

文章编号 1004-924X(2009)04-0787-07

SRAM、ROM 的总剂量辐射效应及损伤分析

李豫东^{1,2},任建岳¹,金龙旭¹,张立国¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

摘要:为了研究大规模集成电路存储器的总剂量辐射效应,分别对 SRAM 和 ROM 两种存储器进行了⁶⁰Co γ 总剂量辐射实验。结果表明,这两种器件是对总剂量辐射效应敏感的器件,失效阈值在 10~15 krad(Si)之间。实验还表明,研究 SRAM、ROM 的总剂量辐射效应,只对数据存取功能进行测试是不完善的,器件的静态功耗电流与动态功耗电流也是总剂量辐射效应的敏感参数,应该作为总剂量辐射效应失效阈值的有效判据。根据器件结构与实验结果,分析了 SRAM 和 ROM 器件的损伤机理,认为 CMOS SRAM 的损伤主要源于辐射产生的界面效应;而浮栅结构 ROM 的损伤则源于辐射产生的氧化物陷阱电荷与界面陷阱电荷。

关键词:SRAM;ROM;静态功耗电流;动态功耗电流;总剂量辐射效应

中图分类号:TN47 **文献标识码:**A

Total dose effects and radiation damage reasons of VLSI SRAM and ROM storages

LI Yu-dong^{1,2},REN Jian-yue¹,JIN Long-xu¹,ZHANG Li-guo¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: In order to research the Total Dose Effects (TDEs) of the storages for Very Large Scale Integrated circuits(VLSIs), two kinds of devices, SRAM and ROM, are used as samples in a radiation experiment, and a ⁶⁰Co γ source is selected as the radiation source. Experiments indicates that both devices are sensitive to the TDEs, and their damage thresholds are 10~15 krad(Si). Experiments also suggest that research on the TDEs of SRAM and ROM should take the static consumption current and dynamic consumption current as the effective criterions for the damage threshold of TDEs other than testing the data access function only, because the static consumption current and dynamic consumption current are all sensitive to TDEs. On the foundation of analysing the device structure and experiment results, the damage reasons of TDEs are analyzed, and results show that the damage of CMOS SRAM is from the interface effect caused by TDEs and the damage of floating gate ROM is from the oxide charges and interface trapped charges caused by TDEs.

Key words: SRAM;ROM;static consumption current;dynamic consumption current;total dose effect

收稿日期:2008-04-28;修订日期:2008-07-09.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

1 引言

SRAM、ROM 大规模集成电路作为数据存储被广泛应用于卫星、航天等空间领域^[1]。空间的辐射环境中存在着多种带电粒子(电子、质子与带电重粒子)与宇宙射线,这些带电粒子与宇宙射线共同对 SRAM、ROM 等大规模数字集成电路产生辐射效应,会引起诸如数据存取速率、噪声容限、功耗电流等特性参数的剧烈变化^[2],甚至造成数据错误或功能完全失效,严重地威胁整个电子系统的可靠运转,造成意想不到的损失。因此,找出引起这两类电路特性变化的主要原因,从基本结构上入手以提高运放电路的抗辐射能力,是目前航天电子学领域中一个迫切需要研究和解决的课题。

国外对于 SRAM、ROM 电路辐射效应的研究一直侧重于对其在不同带电粒子辐射环境中的损伤规律研究^[3-5],对于总剂量效应方面的研究相对较少。国内对这类大规模集成电路辐射效应的研究尚处在探索阶段,所采用辐射效应的实验与测试方法不统一,对于引起总剂量辐射损伤与失效的根本原因知之甚少。由于 SRAM、ROM 电路的集成度高,所以实验设计与测试方法复杂,失效模式也难于分析。因此,如何分析其内部电路的失效原因,并找出电路特性参数与辐射变化的相关性,成为解决该问题的关键。为了实现这一目标,本文选取应用于某空间遥感器的 SRAM、ROM 器件进行了总剂量辐射实验。

2 实验方法

2.1 样品与实验环境

实验样品 SRAM 选用 IDT7164L70DB, ROM 选用 AT28HC256。辐照源为中科院新疆理化技术研究所的 7 万居里的⁶⁰Co γ 辐射源。剂量测量采用标准剂量仪 UNIDOS,在被辐照器件处测量剂量率,然后乘以辐照时间可得辐射的总剂量,标准剂量仪 UNI DOS 的测量误差 $<2\%$ 。辐照剂量率:51.7 rad(Si)/s,辐照时环境温度为 $(25\pm 5)^\circ\text{C}$ 。

