

文章编号: 2095-4980(2017)01-0139-06

激光束模拟剂量率效应关键技术分析

岳 龙, 张战刚, 何玉娟*, 郝明明, 雷志峰, 刘 远

(工业与信息化部电子第五研究所 电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室, 广东 广州 510610)

摘 要: 剂量率效应是电子元器件和系统的抗辐射鉴定考核中不可缺失的项目。脉冲激光束是一种较好的模拟剂量率效应的手段。相比传统脉冲 X 射线装置, 利用激光束模拟剂量率效应, 脉冲输出稳定, 寄生电场效应低, 可进行器件微区辐照, 而且激光束模拟剂量率装置易实现, 剂量率试验的时间和成本均远低于高能 X 射线辐射试验。虽然激光束模拟剂量率装置具有上述优势, 但由于激光束本身的特性, 这种方法具有一定的局限性, 其中高功率激光的非线性吸收、器件金属线的遮挡效应会严重影响激光束模拟剂量率效应的适用性。因此必须通过适当的试验设计和理论修正才能获得相对准确的剂量率试验结果。本文从激光束模拟剂量率效应原理出发, 详细阐述影响激光束剂量率模拟试验适用性的因素, 并分析克服这些影响因素的途径, 以指导激光束模拟剂量率效应装置的开发和应用。

关键词: 激光束; 剂量率效应; 模拟等效性; 抗辐射加固

中图分类号: TN43; R852.7; V438⁺.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201701.0139

Key techniques of pulse-laser simulation of dose rate effects

YUE Long, ZHANG Zhangang, HE Yujuan*, HAO Mingming, LEI Zhifeng, LIU Yuan

(Key Laboratory of Reliability Physics and Application Technology of Electronic Component, The Fifth Research Institute of Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou Guangdong 510610, China)

Abstract: Dose rate effect is a mandatory examination item for devices used in nuclear events. Pulse laser sources are widely used for dose rate effects simulation. Compared with transient high dose rate gamma source, a traditional dose rate effects simulation facility, the pulse laser source shows several advantages, including stable pulse output, low parasitic electrical field, capable to micro-dimensional irradiation and low cost. However, the adequacy of pulse-laser based simulation of the dose rate effects in microcircuits may be corrupted mainly due to some limitations such as laser radiation shadowing by the metallization, the non-linear absorption in a high intensity range etc. The adequacy and accuracy of pulse laser-dose rate effects simulation should be improved through experimental design and theoretical correction. This paper reviews the fundamental of pulse laser simulation for dose rate effects, presents the factors limiting the adequacy and accuracy of simulations and addresses the approaches to overcome corresponding factors.

Keywords: pulse laser beam; dose rate effects; simulation adequacy; radiation hardening

核爆时产生的瞬间高剂量 γ 射线辐射会严重影响电子器件工作, 这种辐射效应称为剂量率效应。剂量率效应主要表现为光电流脉冲, 该脉冲电流大小与脉冲宽度受 γ 脉冲能量、剂量率、宽度等因素决定^[1]。剂量率效应模拟源常采用 γ 射线和硬 X 射线。国内外较常见的剂量率辐射源主要采用强流脉冲电子加速器产生的脉冲电子束, 轰击高原子序数靶材, 产生韧致辐射释放出 γ 射线或硬 X 射线, 获得剂量率可达 10^{12} rad/s^[2-3]。电流脉冲电子加速器装置虽然能够提供模拟真实环境下出现的瞬发脉冲 γ 射线, 但是其试验成本较高, 另外由于加速器释放射线是以场分布的方式存在, 因此在试验过程中, 整个器件和系统均处于辐照场内, 从产生的瞬态失效信息中无法辨认器件中哪些关键部位对剂量率效应敏感, 因此无法指导器件和系统的抗核加固设计。

