

文章编号: 2095-4980(2021)04-0728-05

典型电子器件中子和总剂量辐照协同损伤研究

朱小锋, 许献国, 刘珉强

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 研究了几种典型电源类电子器件的中子和总剂量辐射效应, 包括单总剂量效应、单中子辐射效应、总剂量和中子分时序贯辐照效应以及中子和总剂量同时辐照效应, 分析了不同辐照条件下电子器件的失效中子注量(总剂量)阈值。试验结果显示, 分时序贯、同时辐照试验给出的电子器件辐照失效阈值低, 而单项辐射效应试验给出的失效阈值偏高。对于该类双极工艺器件存在协同增强损伤的机理进行了分析, 其主要原因在于同时辐照时, 电离损伤在晶体管氧化层产生氧化物正电荷, 使基区表面势增加, 与此同时界面态数量增多, 减少 Si 体内次表面载流子浓度的差异, 从而使电流增益的退化加剧, 增强晶体管的中子位移损伤。按照同时辐照进行试验考核, 更能真实评估器件的综合抗辐射性能, 研究结果对于器件抗辐射性能评估具有重要意义。

关键词: 中子辐射效应; 总剂量效应; 协同效应

中图分类号: TN386; O471.4

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019403

Neutron and γ -ray synergic radiation effect of typical electronic components

ZHU Xiaofeng, XU Xianguo, LIU Minqiang

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The radiation effect of several typical power electronic components is analyzed, including single total ionizing dose effect, single neutron radiation effect, the sequence radiation effect of neutron-total dose and the synergic radiation effect of neutron-total dose, to get the failure threshold. Experiments show that electronic components irradiated by both neutron and γ -ray have a lower failure threshold than components radiated by single neutron or γ -ray. The mechanism of synergic enhancement damage in bipolar process devices is analyzed. The main reason is that the ionization damage produces positive oxide charge in the oxide layer of the transistor, which increases the surface potential of the base region, increases the number of interface states, reduces the difference of the carrier concentration on the inner sub-surface of the Si body, and intensifies the degradation of current gain and enhances the transistor neutron displacement damage. It is more practical to evaluate the comprehensive radiation resistance of the device according to the synergic radiation test. The research results are of great significance for the evaluation of the radiation resistance of the device.

Keywords: neutron radiation effect; total ionizing dose effect; synergic effect

核爆的辐射环境主要有中子、 γ 和 X 射线等, 对电子器件产生中协同子位移损伤和电离总剂量损伤, 辐射环境中同时存在这两种损伤^[1-2], 通常对器件的中子和电离总剂量效应研究分别在钴源和反应堆上进行^[3-6]。近年来, 有相关文献报道, 不同种类辐射粒子(如中子与 γ 、质子与电子)同时辐照或顺序辐照半导体器件时, 位移效应与电离效应相互作用、相互影响, 引起的退化不仅与两种效应单独作用时引起的退化有差异, 也不等同于两种效应损伤的简单叠加^[7-9]。本文研究分析了几种典型电子器件的中子和总剂量辐射效应, 包括单总剂量效应、单中子辐射效应、总剂量和中子分时序贯辐照效应以及中子和总剂量同时辐照效应, 分析不同辐照条件下电子器件的失效中子注量(总剂量)阈值的异同。试验结果显示, 分时序贯、同时辐照考核给出的电子器件辐照失效阈值低, 而单项辐射效应考核给出的失效阈值偏高, 主要原因在于同时辐照协同效应的增强损伤。

收稿日期: 2019-10-17; 修回日期: 2020-04-14

基金项目: 抗辐射加固预先研究资助项目(41411030101)