总剂量效应采用移地测试,按照 GJB548A-96《方法 1019 电离辐射(总剂量)试验程序》2 之

规定:在辐照后 2 h 内完成器件的功能及电参数测试,以减小由于辐射诱生陷阱电荷的生长和退火引起的时变效应。实验开始前,先测试样品辐照前的原始数据,然后模仿工作时的状态对器件进行加偏辐照,当辐射剂量达到 5, 10, 15, 20, 25 krad(Si)时,降源取出样品作移地测量,测试环境温度温度为 $(25\pm 5)^\circ\text{C}$ 。

2.2 测试方法

测试辐射效应对数据存取功能的影响时,用 DSP 测试板分别运行对 SRAM、ROM 的测试程序,DSP 测试板与微机建立 USB 通信,通过微机监测 SRAM、ROM 中的数据。对于 SRAM,将所有存储单元写入一个固定的数 0x55h,然后把数据全部读回,与写入的数据进行比较,测试有无变化,哪些地址单元的数据位发生了变化。写入与读取重复 5 次,以保证测试结果的可靠性。测试数据存取功能的同时,监测静态功耗电流与动态功耗电流。对于 ROM,每次辐照前将所有存储单元编程写入 0x55h,测试时,先将所有地址的数据读回,与 0x55h 进行比较,然后进行擦除命令,擦除完毕后编程(向所有地址单元写入固定数 0x55h),再将所有地址的数据读回,与 0x55h 进行比较,擦除、编程与读取过程重复 3 次,以保证测试结果的可靠性,同时监测静态功耗电流与动态功耗电流^[6]。

通过静态功耗电流与动态功耗电流,可以看出辐射效应对功耗的影响。静态功耗电流是集成电路在休眠状态下的功耗电流,此时电路内部的基本单元或逻辑门为截止状态,输出一般为高阻态。卫星上的电子器件为阶段性工作方式,在一个时间段内,通常只开机运行相对较短的时间,大部分时间电路都处在静态偏置的状态,所以静态功耗电流代表了电路长时间的功耗特性,考查器件的长期可靠性与寿命时应该作为参考因素。通常以静态功耗电流超过未经辐照时的 100 倍作为器件的失效判据。动态功耗电流即电路在工作状态下的功耗电流,对于大规模集成电路,器件开关状态切换时的电流即动态功耗电流,通常不同频率工作时功耗是不同的。测试器件的动态功耗时,可以模仿器件实际工作时的状态,如相同的偏置条件,相同的工作频率等,对于 SRAM 与 ROM,则可以根据实际工作时的读写频率,对器件进行反复读写,以此时的功耗电流作为动态功

耗电。器件的动态功耗电流如果随辐射剂量增加变化过大,必定会影响供电系统,后果是非常严重的,所以动态功耗电流可作为考查电路工作可靠性的因素,可以动态功耗电流超过未经辐照时的 1.5 倍作为器件的失效判据。

3 实验结果与损伤分析

3.1 实验结果

实验过程中,对 IDT7164L70DB 进行了 5、10、15、20 krad(Si) 4 个剂量点的测试,对 AT28HC256 进行了 5、10、15、20、25 krad(Si) 5 个剂量点的测试,功能测试结果见表 1、表 2:

表 1 IDT7164L70DB 的功能测试

Tab.1 Function testing of IDT7164L70DB

总剂量/krad(Si)	片选功能	读写功能
0(初始值)	正常	读写完全正确
5	正常	读写完全正确
10	正常	读写完全正确
15	正常	可读写,有少量位反转
20	正常	可读写,有大量位反转

表 2 AT28HC256 的实验数据

Tab.2 Test data of AT28HC256

总剂量/krad(Si)	存储数据	编程功能
0(初始值)	保持不变	编程完全正常
5	保持不变	编程完全正常
10	保持不变	编程完全正常
15	保持不变	编程完全正常
20	大量位反转	可编程,有大量位反转
25	无法读写	无法读写

功耗电流测试结果如图 1~2:

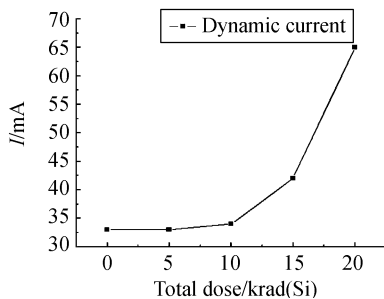
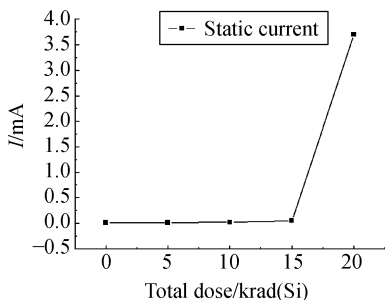


图 1 IDT7164L70DB 的静态功耗电流与动态功耗电流
Fig. 1 Dynamic consumption current and static consumption current of IDT7164L70DB

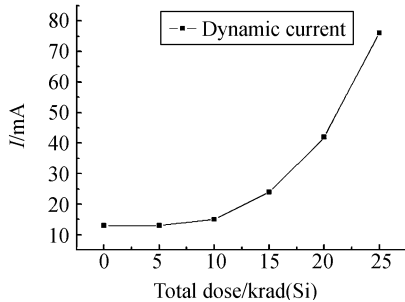
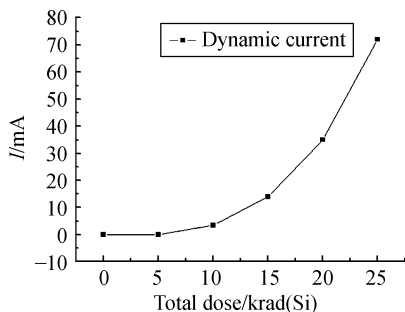


图 2 AT28HC256 的静态功耗电流与动态功耗电流
Fig. 2 Dynamic consumption current and static consumption current of AT28HC256

3.2 实验结果分析

IDT7164L70DB 在总剂量分别达到 5、10 krad(Si) 时,片选功能与读写功能完全正常,静态功耗电流、动态功耗电流与初始值相比基本没有变化。总剂量达到 15 krad(Si) 时,片选功能与读写功能仍正常,但出现了少量数据位反转情况,写入与读回过程循环 5 次,读回的 8k 数据出现位反转的数量分别为 8 位、3 位、5 位、6 位、5 位,典型现象是写入的数据为‘0x55’,而读回的数据变为‘0x75’、‘0x5D’、‘0x57’、‘0xD5’、‘0xD7’等,且错误数据在地址空间分布是离散的,静态功耗电流变化不大、动态功耗电流有了很

大的变化。总剂量达到 20 krad(Si)时,片选功能与读写功能仍正常,但写入与读回的数据已经有大约 8% 的位反转,多数的不一致位反转是‘0’变为‘1’的情况,但出现了少量‘1’变为‘0’的情况,静态功耗电流与初始值相比增大了 100 多倍,动态功耗电流也雪崩式增大。

AT28HC256 在总剂量达到 5 krad(Si)时,片选功能与读写功能正常,读写的数据完全一致,静态功耗电流、动态功耗电流与初始值相比基本没有变化。总剂量达到 10 krad(Si)时,编程与读写功能完全正常,静态功耗电流、动态功耗电流开始明显增大,但仍处在未失效的范围之内。总剂量达到 15 krad(Si)时,编程与读写功能完全正常,静态功耗电流增大为初始值的数十倍、动态功耗电流也比初始值高出一个数量级,说明电路的特性参数退化已经十分严重。总剂量达到 20 krad(Si)时,仍可以编程与读写,静态功耗电流增大为初始值的一千倍左右、动态功耗电流比总剂量 15 krad(Si)时增长了近一倍,且编程写入的数据与读回数据有近 10% 出现位反转,反转的数据位中,有约 17% 是由‘1’变为‘0’,其余都是由‘0’变为‘1’。总剂量达到 25 krad(Si)时已无法继续进行辐射实验。