收稿日期: 2015-07-14; 修回日期: 2015-11-05

*通信作者: 何玉娟 emal:heyu0000@126.com

激光可通过光电相互作用在半导体材料内产生电离作用,从而可诱发半导体内产生光电流脉冲,该作用与 γ 射线和X射线的结果一致。因此脉冲激光束成为另一种模拟剂量率效应的模拟源。通过对比可发现利用脉冲激光模拟剂量率效应具有如下优势^[4]:

- 1) 可进行微区辐射:激光可利用透镜,并通过设计适当的光路将激光束聚焦,束斑大小可根据需要进行调节,可对微小区域进行独立辐照,因而可获得电路各单元剂量率敏感特性。
- 2) 寄生电场很低。
- 3) 脉冲重复率高:激光每次产生的脉冲与激光器本身质量、光路稳定度有关,这些因素在试验中均可控,又因为激光束可实现对焦对特定敏感单元辐照,故而试验过程中激光脉冲重复率高。
- 4) 时间和经济成本低:激光模拟剂量率装备组成简单,易实现,试验准备时间短,能耗低,试验综合成本远低于强流脉冲电子加速器的试验成本。

虽然利用激光束模拟剂量率效应具有上述优势,但由于激光波长相对 γ 射线和X射线长,其在物质中的穿透能力有限,尤其是在原子序数较大的材料中,其穿透能力几乎为0。因而电子器件和电路中的金线会对激光束形成遮挡,从而严重影响激光束对剂量率模拟的等效性。除此之外,与 γ 射线和X射线相比,激光束在模拟剂量率效应时,还面临如下问题:

- 1) 激光束吸收系数强烈地依赖于光子能量,并大于 γ 射线和X射线的衰减系数,造成非均匀的电离。
- 2) 激光束的吸收系数和电离能力与半导体材料的掺杂类型和掺杂浓度有关,不均匀的掺杂会造成激光束电离过程的非均匀性。
- 3) 由于激光束能量低,不足以电离半导体中的电介质,故只能用于模拟那些只有半导体有源区作为主要工作区的器件的剂量率效应。
- 4) 在剂量率效应中,由 γ 射线电离空气产生的电子和空穴的注入也是一个重要的影响因素,而激光束能量无法电离空气,因此无法模拟这个剂量率影响因素。
- 5) 剂量率效应产生的载流子为热载流子,而激光束电离产生的载流子能量较低。
- 6) 激光束电离产生的光电流的脉宽和形状与 γ 射线和X射线存在着差异。

尽管激光束模拟剂量率效应存在上述的不足,但是通过适当的理论修正和试验设计可以减少甚至可避免上述因素对激光束试验等效性的影响。本文将对国内外研究者在激光束模拟剂量率等效性方面做出的工作进行阐述和分析,以支持激光束模拟剂量率方法和设备在我国得到开发和应用。

1 激光束模拟剂量率效应原理

剂量率效应指由核爆发时产生的高电离剂量的瞬态 γ 射线对半导体器件和电路产生电离脉冲的影响。其具体作用过程是,脉冲高能光子作用于半导体器件有源区,通过康普顿相互作用,引发有源区电离并产生瞬时大量的电子-空穴对,在外场作用下电子-空穴对发生分离和迁移,形成瞬时大脉冲电流,脉冲电流在器件内流动将引起器件输出扰动,严重时会使器件输出翻转、闩锁,甚至造成器件烧毁^[1]。

当激光束波长小于半导体材料吸收限时,半导体材料就会发生本征吸收,产生光电效应,价带电子激发到导带从而形成电子-空穴对,进一步在内建电场和外场作用下发生定向移动,从而产生光生电流。因而从本质上说激光束与 γ 射线对物质的作用效果均产生光生电流。这是激光束模拟剂量率效应的基础。

2 激光束模拟剂量率效应等效性分析

激光束对 γ 射线产生剂量率效应模拟效应的等效性主要体现在光子在材料中能量沉积分布是否一致,另一方面是单位沉积能量的光电子-空穴对的产额是否可进行比较。由此本节主要从这两方面对激光束模拟剂量率效应的等效性进行分析。

