

发光二极管电子辐照效应的研究

周彦平,郝娜,杨瑞,车驰,靳浩,徐静

(哈尔滨工业大学 可调谐(气体)激光技术国防科技重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 研究电子辐照对发光二极管(Light emitting diode, LED)性能的影响。利用电子加速器提供的电子束模拟空间电子辐射环境,试验时电子的能量是 1.0 MeV,辐射最大剂量为 1×10^6 rad(Si)。辐照期间,采用异位测试的方法进行光学量和电学量的测量,并进行辐射后退火效应的研究。结果表明:随着辐照剂量的增加,LED 的输出光功率近似线性衰减,其正向压降 V 增大,且不同的试验条件对 LED 性能损伤的程度不同。此外,辐射停止后的一段时间,器件的性能有所恢复,并趋于稳定。同时利用电子辐照机理对试验结果进行理论分析和讨论。

关键词: 发光二极管(LED); 电子辐照; 退火效应

中图分类号: TN36 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)02-0454-05

Electron radiation effect of LED

Zhou Yanping, Hao Na, Yang Rui, Che Chi, Jin Hao, Xu Jing

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The effect of electron radiation on LED was studied. Making use of the electron beam from electron accelerator to simulate the space electron irradiation, test the energy electron was at 1.0 MeV and the maximal total dose at 1×10^6 rad (Si). The optical, electrical and annealing properties were measured after radiation. The results showed that with the increase of radiation dose, LED's light power degenerated linearly, while its voltage increased, and the degenerate extent was diverse in different experimental conditions. In addition, after a period of annealing time, LED's capability recovered to some extent and kept stable. The experimental result was analyzed and discussed through the mechanism of electron radiation.

Key words: LED; electron radiation; annealing property

收稿日期:2012-06-05; 修订日期:2012-07-03

基金项目:国家科技支撑计划(2009BAK58B03)

作者简介:周彦平(1956-),男,教授,博士生导师,主要从事空间光电探测方面的研究。Email:hitlunwen@sohu.com

0 引言

发光二极管(Light emitting diodes, LED)是一种重要的固态光源,具有低成本、寿命长、性能稳定等优点。随着航天技术和光电子技术的进一步发展,红外 LED 作为光源器件已被广泛应用于航天领域,这使得 LED 直接暴露于地外空间环境中,而地外空间环境中存在着质子、中子、电子以及 γ 射线等辐射源^[1-2],长期的辐射将会对器件性能产生严重的影响。近年来,国内外都有对 LED 辐照效应研究的相关报道^[3-9],研究人员利用深能级瞬态谱(DLTS)及光致发光谱(PL 谱)等实验,讨论了不同粒子的辐照对 LED 的电学性能和光学性质的影响。这些研究只是对实验结果进行简单的定性分析,没有建立相应的理论模型定量解释实验现象。

文中首先设计了 LED 辐照实验方案与性能参数测试方案;通过辐照实验,测量了辐照前后器件的光学特性和电学特性的变化;然后通过对实验数据的分析,总结了辐照损伤对 LED 性能的影响规律;最后分析辐照效应产生的物理机制,对辐照产生器件性能衰减进行了理论研究,发现理论模型与实验结果一致。

1 实验器件选择及方案

1.1 实验样品

实验采用同一公司生产的同一批次的 SE1470 型号 AlGaAs 材料的红外发光二极管,其峰值波长为 880 nm,光谱半宽度为 80 nm。根据实验条件的不同将器件分为 3 组,其中 #1 组采取辐照过程中通过长线保持对器件的电流输入,辐照的最大剂量 $1 \times 10^6 \text{ rad(Si)}$;作为对照,#2、#3 两组在辐照时不供电流,辐照的最高剂量分别为 $5 \times 10^5 \text{ rad(Si)}$ 和 $7 \times 10^4 \text{ rad(Si)}$ 。

1.2 辐射源

实验是在黑龙江省科学院技术物理研究所进行的,辐射场所用的主要设备为 DD1.2 高频高压直线电子加速器和 89 型束流积分仪,实验时电子的能量为 1.0 MeV,束流为 1~2 μA 。在实验范围内,扫描不均匀度和能量不稳定性均小于 $\pm 5\%$,束流积分仪的最大测量误差为 $\pm 2\%$ 。

