



## 空间用GaN功率器件单粒子烧毁效应激光定量模拟技术研究

崔艺馨 马英起 上官士鹏 康玄武 刘鹏程 韩建伟

### Research on Single Event Burnout of GaN power devices with femtosecond pulsed laser

Cui Yi-Xin Ma Ying-Qi Shangguan Shi-Peng Kang Xuan-Wu Liu Peng-Cheng Han Jian-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 136102 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212297

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212297>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 氮化镓基高电子迁移率晶体管单粒子和总剂量效应的实验研究

Single event effect and total dose effect of GaN high electron mobility transistor using heavy ions and gamma rays

物理学报. 2021, 70(11): 116102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202028>

#### 基于光纤中超短脉冲非线性传输机理与特定光谱选择技术的多波长飞秒激光的产生

Generation of multi-wavelength femtosecond laser pulse based on nonlinear propagation of high peak power ultrashort laser pulse in single-mode fiber and spectral selectivity technology

物理学报. 2018, 67(18): 184205 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181026>

#### 选择性埋氧层上硅器件的单粒子瞬态响应的温度相关性

Temperature dependence of single-event transient response in devices with selective-buried-oxide structure

物理学报. 2019, 68(4): 048501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191932>

#### 锁频锁相的高功率微波器件技术研究

Review on high power microwave device with locked frequency and phase

物理学报. 2018, 67(8): 088402 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172684>

#### 基于锯齿波脉冲抑制自相位调制的高功率窄线宽单频脉冲光纤激光放大器

High-power narrow-linewidth single-frequency pulsed fiber amplifier based on self-phase modulation suppression via sawtooth-shaped pulses

物理学报. 2021, 70(21): 214202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210496>

#### 不同散射介质对飞秒脉冲激光传输特性影响研究

Influence of different scattering medium on propagation characteristics to femtosecond laser pulses

物理学报. 2019, 68(19): 194207 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190430>

# 空间用 GaN 功率器件单粒子烧毁效应 激光定量模拟技术研究\*

崔艺馨<sup>1)2)</sup> 马英起<sup>1)2)†</sup> 上官士鹏<sup>1)</sup> 康玄武<sup>3)</sup> 刘鹏程<sup>1)2)</sup> 韩建伟<sup>1)2)</sup>

1) (空间天气学国家重点实验室, 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

2) (中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

3) (中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

(2021 年 12 月 13 日收到; 2022 年 3 月 8 日收到修改稿)

利用飞秒脉冲激光对氮化镓 (GaN) 功率器件进行单粒子烧毁效应定量评估技术研究, 针对器件结构建立脉冲激光有效能量传输模型, 理论计算了激光有效能量与重离子线性能量传输 (LET) 的等效关系并开展了试验验证. 考虑器件材料反射率与吸收系数对激光的影响, 针对介质层界面间的激光多次反射进行参数修正, 减小有源区有效能量计算误差. 选择一款氮化镓高电子迁移率晶体管 (GaN HEMT) 与一款肖特基势垒二极管 (SBD) 功率器件作为典型案例, 分别开展飞秒脉冲激光正面与背部辐照试验, 计算诱发单粒子烧毁的有效能量, 并得到不同入射激光波长的烧毁等效 LET 阈值, 对比了模型理论计算值与实际测量值. 同时, 研究结果对材料参数未知的 GaN 功率器件, 提供了正面与背部辐照模型的激光试验波长选择参考. 该工作将为激光定量评估空间用 GaN 等宽禁带半导体器件的单粒子烧毁效应机理研究及加固设计与验证提供技术支撑.

**关键词:** 氮化镓功率器件, 飞秒脉冲激光, 单粒子烧毁效应, 等效 LET 值

**PACS:** 61.80.Az, 61.80.Ba, 78.55.Cr, 61.80.Jh

**DOI:** 10.7498/aps.71.20212297

## 1 引言

GaN 功率器件作为新型电子电力元件, 具有宽禁带、体积小、高击穿电压、高开关频率等优点<sup>[1-3]</sup>, 相较于传统 Si 基器件在高压电源领域具有更广阔的应用前景, 在航天中已得到初步应用<sup>[4,5]</sup>. 重离子可使 GaN 功率器件发生单粒子效应 (single event effect, SEE), 当引起器件单粒子烧毁 (single event burnout, SEB) 时会导致电源系统灾难性故障, 从而无法保证设备正常运行<sup>[6,7]</sup>. 因此, 在空间电源系统中确定关键器件的抗辐射性能特别是突出的 SEB 效应十分必要.

2015 年 Scheick<sup>[8]</sup> 首次在常关型 GaN 功率器件中观察到 SEB 的出现, 国际上前期工作主要分析了质子位移损伤对器件的影响<sup>[9-11]</sup>. Zerarka 等<sup>[12]</sup> 通过数据仿真提出了导致 SEB 的两种可能机制, Martinez 等<sup>[13]</sup> 发现 GaN HEMT 在发生 SEB 时存在栅漏极短路点, 研究表明器件 SEB 敏感区域位于栅漏之间<sup>[8,14]</sup>. 上述试验主要利用地面重离子加速器开展, 分析了器件辐照前后电学特性的变化, 并初步探究了特定器件的 SEB 损伤模式, 仍需在 GaN 功率器件 SEB 失效分析及损伤阈值及机制等方面开展大量工作. 脉冲激光主要通过光电效应等效重离子诱发 SEB 试验结果, 具有快速测定器件安全工作区、探测敏感区域范围等优势. 针对 Si 基

\* 中国科学院青年创新促进会 (批准号: 2018179)、广东省重点研发计划 (批准号: 2020B010170001) 和北京市科学技术委员会项目 (批准号: Z201100003520002) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: myq@nssc.ac.cn