2.1 激光束在材料中能量损失特征分析

脉冲 γ 射线辐射在材料中产生的能量损失分布近似是均匀的。因而自由载流子分布可利用公式(1)表述。

$$G = g_0 P_\gamma \quad (1)$$

式中: G 为自由载流子产额; g_0 为电离系数,在硅材料中 g_0 为 4.3×10^{13} pairs/rad(Si)/cm³; P_γ 为电离吸收剂量。

激光束光强在半导体材料的分布可利用公式(2)表示^[4]。

$$\frac{dI(x,t)}{dx} = -\alpha(x,t)I(x,t) \quad (2)$$

式中： I 为激光束光强； α 为总吸收系数； x 为入射深度； t 为作用时间。总吸收系数 α 由两部分组成，其一部分为半导体带间吸收，这部分由半导体材料本征吸收和由于掺杂效应导致半导体禁带窄化效应引起的吸收组成；另一部分为激光辐射与电子和空穴交互作用时发生的吸收。故 α 可由公式(3)表示。

$$\alpha = \alpha_{\text{ib}}^0 + \sigma_{\text{r}}N_{\text{d}} + \sigma_{\text{n}}n + \sigma_{\text{p}}p \quad (3)$$

式中： α_{ib}^0 为半导体带间吸收系数； σ_{r} 为禁带宽度窄化效应系数； N_{d} 为掺杂浓度； σ_{n} 和 σ_{p} 分别为激光束与电子或空穴作用时发生吸收的系数； n 和 p 分别为自由载流子的浓度。

当自由载流子浓度和半导体掺杂浓度较低时，公式(1)为线性的，即激光强度在材料中以指数形式衰减，即

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (4)$$

式中 I_0 为激光束初始光强。吸收系数同时也与入射激光的波长有关，图 1 为本征硅中激光的吸收系数随波长的变化^[5]。

由上述分析可知，激光在材料中的能量沉积是指数型变化的，但是由指数分布特点可知，在指数型分布的初期，当吸收系数与深度乘积(αx)远远小于 1 时，激光能量沉积近似于线性衰减。由此可知，为了保证激光在材料中近似线性衰减，需要使得激光在材料中的吸收系数尽可能小，即激光波长应尽量长。同时由半导体对激光吸收的物理过程，决定了激光波长必须小于半导体的吸收限，因此这就限制了激光波长可选择的范围。对于 Si 基半导体而言，红外光波长范围的激光在材料中可产生均匀的能量沉积。在一级近似条件下，激光束在材料中线性能量沉积表达式为：

$$I_{\text{d}} = (1 - R)\alpha I_0 \quad (5)$$

式中： I_0 为激光束初始能量； R 为材料对激光束的反射系数。

2.2 激光束电离载流子过程分析

γ 射线在半导体材料中产生电离相互作用主要依赖于康普顿效应，即光子与自由电子间发生的散射作用。对于硅基半导体材料， γ 射线产生一对电子-空穴对的能量约为 3.6 eV，大于硅的禁带宽度。而激光在材料中是以光电效应产生电子-空穴对，需要的能量为 1.17 eV。因此同样的电离剂量下，激光在材料中产生的电子-空穴对为 γ 射线的 3.08 倍，以 1 rad 电离吸收剂量为例， γ 射线在硅中可产生 4.3×10^{13} pair/cm³，而相同剂量 1.06 μm 的激光束可产生 1.32×10^{14} pair/cm³。

综合激光束对半导体材料电离过程分析可知，适当地选择激光束波长可在半导体内产生均匀的电离，产生的电子-空穴数可与 γ 射线电离过程进行比较。但是激光束模拟剂量率效应主要存在 2 个问题。由公式(5)可知，保证激光束在材料内产生均匀的能量沉积除要求波长在一定的范围外，还要保证吸收系数为常数。而由公式(3)可知，当激光功率较高时，材料内被电离出的大量电子-空穴对会再次与激光束发生作用，引起激光束的吸收系数增加，出现非线性吸收现象，这将会引起激光束在材料中的非均匀电离。此外在计算激光束在材料中沉积能量时，必须考虑样品对激光束的发射的影响。而器件或电路中的金线则会完全遮挡激光束，引起激光束的衰减。由此进行激光束模拟剂量率等效性时需要充分利用试验设计和等效性修正解决上述问题。

