

文章编号: 2095-4980(2015)01-0160-09

半导体器件辐射电离效应的激光模拟方法

李沫^{a,b}, 孙鹏^{a,b}, 宋宇^{a,b}, 代刚^{a,b}, 张健^{a,b*}

(中国工程物理研究院 a.电子工程研究所; b.微系统与太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘要: 因对半导体器件进行安全、快捷、无损伤的辐射效应研究及验证的迫切需求, 激光模拟辐射电离效应方法应运而生, 并得到了国外科研界的推动和认可。相比于大型地面辐射模拟装置, 激光模拟方法具有许多独特优势, 可为深入认识半导体器件辐射效应, 开展有针对性的抗辐射加固设计提供重要的补充手段, 其研究在理论和应用方面均具有重要意义。本文简要叙述了 γ 射线、激光与半导体器件相互作用产生电离效应的主要机理, 归纳了激光模拟的物理基础和主要特点, 总结了国内外发展的情况, 深入分析了当前研究存在的问题, 并提出了开展研究可以采取的手段和方法。最后展望了未来值得进一步探索的研究内容和方向。

关键词: 半导体器件; 辐射电离效应; 激光模拟

中图分类号: TN99

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201501.0160

Basic principles and research progress of laser simulation of ionization radiation effect in semiconductor devices

LI Mo^{a,b}, SUN Peng^{a,b}, SONG Yu^{a,b}, DAI Gang^{a,b}, ZHANG Jian^{a,b*}

(a. Institute of Electronic Engineering; b. Microsystems and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: According to the requirements of safe, simple and nondestructive radiation effect investigation of semiconductor devices, the method of laser simulation was proposed and greatly promoted. Compared with large-scale facilities, laser simulation has various unique advantages. It helps understand the ionization radiation effect in depth and is an effective low-cost, table-top supplement for the hardness assurance. Its research shows great significance for radiation effect study in both theory and practice. In this paper, the basic principles of the interactions of γ and laser with semiconductor devices are firstly presented. Then the physical basics and characteristics of laser simulation are given, with the research progress review followed. The existing problems of current research are deeply discussed providing with feasible research approaches. In the end, necessary research contents in the future are proposed.

Key words: semiconductor devices; ionization radiation effect; laser simulation

在很多应用场景中, 存在着 γ 射线、X射线、中子、高能粒子等辐射因素, 这些因素与半导体材料相互作用, 会引发电离效应、位移效应等物理过程, 严重影响基于半导体材料的微电子器件、光电子器件、微机电系统(Micro-electromechanical Systems, MEMS)器件、微系统乃至整个系统的工作性能, 甚至可能使之永久失效^[1]。深入认识辐射效应的影响并探讨相应的抗辐射加固技术是研究人员重点关注的课题。

前期, 人们主要依靠重离子加速器、电子直线加速器、各种放射源等大型地面装置来构造模拟辐射环境, 辅助辐射效应的研究, 并取得了巨大的成功。但这些大型地面辐射模拟装置存在一定局限性, 如辐射测量范围有限, 参数调节非常困难, 改变辐射种类和能量需要较长时间, 对被测器件有损伤, 难于精确提供器件在辐射下的精确时间和空间信息, 需要严格的辐射屏蔽和保护措施等, 难以满足科研人员在设计初期, 在实验室中灵活、快捷、安全地对半导体器件辐射效应和工作性能进行研究和验证的需求^[2]。

收稿日期: 2014-12-15; 修回日期: 2015-01-12

基金项目: 中国工程物理研究院院长基金资助项目(2014-1-100)

*通信作者: 张健 email: zhangjian_ice@caep.cn

由于激光可以在半导体器件内产生与某些辐射效应相近的电学特征, 激光方法模拟辐射电离效应应运而生。近 20 余年来, 得到了国外科研界的推广和认可。此方法已经在半导体器件辐射效应敏感性测试、抗辐射加固器件的批量筛选以及防护措施验证等方面证实了其独特能力, 可在很大程度上弥补地面装置模拟方法的不足, 并具有非常广阔的应用前景。

本文主要以激光模拟半导体器件 γ 射线辐射电离效应为重点, 综合分析了激光模拟的物理基础和基本原理, 阐述了国内外研究进展, 并且探讨了激光模拟辐射电离效应存在的主要问题和相应的研究方法等。

1 半导体器件的 γ 射线辐射效应

当 γ 射线与半导体器件相互作用时, 将引发辐射电离效应, 主要包括: a) 瞬时剂量率效应, 指瞬时脉冲 γ 射线电离半导体器件产生电子-空穴对的现象。目前国外对半导体器件的瞬时辐射响应进行了大量研究, 已经建立了可以预测高达 10^{12} rad(Si)/s 的理论响应模型, 发现了非线性电离、电路单元间耦合等现象, 还分析了高维度的载流子输运过程^[3-4]; b) 电离总剂量效应, 主要来源于长期辐射场景, 是一个累积效应导致器件失效的过程。一般来说, 短时间的总剂量效应主要来自氧化物陷阱电荷的损伤, 长时间的总剂量辐射效应主要来自界面陷阱电荷的损伤。近年来国外发现, 在长期低剂量率的总剂量辐照下, 双极型器件和 CMOS 器件的辐射损伤具有明显的增强效应^[5]。