1.3 器件测试方法

实验样品置于辐射室内,辐射室处于常温常压下,实验所需的导线通过接线孔引到辐射室外安全地带,以便对器件进行测试。在器件的测试上,采用异位测试方法,即当达到预设的辐射剂量点后很快将器件取出进行参数测试。该实验测试中用来表征辐照前后器件特性的基本参数为:(1) I-P 特性;(2) I-V 特性。

2 实验结果

2.1 LED 光功率随辐照剂量的变化

图 1 给出的是 #1 号 LED 的光功率在电子辐射前后随输入电流的变化曲线。从图 1 中可以看出:(1)在同一辐照剂量点时,光功率随着输入电流的增加而增加,这与辐射前的光功率的变化趋势是一致的。(2)在同一输入电流时,随着辐照剂量的增加,LED 的光功率不断的减小。在辐射剂量分别为 $5 \times 10^3 \text{ rad(Si)}$, $1 \times 10^4 \text{ rad(Si)}$, $7 \times 10^4 \text{ rad(Si)}$, $1 \times 10^5 \text{ rad(Si)}$, $5 \times 10^5 \text{ rad(Si)}$, $1 \times 10^6 \text{ rad(Si)}$ 时,LED 的输出光功率分别衰减到辐射前的 92.5%, 89.3%, 86.7%, 85.6%, 67.3%, 45.2%。可见,当辐照剂量达到 $1 \times 10^6 \text{ rad(Si)}$ 时,其性能已退化。

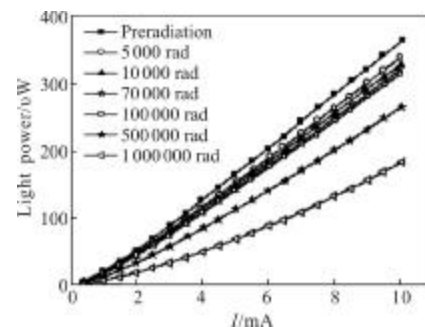


图 1 不同辐照剂量下 LED 的光功率随输入电流的变化关系
Fig.1 Relation between LED's light power and input current after different doses of electron radiation

通过对实验数据进行线性拟合,得到了 LED 的输出光功率随辐照剂量的变化曲线,如图 2 所示。由图 2 中可以看出,二者有很好的线性关系,其拟合公式为: $P = a - b\Phi$ 。其中, Φ 为辐照总剂量; a 为直线与 y 轴的交点,表示未辐射时的光功率,与输入电流有关; b 为直线的斜率,表示光功率随辐照剂量衰减的快慢的参量。线性拟合后直线斜率: $\bar{b} = 1.34 \times 10^{-4} \pm 4.22 \times 10^{-6}$, 则函数为: $P = a - (1.34 \times 10^{-4} \pm 4.22 \times 10^{-6}) \Phi$ 。由该实验

未辐射的光功率数据可知,输入电流为8 mA 时,光功率 P 为 $260.2 \mu\text{W}$, 而线性拟合得到的光功率 P 为 $258.76 \mu\text{W}$ 。综上可知,在实验误差允许的范围内,实验数据的线性拟合是正确的。

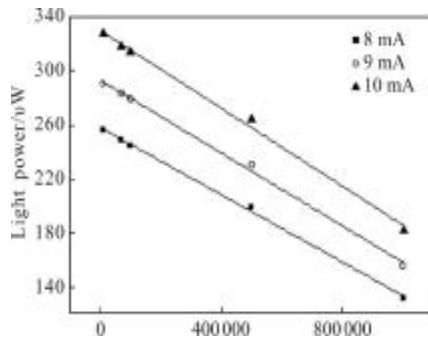


图 2 LED 的光功率随辐照剂量的变化关系

Fig.2 Relation between LED's light power and radiation's dose

图 3 所示为采用双对数坐标时,得到的 LED 的光功率与输入电流的变化曲线,其中 S_0-S_3 为拟合直线的斜率。可以明显的看出二者具有良好的线性关系即: $\lg P = \alpha + \beta \lg I$ 。线性拟合得到的直线斜率为 $\beta = 1.367 \pm 0.019$, 故函数可以表示为 $\lg P = \alpha + (1.367 \pm 0.019) \lg I$ 。其中,直线的截距 α 是与辐照的辐照总剂量有关的参量,其值随总剂量的增加而减小。