3 激光束模拟剂量率关键技术分析

3.1 激光束波长对模拟剂量率试验的影响

如何保证激光束在半导体材料内沉积均匀的能量是激光束模拟剂量率效应的关键技术之一，同时还要兼顾激光束在半导体内拥有足够的穿透深度，已达到对半导体器件结区的电离。理论上利用 $\alpha x \ll 1$ 可限定激光束的波长，研究指出对于硅基材料，这个波长为 1.06 μm 时，激光束可在硅中 700 μm 内沉积近似均匀的能量^[6]，这个深度范围满足大多数硅器件的剂量率效应试验的需求。然而这个波长仅考虑了本征硅对激光吸收的情况，而没有考虑二氧化硅等作为器件栅结构对激光能量的吸收。而随着器件尺寸的减小和器件结构的改进，栅结构在器件中的比例越来越大，因此必须考虑这部分结构对激光束的吸收带来的对模拟剂量率试验的影响。Petr K. Skorobogatov 等提出适当地减小激光束的波长，可以控制激光束在栅和体硅内的能量沉积，使得激光束能够

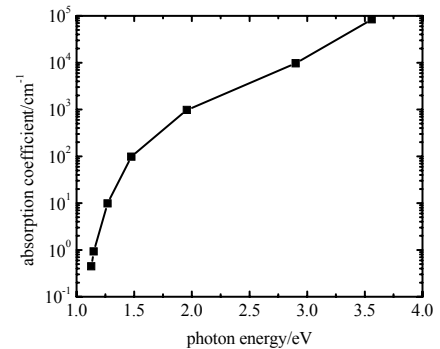


Fig.1 Absorption coefficient for laser in intrinsic silicon^[5]
图 1 本征硅中激光的吸收系数^[5]

在体硅中沉积更多的能量。图 2 为 0.3 μm 工艺的 CMOS/SOS SRAM 在不同波长激光束脉冲下的光电流和吸收剂量率^[7]。在 1.06~0.8 μm 范围内, 光电流随波长增加而减小, 同时吸收剂量率从 0.8 μm 时 10^{12} rad(Si)/s 下降至 1.06 μm 时的 10^{10} rad(Si)/s。经计算表明, 在波长为 0.8 μm 的激光束在器件体硅中沉积的电离剂量约为波长为 1.06 μm 的激光束的 86 倍。这个研究结果表明, 对不同工艺尺寸和工艺结构的器件, 最优化的波长是不同的, 对于小尺寸工艺器件, 选择波长更短的激光束可以适当提高模拟剂量率的范围。

3.2 温度对激光束模拟剂量率试验的影响

半导体禁带宽度随温度的变化(每上升 1 $^{\circ}\text{C}$, 禁带宽度变窄 1%), 这造成材料对激光束的吸收系数会随着温度的变化而变化, 因此在进行激光束模拟剂量率效应试验时必须考虑试验过程中样品温升对试验等效性的影响。随着测试样品温度的升高, 相应波长的激光束在样品中传播时的吸收系数增加。P. K. Skorobogatov 等研究指出, 对于特定结构和工艺的器件或电路, 在一定的温度范围内, 由于激光束的吸收系数的变化, 激光束在器件或电路中电离出的电子-空穴对成比例增加, 继而产生的光电流脉冲的形状和宽度并不会发生明显的变化。因而在进行对相应 γ 辐射剂量率效应等效时, 只需简单地对等效剂量率进行修正, 即改变激光束的功率, 即可排除温度变化对剂量率效应模拟试验结果的影响^[8]。