以上 2 种辐射效应都会使半导体器件和系统性能退化、逻辑错误甚至永久损坏。因此设计者必须针对其可能经历的辐射场景进行有针对性的设计加固和实验验证。美国 Sandia 国家实验室(Sandia National Laboratory, SNL)认为, 能够承受特殊辐照场景的半导体器件和微系统必须采用与一般电子器件不同的材料、结构和工艺。SNL 给出了设计抗辐射半导体器件的主要流程, 如图 1 所示。辐射效应物理机理分析、数学仿真建模与地面模拟实验为其中重要的环节。通过“设计-仿真-模拟实验-优化设计”循环迭代的过程, SNL 确保了其半导体器件和微系统在辐射环境下工作的高可靠性和有效性。

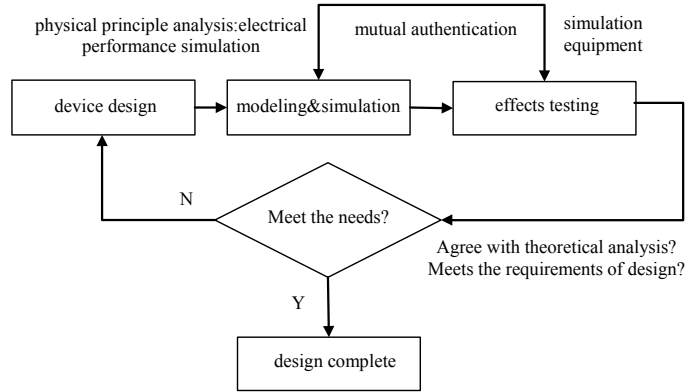


Fig.1 Basic process of designing radiation-hardened devices
图 1 SNL 设计抗辐射加固器件的主要流程

2 激光与半导体相互作用基本原理

激光模拟辐射电离效应最基本原理是半导体器件吸收激光能量, 产生电子-空穴对, 形成电子-空穴等离子体。电子和空穴在耗尽层电场的作用下, 往相反方向运动形成光电流, 通过器件互联, 传播并放大至后续器件中。这个物理机制和 γ 射线照射半导体器件非常接近。

半导体与激光产生的光致光电流来源于半导体材料对光子的吸收, 分为线性吸收和非线性吸收。实际上, 激光照射半导体器件引发的物理过程非常复杂, 除了上述 2 种吸收机制外, 还有自由载流子吸收、激子吸收、带宽收缩、载流子散射、复合及热效应等过程。下面将对主要的物理机制进行简单阐述。

1) 线性吸收

根据能带理论, 当光子能量大于半导体禁带宽度时(以硅材料为例, 300 K 时, 其禁带宽度约为 1.14 eV), 主要的吸收机制为单光子吸收。此时激光光强 I 随入射深度 x 成指数衰减, 可用 Lambert-Beer 定律来描述^[6]:

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \quad (1)$$

式中: I_0 为初始入射光强; α 为半导体吸收光系数, 单位为 cm^{-1} , 与温度、激光波长等参数有关。

此时, 半导体材料单位体积内光激发电子-空穴对的产生率可表示为:

$$N = I \alpha (1 - R) / h\nu \quad (2)$$

式中: R 为半导体的反射率; $h\nu$ 为光子能量。

需要注意的是, 此表达式仅适用于低光强的情况。在光强超过一定阈值时, α 和 R 都会随光强变化而变化,

这种情况下,光注入载流子密度的确定相对比较困难。

2) 非线性吸收

当光子能量略大于硅半导体的禁带宽度,甚至小于其禁带宽度时,半导体材料对光子的吸收率很低。此时如果增大激光强度使之超过一定阈值(如大于 $10^6 \text{ W/cm}^2 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$),就会出现非线性吸收现象,即2个甚至多个光子被一个电子吸收,却只激发一对电子-空穴对。激光强度越大,光波长越长,非线性吸收现象越严重^[7-8]。探究引起非线性吸收的原因,有研究人员认为来自半导体器件对激光强度吸收的不均匀性、等离子振荡引起的反射率变化、温度变化导致吸收系数和电导率改变以及其他热效应等^[9]。

此时,激光强度随着入射深度的变化规律可以写为^[9]:

$$I = I_0 \frac{\exp(-\alpha x)}{1 + \left(\frac{\beta I_0}{\alpha}\right)(1 - \exp(-\alpha x))} \quad (3)$$

式中 β 为非线性吸收系数,单位为 $(\text{cm} \cdot \text{W}^{-1})$,其他参数意义同式(1)。

3) 自由载流子吸收

当半导体中的等离子体振荡频率和入射激光频率接近时,会发生共振吸收,即光子能量被等离子体的自由载流子吸收使其发生同一带内跃迁。这种情况下只产生自由电子的加热效果,不产生新的电离。自由载流子的吸收强烈依赖于光场强度和光波长,这种机制只有当光子能量接近或者小于禁带宽度,且掺杂浓度较高时才比较明显(据文献显示,掺杂浓度一般需大于 10^{20} cm^{-3})^[2]。当半导体熔化,具有较高电导率时,这种机制也比较明显。一般情况下可以忽略这种机制。

4) 带宽收缩效应

半导体材料的能带结构与温度和掺杂浓度有关。当掺杂浓度越大,温度越高,导带与价带之间的带宽越窄,相当于光子能量相对增大,从而导致对激光的吸收增加。在相同的掺杂浓度下,带宽收缩效应对长波长的激光影响越明显。

5) 复合机制

激光照射半导体时打破了热平衡,产生了过剩载流子,主要的复合机制为俄歇复合,尤其对于掺杂高的器件而言。除此之外,还会存在直接复合、间接复合等复合机制。

6) 热效应

激光辐照中的热效应是造成非线性的重要因素之一。当入射激光功率密度较高时,会导致明显的表面加热效应,由外向内传导,将能量传递给晶格系统,使载流子温度和晶格温度几乎同步上升。激光对半导体器件的破坏效应可分为2种,一种是热熔融,即光斑的中心处温度较高,达到半导体的熔点;另外一种为应力破坏,由于光斑照射区域和未照射区域存在较大的温差,产生高温压应力。有文献报道,当激光脉冲宽度为15 ns,功率密度达到 $10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,硅材料的表面就会出现熔化现象^[10]。因此对于一般的激光模拟研究,此效应也可忽略不计。

