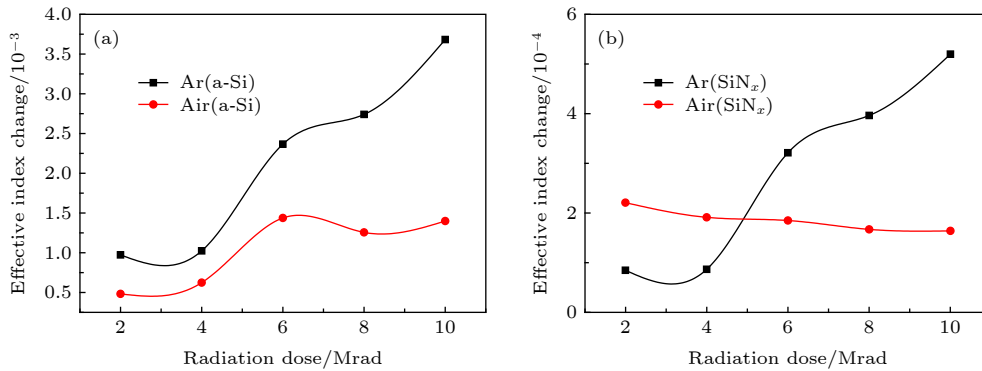


图4 有效折射率与 $\gamma$ 射线的累积剂量的关系 (a) a-Si谐振器; (b)  $\text{SiN}_x$ 谐振器<sup>[25]</sup>

Fig. 4. Dependences of effective index changes on cumulative gamma radiation dose in (a) a-Si resonators and (b)  $\text{SiN}_x$  devices, inferred from optical resonator measurements<sup>[25]</sup>.

对于更高的总剂量, 如 100 krad,  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线对钝化的硅微环谐振器的折射率也没有影响<sup>[26]</sup>. 2014年, Brasch等<sup>[27]</sup>发现在 100 MeV 的高能质子辐射下,  $\text{SiN}_x$  波导型微环谐振器的光学损耗没有显著变化, 材料的折射率也基本没有变化. Grillanda等<sup>[28]</sup>也研究了  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线对非晶硅 (a-Si) 光波导的影响, 总剂量 15 Mrad, 波导芯区是 a-Si, 包层分别涂覆  $\text{SiO}_2$  和含氟聚合物, 测试表明  $\text{SiO}_2$  和 a-Si 材料的折射率没有变化, 然而在高度交联的聚合物中随着辐射剂量增加, 交联聚合物中由于化学键断裂和自由基的形成导致分子量降低, 增加了断裂键的数量, 从而增加聚合物的极化率, 导致折射率增加, 随着辐射剂量继续增大, 聚合物的结构退化导致折射率下降. 他们还通过 Mach-Zehnder 干涉仪和微环谐振腔结构研究  $\alpha$  粒子辐射对  $\text{SiON}$  无源器件的影响<sup>[29]</sup>.  $\alpha$  粒子辐射导致芯层  $\text{SiON}$  波导的折射率增加高于包层  $\text{SiO}_2$  折射率的增加, 导致折射率对比度增加, 损耗减少, 品质因数  $Q$  值提高.  $\text{SiON}$  的折射率介于  $\text{SiO}_2$  和 Si 之间, 可以用来制作高折射率纤芯材料<sup>[30]</sup>.

对于表面无  $\text{SiO}_2$  的器件, 即未钝化的器件, 在 高能光子束如  $\gamma$  射线或者 X 射线下产生钝化的原因主要是因为空气中的氧分子参与了氧化反应, 大于 5.1 eV 能量的光子都可以将氧分子分解成活性氧原子和臭氧<sup>[25,31]</sup>. 辐射产生的自由电子和氧原子反应产生  $\text{O}$  和  $\text{O}^2$  离子, 从而使表面氧化. 当氧化物达到一定厚度之后, 氧化剂通过氧化层往材料内部扩散的速度变慢从而抑制了生长<sup>[26]</sup>. 当氧化饱和之后, 辐射剂量对氧化层的生长影响不大.

对于未钝化的硅器件或者  $\text{SiN}_x$  器件, 表面经

辐射催化生长的  $\text{SiO}_2$ , 其折射率小于 Si 的折射率, 导致材料的有效折射率变小, 从而产生一系列的影响; 对于钝化的硅器件或者  $\text{SiN}_x$  器件, 辐射的影响较复杂.  $\gamma$  射线、X 射线或者质子等产生电离辐射, 对于无源光子学应用的器件中, 没有显著影响; 然而  $\alpha$  粒子等高能粒子轰击波导时, 辐射对波导的结构造成位移损伤, 而且随着剂量增加, 波导结构损伤也会增加, 增加了  $\text{SiO}_2$  的折射率, 导致波导包层和芯层折射率对比度减少, 对光的限制能力减弱. 在辐照剂量为 14 Mrad 之后, 光束将不再继续在波导中传输<sup>[18]</sup>. 在 CMOS 工艺中, 氧化物  $\text{SiO}_2$  通常是用热氧化方法制备的, 是无定形态, 辐射之后  $\text{SiO}_2$  的 Si—O—Si 键角会减小约  $10^\circ$ <sup>[32]</sup>, 辐射诱导非晶原子网络致密化导致折射率增加<sup>[31]</sup>. 折射率变化的原因也不是辐射诱导结晶<sup>[25]</sup>.