3.3 金属线遮挡对激光束模拟剂量率试验的影响

半导体器件和电路存在大量的金属键合线, 这会阻挡激光束的入射。为了避免这个问题, 可采用背面辐射的方式进行激光束模拟剂量率效应试验。需要指出的是, 在理论分析上, 还需要考虑, 正面金属线对激光束的反射, 因而通常在光路分析过程中要在器件的正面施加以反射面, 如图 3 所示。根据上述光路模型可以推导, 在器件中激光束的能量沉积可表达为:

$$E_d = \frac{R(1-R)\alpha I_0}{e-R} \quad (6)$$

实际上, 很多器件的封装形式是不允许对器件或电路进行背部辐照的。对于这些器件采用正面辐照的方式时, 在计算激光束在器件中的能量分布时就要考虑金属线的影响。对于那些没有被金属线覆盖的区域, 激光束沉积能量可按照公式(5)进行计算。

A. Y. Nikiforov 等研究了不同金属覆盖率的 CMOS 器件在激光束辐照下的剂量率效应^[4]。图 4 为覆盖金属带的 CMOS 器件在正面激光束辐照下, 其深度为 8 μm 处的少数载流子随不同剂量率和不同辐照持续时间的变化。图中少数载流子峰谷位置对应金属带位置, 辐照初期, 器件内少数载流子分布极不均匀, 金属带覆盖处的载流子几乎为本征浓度。随着辐照时间延长, 在载流子浓度梯度和内建电场作用下, 载流子在器件内的扩散和迁移, 使得载流子分布趋于均匀化。而且随着剂量率的增加, 载流子均匀化的速度越快。

图 5 为不同程度金属带覆盖的 CMOS 器件少数载流子随辐照时间的变化规律。结果表明, 覆盖的部位少数载流子均匀化的时间不超过 10^{-7} s, 稳定的少数载流子浓度与覆盖的程度成反比, 可表达为:

$$N_c = N_0 \left(1 - \frac{S_M}{S}\right) \quad (7)$$

式中: N_c 为有金属覆盖的 CMOS 器件少数载流子浓度; N_0 为没有金属覆盖的 CMOS 器件少数载流子浓度; S_M 为金属带面积; S 为辐照总面积。

图 6 和图 7 分别为阶跃式激光束和高斯激光束辐照下不同金属覆盖 CMOS 基底-阱 p-n 结光电流随辐照时间的变化。图 6(a)可见在较低剂量率下, 不同覆盖程度的 CMOS 器件光电流变化基本一致, 特别是当覆盖率为 40% 时的器件光电流几乎与无覆盖的器件相同, 这说明在阶跃式激光束下, 较低剂量率辐照试验可以排除金属覆盖对试验结果的影响。由图 6(b)可见, 高剂量率下只有在更低金属覆盖率下, 这种遮挡效应才可避免。上述

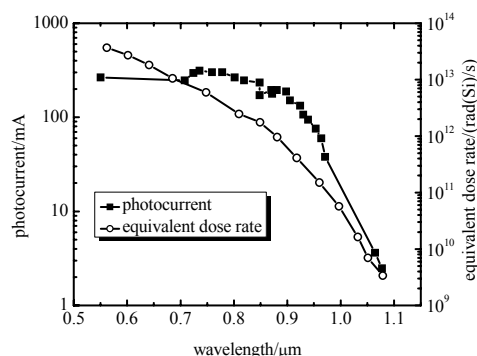


Fig.2 Variation of photocurrent and dose rate with wavelength of laser in 0.3 μm CMOS/SOS SRAM under the pulse power of 7.6×10^3 W/cm²
图 2 激光束脉冲强度为 7.6×10^3 W/cm² 时, 0.3 μm 工艺的 CMOS/SOS SRAM 的光电流和吸收剂量率随激光束波长的变化曲线