3 激光模拟半导体器件辐射效应的物理基础和特点

本文主要关注 γ 射线瞬时剂量率效应和总剂量效应。

衡量半导体器件瞬时辐射作用下的响应,一般通过测量其宏观的辐射感生光电流来表征。辐射感生光电流主要来源于 γ 射线和半导体材料之间的相互作用,包括光电效应、康普顿散射和电子对效应,如图2所示(图中横坐标为辐射能量,纵坐标为材料的 Z 值)^[11]。实现激光等效剂量率效应的条件为,当激光辐照半导体器件产生的光电流与 γ 射线辐射感生光电流相等时,即认为激光脉冲的平均等效剂量率与 γ 射线瞬时剂量率相等。

从理想情况来看,剂量率越高,被瞬时 γ 射线辐照的耗尽层体积越大,产生的光电流越大。但是从图3可以看出,对于某些结构较为复杂的器件,由于耗尽区的内崩溃和本征电阻效应等因素,辐射感生的光电流强度和剂量率之间的关系并不完全线性连续,这在一定程度上会影响激光模拟剂量率效应的精确度^[11]。此外,激光参数、半导体电子器件结构、入射方式也会影响激光模拟辐射效应的有效性和精确度。

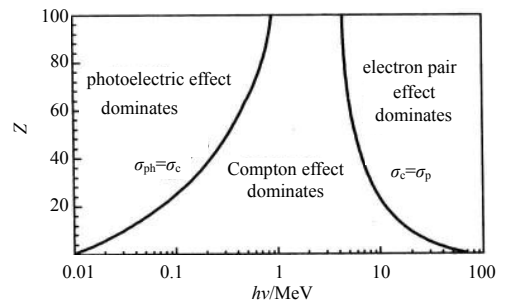


Fig.2 Three main principles of interactions between γ ray and semiconductor

图2 γ 射线与半导体材料相互作用的3种机制

关于半导体器件的总剂量效应, 一般表现为器件氧化层中发生电子-空穴对输运现象, 主要存在初始复合、空穴输运与氧化层俘获、质子产生与界面陷阱形成、界面陷阱俘获 4 个基本过程, 造成器件的电学特性退化, 引起阈值电压漂移、沟道迁移率退化、增益下降、表面漏电流增加等现象。针对总剂量效应的物理机制, 目前美国 SNL 等科研机构提出了众多模型进行解释, 但目前还没有一种统一的、得到大众完全认可的物理分析^[12-14]。对于利用激光模拟电离总剂量效应, 也没有明确的理论分析和实验研究证明长时间激光辐照半导体电子器件模拟总剂量效应的可行性和有效性。但由于总剂量效应中的界面态损伤等问题源自辐照下产生的电子-空穴对, 因此认为激光模拟总剂量效应在原理上可行, 值得深入去探索。

激光模拟辐射电离效应应具有很多独一无二的优势^[15]: a) 激光已经得到明确验证的、可以模拟的剂量率范围可大于 10^{12} rad(Si)/s~ 10^{13} rad(Si)/s, 超过国内现有的电子直线加速器、闪光 X 射线装置能提供的最高剂量率。故而激光模拟方法能够扩展半导体器件辐射电离效应的测试范围; b) 激光模拟辐射效应方法信噪比很高, 非常适用于精确的半导体器件的辐照效应物理模型研究; c) 激光的光斑既可以扩束, 也可以聚焦到 μm 量级。通过精确、简便地控制光斑大小, 既可以定位半导体器件或系统发生辐射效应的具体灵敏单元, 也可用于研究整个器件或系统的辐射响应; d) 激光重复频率较高且可调, 既可用于单个脉冲辐照实验, 也可用于连续脉冲辐照实验, 有利于明确半导体器件和系统在辐射环境中的响应细节和时间特性。如果将激光和被测电路的时钟同步, 可以揭示半导体器件及系统中各单元发生辐射响应的先后顺序和因果关系。而这一点, 大型地面辐射模拟装置无法完成; e) 操作简便, 清洁安全, 试验效率高, 对被测器件无损伤, 对操作人员无危害, 可以在实验室进行辐射效应模拟实验; f) 可靠性高, 可重复性好, 体积小, 成本低, 实验方法和手段成熟; g) 可以同时使用不同参数的激光器, 用于模拟复杂的辐射环境, 这也是大型地面辐射装置无法实现的。

当然, 激光模拟半导体辐射电离效应也存在一些问题, 其产生光电流的机制和辐照并不完全相同, 等效性和使用场景也受到一定限制。但是此项研究的根本出发点并不是取代现有的地面辐射模拟装置, 而是帮助加深对半导体材料、器件及系统辐照效应的物理认识, 为实验室半导体器件抗辐射加固设计、辐射效应诊断以及失效机理研究需要的辐射实验环境提供补充的模拟方法和测试手段。故而, 对激光模拟辐射效应的等效机理、数学模型、实验方法、精确度及模拟范围、影响因素等进行深入研究仍然具有非常重要的意义。