上述器件是基于干涉原理的功能性无源器件, 它们对折射率变化非常敏感, 任何导致波导中有效折射率变化的因素, 如波导的氧化、晶格的缺陷、材料的致密化等, 都将导致其波长的变化. 利用 SOS (silica on silicon) 实现的具有波分复用/解复用功能的阵列波导光栅 (arrayed waveguide grating, AWG) 属于 PLC (planar lightwave circuit) 器件, 由于其对折射率变化的敏感度较低<sup>[33,34]</sup>, 在总剂量为 300 krad 的  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线辐照下, 波长仅偏移 0.03 pm/krad, 所以这种 SOS AWG 在该剂量下能正常工作<sup>[23]</sup>.

对于无源器件来说, 其主要损伤机制可以归结为辐射导致表面加速氧化、辐射导致的晶格缺陷或者辐射诱导的非晶原子网络的结构致密化, 从而导致材料中的体光学性质变化. 现阶段关于无源器件

的辐射效应研究主要针对的是一些单独的功能性器件,如 Mach-Zehnder 干涉仪、微环谐振腔、阵列波导光栅等被辐照前后的折射率变化,以此来探究各种辐射源对无源器件的影响.虽然可以通过适当的退火来恢复辐射引起的部分器件损伤,但是并不能完全解决硅基光电系统中无源器件在恶劣的辐射环境下性能会降低甚至失效的问题,需要针对性地提出抗辐射器件的设计方案.

### 3.2 有源器件的辐射效应

硅基光电系统中的有源器件包括激光器、探测器和调制器等.目前研究的激光器主要是基于 III-V 族材料的激光器,由于 Si 是间接带隙半导体,发光效率低,所以硅光系统中硅基发光器件很难制备,通常是采用 III-V 族发光材料如 InP, GaAs, AlGaAs 等和硅光电路混合集成来解决硅基光电子系统的发光问题<sup>[35]</sup>.光电探测器低成本、小尺寸和高速响应的优势使得其应用前景较好,但目前仅有少数的机构研究了硅基光电探测器的辐射效应,大部分机构仍然重点研究基于 III-V 族光电探测器在辐照之后的性能变化,将 III-V 族探测器与硅基光电子芯片异质集成也一直是硅光子研究的重要内容和解决方案之一.对调制器的辐射效应研究很少,主要是欧洲核子研究组织 (CERN) 针对硅光 Mach-Zehnder 调制器开展了一些研究,以及 Sandia 国家实验室对 Si-disk 调制器的研究.

#### 3.2.1 探测器

一直以来,研究人员都致力于制作高响应速度、高响应度、低暗电流,工作波段为 1300—1550 nm 的近红外光电探测器.然而由于能带结构的固有特性,硅的禁带宽度为 1.1 eV,波长大于 1100 nm 的光很难吸收,因此制造光通信波段的探测器是困难的<sup>[36,37]</sup>.锗作为在红外波段具有高响应的材料,同时又具备与 CMOS 工艺兼容的制备技术,故锗硅探测器是目前被研究人员看好的硅基红外光电探测器.硅基光电探测器主要包括体硅光电探测器和锗硅光电探测器.

目前有少数关于硅基光电探测器的辐射效应研究. Nikolić 等<sup>[38]</sup>发现硅基 PIN 光电二极管在  $^{60}\text{Co}_\gamma$  射线下,总剂量为 200 krad,光电流会减少,暗电流增加.意大利的 Kumar 等<sup>[39]</sup>用 100 Mrad 的  $^{60}\text{Co}_\gamma$  射线辐射硅光探测器 (n+/p/p+),反向

漏电流增加. Ge-Si 探测器在总剂量 360 Mrad、能量为 10 keV 的 X 射线辐射下漏电流增加约两倍<sup>[40]</sup>. Seif El Nasr-Storey 等<sup>[7]</sup>用 20 MeV 中子辐射 Ge 光电二极管,漏电流随着中子注量增加而增加. Sandia 国家实验室用  $^{60}\text{Co}_\gamma$  射线辐射 Ge-Si 光电二极管,在反向偏压下,总剂量为 1 Mrad 的辐射增加了暗电流<sup>[41]</sup>.

当硅基光电探测器位于 X 射线或  $\gamma$  射线等强辐射环境中时,光子与束缚电子相互作用消耗动能,电子吸收能量导致电离,产生电子空穴对<sup>[42]</sup>,主要通过康普顿散射的二次电子带有能量,会继续与晶格原子相互作用,导致晶格原子离开原来的晶格位置,产生间隙原子和空位,从而产生点缺陷,这和中子辐射引起的位移损伤一致.该缺陷会在带隙中产生深能级,充当产生复合中心,并且深能级会补偿浅受主或者施主能级,导致有效载流子浓度减少,耗尽区变长,最终影响了光电流;耗尽区的缺陷充当复合或者隧穿效应的陷阱,从而增加暗电流.这一系列辐射效应导致探测器预期的响应会受到影 响,因此对硅光探测器的辐射效应研究是很有必要的.