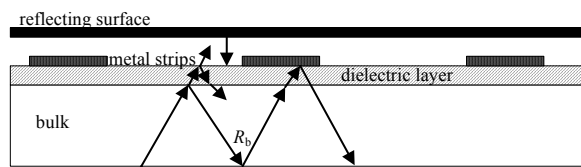


Fig.3 Optical model for back illumination
图 3 背面激光辐照器件光路模型

结果同样适用于高斯型激光束辐照条件，区别是遮挡效应对高斯型激光束辐照试验结果的影响较阶跃型显著。

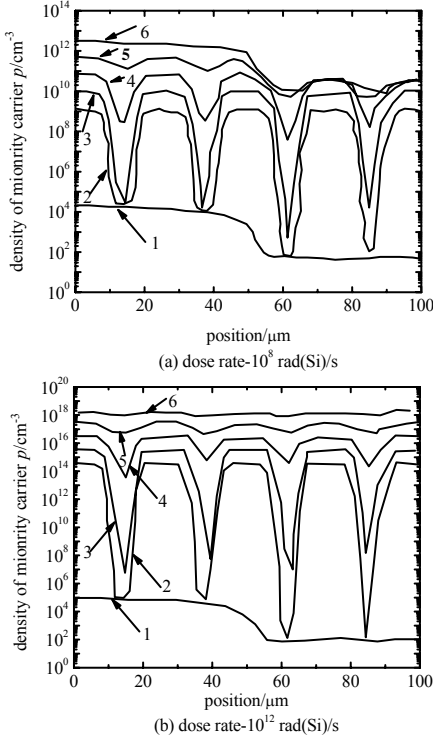


Fig.4 Dynamic curves describing minority carriers distribution within CMOS under pulse laser irradiations, 1: initial moment; 2: 10^{-11} s; 3: 10^{-10} s; 4: 10^{-9} s; 5: 10^{-8} s; 6: 10^{-7} s
图 4 激光束辐照下 CMOS 器件少数载流子分布随不同的辐照时间的变化(1:初始时刻; 2: 10^{-11} s; 3: 10^{-10} s; 4: 10^{-9} s; 5: 10^{-8} s; 6: 10^{-7} s)

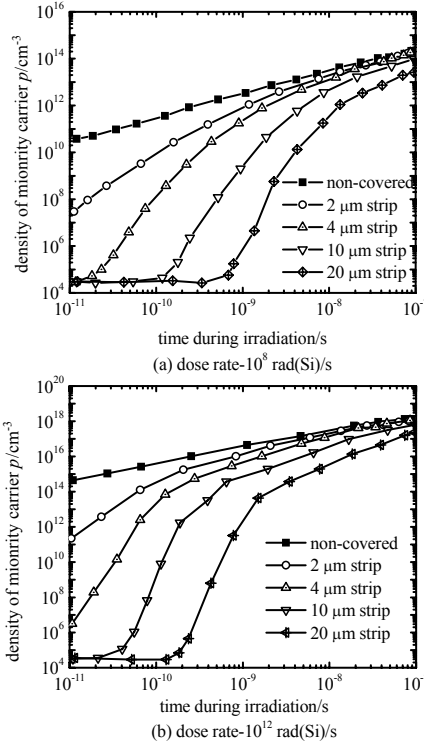


Fig.5 Variation of minority carrier with irradiation duration in CMOS covered by metal strip with various widths
图 5 激光束辐照下不同尺寸金属带的 CMOS 器件少数载流子的分布随不同辐照时间的变化