功率器件 SEB 试验激光手段已被广泛应用<sup>[15-17]</sup>,但在 GaN 等宽禁带半导体器件 SEB 激光评估方面需要进行系列关键技术研究. Ngom 等<sup>[18]</sup>使用飞秒脉冲激光背部入射 GaN HEMT 器件,讨论波长对其穿透深度等参数的影响,获得 SEE 与入射波长的依赖关系;蒙彼利埃大学 Roche 与美国海军研究实验室 Khachatrian 等<sup>[19-21]</sup>基于单光子吸收 (single-photon absorption, SPA) 机制利用紫外波段脉冲激光对 GaN HEMT 定制器件进行 SEE 研究获得了单粒子瞬态 (single event transient, SET) 不同波形特征,并在 GaN 材料中测试激光双光子吸收 (two-photon absorption, TPA) 引起的空间电信号脉冲,从正面入射 GaN 二极管产生 SET 响应,为激光 TPA 技术用于模拟重离子诱发 GaN 器件 SEB 提供试验参考. 激光与重离子等效关系一直以来是阻碍脉冲激光定量评估 SEB 的关键技术问题,建立脉冲激光与重离子能量的对应关系、定量评估器件发生 SEB 阈值亟需充分研究.

中国科学院国家空间科学中心已初步建立正面入射 GaN HEMT 器件的激光能量传输模型<sup>[22]</sup>,并据此计算了与重离子线性能量传输 (linear energy transfer, LET) 的等效关系. 本文主要研究脉冲激光对 GaN 功率器件 SEB 效应的定量评估技术,在前期基础上完善正面入射激光能量传输模型,并进行关键参数校正;同时建立背部入射激光能量传输模型,使两种模型普遍适用于不同类型的 GaN 功率器件,据此建立激光与重离子 LET 的定量对应关系. 利用空间中心自行搭建的飞秒激光测试装置,对两款不同类型的 GaN 功率器件开展试验,将器件发生 SEB 时的脉冲激光有效能量与重离子 LET 数据进行对比,获得了良好的等效关系. 本文的工作将有助于 GaN 功率器件的 SEB 定量评估研究,为空间用 GaN 功率器件的安全工作区域确定、机理研究及加固设计验证提供技术支撑.

## 2 理论模型建立与数值计算

### 2.1 激光有效能量传输模型建立

基于 AlGaIn/GaN 异质结的 GaN 功率器件,在 GaN 层侧因自发和压电极化效应形成横向高密度且迁移率明显高于体电子的二维电子气 (two-dimensional electron gas, 2DEG), 2DEG 在器件中是极其重要的导电通道. 在进行脉冲激光实验

时,激光穿过介质层聚焦于 GaN 层 2DEG 周围有源区发生光电作用,当激光有效能量的转化电荷超过器件承受阈值时发生单粒子烧毁效应. 对基于 AlGaIn/GaN 异质结的 GaN 功率器件进行有源区激光有效能量定量评估,根据器件不同的结构类型,可建立正面入射和背部入射的两种有效能量传输模型.

对于 GaN HEMT 等背部有金属的 GaN 功率器件,可选择对器件开正面封装,使脉冲激光从正面进行辐射试验. GaN HEMT 的金属布线层间隙大于激光光斑尺寸,激光可通过器件栅漏之间的金属布线层间隙到达有源区产生电子-空穴对,从而引发单粒子效应. 正面入射的 GaN 功率器件激光有效能量传输模型如图 1 所示.

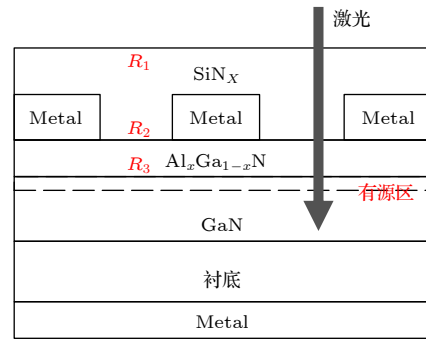


图 1 正面入射的脉冲激光能量传输模型

Fig. 1. Pulsed-laser energy transmission model with frontal incidence.

激光能量传输过程中,激光会经历器件表面 SiNx 层的反射、SiNx 及 AlxGa1-xN 层的光衰减、AlxGa1-xN 及 GaN 界面的反射,传输角度考虑器件为理想化的垂直正入射. 依据几何光学的传播特性,建立脉冲激光能量传输衰减的计算模型. 最终达到有源区的激光能量  $E_{\text{eff}}$  如下式所示:

$$E_{\text{eff}} = (1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3)t_1t_2E_0 + E', \quad (1a)$$

其中  $E_0$  是入射到器件表面的激光脉冲能量;  $R_1$  是器件表面 SiNx 层对激光的反射率;  $R_2$  是 SiNx 层与 AlxGa1-xN 层交界面对激光的反射率;  $R_3$  是 AlxGa1-xN 层与 GaN 层交界面对激光的反射率;  $t_1$  是 SiNx 层的材料透光系数;  $t_2$  是 AlxGa1-xN 层的材料透光系数;  $t_1, t_2$  均与材料对激光的吸收作用有关;  $E'$  是界面层间多次反射进入有源区的激光脉冲能量. GaN HEMT 功率器件往往会有场板、帽层等更为复杂的设计影响激光能量的传输效率.

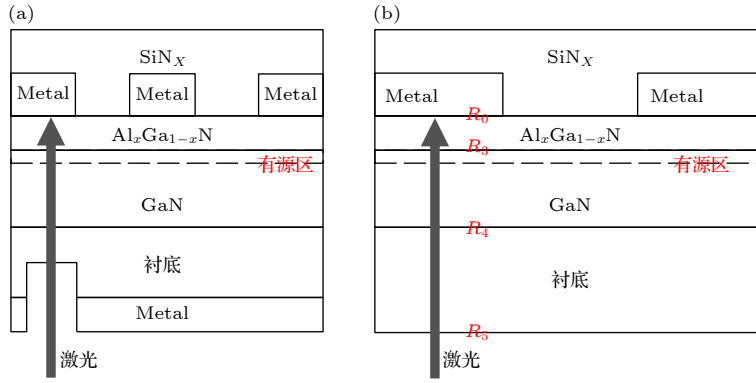


图 2 背部入射的脉冲激光能量传输模型 (a) 背部开孔的 HEMT 器件; (b) SBD 器件

Fig. 2. Pulsed-laser energy transmission model with back incidence: (a) HEMT device with hole on the back; (b) SBD device.