1 试验条件设计

针对典型电源类器件分别在钴源、反应堆中子/γ 混合辐射环境、反应堆中子辐射环境中开展总剂量效应试验、协同效应试验、中子辐射效应试验以及先 γ 后中子辐照试验。

中子辐射环境采用中物院 CFBR-II 堆，n/γ 比为 $1 \times 10^{12}/\text{cm}^2 \cdot \text{Gy}(\text{Si})$ ；中子 γ 混合辐射环境，采用西安脉冲堆 2#辐照装置，n/γ 比为 $5.4 \times 10^{10}/\text{cm}^2 \cdot \text{Gy}(\text{Si})$ ；γ 辐射环境采用中物院 ^{60}Co 源，γ 射线剂量率均为 $0.12 \text{ Gy}(\text{Si})/\text{s}$ 。辐照中子注量均采用活化箔进行伴随测量，以保证中子注量的准确性和一致性。同时辐照和单中子辐照时，中子注量伴生总剂量关系见表 1~表 2。

试验样品包括一种高压换流器 S012、一种 DC/DC S084、一种加固与非加固 LDO 1764，辐照时加电在线测试其输出电压和输入电流的变化情况。

表 1 同时辐照时不同中子注量的伴生总剂量

Table1 Associated total-dose under different neutron fluences		
serial number	neutron fluence while synergic radiation/($\text{n} \cdot \text{cm}^{-2}$)	total-dose while synergic radiation/Gy(Si)
1	1.00×10^{13}	185
2	1.10×10^{13}	203
3	1.25×10^{13}	231
4	1.50×10^{13}	278
5	2.00×10^{13}	370
6	2.25×10^{13}	416
7	2.50×10^{13}	462
8	3.00×10^{13}	555
9	3.50×10^{13}	648
10	4.00×10^{13}	740

表 2 单中子辐照时不同中子注量的伴生总剂量

Table2 Associated total-dose under different neutron fluences		
serial number	neutron/($\text{n} \cdot \text{cm}^{-2}$)	total-dose while neutron radiation/Gy(Si)
1	1.00×10^{13}	10.0
2	1.10×10^{13}	11.0
3	1.25×10^{13}	12.5
4	1.50×10^{13}	15.0
5	2.00×10^{13}	20.0
6	2.25×10^{13}	22.5
7	2.50×10^{13}	25.0
8	3.00×10^{13}	30.0
9	3.50×10^{13}	35.0
10	4.00×10^{13}	40.0

2 试验结果与分析

高压换流器 S012 的辐照试验数据见图 1，以相对初始值的输出电压变化量作为不同条件下的对比参数。图 1 中的综合指同时辐照，中子指单中子注量辐照。图 2 为 S012 单总剂量辐照条件下的变化情况。

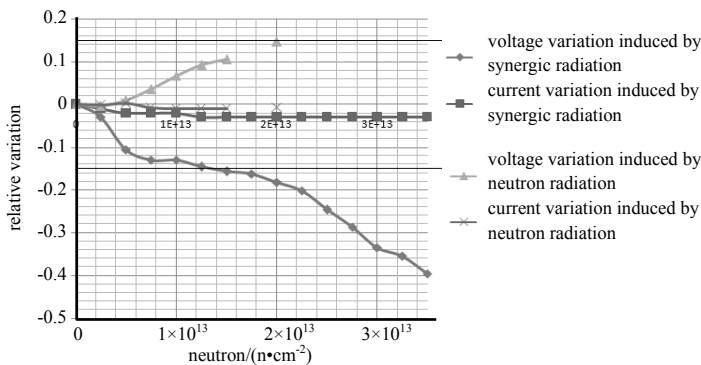


Fig.1 Comparison between synergic radiation and neutron radiation on S012
图 1 S012 同时综合辐照与单中子注量辐照结果对比