从以上实验结果可以看出, IDT7164 与 AT28HC256 都是总剂量效应的敏感器件。如果只从数据操作功能来判断, IDT7164 的失效阈值在 10~15 krad(Si)之间, AT28HC256 的失效阈值在 15~20 krad(Si)之间;如果只用静态功耗电流判断, IDT7164 的失效阈值在 15~20 krad(Si)之间, AT28HC256 的失效阈值在 10~15 krad(Si)之间;如果仅以动态功耗电流判断, IDT7164 的失效阈值在 10~15 krad(Si)之间, AT28HC256 的失效阈值在 10~15 krad(Si)之间;可见,如果只以某一个指标判断失效阈值时,结果是不同的,所以测试 SRAM、ROM 的总剂量辐射效应时,不能只针对数据存取进行测试,器件的静态功耗电流与动态功耗电流也是总剂量的敏感参数,应该作为总剂量失效阈值的有效判据,否则得出的失效阈值是不可靠的,因为静态功耗电流代表器件的长期功耗,是电路可靠性的关键指标,动态功耗电流直接影响着电源的供电性能。3 个指标都是代表器件性能与可靠性的重要参数,只有综合 3 个指标的测试结果,才能判断出可靠

的失效阈值,综合测试结果进行判断, IDT7164 与 AT28HC256 的失效阈值都在 10~15 krad(Si)之间。

3.3 损伤机理分析

CMOS 电路的基本单元结构如图 3 所示,是一个 N 沟道管和一个 P 沟道管组成的互补对称的反相器。⁶⁰Co γ 辐射源的辐射效应主要是电离作用,受辐照后晶体管内部电离出电子空穴对,而且这种电离效应是累积的,对 CMOS 类器件辐射产生的效应主要有:(1)产生界面效应,使 CMOS 反相器的 N 沟道管与 P 沟道管的阈值电压向负方向漂移,使电路的噪声容限变小;(2)晶体管的漏源电流增大,使整体电路的静态功耗变大;(3)晶体管的导电沟道电阻增加,通断操作时的开关电流增大,即整体电路的动态功耗变大,同时开关速度变慢,上限工作频率降低。

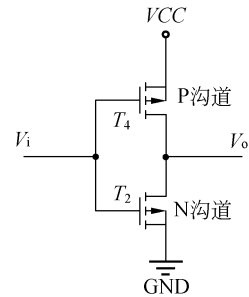


图 3 CMOS 的基本结构

Fig. 3 Basic structure of CMOS circuit

IDT7164 是 CMOS 型 SRAM, CMOS 型 SRAM 的存储单元的结构如图 4 所示, T_1 、 T_3 组成一个反相器, T_2 、 T_4 也是一个反相器,两个反相器构成一个基本的 RS 触发器,当 T_1 、 T_4 导通, T_2 、 T_3 截止时, $Q = '0'$, $Q' = '1'$, 表示该单元为逻辑‘0’;当 T_1 、 T_4 截止; T_2 、 T_3 管导通时; $Q = '1'$, $Q' = '0'$, 表示该单元为逻辑‘1’。 T_5 、 T_6 是写入读出控制管,由字线 W 控制。在总剂量较小,达到 5 krad(Si)与 10 krad(Si)时,晶体管的阈值电压负向漂移不大,数据存取功能正常,静态功耗电流与动态功耗电流基本保持不变,累积的电离效应并不明显;随着总剂量的不断增大,达到 15 krad(Si)时,晶体管的阈值电压继续负向漂移,使得电路的低电平上升,高电平下降,由于 CMOS 电路的互补对称结构,低电平上升的幅度与高电平下降的幅度大致相等; IDT7164 的标准

偏置为低电平 0 V,高电平 5.0 V,而 CMOS 电路的输出阈值电压为低电平 0.4 V,高电平 2.4 V (参考 IDT7164 的数据手册),所以在不出现位反转的限制条件下,高电平的下降范围比低电平的上升范围宽。如图 5 所示,在低电平升高到接近 CMOS 低电平输出阈值电压这种临界状态时,高电平虽然有所下降,但仍大于 CMOS 输出高电平阈值电压,所以回读的数据会先出现少量‘0’变为‘1’的位反转现象,而没有‘1’变为‘0’的位反转现象,由于位反转现象较少,所以晶体管的漏源电流变化不大,电路的静态功耗电流也变化不大。但是晶体管阈值电压负漂引起了导电沟道电阻增大,开关电流变大,所以电路的动态功耗电流明显增大。总剂量进一步累积,达到 20 krad(Si)时,晶体管阈值电压的负向漂移更加严重,这时低电平继续上升,回读的数据出现了大量的‘0’变为‘1’的位反转现象,而高电平下降的幅度也变大,使电路的高电平接近了 CMOS 输出高电平的阈值电压,回读的数据也开始出现‘1’变为‘0’的位反转现象,由于晶体管反转的数目雪崩式增多,电路的静态电流也雪崩式增大,晶体管的开关电流也明显上升,所以电路的动态功耗电流明显增大。