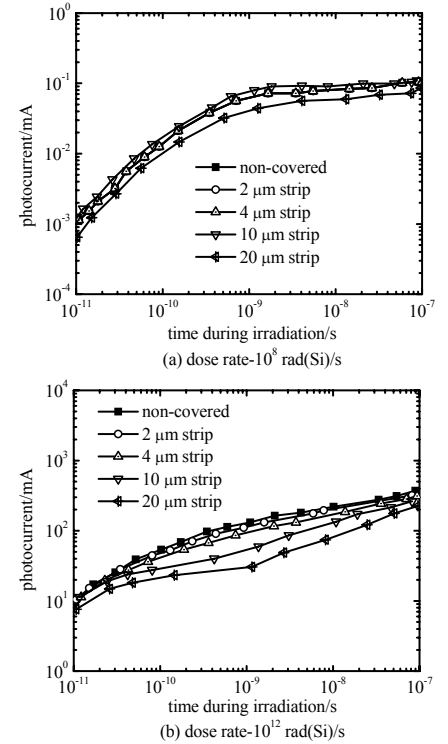


Fig.6 Photocurrent transient curves under step pulse of equivalent dose rate in CMOS covered by metal strip with various widths
图 6 阶跃式激光脉冲下不同金属带覆盖的 CMOS 器件基区-阱 p-n 结光电流随时间的变化

3.4 激光束功率对激光束模拟剂量率试验的影响

在较高功率激光束辐照下，大量的电子-空穴对会与激光束发生作用，使得激光束吸收增加。但是吸收的激光束能量并不会用于电离更多的电子-空穴，而是产生更多的热量使样品温度升高，此外还会增加材料对激光的散射。图 8 为利用 LDR 软件计算的激光等效剂量率随激光功率的变化曲线。可见无论是前面辐照还是背部辐照，激光束等效剂量都会随激光功率达到饱和，饱和区即为发生载流子对激光吸收的区域。在不发生这种作用以及不破坏样品结构的条件下，可以确定对于 $1.06 \mu\text{m}$ 激光束，其模拟剂量率效应的范围可达 $10^{14} \text{ rad(Si)/s}$ 。

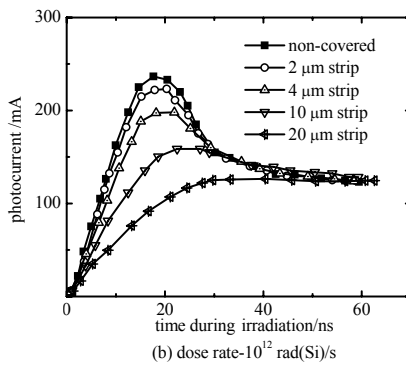
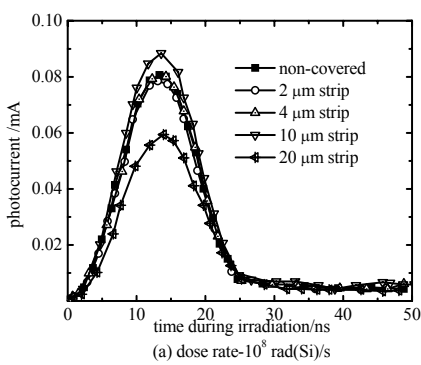


Fig.7 Photocurrent transient curves under Gaussian pulse in CMOS covered by metal strip with various widths
图 7 高斯式激光脉冲下不同金属带覆盖的 CMOS 器件基区-阱 p-n 结光电流随时间的变化

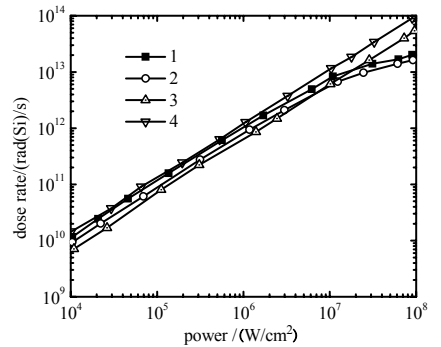


Fig.8 “LDR” simulation equivalent dose rate vs. laser intensity dependencies under backside (1,2) and topside (3,4) irradiation
图 8 LDR 软件计算的激光等效剂量率随激光功率的变化曲线^[4]