在进行有源区激光有效能量定量计算时, 可结合器件的实际结构, 将复杂结构的材料系数加入  $E_{\text{eff}}$  的公式计算, 从而使得计算结果更为精准.

对于横向结构肖特基 (SBD) 二极管等背部没有金属的 GaN 功率器件, 选择对器件开背部封装, 使脉冲激光从背部进行辐射试验; 对于衬底较薄的 GaN HEMT 器件, 也可以在背部金属上进行特定大小 (开孔大小至少覆盖一组源栅漏极结构重复单元) 的金属开孔, 完成背部衬底减薄的辐射实验. 背部入射的 GaN 功率器件激光有效能量传输模型如图 2 所示.

当激光从背部入射进行辐射实验时, 器件表面的激光会经历衬底层的反射、因材料光子吸收导致衬底层的光衰减、GaN 界面的反射与 GaN 层的光衰减、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  界面的反射与  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  层的光衰减、金属层的二次反射后到达有源区诱发器件产生单粒子效应. 传输角度考虑器件为理想化的垂直正入射. 依据几何光的传播特性, 建立脉冲激光能量传输衰减的计算模型. 最终达到有源区的激光能量  $E_{\text{eff}}$  如下式所示:

$$E_{\text{eff}} = (1 - R_5)(1 - R_4)[1 + (1 - R_3)^2 t_3 t_2^2 R_0] t_4 E_0 + E', \quad (1b)$$

其中  $E_0$  是入射到器件表面的激光脉冲能量;  $R_5$  是器件衬底表面对激光的反射率;  $R_4$  是 GaN 层与衬底交界面对激光的反射率;  $R_3$  是  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  层与 GaN 层交界面对激光的反射率;  $R_0$  是金属布线层与  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  层交界面对激光的反射率;  $t_4$  是衬底的材料透光系数;  $t_3$  是 GaN 层的材料透光系数;  $t_2$  是  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  层的材料透光系数;  $t_4$ ,  $t_3$ ,  $t_2$  均与材料对激光的吸收作用有关;  $E'$  是界面间多次反射进入有源区的激光脉冲能量. 与正面辐射的激光

有效能量传输模型相比, 除了同样需要考虑特殊复杂结构, 背部辐射还需考虑金属二次反射对有源区有效能量的影响, 即当激光穿过垂直方向上有金属电极的有源区时, (1b) 式中  $R_0$  不为 0, 需要考虑金属反射的作用.

## 2.2 关键参数确定

为了定量模拟激光诱发 GaN 功率器件单粒子烧毁效应, 需要确定激光与器件的关键参数. 激光关键参数主要为激光波长的选择, 器件关键参数主要为脉冲激光能量传输模型中各层材料的透光系数与反射率, 同时对界面间激光多次反射的能量值等参数也应进行分析.

### 2.2.1 激光波长选择

在选择试验激光波长时, 激光入射器件的光生电流敏感程度与选择的波长有很大的关系. 激光辐照半导体材料时, 根据产生一个电子-空穴对所吸收的光子数量, 分为单光子吸收、双光子吸收、多光子吸收机制. TPA 指在高激光强度下吸收两个光子产生单个电子-空穴对, 同时仅在光束焦点附近作用效果显著, 传输光路中因光束尺寸的增加使得激光强度不足以产生 TPA, 与 SPA 相比具有更好的空间分辨率与更长的穿透深度. GaN 禁带宽度为 3.4 eV, 发生 TPA 的波长范围为 364—729 nm. 图 3 表示了不同波长在 GaN 材料中的穿透深度, 商用 GaN HEMT 功率器件的有源区多在正面 6  $\mu\text{m}$  以下位置, 背部入射时器件缓冲层厚度也多在 4  $\mu\text{m}$  以上, 因此在进行激光模拟 GaN 功率器件单粒子烧毁效应试验中, 选择 TPA 的实验波长时以 600—729 nm 之间为佳.



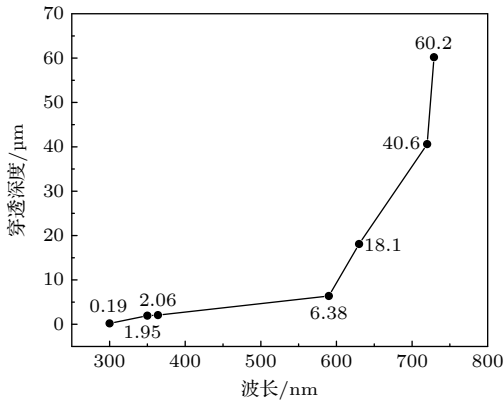


图3 不同波长下激光在 GaN 材料中的穿透深度

Fig. 3. Laser penetration depth in GaN materials at different wavelengths.

### 2.2.2 介质层透光系数与反射率确定

在正面入射模型中,对 GaN 功率器件的介质层透光系数进行分析,钝化层材料  $\text{Si}_3\text{N}_4$  的禁带宽度为 5.1 eV, TPA 波段的激光在穿过该介质层时,光子能量不足以引发 SPA 与 TPA,透射损耗较低,因此在激光有效能量传输模型中,  $\text{SiN}_x$  层材料对光子近乎不吸收,可视为完全透光;  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  介质层厚度极薄,如表 1 所列,在 TPA 适宜波长范围内,常用材料  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  因吸收导致的光损在 0.1% 左右,激光穿过该介质层的光损可以忽略;当衬底材料为蓝宝石时,蓝宝石对于 TPA 波段的激光波长透明.因此在模型计算中,各层材料对激光无吸收影响,主要考虑材料界面的反射率导致的光损失.