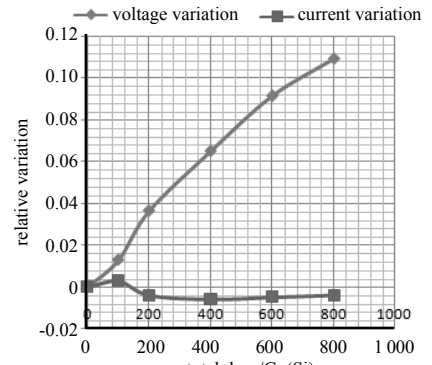


Fig.2 Total-dose radiation on S012
图 2 S012 单总剂量辐照下的变化

从图 1~图 2 可以看出：a) S012 同时辐照试验中，其失效中子注量(总剂量)阈值约为 $1.25 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ ($231 \text{ Gy}(\text{Si})$)~ $1.5 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ ($278 \text{ Gy}(\text{Si})$)(器件手册输出电压合格判据为输出变化 $\pm 0.15 \text{ V}$)。b) 单中子注量辐照试验显示，S012 失效中子注量阈值约 $2.0 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ (合格判据同上)。单总剂量辐照条件下，失效总剂量阈值大于 $800 \text{ Gy}(\text{Si})$ 。按照传统单因素抗辐射性能评价方法，S012 中子、总剂量失效阈值约 $2.0 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ ($800 \text{ Gy}(\text{Si})$)，显然过高估计了器件的失效阈值。

12 V 转 5 V 低压开关电源器件 S084 的同时综合辐照与单中子辐照试验数据如图 3 所示。从图 3 可以看出，随中子注量的增加，电源器件中脉宽调制器内部运放增益下降，输入失调电压增大，从而输出电压降低，降低到一定程度后，运放增益达到平稳，输出电压降低趋缓；随着中子注量继续增加，脉宽调制器中比较器性能持续降低，占空比逐渐增大，持续充电导致输出电压持续上升，最终导致功率器件烧毁或 PWM 比较器永久失效。该器件为总剂量加固器件，其抗总剂量能力大于 $1000 \text{ Gy}(\text{Si})$ ，总剂量辐照试验结果如图 4 所示。

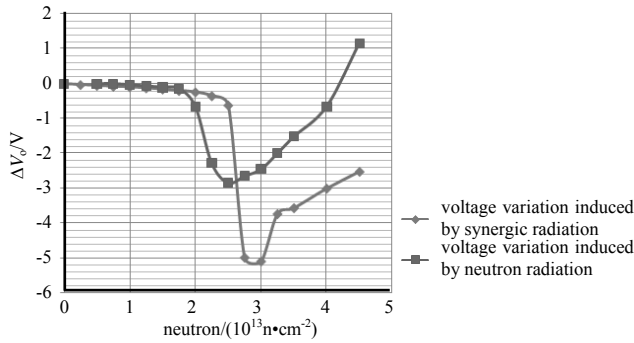


Fig.3 Synergic radiation and neutron radiation data on S084
图 3 S084 同时综合辐照与单中子辐照结果比较

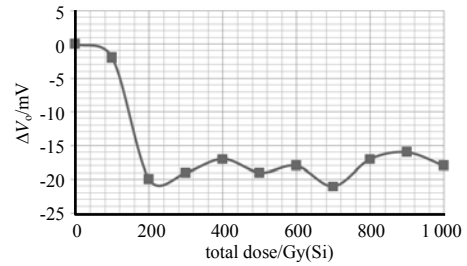


Fig.4 Total-dose radiation on S084
图 4 S084 单总剂量辐照下的变化

从失效阈值看：a) S084 的同时综合辐照试验显示，其失效中子注量阈值约 $1.75 \times 10^{13} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$ (324 Gy(Si))(器件手册输出电压合格判据为变化 ± 0.2)；b) 单中子注量辐照时，失效中子注量(总剂量)阈值约 $2.0 \times 10^{13} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$ (合格判据为变化 ± 0.2)。同时辐照比单中子辐照损伤更严重一些。

针对两种 S1764 电源芯片开展反应堆中子、钴源、混合场的辐照对比试验。其中一种为加固器件，一种为非加固器件。利用数采卡对电源芯片的输出进行测量。

表 3 为试验中实测的辐射环境参数，其中先 γ 后中子辐照下的 n/γ 比值与综合辐射环境一致，中子场辐照下伴生的 γ 射线总剂量比其他环境低一个量级，可忽略。

总剂量效应结果如图 5 所示，结果表明该电源芯片具备较好的抗总剂量性能，在 350 Gy(Si)的总剂量辐照下，非加固器件变化后的幅度为 2.511~2.512 V，加固器件变化后的幅度为 2.512~2.525 V。最大变化量小于 1%，可以认为该类器件抗总剂量能力在 350 Gy(Si)以上。