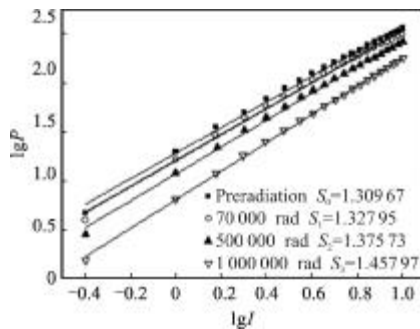


图 3 双对数坐标下电流和光功率的关系

Fig.3 Relation between LED's light power and input current in double logarithmic coordinates

2.2 LED 光功率随供电条件的变化

如图 4 所示,笔者得到了在辐射剂量相同时,LED 的光功率与供电条件的变化曲线。在辐射剂量相同的条件下,辐射现场供电的器件比断电的器件的输出光功率低,这说明辐照期间供电加剧了 LED 性能的退化。

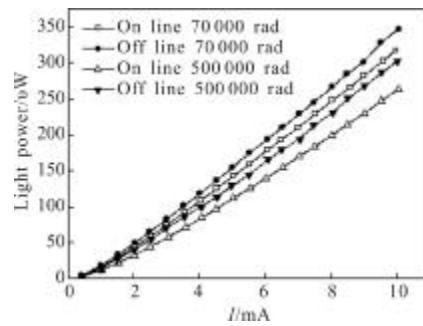


图 4 LED 的光功率随偏置电压的变化关系

Fig.4 Relation between LED's light power and bias voltage

2.3 LED 光功率退火效应的研究

对 #1 号器件进行了一个月的退火观察,得到了输出光功率随退火时间的变化曲线,如图 5 所示。可以看出,LED 光功率有明显的恢复效应,在退火 5 天内 LED 的输出率逐渐增加,随着退火时间的延长,器件的恢复速率逐渐减慢,最终趋于稳定,但没有恢复到辐射前的功率值。这是由于辐照停止后,器件的分子间存在相互作用,使得被损伤的能级逐渐恢复,但是不能恢复到辐射之前光功率值。同时实验还发现,在输入电流不同的条件时,器件退火恢复效应的变化趋势几乎是一致的。

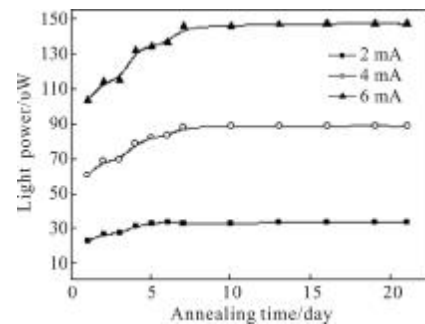


图 5 LED 的光功率随退火时间的变化曲线

Fig.5 Relation between LED's light power and annealing time

2.4 辐照前后 LED 的 I-V 特性的变化

辐照前后 LED 的正向 I-V 特性随辐照剂量的变化如图 6 所示,可以看出:(1) 在同一辐照剂量点时,电压随着输入电流的增加而增加,这与辐射前的变化趋势是一致的。(2) 在输入电流相同时,正向电压 V 随辐照剂量的增加而增大。在辐射剂量分别为 $1 \times 10^5 \text{ rad}(\text{Si})$, $5 \times 10^5 \text{ rad}(\text{Si})$, $1 \times 10^6 \text{ rad}(\text{Si})$ 时,LED 的正向电压 V 分别是未辐照时的 1.054 倍, 1.096 倍, 1.12 倍。

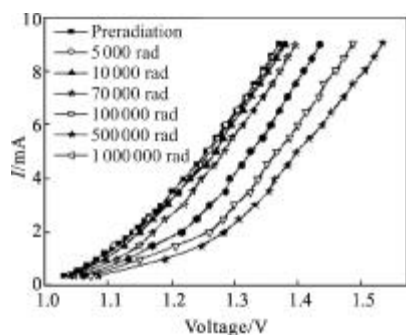


图 6 LED 的 I-V 特性随辐照剂量的变化曲线

Fig.6 Relation between I-V property and annealing time

同时,实验也观察到了 LED 的正向 I-V 特性随供电条件的变化曲线,如图 7 所示。结果表明,在辐照剂量相同时,LED 的正向电压 V 在辐照期间供电的比断电的增加的更多,即在线供电加剧了 LED 性能的恶化,这与前面得到的 LED 的光功率与供电条件的变化趋势是一致的。