在背部入射模型(蓝宝石衬底)中,应考虑金属布线层的二次反射对有源区能量的影响,而到达金属布线层的能量则受 GaN 层的透光系数制约. GaN 层的透光系数  $t_1$  与  $\beta$  呈反比关系,其中  $\beta$  (cm/GW) 是 GaN 材料的 TPA 系数.  $\beta$  与激光波长相关,即

背部入射的激光有效能量传输模型受波长的影响较大.

表 1 不同波长的激光在不同厚度的  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  中的吸收系数与光损

Table 1. Absorption coefficients and optical losses of different laser wavelengths in different thicknesses of  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ .

波长/nm	600	620	650	700	720
吸收系数/ $\text{cm}^{-1}$	210	190	172	155	143
30 nm厚光损	0.06%	0.06%	0.05%	0.05%	0.04%
50 nm厚光损	0.1%	0.1%	0.09%	0.08%	0.07%
70 nm厚光损	0.14%	0.13%	0.12%	0.11%	0.1%

计算器件介质层间的界面反射率,首先需要获得  $\text{SiN}_x$ ,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , GaN 等材料层的空气中反射率与折射率.以 GaN 器件常用材料系数为例,在 TPA 适宜波长范围内,不同波长的激光在材料中的空气中反射率与折射率如表 2 所列<sup>[23]</sup>.

各层材料空气中反射率和折射率在不同波长下区别很小,在正面入射的激光有效能量传输模型中,  $\text{SiN}_x$ ,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , GaN 介质层在 TPA 使用波段内可取空气中反射率为 0.117, 0.14 和 0.168,折射率可取 2.04, 2.18 和 2.31,蓝宝石作为衬底时,反射率可取 0.08,折射率可取 1.76 计算.

器件介质层间的界面两侧为两种不同的介质,在进行界面反射率计算时,需要利用菲涅尔公式进行修正,修正公式如下式所示:

$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2, \quad (2a)$$

其中  $n_1$ ,  $n_2$  分别为界面两侧不同介质的折射率;  $R$  为界面反射率,激光从界面两侧介质分别入射的界面反射率相同.带入折射率通用值可得到模型中  $\text{SiN}_x$

表 2 不同波长的激光在材料中的空气中反射率与折射率

Table 2. The reflectivity and refractive index of different laser wavelengths from air to the material.

光学参数	材料	波长/nm				
		600	620	650	700	720
空气中反射率	$\text{Si}_3\text{N}_4$	0.118	0.117	0.117	0.116	0.116
	$\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
	GaN	0.169	0.168	0.167	0.165	0.165
	蓝宝石	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
折射率	$\text{Si}_3\text{N}_4$	2.04	2.04	2.04	2.03	2.03
	$\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$	2.18	2.18	2.18	2.17	2.17
	GaN	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31
	蓝宝石	1.76	1.76	1.76	1.76	1.75

层与  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  层的界面反射率 ( $R_2$ ),  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  层与 GaN 层的界面反射率 ( $R_3$ ), GaN 层与衬底 (蓝宝石) 的界面反射率 ( $R_4$ ) 分别为 0.11%, 0.08% 和 1.9%.

由上分析可得, 除金属布线层外, 介质层间的界面反射率普遍较小, 即激光入射器件各层材料时, 能量衰减主要受表面材料的空气中反射率影响. 如 2.1 所述, 器件加入 AlN 帽层等复杂结构设计时, 由于 AlN 材料的折射率与  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  及 GaN 材料的折射率极为接近, 使用 (2a) 式进行计算后介质层间的界面反射率仍旧较小; AlN 材料禁带宽度较大, 对 TPA 波段的激光没有吸收损耗, 因此 2.1 的激光有效能量传输模型可对 GaN 功率器件进行通用计算.

### 2.2.3 界面间激光多次反射能量分析

激光入射器件传输至有源区的过程中, 激光在介质层的界面间会进行多次反射. 为了清楚地显示激光在介质间多次反射的过程, 并定量分析多次反射后的透射能量大小, 图 4 以三层介质为例示意图界面间激光反射过程, 为清楚表现激光传输的状态, 所示光束有一定的入射角度, 计算中仅考虑正入射情况.

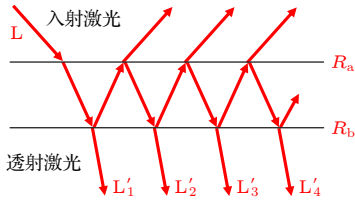


图 4 脉冲激光在介质层间多次反射示意图

Fig. 4. Schematic diagram of the pulsed laser light reflecting between dielectric layers.

计算透射的所有能量, 发现多次反射后透射能量之和趋于级数收敛, 得到激光穿过两层界面后的激光总透射率  $T$  为

$$T = (1 - R_a)(1 - R_b)[1 + R_a R_b + (R_a R_b)^2 + (R_a R_b)^3 + \dots] = \frac{(1 - R_a)(1 - R_b)}{1 - R_a R_b}, \quad (2b)$$

其中  $R_a, R_b$  分别为两层界面的反射率. 将上述结果与器件界面反射率带入激光有效能量传输模型计算, 得到界面间多次反射后透射的能量之和仅为有效能量的 0.01%, 即界面间多次反射影响可忽略.