基于 III-V 族材料的探测器研究更成熟,这类探测器件的辐射效应研究时间上也更早,典型的材料包括 GaAs, AlGaAs, GaP 和 InGaAs. InGaAs 和 GaAs 光电二极管在中子和  $\pi$  介子的辐射下, InGaAs 二极管的暗电流显著增加,响应度迅速减弱,当粒子注量 (单位面积撞击材料的粒子数) 大于  $10^{14}$  particles/cm<sup>2</sup> 时,二极管的性能开始退化,当粒子注量达到  $10^{16}$  particles/cm<sup>2</sup> 左右时二极管近乎失效,然而 GaAs 的暗电流变化不明显<sup>[43]</sup>,但另有学者发现用类似的注量辐照类似的 GaAs 结构,辐射后暗电流增加了一个数量级<sup>[44]</sup>.此外,不同的辐射源造成的损伤不同,191 MeV 的  $\pi$  介子比 20 MeV 的中子造成的损伤高 2—3 倍<sup>[43]</sup>. Gill 等<sup>[45]</sup>用能量分别为 0.8, 6, 20 MeV 的中子和 200 MeV 的  $\pi$  介子辐射 InGaAs/InP 光电二极管,当  $\pi$  介子注量达到  $2 \times 10^{14}$  pions/cm<sup>2</sup> 时,二极管暗电流大约为 10  $\mu\text{A}$ ,响应度降低;200 MeV 的  $\pi$  介子对二极管造成的损伤比 0.8, 6.0, 20.0 MeV 中子造成的损伤分别高 2.3, 4.0, 7.0 倍. InGaAs 光电二极管在 20 MeV 中子辐射下,暗电流随着注量增加而增加<sup>[7]</sup>.

电离辐射会在氧化物中和半导体-绝缘体界面产生带正电的缺陷电荷,可以显著减少 p 掺杂区的

载流子浓度甚至使其反型. 但对于 PIN 光电二极管, 器件速度由载流子在本征区域的传输时间决定, 由于半导体-绝缘体界面远离中心吸收区, 载流子迁移率受半导体-绝缘体界面附近的充电效应的影响很小. 电离辐射导致光电二极管产生的少量损伤相比于位移损伤产生的影响很小. 辐射在光电二极管中的主要损伤机制还是位移损伤<sup>[5]</sup>. 辐射通过非电离能量损失导致耗尽区产生点缺陷, 缺陷密度随着总剂量增加而增多, 耗尽区的缺陷充当了重组或者隧穿效应的陷阱中心, 从而导致暗电流增加.

在反向偏置二极管中, 耗尽区内吸收的光产生的光电流通过漂移被收集, 耗尽区外产生的光电流通过扩散被收集且过程较慢, 主要取决于少数载流子的寿命. 一般常用的光电二极管在较长的工作波长下主要是通过扩散的方式收集电荷, 在这种二极管中, 辐射导致载流子寿命缩短从而引起更多的辐射损伤<sup>[6]</sup>. 因此, 限定入射光的波长范围、调整光电二极管的掺杂水平和结宽度, 使大部分光在耗尽区内被吸收, 从而减小电容并增加响应时间, 也能减轻辐射损伤. 探测器性能会受到辐射的影响主要是因为轻掺杂本征区域中的暗电流在辐照过程中显著增加<sup>[5]</sup>, 所以抑制探测器在被辐照过程中暗电流的增加是提高其抗辐射能力的关键.

### 3.2.2 电光调制器

硅基电光调制器的机理包括电吸收、等离子色散效应和电光效应等. 目前最为成熟的硅基电光调制器是利用等离子色散效应, 将半导体中自由载流子浓度变化引起的光子吸收变化转换为折射率的变化<sup>[46]</sup>, 导致载流子浓度变化区域的折射率发生变化从而引起出射光的强度调制. 可以预见等离子色散效应调制器的有源区是高掺杂的 ( $10^{17}$ — $10^{18}$   $\text{cm}^{-3}$ ). 目前主要是 CERN 在重点研究 Mach-Zehnder 调制器 (MZM) 的辐射效应. MZM 用于将电数据流转换为光数据流, 图 5 为 MZM 的示意

图. MZM 是基于 Mach-Zehnder 干涉仪 (MZI) 工作的器件, 入射光束被均匀等分成两个单独的光束进入 MZI 的两个臂中, 在两个臂中引入光程长度差  $\Delta L$ , 两个光束在输出端相对于彼此累积了不同的相位差  $\Delta\phi$ , 利用相位差产生相长干涉或相消干涉, 当两个光束同相时, 即  $\Delta\phi$  是  $2\pi$  的整数倍时发生相长干涉, 当相位差  $\Delta\phi$  是  $\pi$  的整数倍时发生相消干涉, 通过一个或两个干涉仪臂中的相位调制可以有效地在 MZI 中实现幅度调制<sup>[47]</sup>.

大型强子对撞机 (LHC) 升级到 High Light (HL)-LHC 之后, 需要传输大量的实验数据, 基于硅光子的互连模块是整个大装置的重要组成部件. 为了研究粒子碰撞实验的数据传输, CERN 开始研究硅光 Mach-Zehnder 调制器的辐射效应<sup>[45,47-54]</sup>. 在能量为 20 MeV, 注量为  $1.2 \times 10^{15}$ <sup>[48]</sup>,  $2.0 \times 10^{15}$ <sup>[49]</sup> 和  $3 \times 10^{16}$   $\text{n/cm}^2$ <sup>[45]</sup> 的中子辐照下, 调制器发生非电离辐射, 对其性能没有影响, 这个结果归因于器件中的掺杂浓度很高, 非电离辐射产生的缺陷相比于掺杂浓度而言低了几个数量级. 而在总剂量为 130 Mrad<sup>[48-50]</sup>、能量为 10 keV 的 X 射线下, 调制器接收几十 Mrad 的辐射剂量之后相移值就开始降低, 主要原因是电离辐射的产生. 上述研究结果表明电离辐射导致 MZM 的光学调制性能显著降低. 为了解决这个问题, CERN 分别研究了波导刻蚀深度、耗尽区掺杂浓度以及反向偏压对器件辐射响应的影响. 在电离辐射下, 深蚀刻波导结构的相移比浅蚀刻波导的相移更大<sup>[51]</sup>. 浅蚀刻波导比深蚀刻波导更耐辐射, 但是其吸收损耗更大<sup>[52]</sup>. 所以需要适当考虑参数条件以平衡调制效率、损耗和抗辐射性能等因素. 移相器耗尽区的掺杂浓度越高, 相移越大<sup>[47]</sup>. 反向偏压的值也会影响 MZM 的抗辐射性能<sup>[53]</sup>, 反向偏压增加了器件中的电场, 导致大部分空穴从与电子的重组中逃逸而朝界面处运动, 这些空穴在 Si-SiO<sub>2</sub> 界面附近的 SiO<sub>2</sub> 中被俘获, 自