图 6 为非加固 S1764 电源芯片的协同效应对比结果，输出电压达失效判据 2.75 V 时，单中子辐照、同时辐照、分时辐照损伤阈值基本一致($1.65 \times 10^{13} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$)。

图 7 为加固 S1764 电源芯片的协同效应对比结果。输出电压达失效判据 2.75 V 时，同时辐照损伤阈值为 $3.5 \times 10^{13} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，分时辐照损伤阈值为 $4.2 \times 10^{13} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，单中子辐照损伤阈值为 $5.3 \times 10^{13} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。从试验数据可见，综合辐射环境下器件的退化程度显著大于中子辐照效应，由于器件总剂量效应的不敏感性，中子效应退化和总剂量效应退化的加和也明显弱于综合效应。

表 3 实测的辐射环境参数

Table3 Radiation environment parameters by test		
radiation	neutron/(n·cm ²)	γ total-dose/rad(Si)
synergic radiation	1.30×10^{14}	2.4×10^5
neutron radiation	6.25×10^{13}	8.1×10^3
⁶⁰ Co γ ray	0	1.1×10^5
γ after neutron	6.20×10^{13}	1.1×10^5

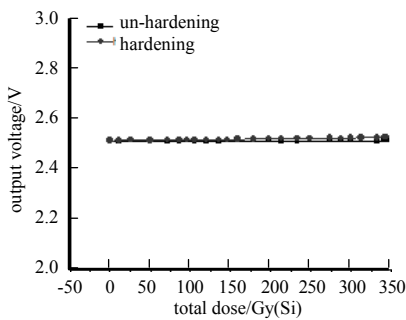


Fig.5 Total-dose effect on S1764
图 5 S1764 芯片的总剂量效应

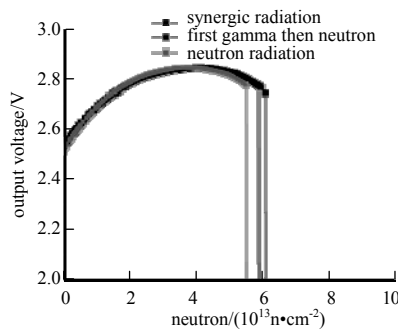


Fig.6 Synergic effect of un-hardening S1764
图 6 非加固 S1764 电源的协同效应对比

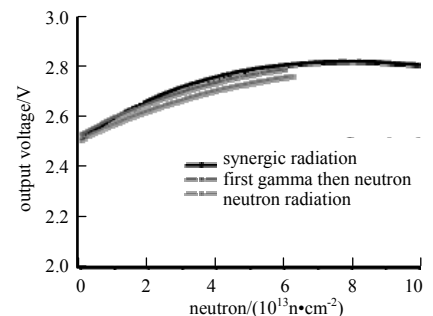


Fig.7 Synergic effect of hardening S1764
图 7 加固 S1764 电源的协同效应对比

对比图 6 和图 7，加固器件具备明显强于非加固器件的抗中子辐射性能，表明了加固措施的有效性；图 7 中试验结果表明，加固 S1764 电源芯片在综合辐照环境下存在加剧退化的效应特征，其退化程度远大于单项辐射效应，而通过先 γ 后中子的次序辐照与综合辐照损伤更接近。

3 协同效应损伤机理分析

对于协同增强效应原因，Vanderbilt 大学的 H J Barnaby^[10-11]等基于 200 MeV 质子与 X 射线辐照 LM124、

LM148 运算放大器的试验结果,给出了电离和位移效应相互作用的一种分析模型。该模型认为:对于 NPN 晶体管,高能质子辐照所引起的电离损伤(氧化物层中正电荷积累,改变了表面电势)与位移损伤(Si 体中缺陷)相互作用,使电流增益衰降呈现“超线性行为”(super-linear),即随着高能质子辐照注量增加,电流增益逐渐偏离线性而趋于加剧。王晨辉^[12]研究了基区表面势对栅控横向 PNP 中子位移损伤退化的影响,实验结果表明,基区表面势的增加引起栅控横向 PNP 晶体管位移损伤退化速率增加,加剧晶体管的中子位移损伤,引起更显著的增益退化。数值模拟结果表明,对于受相同注量中子辐照后的栅控横向 PNP 晶体管,基区表面势的增加引起更大的基极复合电流,导致更显著的增益退化。