### 2.3 激光等效 LET 值计算方法

在进行 GaN 功率器件脉冲激光能量等效 LET 值计算时, 选择 TPA 激光波段入射器件, 不同深度的激光功率为

$$dI = -\beta I^2 dx, \quad (3a)$$

其中  $I$  (W) 是激光功率;  $x$  (cm) 是半导体的深度. 带入  $I = E_{\text{eff}}/ws$  ( $w$  为脉冲宽度,  $s$  为光斑面积), 得到:

$$\frac{dE(x)}{dx} = -\frac{\beta}{ws} E^2(x), \quad (3b)$$

其中  $E(x)$  是入射激光能量. 依据脉冲激光和重离子在器件敏感区域单位长度上产生等量的电离电荷, 脉冲激光的等效 LET 值理论上可以表述如下:

$$\text{ELET} = \frac{e_f}{\rho} \cdot \frac{dE_{\text{eff}}}{dx}, \quad (3c)$$

其中  $\rho$  为 GaN 材料密度, 为  $6.1 \text{ g/cm}^3$ , ELET ( $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ ) 为等效 LET 值, 在 TPA 中  $e_f$  为重离子产生一个电子-空穴对所需能量与脉冲激光两个光子能量的比值,  $E_{\text{ion}}$  是粒子在 GaN 材料中激发一对电子-空穴对所需的能量, 为  $8.9 \text{ eV}$ .

脉冲激光有效能量等效 LET 值的表达式简化如下:

$$\text{ELET} = \frac{E_{\text{ion}}}{\rho} \left( \frac{\lambda \beta}{2hcws} E_{\text{eff}}^2 \right) = \frac{\beta}{\rho ws} e_f E_{\text{eff}}^2, \quad (3d)$$

其中  $\lambda$  为激光波长;  $h$  与  $c$  均为常数;  $\omega$  与  $s$  在激光测试系统中为固定参数;  $E_{\text{eff}}$  由脉冲激光有效能量传输模型可得. 脉冲激光有效能量等效 LET 值公式在 TPA 波长下可简化为

$$\text{ELET}_{\text{wavelength}} = k \times E_{\text{eff}}^2, \quad (3e)$$

其中  $k$  为某波长下 ELET 的激光等效系数;  $E_{\text{eff}}$  激光有效能量单位为  $\text{nJ}$ .

在等效 LET 的计算中, GaN 的 TPA 系数  $\beta$  ( $\text{cm/GW}$ ) 需要进行参数确定 [24,25]. 使用 (3f) 式可进行  $\beta$  值计算, 具体如下:

$$\beta_{\text{wavelength}} = a \times K \times \sqrt{\frac{E_p}{n^2 E_g^3}} \times F\left(\frac{hv}{E_g}\right) \quad (3f)$$

其中  $a$  为取值 12 的经验常数;  $K$  为取值 1940 的材料参数;  $E_p$  是直接带隙半导体的一个与材料无关的参数, 取值为  $21 \text{ eV}$ ;  $n$  为 GaN 材料的折射率;  $E_g$  为 GaN 材料的禁带宽度;  $hv$  为激光光子能量, 函数关系  $F(x) = \frac{(2x-1)^{1.5}}{(2x)^5}$ . 将参数带入,  $600\text{--}729 \text{ nm}$  波长下的  $\beta$  值如图 5 所示.

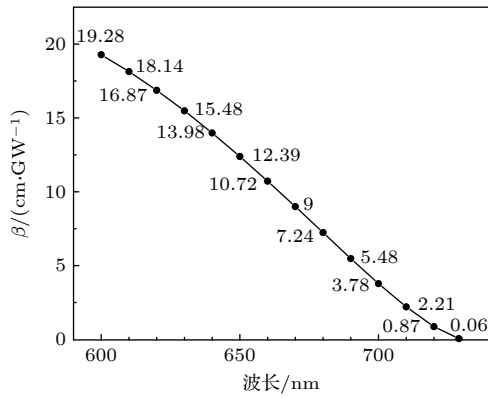


图 5 不同波长下 GaN 材料的  $\beta$  值  
Fig. 5.  $\beta$  of GaN materials at different wavelengths.

### 3 试验装置与试验对象

#### 3.1 试验装置

中国科学院国家空间科学中心单粒子效应飞秒脉冲激光试验装置如图 6 所示, 主要由激光器、光路系统、载物台、测试系统、计算机组成。飞秒脉

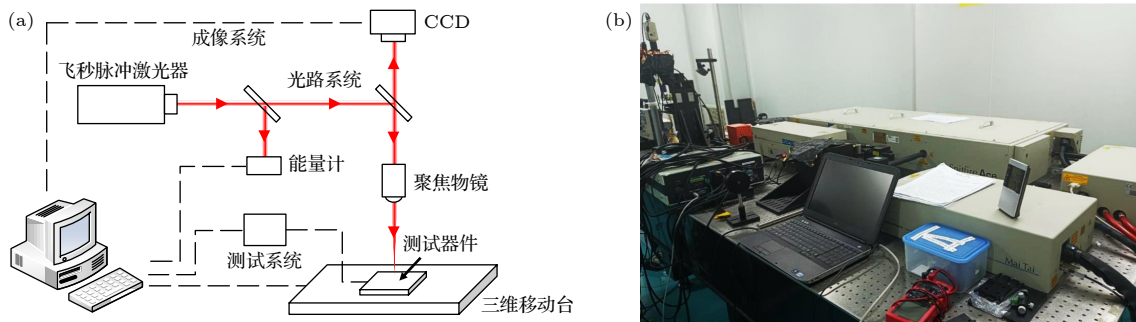


图 6 飞秒脉冲激光单粒子效应试验装置 (a) 原理图; (b) 实物图  
Fig. 6. Femtosecond pulsed laser SEE test device: (a) Schematic diagram; (b) physical diagram.