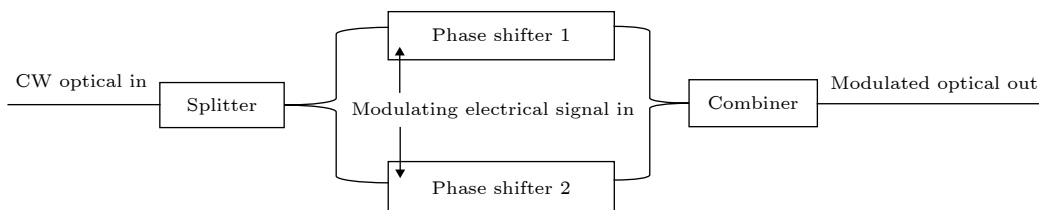


图 5 MZM 的示意图<sup>[47]</sup>

Fig. 5. Schematic diagram of MZM<sup>[47]</sup>.

由载流子浓度降低, 折射率的变化降低, 相移降低. 辐照期间施加反向偏压的相移比未施加反向偏压的相移下降得更快, 施加的反向偏压越大, 相移降低的速度越快.

CERN 所做的粒子碰撞实验中辐射水平最高的区域工作温度通常低至  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 所以温度对器件的辐射效应的影响也在研究范围内, 对于深蚀刻和浅蚀刻器件, 抗辐射性能随温度的降低显著增加, 归因于温度越低空穴迁移率越低. 对辐照后的 MZM 施加正向电流进行退火, 即使当辐射剂量达到  $300\text{ Mrad}$  之后器件的损伤也能基本恢复<sup>[54]</sup>. 因此在低剂量率和需要定期关闭器件的应用中加入退火可以显著地增加硅光 MZM 器件的抗辐射性.

Sandia 国家实验室研究了垂直结 Si-disk 调制器在  $^{60}\text{Co}_\gamma$  射线下的辐射效应, 总剂量为  $1\text{ Mrad}$ , 辐射之后器件的反向电流显著增加, 辐射灵敏度增加<sup>[41]</sup>. Si-disk 调制器是谐振器件, 它的光谱响应随着载流子浓度变化而变化. 反向偏压下, 电离辐射在氧化物和半导体-绝缘体界面积累正缺陷电荷, 导致载流子浓度减少甚至使器件表面附近的 p 掺杂半导体反型, 折射率减小.

对于 Mach-Zehnder 调制器或者 Si-disk 调制器等电光调制器来说, 通过非电离能量损失产生的位移损伤产生的缺陷相比于硅中的高掺杂浓度而言低了几个数量级, 所以位移损伤对其性能基本无影响. 然而通过电离能量损失产生的电离辐射在氧化物中形成正捕获电荷、在 Si-SiO<sub>2</sub> 界面累积正缺陷电荷, 在电场作用下, p 掺杂区的载流子浓度减少甚至产生夹断效应, 从而减少有效折射率, 导致光学性能变差.

近几年国外才着手研究硅光调制器的辐射效应, 国内还没有相关研究, 因此可供参考的数据较少. 调制器作为收发机上重要的模块, 在辐射环境中对其性能开展研究对于硅基光电子集成器件的空间应用有巨大推动作用. CERN 已经研究了调制器在 X 射线和中子辐射下的性能变化, Sandia 国家实验室研究了  $^{60}\text{Co}_\gamma$  射线下 Si-disk 调制器的辐射效应, 然而由于空间中的辐射主要是电子、质子和少量的重离子等, 所以还需要进行更多相关的辐射研究工作. 硅基电光调制器在粒子碰撞实验中的使用对于调制器在空间中的应用有很重要的参考作用.

### 3.3 其他器件的辐射效应

#### 3.3.1 激光器

激光器的基本原理是施加正向偏压时在 p-n 结处发生受激发射, 激光发生在特定阈值电流之上. 激光二极管的光输出与复合率或过量的少数载流子寿命相关.

$^{60}\text{Co}_\gamma$  射线产生电离辐射对激光器造成损伤, 损伤程度与辐射剂量有关. 电离辐射降低了少数载流子寿命, 这是由于非辐射复合中心的数量增加, 会与辐射复合中心争夺过量载流子, 导致量子效率降低, 所以激光器阈值电流升高. 最早的研究出现在 1970 年, GaAs 激光器在  $^{60}\text{Co}_\gamma$  射线电离辐射下, 其阈值电流略有升高, 光强稍有减小<sup>[55]</sup>. InGaAsP 激光二极管被  $1\text{ krad}$  剂量的  $^{60}\text{Co}_\gamma$  射线辐射后其光功率损失约  $10\%$ <sup>[56]</sup>. 高功率激光二极管阵列在剂量为  $4\text{ Mrad}$  的  $^{60}\text{Co}_\gamma$  射线的辐射下, 阈值电流和量子效率值所受的影响较小<sup>[57]</sup>. 剂量高达  $100\text{ Mrad}$  的  $^{60}\text{Co}_\gamma$  射线不会导致高功率激光二极管破坏性失效, 输出功率仅轻微降低<sup>[58,59]</sup>. 激光器在相对高电流密度且短的载流子寿命条件下工作, 对电离辐射的灵敏度相对较低<sup>[57]</sup>. 电离辐射引起的复合中心能量较低, 可以通过热退火或者正向偏置二极管恢复阈值电流, 室温下随着时间推移也可以发生退火从而恢复少部分损伤.