李兴冀^[13]认为除了考虑电离效应导致的氧化物层内正电荷造成 Si 体内次表面载流子的浓度差,还应考虑界面态的影响。对于 NPN 晶体管,随着电离效应造成的界面态(正电)数量增多, Si 体内次表面载流子浓度的差异会减小;对于 PNP,随着电离效应造成的界面态(负电)数量增多,同样 Si 体内次表面载流子浓度的差异会减小,因此电离效应对 NPN 和 PNP 产生的界面态均会导致位移损伤的加剧。界面态数量的增加,还会使表面电流复合率的峰值进一步向 Si 体内移动,导致体复合电流的影响越来越大,从而使电流增益的退化加剧。

因此协同效应的机理主要是综合辐照时,电离损伤在晶体管氧化层产生氧化物正电荷,使基区表面势增加,引起基极复合电流增大, Si 体内次表面载流子的浓度降低,导致电流增益退化加剧;与此同时,电离效应造成的界面态数量增多,同样会减小 Si 体内次表面载流子浓度的差异,从而使电流增益的退化加剧,增强晶体管的中子位移损伤。

本文研究的 3 种器件主要由双极晶体管和少量功率 MOS 管组成,单电离总剂量辐照、综合辐照与单项辐照时,双极晶体管和 MOS 管都表现出较强的抗电离总剂量能力,中子与 γ 综合辐照损伤比单中子或先 γ 后中子序贯辐照损伤严重,这主要是由于双极晶体管表现出协同增强效应的结果。

4 结论

针对 3 种电源模块类双极模拟电路的综合与单项辐照试验研究结果表明,同时辐照、分时序贯辐照比分别进行单项辐照给出的性能评估结果要保守。采取单独 γ 或单独中子试验方式,不能准确反映出综合辐照的损伤效果(主要由双极晶体管的协同效应损伤增强引起),按照同时辐照进行试验考核更能真实评估器件的综合抗辐射性能。

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] 赖祖武,包宗明,宋钦歧,等. 抗辐射电子学—辐射效应及加固原理[M]. 北京:国防工业出版社, 1998. (NAI Zhuwu,BAO Zongming,SONG Qinqi,et al. Radiation hardening electronics—radiation effect and hardening principle[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 1998.)
- [3] 王桂珍,何宝平,姜景和,等. MOS 器件在不同源辐照下总剂量效应的异同性研究[J]. 微电子学, 2004,34(5):532-535. (WANG Guizhen,HE Baoping,JIANG Jinghe,et al. A comparison of ionizing total-dose effect for MOS devices under different radiation resources[J]. Microelectronics, 2004,34(5):532-535.)
- [4] 刘梦新,韩郑生,毕津顺,等. RF PDSOI LDMOS 器件的电离总剂量辐照效应[J]. 半导体学报, 2008,29(11):2158-2163. (LIU Mengxin,HAN Zhengsheng,BI Jinshun,et al. Total ionizing dose radiation effects of RF PDSOI LDMOS[J]. Journal of Semiconductors, 2008,29(11):2158-2163.)
- [5] 石晓峰,尹雪梅,李斌,等. 半导体器件的中子辐射效应研究[C]// 2007 年第十二届全国可靠性物理学术讨论会. 成都:中国电子学会可靠性分会, 2007. (SHI Xiaofeng,YIN Xuemei,LI Bin,et al. Study on neutron radiation effect of semiconductor devices[C]// The 12th National Symposium on Reliability Physics. Chengdu,China:Reliability Branch of China Electronics Society, 2007.)
- [6] 刘书焕,林东生,郭晓强,等. SiGe HBT 的脉冲中子及 γ 辐射效应[J]. 半导体学报, 2007,28(1):78-82. (LIU shuhuan,LIN Dongsheng,GUO Xiaoqiang,et al. Pulse neutron and gamma radiation effects of SiGe HBT[J]. Journal of Semiconductors, 2007,28(1):78-82.)
- [7] WANG Chenhui,BAI Xiaoyan,CHEN Wei,et al. Simulation of synergistic effects on lateral PNP bipolar transistors induced by neutron and gamma irradiation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2015(796):108-113.