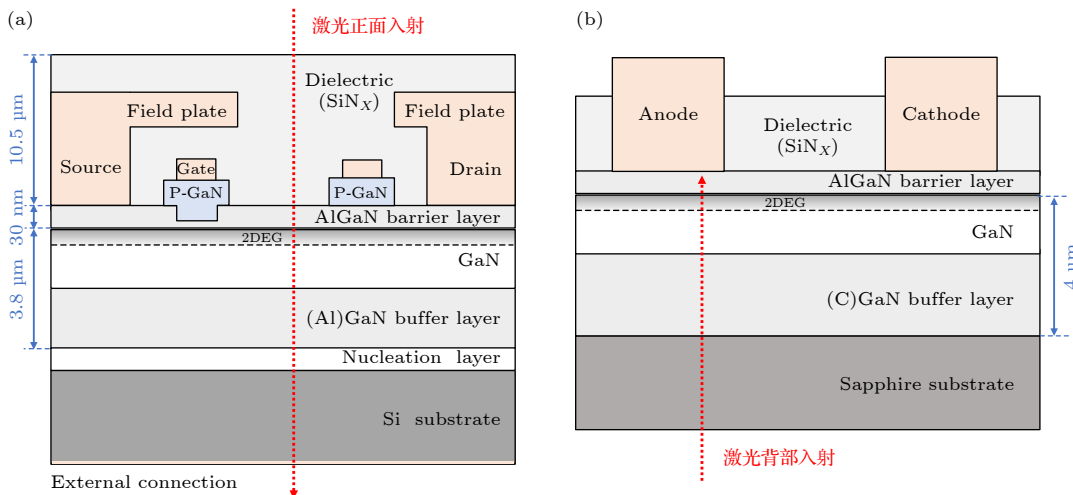


图 7 验证器件结构参数及激光入射位置 (a) 器件 1; (b) 器件 2  
Fig. 7. Device structure parameters and laser incident positions: (a) Device 1; (b) device 2.

冲激光器脉宽为 35 fs, 脉冲重复频率为 5 KHz; 激光聚焦光斑尺寸达亚微米级, 能量在 1 nJ—1  $\mu$ J 范围调节; XYZ 三维载物台分辨率为 1  $\mu$ m, 移动速度为速度为 5000  $\mu$ m/s; 测试系统的电流采样率为 0.05 s. 试验中, 选择 TPA 适宜范围内 620 和 720 nm 两个激光波长进行具体测试.

#### 3.2 试验对象

本研究所用典型器件有两款, 器件 1 为 HD-GIT 结构的 X-GaN 系列商用增强型器件, 漏源击穿电压为 600 V, 用于正面入射脉冲激光有效能量传输模型, 反剖器件的结构与参数如图 7 所示; 器件 2 为中国科学院微电子研究所自主研发的蓝宝石衬底 GaN SBD 功率器件, 两极间反向击穿电压为 100 V, 用于背部入射脉冲激光有效能量传输模型. 通过对两款器件进行全芯片激光扫描测试与典型位置理论值计算, 完成对激光有效能量传输模型与激光等效重离子 LET 值的技术研究.

## 4 试验过程、结果及数据对比分析

### 4.1 激光试验过程及结果

试验中, 器件 1 的漏源电压为 520 V, 栅源电压为 0 V; 器件 2 的两极反向偏压为 90 V. 两款测试器件均处于关闭状态. 使用飞秒激光对器件进行扫描, 当激光扫描至器件辐射敏感位置时会观察到电流瞬态变化, 入射能量越强, 可用于发生 TPA 的光子数越多, 有源区将产生更多的电子, 继而导致器件电流增大, 当超出器件可承受的最大电流时, 器件发生单粒子烧毁. 图 8 为发生 SEB 后的器件实物表征; 记录激光诱发 SEB 的能量值与器件工作状态, 结果如表 3 所列.

表 3 激光试验结果  
Table 3. Laser test results.

器件	器件工作电压/V	波长/nm	诱发SEB的激光能量/nJ
器件1	520	620	3.3
		720	6
器件2	90	620	3.8
		720	4.5

### 4.2 激光等效重离子 LET 计算

#### 4.2.1 激光有效能量计算

计算激光 ELET 首先需要通过脉冲激光有效能量传输模型获取有源区的  $E_{\text{eff}}$ . 带入 2.2 关键参数计算, 器件 1 的有效能量与入射激光能量的比值为 88.1%; 器件 2 的金属布线层为材料金, 代入 620, 720 nm 波长下的  $\beta$  值进行计算, 得到两个波长下的有效能量与入射激光能量的比值分别 93.7% 和 143%. 表 4 为两个试验器件发生 SEB 的有源区有效能量  $E_{\text{eff}}$  计算值.

表 4 器件有效能量  $E_{\text{eff}}$   
Table 4. Device effective energy  $E_{\text{eff}}$ .

器件	入射激光波长/nm	入射激光能量/nJ	有效能量 $E_{\text{eff}}$ /nJ
器件1	620	3.3	2.91
	720	6	5.29
器件2	620	3.8	3.56
	720	4.5	6.44

#### 4.2.2 重离子 LET 试验结果

器件 1 的重离子 SEB 辐照数据由日本千叶重离子加速器提供<sup>[26]</sup>, 使用的离子为  $^{86}\text{Kr}^{31+}$  离子; 器件 2 的重离子 SEB 辐照数据在中国原子能科学院回旋加速器上进行, 使用的离子为  $^{74}\text{Ge}^{20+}$  离子.

重离子造成的 SEB 结果与最低工作电压如表 5 所列.

表 5 器件重离子 SEB 结果  
Table 5. SEB results (Heavy ion) of the device.

器件	毁坏时最低工作电压/V	LET (GaN)/ (MeV·cm <sup>2</sup> ·mg <sup>-1</sup> )
器件1	520	18
器件2	90	28.5

#### 4.2.3 激光 ELET 与重离子 LET 对比

在该激光试验装置中, 将 620 和 720 nm 波长条件下双光子吸收系数  $\beta$  代入 (3e) 式计算可得 ELET 的表达式如下:

$$\text{ELET}_{620\text{ nm}} = 2.24 \times E_{\text{eff}}^2, \quad (4a)$$

$$\text{ELET}_{720\text{ nm}} = 0.66 \times E_{\text{eff}}^2. \quad (4b)$$

使用 (4a) 式和 (4b) 式可以得到两个波长的激光 ELET 值并与重离子 LET 值对比, 结果如表 6 所列.