晶格的位移损伤对激光二极管的影响很大. 材料晶格中产生的弗伦克尔缺陷对, 会在禁带中引入深能级, 这些能级充当陷阱和非辐射复合中心, 位移损伤也会引起材料折射、吸收或者散射的变化以及一些电学性能如载流子寿命、电阻和载流子迁移率等变化. 十几年前, 研究者们已经研究了 AlGaAs 和 GaAs 激光器二极管在几 MeV 到几百 MeV 的质子下的辐射效应. 研究表明垂直腔表面发射激光器 (VCSEL) 暴露在  $4.5\text{ MeV}$  的质子下, 粒子注量范围为  $(1-9) \times 10^{13}\text{ p/cm}^2$ , 其阈值电流会升高<sup>[60]</sup>. 近红外波段的光发射二极管在  $50\text{ MeV}$  的质子辐射下,  $10^{10}-10^{11}\text{ p/cm}^2$  的注量, AlGaAs-GaAs 双异质结 LED 比两性掺杂剂制造的同质结 GaAs 扩散 LED 的性能降低更少, 因为后者对位移损伤更敏感<sup>[61]</sup>. 当质子能量高达  $500\text{ MeV}$  时, 注量范围为  $10^{11}-10^{12}\text{ p/cm}^2$ , AlGaAs-GaAs 双异质结 LED 更抗质子损伤, 而单异质结器件表现出类似于两性掺杂 LED 的灵敏度<sup>[62]</sup>. 在粒子注量为

$10^{15}$  particles/cm<sup>2</sup>, 能量为 20 MeV 的中子和 191 MeV 的  $\pi$  介子辐射下, VCSEL 比边缘发射激光器更抗辐射, 短波长器件比长波长器件表现更好 [63], 体积越小的激光器显示出更高的抗辐射损伤能力 [43]. Sandia 的环形核研究反应堆 (ACRR) 上进行的一项研究表明, 激光二极管受到粒子注量为  $1.0 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup> 的中子脉冲辐射, 阈值电流显著升高 [56]. 文献 [43,63] 建立了一个速率方程模型, 该模型结合了退火的信息, 用来预测在比典型的辐照测试低得多的粒子注量下使用时发生的性能退化.

激光二极管的性能在  $\gamma$  射线照射下不会发生明显恶化, 表明激光二极管对电离辐射相对不敏感, 相反, 其对中子和质子等辐射引起的位移损伤很敏感. 例如中子辐射对激光二极管造成的损伤比  $\gamma$  射线对其造成的损伤高约 100 倍 [57]. 为了最大限度地减轻辐射效应, 激光器应具有下列特征: 阈值电流低、出色的散热能力、少数载流子寿命低、初始光输出功率高. 另外, 激光二极管腔长的变化会影响其抗辐射性能, 因此在辐射加固和器件性能之间需要权衡考虑.

### 3.3.2 光 纤

光纤被广泛用于光通信和光纤传感, 但是在空间等辐射环境下, 光纤会产生辐射致衰减 (RIA) [15]. 辐射对光纤的影响主要是导致光纤中形成色心, 色心本质上是辐射引起的点缺陷, 色心会强烈吸收光纤中的传导光, 增加 RIA. 光纤中掺杂可以改变 SiO<sub>2</sub> 的折射率, 因此芯区和包层的掺杂剂类型会强烈地影响光纤的抗辐射性. 通常掺入 Ge 或 P 增加 SiO<sub>2</sub> 的折射率, 然而掺入 F 或 B 会降低折射率. 一般芯区的掺杂剂是 Ge 和 P. 研究表明, 1 MeV 的脉冲 X 射线, 1.2 MeV 的连续  $\gamma$  射线和 14 MeV 的中子分别辐射芯区掺杂 Ge, GeP 和 P 的光纤, 对于 P 掺杂或者 GeP 掺杂的光纤, 辐射剂量越大, RIA 值越大, 随着波长增大 (300—1100 nm), RIA 值减弱, 其中没有 P 掺杂的光纤其 RIA 较低, 且随着辐射剂量呈非线性变化, 三种辐射源对光纤的 RIA 影响类似 [11]. 同样, 在总剂量为 1100 Mrad 的  $\gamma$  射线下对光纤进行辐照, 实验结果表明光纤掺杂量越少其 RIA 值越低 [64]. 更多光纤的辐射效应研究的相关内容, Sporea 等 [9] 较好地详述过.

在过去十年间, 随着新材料、新技术和光纤在辐射环境中的应用不断涌现, 关于光纤的辐射效应

研究已经取得一定的进展. 光纤在辐射环境中应用时可能遇到的辐射类型有 X 射线、 $\gamma$  射线、电子束、 $\alpha$  粒子、中子和质子等, 光纤的性能会受到这些辐射源性质的影响, 也会受到光纤自身的参数、温度、辐射源的剂量和剂量率等因素的影响. 辐射虽然会使光纤中产生色心, 但是色心并不完全稳定, 一般可通过改变掺杂剂、温度等条件使色心部分退火, 从而改变光纤的耐辐射性.