4 国内外研究现状和进展

1) 美国

1965 年美国 SNL 的 D H Habing 首次报道了利用脉冲激光对半导体器件辐射电离效应进行模拟^[16]。将模拟的结果和直线加速器、闪光 X 射线源的实验结果进行对比, 获得了较好的一致性, 初步证实激光模拟方法是一种有效的、简单的、低廉的模拟 γ 射线辐射效应的手段。这也是激光模拟辐射效应研究的良好开端。1967 年, McWilliams 等人针对半导体器件的瞬态辐射电离效应也使用了激光模拟方法, 再次验证了模拟的有效性^[17]。但此项研究中断了一段时间, 直到 20 世纪 80 年代, 才被美国研究界重新重视并大力推动^[18-21], 如美国国防核子局报道了脉冲激光对 I²L 集成电路的剂量率研究等。

但是此后, 美国的相关工作主要集中于单粒子效应的激光模拟。理论方面的工作主要有美国海军实验室的 S Buchner 和波音公司的 A K Richter 发表的利用脉冲激光模拟单粒子效应的相关试验及理论研究^[22-26]。这种方法也被认可为 IC 抗辐射加固设计中的重要一环^[27]。美国建立了不同工作参数的脉冲激光模拟单粒子效应的试验装置。2001 年美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)在发布的《用于 NASA 航天器电子系统的最新单粒子效应测试结果手册》中, 正式收录了脉冲激光模拟试验的单粒子效应数据。美国 SNL、美国海军研究实验(American Naval Research Laboratory, NRL)、波音公司先后建立单粒子效应激光评估实验室, 如图 4 所示。洛克希德·马丁公司甚至提出将激光模拟辐射效应方法引入到 IC 设计流程中^[28-30]。美国其他研究机构如喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)、马丁·玛丽埃塔实验室、马里兰大学巴尔迪莫分析实

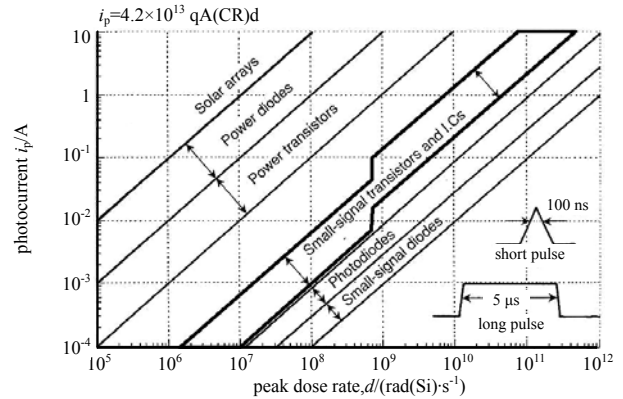


Fig.3 Relationship between radiation-induced photocurrent and dose rate
图 3 半导体器件辐射感光电流和剂量率之间的关系

实验室等也都建成了实验装置。这些装置的详细进展在文献[2,31]给出了较为详细的阐述,这里不再赘述。这些研究,也从另一方面说明,激光模拟辐射效应具有良好的前景。

相对于如火如荼的激光模拟单粒子效应研究,激光模拟瞬时剂量率效应直到最近几年才又见报端,并且公布了非常优秀的研究结果。2008年,美国海军研究实验室利用532 nm的调Q Nd:YAG激光器模拟了 γ 射线的瞬时剂量率效应,比对了激光强度和直线加速器辐射剂量率之间的关系,获得了良好的一致性^[32]。2010年,美国SNL将脉冲激光、脉冲电子束和加速硅离子手段相结合,拟构造复杂辐射模拟环境验证其电子学系统的工作性能^[33]。

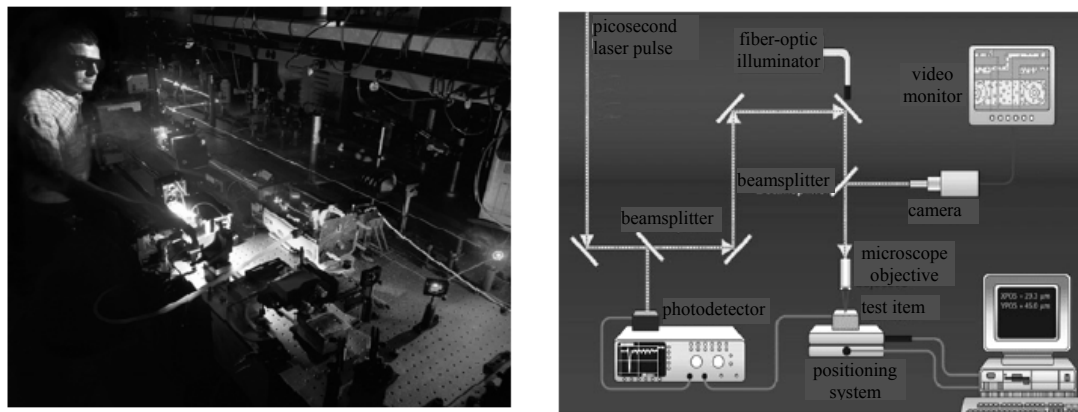


Fig.4 Experimental system of laser simulating single event effect of Boeing
图4 波音公司的激光模拟单粒子效应试验系统

2) 俄罗斯

俄罗斯也很早就开展了激光模拟辐射效应研究,并且将瞬时剂量率效应的模拟和单粒子效应的模拟并重。其主要研究单位为特种电子学系统研究所(Specialized Electronic Systems, SPELS)。近30年来他们开展了CMOS, SOI/SOS器件的激光模拟辐射效应实验,认为激光模拟的误差可以小于 $\pm 30\%$ ^[34-35]。他们获得了激光能量和剂量率的初步等效曲线,还证实利用脉冲激光模拟剂量率效应,不仅器件产生的光电流非常相似,其他电参数变化也具有较好的一致性。初步考虑激光能量以及金属互联覆盖率的影响,他们认为激光可模拟的剂量率范围可高至 $10^{13} \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ ^[36],并认为影响激光模拟剂量率效应的主要因素来自半导体器件设计参数和物理结构。