4 结论

激光束辐照模拟剂量率效应具有多项优势,可用于抗核产品设计阶段,鉴别剂量率敏感性单元。但是激光本身及其与物质交互作用的特性,使得在利用激光模拟剂量效应时需要考虑多种因素的影响。本文基于激光束与物质交互作用原理,对激光束模拟剂量率效应过程中所需考虑的因素和研究现状进行了阐述。最终实现激光束模拟剂量率效应在工程上广泛应用还需进行大量的研究性工作。主要为:a)随着器件和电路结构、材料、工艺和尺度的变化,激光束模拟剂量率效应的波长、功率以及修正方法也要发生变化。需要针对特定种类器件进行理论和试验研究以确定相应的试验参数,以获得更为准确的试验结果。b)虽然金属线遮挡效应降低了以正面辐照方式的剂量率效应试验等效性,但是这种辐照方式的适用性更为广泛,大量的模拟研究工作指出进行适当的修正,能够保证正面辐照方式对剂量率效应的等效性。同时也要针对特定的器件和电路结构进行开展,尤其是对于小尺度器件,金属线的遮挡效应的影响可能会更加显著。c)建立不同门类器件和电路激光束模拟剂量率效应的试验参数、方法以及修正模型数据库,以指导激光束模拟剂量率效应专用设备的设计和应用。

参考文献:

- [1] 王桂珍,龚建成,姜景和,等. 电子元器件及电路的剂量率效应测试技术研究[J]. 微电子学, 2001,31(2):130-134. (WANG Guizhen,GONG Chengjian,JIANG Jinghe,et al. Measurement of dose rate effects on electronic devices and circuits[J]. Microelectronics, 2001,31(2):130-134.)
- [2] 邱爱慈. 脉冲 X 射线模拟源技术的发展[J]. 中国工程科学, 2000,2(9):24-28. (QIU Aici. The development of technology for pulsed X-ray simulators[J]. Engineering Science, 2000,2(9):24-28.)
- [3] 蒯斌,邱爱慈,曾正中,等. 短脉冲高剂量率 γ 射线源技术研究[J]. 强激光与粒子束, 2005,17(4):595-598. (KUAI Bin, QIU Aici,ZENG Zhengzhong,et al. Research on source of high dose rate gamma-ray with short pulse duration[J]. High Power Laser and Particles Beams, 2005,17(4):595-598.)
- [4] NIKZOROV A Y,SKOROBGATOV P K. Dose rate laser simulation tests adequacy: shadowing and high intensity effects analysis[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996,43(6):3115-3121.
- [5] HABING D H. The use of lasers to simulate radiation induced transients in semiconductor devices and circuit[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1965,12(5):91-100.
- [6] JOHNSTON A H. Charge generation and collection in p-n junctions excited with pulsed infrared lasers[J]. IEEE Journals & Magazines, 1993,40(6):1694-1702.
- [7] SKOROBGATOV P K,NIKIFOROV A Y,EGOROV A N,et al. Wavelength influence on CMOS SOS IC dose rate laser simulation efficiency[C]// 2013 14th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). Oxford,United Kingdom:IEEE, 2013:435-437.
- [8] SKOROBGATOV P K,NIKIFOROV A Y,DEMIDOV A A,et al. Influence of temperature on dose rate laser simulation adequacy[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2000,47(6):2442-2446.

作者简介:



岳 龙(1983-),男,黑龙江省牡丹江市人,博士,高级工程师,主要研究方向为材料及电子器件在复杂空间及核辐射环境下退化和失效行为.email:longeryet@163.com.

刘 远(1984-),男,南昌市人,博士,副教授,主要研究方向为半导体器件低频噪声表征技术、先进显示器件设计或缺陷分析技术、半导体器件抗辐射加固技术。

张战刚(1986-),男,河南省洛阳市人,博士,高级工程师,主要研究方向为电子器件重离子单粒子效应。

何玉娟(1981-),女,江西省宜春市人,在读博士研究生,主要研究方向为 SOI 工艺器件可靠性评估、半导体器件抗辐射加固技术。

郝明明(1984-),男,内蒙古自治区包头市人,博士,副教授,主要研究方向为激光器与材料交互作用。

雷志峰(1981-),男,河南省洛阳市人,在读博士研究生,主要研究方向为半导体器件单粒子效应、GaN HEMT 重离子辐射损伤效应。