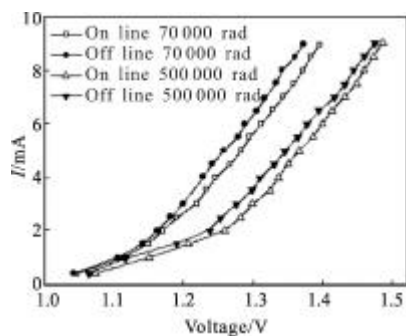


图 7 LED 的 I-V 特性随偏置电压的变化曲线

Fig.7 Relation between I-V property and bias voltage

实验还观察到了 LED 的正向 I-V 特性的退火现象,如图 8 所示。其结果与 LED 光功率退火现象一致,随着退火时间的延长,正向电压 V 趋于稳定,但仍未恢复到辐照前的电压值。

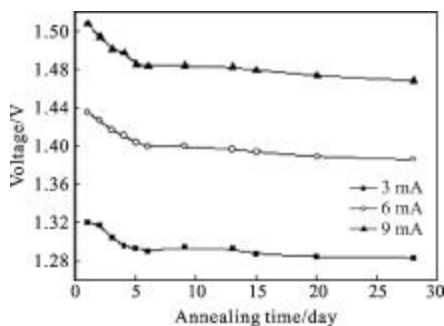


图 8 LED 的电压随退火时间的变化曲线

Fig.8 Relation between LED's voltage and annealing time

3 分析与讨论

根据半导体辐射损伤机理可知,电子辐射在半导体材料中产生能级缺陷,缺陷作为陷阱束缚载流子使其不参与导电,从而降低半导体材料的载流子浓度,二者呈线性关系^[10]即:

$$n(\Phi) = n(0) - k\Phi \tag{1}$$

式中: $n(0)$ 和 $n(\Phi)$ 分别为辐照前后半导体材料的载流子浓度; k 为载流子去除损伤系数(或载流子去除率); Φ 为辐照总剂量。从关系式(1)中可以看出,辐照会使载流子浓度线性的下降。

由半导体物理知识可知^[11],非平衡载流子在 LED 中的复合方式有两类:(一)是电子由导带直接跃迁到价带,使电子和空穴成对消失,同时发射光子,这是辐射复合,其非平衡载流子浓度用 n_r 表示;(二)是通过复合中心的复合,即电子先跃迁到复合中心能级然后再跃迁到价带,在此过程中不能产生光子,称为非辐射复合,其非平衡载流子浓度用 n_u 表示。则器件中总的载流子浓度表示为:

$$n = n_r + n_u \tag{2}$$

由关系式(1)可知, n_u 随着辐照剂量的增加是线性衰减的,即有:

$$n_u(\Phi) = n_u(0) - k_u\Phi \tag{3}$$

式中: $n_u(0)$ 和 $n_u(\Phi)$ 分别为辐照前后半导体材料非辐射复合的载流子浓度; k_u 为非辐射复合载流子的辐射损伤系数; Φ 为辐照剂量。则根据关系式(1)、(2)可以得到:

$$n_r(\Phi) = n(\Phi) - n_u(\Phi) = n_r(0) - (k - k_u)\Phi \tag{4}$$

式中: $n_r(0) = n(0) - n_u(0)$, $n_r(\Phi)$ 分别为辐照前后半导体材料辐射复合的载流子浓度。由于发光是由辐射复合载流子 n_r 提供的,所以输出光功率的表达式为:

$$P_{out} = n_r S v h \nu \tag{5}$$

式中: S 为载流子通过的横截面积; v 为载流子移动的速率; $h\nu$ 为单个光子的能量。将公式(4)带入公式(5),可以得到电子辐照时的输出光功率:

$$P_{out}(\Phi) = P_{out}(0) - k'\Phi \tag{6}$$

式中: $P_{out}(0) = n_r(0) S v h \nu$, $P_{out}(\Phi)$ 为辐照前后 LED 输出的光功率, $k' = (k - k_u) S v h \nu$ 为辐射复合载流子的辐照损伤系数。