- [8] WANG C, CHEN W, YAO Z, et al. Ionizing/displacement synergistic effects induced by gamma and neutron irradiation in gate-controlled lateral PNP bipolar transistors[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 2016(831):322–327.
- [9] WANG C, CHEN W, LIU Y, et al. The effects of gamma irradiation on neutron displacement sensitivity of lateral PNP bipolar transistors[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A, 2016(831):328–333.
- [10] BARNABY H J, SMITH S K, SCHRIMPF R D, et al. Analytical model for proton radiation effects in bipolar devices[J]. IEEE Transaction on Nuclear Science, 2002, 49(6):2643–2649.
- [11] BARNABY H J, SCHRIMPF R D, STERNBERG A L, et al. Proton radiation response mechanisms in bipolar analog circuits[J]. IEEE Transaction on Nuclear Science, 2001, 48(6):2074–2080.
- [12] 王晨辉, 刘岩, 李斌, 等. 基区表面势对栅控横向 PNP 晶体管中子位移损伤的影响[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(11): 114002-1–114002-6. (WANG Chenghui, LIU Yan, LI Bin, et al. The influence of surface potential of base on neutron displacement damage of gate-controlled lateral PNP bipolar transistors[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(11):114002-1–114002-6.)
- [13] LI Xingji, LIU Chaoming, YANG Jianqun. Synergistic effect of ionization and displacement damage in NPN transistors caused by protons with various energies[J]. IEEE Transaction on Nuclear Science, 2015, 62(3):1375–1382.
- [14] ZHOU Shidong, ZHAO Ming, XU Xibin, et al. Distributed wireless communication system: a new architecture for future public wireless access[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(3):108–113.

作者简介:

朱小锋(1976–), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为抗辐射加固. email:229700535@qq.com.

许献国(1971–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为抗辐射加固.

刘珉强(1992–), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为核技术及应用.

(上接第 727 页)

- [4] 王合龙, 边栓成. 一种增强细节的红外图像处理算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(1):139–142. (WANG Helong, BIAN Shuancheng. Detail enhancement algorithm based on infrared image transform[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(1):139–142.)
- [5] GOODFELLOW I J, POUGET-ABADIE J, MIRZA M, et al. Generative Adversarial Networks[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2014, 3(11):2672–2680.
- [6] 郭立君, 赵杰煜, 史忠植. 生成模型与判别方法相融合的图像分类方法[J]. 电子学报, 2010, 38(5):1141–1145. (GUO Lijun, ZHAO Jieyu, SHI Zhongzhi. Image classification method based on the fusion of generation model and discriminant method[J]. Electronica Sinica, 2010, 38(5):1141–1145.)
- [7] CHO K, VAN Merriënboer B, GULCEHRE C, et al. Learning phrase representations using RNN encoder–decoder for statistical machine translation[J]. Computer Science, 2014:1724–1734.
- [8] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation[C]// International Conference on Medical Image Computing & Computer-assisted Intervention. Munich: [s.n.], 2015:234–241.

作者简介:

李国威(1997–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为抗干扰通信. email:lgw1105162500@163.com.

石志广(1975–), 男, 主要从事红外与激光雷达信息获取与处理技术研究. email:szgstone75@sina.com.

张焱(1975–), 女, 主要从事红外、可见光图像处理的研究工作. email:atrthreefire@nudt.edu.cn.