1995年, SPELS发布了第一款针对激光-半导体器件相互作用的模拟器“DIODE-2D”,该模拟器考虑了多次反射和自由载流子非平衡吸收等电学和光学过程^[37]。

2000年, SPELS指出,由于激光能量接近于Si中的价带导带跃迁能量,且温度升高导致带宽收缩效应,激光吸收系数有很明显的温度依赖性。考虑了激光吸收系数的温度依赖性,他们对1064 nm激光辐照下的Si集成电路进行了模拟,发现温度的改变可以看作等效剂量率的改变。他们还获得了正面入射、背面入射2种方式下的温度和剂量率的关系,认为吸收系数的温度依赖性会导致电离不均匀性增大,但在一定温度范围内不影响电离电流的大小。仿真结果得到了20℃~100℃时的实验验证^[38]。

2004年, SPELS给出了微电子结构半导体区中激光-物质相互作用的物理原理,并针对正面入射和背部入射2种情况,在线性近似下推导了光吸收、多次反射和掺杂能级条件下的等效剂量率的深度曲线^[39],认为激光模拟 γ 射线瞬时辐射剂量率误差的最主要来源为激光产生的不均匀电离,激光参数和器件结构参数对这种电离不均匀性均有贡献。

2006年, SPELS进一步研究了较强激光与器件的相互作用,发现对于强度超过 $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的脉冲激光,计算等效剂量率时必须考虑额外载流子浓度造成的线性系数变化和Auger复合对载流子寿命的影响。对高强度脉冲激光瞬时响应的准确计算必须同时求解至少二维的基本方程和光传输方程^[9]。

2008年, SPELS再次分析了激光在半导体器件内,垂直和水平方向的不均匀性,认为垂直方向的不均匀来源于半导体对激光能量的吸收,而水平方向的不均匀性来源于金属遮挡等因素。他们还探讨了利用漫射体来拓展激光模拟的应用范围的可行性^[40]。

2014年, SPELS基于“DIODE-2D”模拟器仿真结果,阐述了模拟体硅工艺半导体器件剂量率效应时的激光波长优化选择方法,认为应当优先选择0.97 nm~1.08 nm的激光^[41]。

3) 欧洲及日本

欧洲及日本近年来也开展了大量的激光模拟辐射电离效应研究^[23-24,42]。为促进激光装置在电子器件辐射效应

分析中的推广应用, 欧洲宇航防务中心、NRL 和法国波尔多大学联合举办了 RADALS(Radiation Analysis Laser Facilities Day)研讨会, 每 2 年举行一次, 每次会议都聚集了美国 SNL,NASA,JPL 及俄罗斯 SPELS 等科研机构 and 大学的研究人员。

4) 国内

国内在 21 世纪初才开始关注激光模拟辐射电离效应, 见诸报端的工作都围绕着单粒子效应研究, 包括西北核技术研究所、中科院空间中心、兰州物理所、中科院微电子所、哈尔滨工业大学等。这些单位通过自主研发或者国外引进等方式, 搭建了激光模拟单粒子效应系统, 并能在一定程度上, 对半导体器件等进行单粒子效应定量评估工作^[43-48]。但纵观国内, 据目前所知, 尚无公开发表的激光模拟剂量率效应方面的研究。在这一点上, 与国外当前取得的成就有一定的差距。

关于激光模拟半导体器件总剂量效应研究, 目前国内外都无公开文献报道。但从美国 SNL 的文献中可以得知, 低剂量率下的总剂量效应是其异常重视的辐射场景, SNL 一直致力于研究不同的手段来模拟半导体器件的总剂量效应, 激光模拟方法有可能是其探索的方向之一^[33]。

总而言之, 经过几十年的研究, 激光模拟半导体器件辐射电离效应在很多研究和实验中得以推广。但这项研究远远没有结束, 其中仍存在大量的尚未认清的物理问题, 迫切需要开展更多更细致的工作来明确对物理机制、实验手段、影响因素的认识。随着大规模集成电路以及异构集成微系统技术的发展, 新材料、新工艺、新技术层出不穷, 这些形势迫使必须推进此项研究, 推动激光模拟辐射效应方法和技术进步。

5 辐射效应激光模拟存在的主要问题和研究方法

如前所述, 激光与半导体相互作用和 γ 射线与半导体相互作用的机理存在一定差别, 使模拟有一定的偏差和适用范围。

对于瞬时剂量率效应, 两者机制上存在的主要差别包括^[34]: a) γ 射线的能量很高, 穿透性强, 对半导体器件和系统产生的电离效果在各方向基本是均匀一致的, 而半导体对光的吸收系数强烈依赖于光子能量, 半导体材料对光的吸收会造成不均匀电离, 这种电离不均匀影响着模拟的精确度; b) 半导体对光的吸收系数和电离能很大程度上依赖于器件中掺杂的类型和浓度, 这些因素对电离的不均匀性也有贡献; c) 金属对激光的反射率很高, 半导体器件中的金属互联会对光存在遮挡效应, 进一步造成激光在半导体器件内的电离不均匀; d) 激光能量不足以完全电离 $\text{SiO}_2, \text{Si}_3\text{N}_4$ 等介质, 因此激光对某些器件的模拟效果可能较差; e) 激光不能电离空气, 而 γ 射线可以电离空气, 这也会影响激光模拟辐射响应; f) 激光光子能量只是少量地超过半导体能隙, 光致载流子能量比较低, 而 γ 射线可以产生动量较高的热载流子; g) 激光脉冲的形状和脉宽很难做到和 γ 射线脉冲完全相同。