由公式(6)可知,LED 的输出光功率随辐照剂量

的增加而线性的衰减,实验中观察到了这种现象,见图 2。同时通过实验数据的处理,还得到了对于笔者所研究的器件的辐射复合载流子的辐照损伤系数 k' 的值为: $k'=1.34\times 10^{-4}\pm 4.22\times 10^{-6}$,实验结果符合理论分析。

由文中分析和公式(1)可以看出,辐射产生了能级缺陷,能捕获载流子,产生载流子去除效应,就使得在相同电流激励下,辐射前自由载流子浓度要比辐射后载流子浓度高。这样,辐射后的 LED 要产生相同大小的电流,就必须有更大的电压激励以注入更多的载流子。本次实验也观察到了这种现象,见图 6,即随着辐射剂量的增加,同一电流所对应的电压值增加,实验验证了理论的正确性。

4 结 论

利用电子加速器模拟空间辐射环境,研究电子辐射对 LED 的 I-P 特性和 I-V 特性的影响。结果显示:LED 的光功率随着辐照剂量的增加而线性衰减,这与理论分析一致,即电子辐照后 LED 光功率的表示为: $P_{out}(\Phi)=P_{out}(0)-k'\Phi$,并由实验确定 k' 值: $k'=1.34\times 10^{-4}\pm 4.22\times 10^{-6}$ 。LED 的 I-V 曲线随着辐照剂量的增加向大电压方向偏移,即在输入电流相同时,正向电压 V 随辐照剂量的增加而增大。实验还发现,辐照期间不同的供电条件对 LED 的损伤是不同的,在线供电的器件比断电的辐射损伤大。此外器件还存在常温退火效应。由此可见,文中的研究结果可以为 LED 的空间应用提供了一定的理论和实验依据。

参考文献:

- [1] Benton E R, Benton E V. Space radiation dosimetry in low-earth orbit and beyond[J]. Nucl Instru Meth, 2001, 184B: 255.
- [2] Reitz C K, Schnuer K, Shaw K. Editorial-workshop on radiation exposure of civil aircrew [J]. Radiation Protection Dosimetry, 1993, 48(3):5.
- [3] Allan H. Johnston. Radiation effects in light-emitting and laser diodes[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2003, 50(3): 689-703.
- [4] Johnston A H, Miyahira T F. Characterization of proton damage in light-emitting diodes [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2000, 47(6): 2500-2507.
- [5] Pavesi M, Rossi F, Zanoni E. Effects of extreme dc-ageing and electron-beam irradiation in InGaN/AlGaIn/GaN light-emitting diodes [J]. Semicond. Sci. Technol, 2006, 21(2): 138-143.
- [6] Beringer J, Borner K, Mommsen R. K, et al. Radiation hardness and lifetime studies of LEDs and VCSELS for the optical readout of the ATLAS SCT [J]. Nucl Instru Meth, 1999, 435: 375-392.
- [7] Zhou Yanping, Chang Guolong, Ma Jing, et al. Influence of laser diodes cumulative radiation damage on bit error rate of space optical communication system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3): 497-500. (in Chinese)
周彦平,常国龙,马晶,等. 半导体激光器辐射损伤对空间光通信误码率的影响 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 497-500.
- [8] Bai Yun, Shao Xiumei, Chen Liang, et al. Effect of electron irradiation on the GaN based pin UV detector [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 270-273. (in Chinese)
白云,邵秀梅,陈亮,等. GaN 基紫外探测器的电子辐照效应[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 270-273.
- [9] Zhou Yanping, Wang Xiaoming, Chang Guolong, et al. Radiation experiment of CMOS image sensor [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1270-1273. (in Chinese)
周彦平,王小明,常国龙,等. CMOS 图像传感器的辐射实验[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1270-1273.
- [10] Cao Jianzhong. Radiation Effects on Semiconductor [M]. Beijing: Science Press, 1993. (in Chinese)
曹建中. 半导体材料的辐射效应 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [11] Meng Qingju, Liu Haibo, Meng Qinghui. Physics of Semiconductor Devices[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
孟庆巨,刘海波,孟庆辉. 半导体器件物理 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.