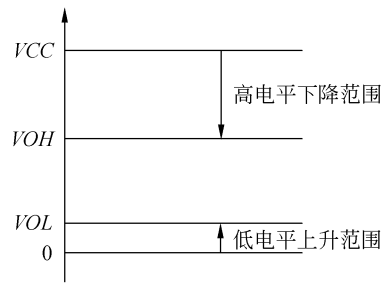


图 5 CMOS 电路高低电平变化范围
Fig. 5 Alterable ranges of CMOS output

效应,P 沟道管的机理与 N 沟道管类似,只是极性相反。如图 6 所示,对于控制栅上的一定电压,晶体管就处于截止或导通状态,对应于存储信息‘0’或‘1’。一般情况下,EEPROM 在写入信息前,浮栅上无电子,晶体管导通,表示存‘1’。写入信息的过程就是使电子注入浮栅,晶体管截止,表示存‘0’。

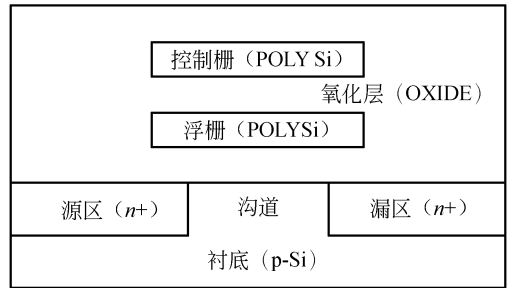


图 6 ROM 存储单元 N 沟道管的基本结构
Fig. 6 Basic structure of N-channel MOSFET in ROM

γ 辐射在浮栅周围的氧化层内电离产生电子空穴对^[8]。电子空穴在电场的作用下定向漂移,电子漂移向沟道或控制栅,迁移率小的空穴,一部分漂移到浮栅,复合了浮栅上的电子,一部分在氧化层中形成氧化物陷阱电荷;一部分在氧化层与半导体材料的界面处形成界面陷阱电荷,这些因素综合起来,使晶体管的阈值电压向负方向漂移,整体电路的低电平上升,高电平下降。在总剂量较小,达到 5 krad(Si)与 10 krad(Si)时,阈值电压漂移不大,高低电平没有达到输出高低电平的阈值,数据操作没有错误,只是电路的静态功耗电流与动态功耗电流略有增大。随着累积剂量的增加,在总剂量较小,达到 15 krad(Si)时,阈值电压继续向负方向漂移,如图 5 所示,低电平上升至

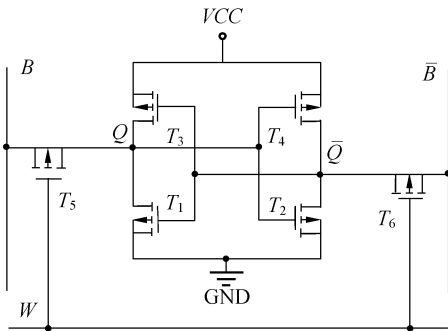


图 4 SRAM 的单元结构
Fig. 4 Storage unit of SRAM

AT28HC256 是 CMOS 型 EEPROM,其基本结构也是如图 3 所示的反相器。不同于 SRAM,它的单管有两个栅:一个控制栅和一个位于沟道和控制栅之间的浮栅^[7]。沟道和浮栅之间的氧化层很薄,电子可以通过 F-N 隧道效应或热电子注入机制在浮栅和源区或沟道之间传输。根据浮栅的带电状态,存储单元就成为耗尽型或增强型的晶体管。由于 CMOS 结构的对称性,以 N 沟道管为例来分析 EEPROM 的内部结构和辐射