图 9 为 620 与 720 nm 波长诱发 SEB 时, 激光  $E_{\text{eff}}^2$  与重离子 LET 的对比关系.

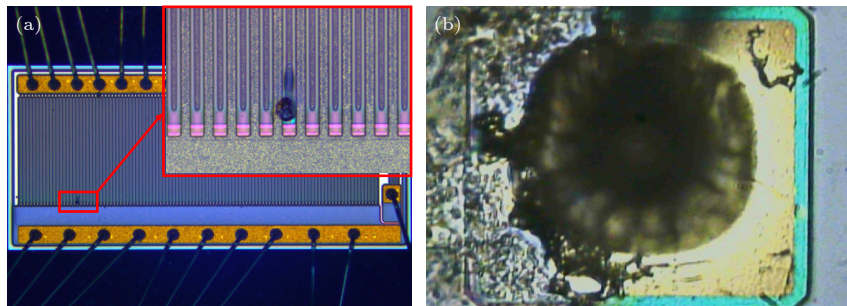


图 8 器件发生 SEB 后的实物图 (a) 器件 1; (b) 器件 2

Fig. 8. The physical pictures of the devices after SEB: (a) Device 1; (b) device 2.



表 6 激光 ELET 与重离子 LET 对比

Table 6. Comparison of laser ELET and Heavy ion LET.

器件	毁坏时工作电压/V	入射激光波长/nm	有效能量 $E_{\text{eff}}/\text{nJ}$	激光ELET/ ( $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ )	重离子LET (GaN)/ $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\cdot\text{mg}^{-1}$
器件1	520	620	2.91	18.97	18
		720	5.29	18.47	
器件2	90	620	3.56	28.39	28.5
		720	6.44	27.37	

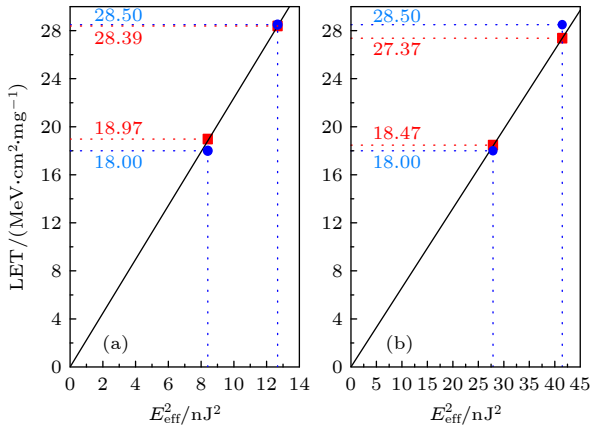


图 9 不同波长下器件发生 SEB 的  $E_{\text{eff}}^2$  与 LET 关系对比图 (a) 620 nm; (b) 720 nm

Fig. 9. Corresponding diagram of the relationship between  $E_{\text{eff}}^2$  and LET under different wavelengths causing SEB: (a) 620 nm; (b) 720 nm.

从图 9 对比看出, 器件 1 与器件 2 的激光 ELET 与重离子 LET 等效关系, 理论与试验符合. 对于正面入射激光有效能量传输模型, 不同的波长入射得到的 ELET 差距不大. 而对于背部入射激光有效能量传输模型, 器件 2 在验证过程中入射激光波长为 620 nm 时, 较大的双光子吸收系数使得激光在 GaN 层的透光系数较小, 从而有源区受到的金属二次反射影响较弱, 二次反射能量与有源区能量占比约为 2.8%; 入射激光波长为 720 nm 时, 较小的双光子吸收系数使得激光在 GaN 层的透光系数较大, 从而有源区受到的金属二次反射影响较强, 二次反射能量与有源区能量占比约为 36.5%. 因此对于材料参数未知的器件, 背部入射模型的入射波长选择 620 nm 优于 720 nm.

## 5 结 论

本文主要进行空间用 GaN 功率器件单粒子烧毁效应激光定量模拟关键技术研究, 对基于 AlGaIn/GaN 异质结的 GaN 功率器件, 建立了适用于 HEMT

和 SBD 等结构的正面入射与背部入射脉冲激光有效能量传输模型, 确立了模型中激光的入射波长、器件材料反射率与透光系数、界面间激光多次反射能量等普适参数, 并计算了脉冲激光能量等效重离子线性传输能量 (ELET), 从理论上分析 GaN 功率器件的脉冲激光定量模拟的可行性.

在试验测试的过程中, 使用两款器件进行激光辐射测试并与重离子实验数据做比较, 其中正面入射的能量传输模型有源区能量占比为 88.1%, 620 和 720 nm 波长下背部入射的能量传输模型有源区能量占比分别为 93.7% 和 143%; 两款器件的激光 ELET 理论计算和重离子试验结果符合性较好. 同时, 由于背部入射的激光有效能量传输模型中, TPA 较小的入射波长受到的金属二次反射影响较大, 因此尽量选择较小的 TPA 波长对器件进行测试; 而正面入射的激光有效能量传输模型则不需要考虑不同入射波长导致的结果差异. 试验结果验证了激光有效能量传输模型与 ELET 的推导对定量模拟 GaN 功率器件 SEB 的可行性与准确性.