## 4 硅光器件的辐射加固和应用展望

目前在硅光器件的辐射效应研究工作中, 可供参考的试验和数据较少, 而关于硅光器件的辐射加固研究更为稀缺. 无源器件在辐照下发生性能变化主要是因为辐射引起材料产生晶格缺陷、网络结构致密化或者表面氧化等, 从而导致材料的折射率变化, 通过改变器件的结构, 例如在器件表面生长一层氧化层充当钝化层, 可以适当地增加器件抗辐射性. 然而 Si 表面生长的自然氧化层厚度只能达到 40 Å 左右, 而且只能一定程度地提高抗辐射性. 辐射产生的具体影响与辐射源能量和剂量以及操作温度有关 [32].

有源器件的辐射加固可参考 CERN 在研究 MZM 的辐射效应时提出的改变器件抗辐射性能的措施: 他们通过改变波导的宽度、耗尽区掺杂浓度、波导的蚀刻深度 (深蚀刻、浅蚀刻)、芯区和包层的材料以及掺杂的宽度等因素, 从而降低器件对辐射的敏感度. 硅基微电子 SOI 器件的辐射加固技术对硅光器件的辐射加固研究也有参考作用. SOI 器件中的绝缘埋层和浅沟槽隔离氧化层对辐射最为敏感, 通常可以从材料的改性、特殊工艺和器件结构设计等方面入手来降低 SOI 器件对辐射的敏感度 [4,65]. 在制作过程中也要注意不要引入大量的氢, 因为氢的存在会使正缺陷电荷更接近氧化物-半导体界面, 使界面态能级位置更接近禁带中心, 器件性能更容易产生退化 [66]. 在光电器件中, 当辐射停止之后再次给器件施加电流时, 器件会发生退火, 即在器件重新开始工作时, 辐射产生的损伤会部分恢复; 但是当辐射对器件造成永久性的损伤时, 退火就不再起作用.

硅光器件的辐射效应研究目前还都比较分散, 硅基光电子技术在空间的系统应用需要研究整个硅基光电集成芯片的辐射效应以使其能够适应空



间复杂的辐射环境. 如果能够熟悉硅基光电集成器件的辐射效应并能设计出具有一定抗辐射性能的器件, 那么硅基光电子集成芯片在空间中的应用前景会非常广阔.