激光参数、器件物理结构、入射方式等因素与上述的机制差异有着紧密的联系。因此激光模拟辐射电离效应最关键的问题应是: 分析激光场在器件内的时间特性、强度特性和空间分布, 并根据不同因素在半导体器件内营造和 γ 辐射场相近的激光场, 最终建立起与激光能量等参数对应的等效剂量率数学模型。

再者, 目前公开报道的激光模拟辐射剂量率范围主要为 $10^8 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s} \sim 10^{12} \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ 。而在此区域外的激光模拟剂量率效应研究少有展开, 迫切需要更多、更细致的工作来完善对激光模拟的认识。

理论研究激光模拟半导体器件辐射电离效应的基本思路如图 5 所示。具体而言, 理论研究应基于激光辐照下半导体器件的漂移-扩散模型, 通过联立求解电离辐射条件下的泊松方程、连续性方程、电流密度方程等基本方程, 获得半导体器件中自洽的电势的空间和时间分布, 以及载流子密度(电离率)的空间和时间分布, 从而获得激光的等效剂量率。基于该理论模型和合适的边界条件, 通过数值仿真建立有效剂量率大小及其在器件内的三维分布与激光波长、脉冲强度等激光参数和金属覆盖率、氧化层厚度、半导体掺杂浓度及其空间分布等器件结构特征之间的关系。激光参数、器件结构和入射方式是研究中 3 个最重要的输入条件。

对于总剂量效应, 激光模拟长期低剂量率下半导体器件总剂量效应目前存在的问题如下: a) 激光能量与辐射剂量率的线性对应关系下限还未确定, 目前报道 μJ 级的脉冲激光可以等效的辐射剂量率约为 $10^6 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s} \sim 10^8 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$, 那么 $10 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ 、甚至小于 $0.1 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ 的剂量率对应的激光能量可能为 nJ 甚至更小。这种情况下, 利用激光长期辐照半导体器件模拟总剂量效应, 激光的漂移、长期稳定性、信噪比可能极大地影响模拟的精确度; b) 总剂量效应的研究往往需要较长的时间, 一般很难有长时间来进行真实情况的模拟, 利用提高激光能量来进行加速实验是否具有有效性还未得到验证; c) 低剂量率下的总剂量效应主要发生在 SiO_2 和 Si 的界面层, 而激光很难有效地电离 SiO_2 , 其模拟的机理和准确性可能和实际情况差别较大, 需要进一步明确。

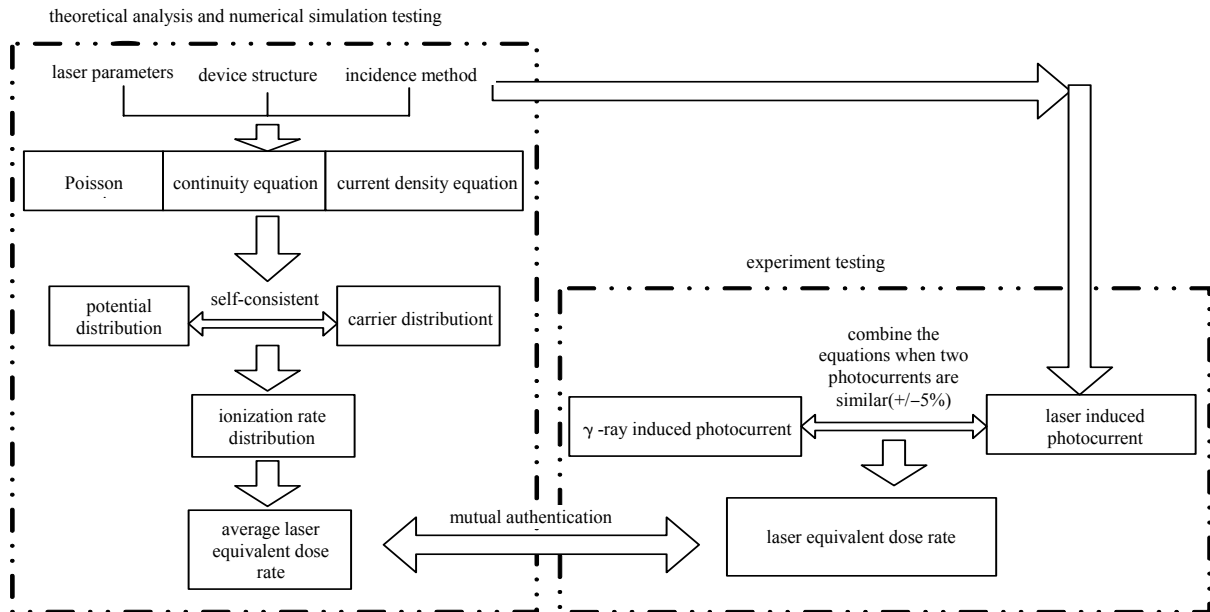


Fig.5 Basic method of laser simulation of ionization radiation effect in semiconductor devices
图 5 研究激光模拟半导体的辐射效应的基本方法