## 参考文献

- [1] Saito W, Takada Y, Kuraguchi M, Tsuda K, Omura I, Ogura T, Ohashi H 2003 *IEEE Trans. Electron Devices.* **50** 2528
- [2] Meneghesso G, Verzellesi G, Danesin F, Rampazzo F, Zanon F, Tazzoli A, Meneghini A, Zanoni E 2008 *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* **8** 332
- [3] Millán J, Godignon P, Perpiñà X, Tomás A P, Rebollo J 2014 *IEEE Trans. Power Electron.* **29** 2155
- [4] Zerarka M, Crepel O 2018 *Microelectron. Reliab.* **88** 984
- [5] Shikhar S, Ashish S, Subhashish B 2015 *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition* Charlotte, NC, USA, March 15–19, 2015 p1048
- [6] Chen R, Liang Y N, Han J W, Wang X, Yang H, Chen Q, Yuan R J, Ma Y Q, Shangguan S P 2021 *Acta Phys. Sin.* **11** 116102 (in Chinese) [陈睿, 梁亚楠, 韩建伟, 王璇, 杨涵, 陈钱, 袁润杰, 马英起, 上官士鹏 2021 物理学报 **11** 116102]
- [7] Zhang F, Wang Y, Wu X, Cao F 2020 *IEEE Access* **8** 12445
- [8] Scheick L 2014 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **61** 2881
- [9] Cai S J, Tang Y S, Wei Y Y, Wong L, Chen Y L, Wang K L, Chen M, Schrimpf R D, Keay J C, Galloway K F 2000 *IEEE Trans. Electron Devices.* **47** 304

- [10] Luo B, Johnson J W, Ren F 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 2196
- [11] Kim H Y, Kim J, Liu L, Lo C F, Ren F, Pearton S J 2012 *J. Vac. Sci. Technol.* **30** 012202
- [12] Zerarka M, Austin P, Toulon G, Morancho F, Arbess H, Tasselli J 2012 *IEEE Trans. Electron Devices.* **59** 3482
- [13] Martinez M J, King M P, Baca A G, Allerman A A, Armstrong A A, Klein B A, Douglas E A, Kaplar R J, Swanson S E 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 344
- [14] Luo X, Wang Y, Hao Y, Li X J, Liu C M, Fei X X, Yu C H, Cao F 2019 *IEEE Trans. Electron Devices.* **66** 1118
- [15] Buchner S, Howard J, Poivey C, McMorrow D, Pease R 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3716
- [16] Han J W, Shanguan S P, Ma Y Q, Zhu X, Chen R, Li S 2017 *J. Deep Space Explor.* **4** 577 (in Chinese) [韩建伟, 上官士鹏, 马英起, 朱翔, 陈睿, 李赛 2017 *深空探测学报* **4** 577]
- [17] Buchner S, Miller F, Pouget V, McMorrow D 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 1852
- [18] Ngom C, Pouget V, Zerarka M, Coccetti F, Crepel O, Touboul A, Matmat M 2021 *Microelectron. Reliab.* **126** 114339
- [19] Khachatryan A, Roche N J, Buchner S, Koehler A D, Greenlee J D, Anderson T J, Warner J H, McMorrow D 2016 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **63** 1995
- [20] Roche N J, Khachatryan A, King M, Buchner S, Halles J, Kaplar R, Armstrong A, Kizilyalli I C, Cunningham P D, Melinger J S, Warner J H, McMorrow D 2016 *16th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)* Bremen, Germany, September 19–23, 2016
- [21] Khachatryan A, Roche N J, Buchner S, Koehler A D, Anderson T J, Cavois V F, Muschitiello M, McMorrow D, Weaver B, Hobart K D 2015 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **62** 2743
- [22] Shanguan S P 2020 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [上官士鹏 2020 博士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]
- [23] Refractive index database, Polyanskiy M N <https://refractiveindex.info/> [2021-12-5]
- [24] Mizuta E, Kuboyama S, Nakada Y, Takeyama A, Ohshima T, Iwata Y, Suzuki K 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 1956
- [25] Sun C K, Liang J C, Wang J C, Kao F J 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 439
- [26] Chen H, Huang X, Fu H, Lu Z, Zhang X, Montes J A, Zhao Y 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 181110

# Research on Single Event Burnout of GaN power devices with femtosecond pulsed laser\*

Cui Yi-Xin<sup>1)2)</sup> Ma Ying-Qi<sup>1)2)†</sup> Shangguan Shi-Peng<sup>1)</sup> Kang Xuan-Wu<sup>3)</sup>  
Liu Peng-Cheng<sup>1)2)</sup> Han Jian-Wei<sup>1)2)</sup>

1) (*State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

( Received 13 December 2021; revised manuscript received 8 March 2022 )

## Abstract

The femtosecond pulsed laser is used to study the quantitative evaluation technology of the single event burnout (SEB) effect in GaN power devices. In this work, we establish two pulsed-laser effective energy transmission models for different device structures, analyzing and verifying the equivalent relationship between the effective laser energy and the heavy ion linear energy transmission (LET). The critical parameters of models are confirmed, including laser parameters and device parameters. The interface reflectivity between the layers is mainly considered. Meanwhile, the parameters are corrected by the multiple reflections between the interfaces, and the laser energy of the second reflection of the metal layer is considered. These measures can be used to reduce the error of the effective energy in the device active area. In addition, we validate the models experimentally. A gallium nitride high electron mobility transistor (GaN HEMT) and a schottky barrier diode (SBD) power device are used in the experiment on the irradiation by a femtosecond pulse laser. The effective laser energy thresholds and the laser equivalent LET threshold with two incident wavelengths of the SEB are calculated. The theoretical calculation value and the actual measured value are compared. The selection basis of the laser wavelengths is given by the detailed study. The support for the laser quantitative evaluation and the protection design of the SEB in GaN power devices is provided by this work.

**Keywords:** GaN power devices, femtosecond pulsed laser, Single Event Burnout, equivalent LET

**PACS:** 61.80.Az, 61.80.Ba, 78.55.Cr, 61.80.Jh

**DOI:** [10.7498/aps.71.20212297](https://doi.org/10.7498/aps.71.20212297)

---

\* Project supported by Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences, China(Grant No. 2018179), the Key Research and Development Program of Guangdong Province, China(Grant No. 2020B010170001), and the Beijing Municipal Science and Technology Commission, China(Grant No. Z201100003520002).

† Corresponding author. E-mail: [myq@nssc.ac.cn](mailto:myq@nssc.ac.cn)