### 参考文献

- [1] Wang X J, Su Z T, Zhou Z P 2015 *Sci. China: Phys. Mech. Astron.* **45** 15 (in Chinese) [王兴军, 苏昭棠, 周治平 2015 中国科学: 物理学 力学 天文学 **45** 15]
- [2] Dai L H, Bi D W, Zhang Z X, Xie X, Hu Z Y, Huang H X, Zou S C 2018 *Chin. Phys. Lett.* **35** 056101
- [3] Dai L H, Bi D W, Hu Z Y, Liu X N, Zhang M Y, Zhang Z X, Zou S C 2018 *Chin. Phys. B* **27** 048503
- [4] Zhang Z X, Zou S C 2017 *Chin. Sci. Bull.* **62** 1004 (in Chinese) [张正选, 邹世昌 2017 科学通报 **62** 1004]
- [5] Johnston A H 2000 *the 4th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Application* Tsukuba, Japan, October 11–13, 2000 p1
- [6] Johnston A H 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 2054
- [7] Seif El Nasr-Storey S, Detraz S, Olantera L, Sigaud C, Soos C, Troska J, Vasey F 2013 *Topical Workshop on Electronics for Particle Physics* Perugia, Italy, September 23–27, 2013 pC12040
- [8] Henschel H, Kohn O, Weinand U 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 1432
- [9] Sporea D, Agnello S, Gelardi F M <https://www.intechopen.com/books/frontiers-in-guided-wave-optics-and-optoelectronics/irradiation-effects-in-optical-fibers> [2019-3-7]
- [10] Sporea D, Sporea A <http://www.intechopen.com/embed/radiation-effects-in-materials/radiation-effects-in-optical-materials-and-photonic-devices> [2019-3-7]
- [11] Girard S, Baggio J, Bisutti J 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3750
- [12] Uffelen V M, Girard S, Goutaland F, Gusarov A, Brichard B, Berghmans F 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 2763
- [13] Wyllie K, Baron S, Bonacini S, Çobanoğlu Ö, Faccio F, Feger S, Francisco R, Gui P, Li J, Marchioro A, Moreira P, Paillard C, Porreta D 2012 *Proceedings of the 2nd International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics* Chicago, IL, USA, Jun 9–14, 2011 p1561
- [14] Xiang A, Gong D, Hou S, Huffinan T, Kwan S, Liu K, Liu T, Prosser A, Soos C, Su D, Teng P, Troska J, Vasey F, Weidberg T, Ye J 2012 *Proceedings of the 2nd International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics* Chicago, IL, USA, Jun 9–14, 2011 p1750
- [15] Song J M, Guo J H, Wang X Q, Hu S L 2012 *Laser & Optoelectronics Progress* **49** 080001 (in Chinese) [宋镜明, 郭建华, 王学勤, 胡妹玲 2012 激光与光电子学进展 **49** 080001]
- [16] Berghmans F, Brichard B, Fernandez A F, Gusarov A, Uffelen M V, Girard S 2008 *An Introduction to Radiation Effects on Optical Components and Fiber Optic Sensors* (Dordrecht: Springer Netherlands) pp127–165
- [17] Shen Z C, Ding Y G 2015 *Radiation Protection Design and Radiation Effect* (Beijing: China Science And Technology Press) p85 (in Chinese) [沈自才, 丁义刚 2015 抗辐射设计与辐射效应 (北京: 中国科学技术出版社) 第85页]
- [18] Lai C C, Chang C Y, Wei Y Y, Wang W S 2007 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **19** 1002
- [19] Lai C C, Wei T Y, Chang C Y, Wang W S, Wei Y Y 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 23303
- [20] Del'Haye P, Schliesser A, Arcizet O, Wilken T, Holzwarth R, Kippenberg T J 2007 *Nature Lett.* **450** 1214
- [21] Ren G H, Chen S W, Cao T T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 034215 (in Chinese) [任光辉, 陈少武, 曹彤彤 2012 物理学报 **61** 034215]
- [22] Cao T T, Zhang L B, Fei Y H, Cao Y M, Lei X, Chen S W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 194210 (in Chinese) [曹彤彤, 张利斌, 费永浩, 曹严梅, 雷勋, 陈少武 2013 物理学报 **62** 194210]
- [23] Dumon P, Baets R, Kappeler R, Barros D, McKenzie I, Doyle D 2005 *Proc. SPIE 5597, Photonics for Space Environments X* (San Diego, California, United States: Optics and Photonics) p1
- [24] Bhandaru S, Hu S, Fleetwood M D, Weiss M S 2015 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **62** 323
- [25] Du Q Y, Huang Y Z, Ogbun O, Zhang W, Li J Y, Singh V, Agarwal M A, Hu J J 2017 *Opt. Lett.* **42** 587
- [26] Ahmed Z, Cumberland T L, Klimov N N, Pazos M I, Tosh E R, Fitzgerald R 2018 *Sci. Rep.* **8** 13007
- [27] Brasch V, Chen Q F, Schiller S, et al. 2014 *Opt. Express* **25** 30786
- [28] Grillanda S, Singh V, Raghunathan V, Morichetti F, Melloni A, Kimerling L, Agarwal M A 2016 *Opt. Lett.* **41** 3053
- [29] Morichetti F, Grillanda S, Manandhar S, Shutthanandan V, Kimerling L, Melloni A, Agarwal M A 2016 *ACS Photonics* **3** 1569
- [30] Wu J D, Huang S, Hu H X, Ding G J, Xiao X J 2014 *Hans* **4** 34 (in Chinese) [吴金东, 黄舒, 胡海鑫, 丁纲筋, 肖湘杰 2014 汉斯 **4** 34]
- [31] Ryckman D J, Reed A R, Weller A R, Fleetwood M D, Weiss M S 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 113528
- [32] Piao F, Oldham G W, Haller E E 2000 *J. Non-Cryst. Solids* **276** 61
- [33] Leick L, Zenth K, Laurent L C, Koster T, Andersen UA L, Wang L, Larsen H B, Nielsen P L, Mattsson E K 2004 *Optical Fiber Communication Conference* Los Angeles, USA, February 23–27, 2004 p40
- [34] Worhoff K, Lambeck P V, Driessen A 1999 *J. Lightwave Technol.* **17** 1401
- [35] Shen H, Li D S, Yang D R 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 204208 (in Chinese) [沈浩, 李东升, 杨德仁 2015 物理学报 **64** 204208]
- [36] Wang Z Q 2014 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [王智琪 2014 博士学位论文 (上海: 中国科学院大学上海微系统与信息技术研究所)]
- [37] Qiu C 2013 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [仇超 2013 博士学位论文 (上海: 中国科学院大学上海微系统与信息技术研究所)]
- [38] Nikolić, D, Vasic A, Fetahovic I, Stanković K, Osmokrović P 2011 *Ser. A: Appl. Math. Inform. Mech.* **3** 27
- [39] Kumar M V, Kumar S, Cheng C, Asokan K, Kumar A, Shobha V, Karanth P S, Krishnaveni S 2017 *ECS J. Solid State Sci. Technol.* **6** Q132
- [40] Zeiler M, Seif El Nasr-Storey S, Detraz S, Kraxner A, Olantera L, Scarcella C, Sigaud C, Soos C, Troska J, Vasey F 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 2794
- [41] Hoffman G B, Gehl B, Martinez N J, Trotter D C, Starbuck A L, Pomerene A, Dallo C M, Hood D, Dodd P E, Swanson S E, Long C M, DeRose C T, Lentine A L 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 801
- [42] Detection Technology, Inc. <http://www.deettee.com> [2019-3-7]