6 结束语

在总结了半导体器件和系统辐射效应研究及设计的需求、激光模拟辐射电离效应的物理基础以及国内外研究现状的基础上,本文详细阐述了激光模拟方法的特点、存在的主要问题和研究方法。可以看出,开展辐射效应的激光模拟机理及方法研究,是目前国外积极推进的研究方向,其发展不但符合半导体器件辐射效应研究、失效机理分析以及抗辐射加固设计等领域的需求,对更深入地认识半导体器件及系统辐射效应本质也具有重大帮助。相对于国外而言,国内研究仍集中于单粒子效应的激光模拟方法研究,在激光模拟剂量率效应等方面尚未查到公开的研究成果。因此,应尽快推进相关研究,切实深入探讨激光模拟剂量率效应的机理和方法,为我国相关领域实际需求提供研究参考和技术手段。

参考文献:

- [1] 陈盘训. 半导体器件和集成电路的辐射效应[M]. 北京:国防工业出版社, 2005. (CHEN Panxun. Radiation effects on semiconductor devices and integrated circuits[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2005.)
- [2] 薛玉雄,田恺,曹洲,等. 激光模拟单粒子效应设备及试验研究进展综述[J]. 航天器环境工程, 2010,27(3):304-312. (XUE Yuxiong,TIAN Kai,CAO Zhou,et al. The progress review of single event effects equipment laser simulation and experimental research[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010,27(3):304-312.)
- [3] Nikiforov A Y,Telets V A,Chumakov A L,et al. CMOS IC transient radiation effects investigations, model verification and parameter extraction with the test structure laser simulation tests[C]// Proc IEEE Int. Conf. Microelec Test Struc., 1996: 253-258.
- [4] Nikiforov A Y,Guminov V N,Telets V A,et al. Radiation hard bulk CMOS ROM dose rate upset detailed analysis technique and results[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1997,44(1):44-47.
- [5] Ronald P L. ELDRS in bipolar linear circuits:a review[J]. IEEE. Trans. Nucl. Sci., 2009,56(4):1894-1908.
- [6] King E E,Ahlport B. Transient radiation screening of silicon devices using backside laser irradiation[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1983,30(6):1809-1815.
- [7] Boggess T. Nonlinear optical energy regulation by nonlinear refraction and absorption in silicon[J]. Opt. Lett., 1984,9(7): 291-391.
- [8] Van Stryland E W. Two photon absorption,nonlinear absorption and optical limiting in semiconductors[J]. Opt. Eng., 1985, 24(4):613-623.

- [9] Nikiforov A Y, Skporpnpgatov P K. Physical principles of laser simulation for the transient radiation response of semiconductor structures, active circuit elements, and circuits: A nonlinear model[J]. *Russian Microelectronics*, 2006, 35(3):138–149.
- [10] 黎小鹿. 激光与半导体材料相互作用的热效应分析[D]. 南昌:江西师范大学, 2008. (LI Xiaolu. The thermal effects analysis of semiconductor materials and laser interaction[D]. Nanchang, China: Jiangxi Normal University, 2008.)
- [11] Holmes-Seidle A, Adams L. Handbook of radiation effects[M]. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2002.
- [12] Rashkeev S N, Cirba C R. Physical model for enhanced interface-trap formation at low dose rates[J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2002, 49(6):2650–2655.
- [13] Hjalmarson H P, Pease R L, Witczak S C, et al. Mechanisms for radiation dose-rate sensitivity of bipolar transistors[J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2003, 50(6):1901–1909.
- [14] Boch J, Saign F, Schrimpf R D, et al. Physical model for the low-dose-rate-effect in bipolar devices[J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2006, 53(6):3655–3660.
- [15] 上官士鹏. 脉冲激光模拟试验数字器件单粒子效应的机理与方法研究[D]. 北京:中国科学院空间科学与应用研究中心, 2011. (SHANGGUAN Shipeng. The mechanism and method research of simulating digital devices single event effects by using pulse laser[D]. Beijing, China: Chinese Academy of Sciences, 2011.)
- [16] Habing D H. The use of lasers to simulate radiation-induced transients in semiconductor devices and circuits[J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1965, 12(5):91–100.
- [17] McWilliams D. Investigation of laser simulation for microelectronic device hardening[R]. AFCRL-67-0102, TRW Systems Group, 1967.
- [18] Ellis T D, Kim Y D. Use of a pulsed laser as an aid to transient radiation upset comparative research and failure analysis[J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1978, 25(6):1489–1493.
- [19] Stultz T J, Crowley J L. An investigation of the transient ionizing radiation response of diffused resistors using a pulsed laser[J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1980, 27(5):1362–1367.
- [20] Hardman M N, Edwards A R. Exploitation of a pulsed laser to explore transient effects on semiconductor devices[J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1984, 31(6):1406–1410.
- [21] Johnston A H, Baze M P. Mechanisms for the latchup window effects in integrated circuits[J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1985, 32(6):4018–4025.
- [22] Buchner S P. Laser simulation of single event upsets[J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1987, 34(6):228–233.
- [23] Richter A K, Arimura I. Simulation of heavy charged particle tracks using focused laser beams[J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1987, 34(6): 1234–1239.
- [24] Melinger J S. Critical evaluation of the pulsed laser method for single event effects testing and fundamental studies[J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1994, 41(6):2574–2584.
- [25] Melinger J S, McMorro D, Campbell A B. Pulsed laser-induced single event upset and charge collection measurements as a function of optical penetration depth[J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, 84(2):690–703.
- [26] Schwank J R, Shaneyfelt M R, Dodd P E, et al. Direct comparison of charge collection in SOI devices from single-photon and two-photon laser testing techniques[J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2011, 58(3):820–826.
- [27] Quinn H M, Black D A, Robinson W H, et al. Fault simulation and emulation tools to augment radiation-hardness assurance testing[J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2013, 60(3):2119–2142.
- [28] McMorro D, Melinger J S, Buchner S, et al. Application of a pulsed laser for evaluation and optimization of SEU-hard designs[J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2000, 47(3):559–565.
- [29] Darracq F. Backside SEU laser testing for commercial off-the-shelf SRAMS[J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2002, 49(6):2977–2983.
- [30] 韩建伟, 张振龙, 封国强, 等. 利用脉冲激光开展的卫星用器件和电路单粒子效应试验[J]. *航天器环境工程*, 2009, 26(2):125–130. (HAN Jianwei, ZHANG Zhenlong, FENG Guoqiang, et al. Launching the single event effects experiment by using pulsed laser on satellite-use devices and circuits[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2009, 26(2):125–130.)
- [31] 丁义刚. 空间辐射环境单粒子效应研究[J]. *航天器环境工程*, 2007, 24(5):283–290. (DING Yigang. Single event effects in space radiation environment[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2007, 24(5):283–290.)
- [32] Nation S A, Massengill L W, McMorro D, et al. Laser dose-rate simulation to complement LINAC discrete device data[J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2008, 55(6):3114–3121.
- [33] Bielejec E S. Mixed hostile-relevant radiation capability for assessing semiconductor device performance[R]. 141535, SNL LDRD Annual Report, 2010–2012.