- [43] Troska J, Detraz S, Seif El Nasr-Storey S, Stejskal P, Sigaud C, Soos C, Vasey F 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 3103
- [44] Blansett L E, Serkland, K D, Cich J M, Geib M K, Peake M G, Fleming M R, Wrobel L D, Wrobel F T 2008 *Sandia Report* (Springfield: U.S. Department of Commerce) p1
- [45] Gill K, Axer M, Dris S, Grabit R, Macias R, Noah R, Troska J, Vasey F 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 1480
- [46] Wang J 2015 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [汪敬 2015 博士学位论文 (上海: 中国科学院大学上海微系统与信息技术研究所)]
- [47] Zeiler M 2017 *Ph. D. Dissertation* (Dublin: Dublin City University)
- [48] Seif El Nasr-Storey S, Détraz S, Olantera L, Sigaud C, Soos C, Pezzullo G, Troska J, Vasey F, Zeiler M 2015 *J. Instrum.* **10** C3040
- [49] Seif El Nasr-Storey S, Boeuf F, Baudot C, Detraz S, Fedeli M J, Marris-Morini D, Olantera L, Pezzullo G, Sigaud C, Soos C, Troska J, Vasey F, Vivien L, Zeiler M, Ziebell M 2015 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **62** 329
- [50] Seif El Nasr-Storey S, Boeuf F, Baudot C, Detraz S, Fedeli M J, Marris-Morini D, Olantera L, Pezzullo G, Sigaud C, Soos C, Troska J, Vasey F, Vivien L, Zeiler M, Ziebell M 2015 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **62** 2971
- [51] Zeiler M, Detraz S, Olantera L, Pezzullo G, Seif El Nasr-Storey S, Sigaud C, Soos C, Troska J, Vasey F 2016 *J. Instrum.* **11** C1040
- [52] Zeiler M, Detraz S, Olantera L, Nasr-Storey E S S, Sigaud C, Soos C, Troska J, Vasey F 2016 *16th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)* Bremen, Germany, September 9–13, 2016 p1
- [53] Zeiler M, Detraz S, Olantera L, Sigaud C, Soos C, Troska J, Vasey F 2016 *IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop (NSS/MIC/RTSD)* Strasbourg, France, October 29–November 6, 2016 p1
- [54] Kraxner A, Detraz S, Olantera L, Scarcella C, Sigaud C, Soos C, Troska J, Vasey F 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 1624X
- [55] Barnes, Charles 1970 *Phys. Rev. B* **12** 4735
- [56] Ohyama H, Hirao T, Simoen E, Claeys C, Onoda S, Takami Y, Itoh H 2001 *Physica B* **308** 1185
- [57] Phifer C C 2004 *Sandia Report* (Springfield: U.S. Department of Commerce) p1
- [58] Aukerman L W, Song Y, Vernon F L J 1982 *Laser & Laser Systems Reliability. International Society for Optics and Photonics* Los Angeles, CA, January 28–29, 1982 p56
- [59] Liscka H, Henschel H, Köhn O, Lennartz W, Metzger S, Schmidt H U 1995 *European Conference on Radiation & Its Effects on Components & Systems* Arcachon, France, September 18–22, 1995 p560
- [60] Johnston A H 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 689
- [61] Johnston H A, Rax G B, Selva E L, Barneset E C 1999 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **46** 1781
- [62] Reed A R, Marshall W P, Marshall J C, Ladbury L R, Kim S K, Nguyen X L, Barth L J, LaBel A K 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 2492
- [63] Stejskal P, Détraz S, Papadopoulos S, Papakonstantinou I, Sigaud C, Soos C, Storey S, Troska J, Vaseya F 2010 *J. Instrum.* **5** C12033
- [64] Cheremisin I I, Ermolenko A T, Evlampiev K I, Popov A S, Turoverov K P, Golant M K, Zabezhaïlov O M 2004 *Plasma Devices Oper.* **12** 1
- [65] Tian H, Zhang Z X, He W, Yu W J, Wang R, Cheng M 2008 *Chin. Phys. C* **32** 645
- [66] Yang J Q, Dong L, Liu C M, Li X J, Xu P F 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 168501 (in Chinese) [杨剑群, 董磊, 刘超铭, 李兴冀, 徐鹏飞 2018 物理学报 **67** 168501]

## REVIEW

Progress of radiation effects of silicon photonics devices<sup>\*</sup>Zhou Yue<sup>1)2)</sup> Hu Zhi-Yuan<sup>1)2)</sup> Bi Da-Wei<sup>1)2)</sup> Wu Ai-Min<sup>1)2)†</sup>

1) (*State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

2) (*Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

( Received 15 April 2019; revised manuscript received 19 June 2019 )

## Abstract

Silicon photonics is a fundamental technology, which has great potential applications in optical interconnection for telecom, datacom, and high performance computers, as well as in bio-photonics. Currently considered are the photonics integrated circuits that are able to work in harsh environments such as high energy equipment and future space systems including satellites, space stations and spacecraft. The understanding of the radiation effects of the photonics devices is critical for fabricating radiation hardened photonic integrate chips and maintaining the performance of the devices and the systems. In this paper, the recent progress of the radiation effects of silicon photonic components is summarized. The effects of the high energy particles that possibly degrade the performance of the device are explained, and the response of the passive and active device under radiation are reviewed comprehensively, including waveguides, ring resonators, modulators, detectors, lasers and optical fibers and so on. For passive devices, radiation-induced effects include accelerated-oxidation of the structures, radiation-generated lattice defects, and amorphous densification or compaction in the optical materials. The effective refractive index of the passive device may change consequently, leading the working frequency to shift, the optical confinement to decrease, and the optical power to leak, which accounts for the extra loss or other performance degradation behaviors. For photodetectors and lasers, radiation-induced displacement damage will be dominant. The induced point defects localized in the silicon layer bring about deep level in the forbidden band, acting as generation-recombination centers or trap centers of tunneling effect, which will compensate for either donor or acceptor levels, degrading the response of these optoelectronic device significantly. The plasma dispersion effect is the mainstream approach to building the silicon electro-optic modulators, which will suffer ionization damage in the high energy particle environment, because the interface-trapped hole caused by ionizing radiation reduces the carrier concentration in the depletion region and even induces the pinch-off of the p-doped side of the modulator, which may result in device failure. To improve the radiation hardness of the silicon photonic device, the passivation of the surface, optimization of the waveguide shape, and the choice of appropriate thickness of the buried oxide layer are possible solutions, and more effective approaches are still to be developed.

**Keywords:** silicon photonic, radiation effect, ionizing radiation, non-ionizing radiation

**PACS:** 42.82.-m, 61.82.-d, 61.80.Az, 61.72.J-

**DOI:** 10.7498/aps.68.20190543

<sup>\*</sup> Project supported by the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2017ZX02315004-002-003) and the Major Research and Development Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2016YFE0130000).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [wuaimin@mail.sim.ac.cn](mailto:wuaimin@mail.sim.ac.cn)