- [34] Nikiforov A Y,Skorobogatov P K. Experimental studies of the adequacy of lasers simulations of dose rate effects in integrated circuits and semiconductor devices[J]. Russian Microelectronics, 2009,38(1):2-16.
- [35] Demidov A A,Nikiforov A Y. Use of diffused laser irradiation to improve dose rate simulation adequacy[C]// Proc. 5th Workshop on Electronics for LHC Experiments,Snowmass,Colo., 1999:547-550
- [36] Nikiforov A Y,Skorobogatov P K. Dose rate laser simulation tests adequacy: shadowing and high intensity effects analysis[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1996,43(6):3115-3121.
- [37] SPELS. The“DIODE-2D” software simulator manual guide[Z]. 1995.
- [38] Skorobogatov P K,Nikiforov A Y. Influence of temperature on dose rate laser simulation adequacy[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2000,47(6):2442-2446.
- [39] Nikiforov A Y,Skporpnngatov P K. Physical principles of laser simulation for the transient radiation response of semiconductor structures,active circuit elements,and circuits:A linear model[J]. Russian Microelectronics, 2004,33(2):68-79.
- [40] Nikiforov A Y,Skorobogatov P K. Evaluating the effect of photo generation nonuniformity on the accuracy of laser simulation of the transient radiation response in semiconductor devices and circuits[J]. Russian Microelectronics, 2008,37(1):2-14.
- [41] Nikiforov A Y,Skorobogatov P K,Egorov A N,et al. Selection of optimal parameters of laser radiation for simulating ionization effects in silicon bulk-technology microcircuits[J]. Russian Microelectronics, 2014,43(2):133-138.
- [42] Richer A K. Pulsed laser-induced SEU in integrated circuits:A practical method for hardness assurance testing[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1990,37(6):1825-1829.
- [43] 李华,陈雨生. 单粒子翻转脉冲激光模拟的能量阈值的计算[J]. 强激光与粒子束, 2001,13(6):436-440. (LI Hua,CHEN Yusheng. Calculation of the energy threshold in the pulsed laser simulation of single event upset[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2001,13(6):436-440.)
- [44] 黄建国,韩建伟. 脉冲激光诱发单粒子效应的研究[J]. 中国科学G辑:物理学力学天文学, 2004,34(2):121-130. (HUANG Jianguo,HAN Jianwei. The mechanism of pulsed laser induced single event effects[J]. Science China Physics,Mechanics & Astronomy, 2004,34(2):121-130.)
- [45] 韩建伟,封国强,蔡明辉,等. 脉冲激光试验在宇航器件和电路系统抗单粒子效应设计中的初步应用[J]. 航天器环境工程, 2011,28(2):121-125. (HAN Jianwei,FENG Guoqiang,CAI Minghui,et al. Application of pulsed laser test on the anti single event effects of aerospace components and circuitry designing[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011,28(2): 121-125.)
- [46] 薛玉雄,曹洲. 脉冲激光模拟超大规模集成电路单粒子效应试验初探[J]. 核电子与探测技术, 2008,28(2):371-375. (XUE Yuxiong,CAO Zhou. Pulsed laser simulation of vlsi single-event effect testing study[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008,28(2):371-375.)
- [47] BI J S,ZENG C B,GAO L C,et al. Estimation of pulsed laser-induced single event transient in a partially depleted silicon-on-insulator 0.18 μm MOSFET[J]. Chinese Physics B, 2014,23(8):088505.
- [48] BI J S,ZENG C B,GAO L C,et al. Effects of metal spacing and poly-silicon layers on pulsed-laser single event transient testing[C]// IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures(ICMTS), 2014:207-212.

作者简介:



李沫(1982-),女,哈尔滨市人,博士,副研究员,主要研究方向为光子学、光电融合技术和集成微系统技术等.email:limomaria@caep.cn.

孙鹏(1988-),男,山东省高密市人,硕士,研究实习员,主要研究方向为光电融合技术等.

宋宇(1986-),男,四川省南充市人,博士,助理研究员,主要研究方向为集成微系统技术等.

代刚(1984-),男,四川省绵阳市人,博士,副研究员,主要研究方向为集成微系统技术等.

张健(1968-),男,四川省大竹县人,博士,研究员,主要研究方向为微系统技术、太赫兹技术、无线电物理等.