接近输出低电平阈值电压的临界状态时,高电平由于变化的幅度与低电平基本相同,并未接近高电平的输出阈值电压,此时一小部分晶体管处于截止和导通的临界状态,但是并不能使存储单元由一种状态彻底变为相反状态。因此,在存储单元状态彻底改变之前的一段时间内,其状态是不确定的。所以,器件刚开始出错时,回读的数据出现少量‘0’变为‘1’的位反转现象,错误数及错误地址都是不确定的。累积剂量进一步增大,达到 20 krad(Si)时,低电平还在继续上升,高电平也下降至接近高电平阈值电压,这时回读的数据出现大量‘0’变为‘1’的位反转,也有少量‘1’变为‘0’的位反转,由于电路的 N 沟道阈值电压变得更负,输入为 0 时本应处于关态的 N 沟道 MOS 管此时导通,而输入为 0 时 P 沟道是导通的,整个反相器在输入为 0 时导通,引起漏源电流陡增,电

路的静态功耗陡增,电路失效。

4 结 论

根据实验结果,得出 SRAM、ROM 器件是总剂量效应的敏感器件,它们的损伤阈值均在 10~15 krad(Si);在测试 SRAM 与 ROM 等大规模集成电路时,不能只针对数据功能进行测试,器件的静态功耗电流与动态功耗电流也应该作为总剂量失效阈值的有效判据,否则得出的结论是不可靠的。SRAM、ROM 器件的总剂量辐射损伤主要有:(1)产生界面效应,晶体管的阈值电压向负方向漂移,电路的噪声容限变小;(2)晶体管的漏源电流增大,整体电路的静态功耗变大;(3)晶体管的导电沟道电阻增加,开关操作时开关电流增大,即整体电路的动态功耗变大。

参考文献:

- [1] CELLERE G. Radiation effects on floating-gate memory cells[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2001, 48(6): 2222-2228.
- [2] CESTER A, GERARDIN S, PACCAGNELLA A, *et al.*. Drain current decrease in MOSFETs after heavy ion irradiation[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2004, 51(6): 3150-3157.
- [3] AMMENDOLA G, ANCARANI V, TRIOLO V, *et al.*. Nanocrystal memories for FLASH device applications [J]. *Solid-State Electron*, 2004, 48(9): 1483-1488.
- [4] 陆妩, 郭旗, 任迪远, 等. CMOS 运算放大器电路的辐照损伤分析[J]. *核技术*, 2002, 25(3): 218-222.
LU W, GUO Q, REN D Y, *et al.*. Analyses of the CMOS op-amps' damage in irradiation environment [J]. *Nuclear Techniques*, 2002, 25(3): 218-222. (in Chinese)
- [5] 贺朝会, 耿斌, 杨海亮, 等. 浮栅 ROM 器件辐射效应机理分析[J]. *物理学报*, 2003, 52(9): 2235-2238.
- [6] HE CH H, GENG B, YANG H L, *et al.*. Mechanism of radiation effects in floating gate ROMs[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(9): 2235-2238. (in Chinese)
- [7] 郝志航, 王晓东. 大容量固态记录器技术[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(4): 396-400.
HAO ZH H, WANG X D. Mass solid state recorder technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(4): 396-400. (in Chinese)
- [8] 刘林生, 刘肃, 王文新, 等. GaAs(110)量子阱材料生长和光学特性[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(5): 678-683.
LIU L SH, LIU S, WANG W X, *et al.*. Optical properties and material growth of GaAs(110) quantum wells[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 678-683. (in Chinese)
- [9] 白雨虹, 杨秀彬, 严寒. 量子光学与量子信息领域中的中国[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(5): 684-698.
BAI Y H, YANG X L, YAN H. China in quantum optics and quantum information[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 684-698. (in Chinese)

作者简介:



李豫东(1982—),男,新疆伊犁人,中科院长春光学精密机械与物理研究所光学工程专业博士研究生,主要从事嵌入式系统与图像处理的研究。E-mail: lydong555@126.com



金龙旭(1965—),男,吉林长春人,中科院长春光学精密机械与物理研究所研究员,博士生导师,主要从事空间相机智能控制系统方面的研究。E-mail: Jinlx@ciomp.ac.cn



任建岳(1952—),男,吉林长春人,中科院长春光学精密机械与物理研究所研究员,博士生导师,主要研究方向为空间光学光机电系统。E-mail: Renjy@ciomp.ac.cn



张立国(1961—),男,吉林长春人,中科院长春光学精密机械与物理研究所副研究员,硕士生导师,主要从事光学仪器和辐射剂量等方面的研究。Email: Zhanglg@ciomp.ac.cn

● 下期预告

扫描全息术中菲涅耳波带板的衍射问题

孙 萍¹,王 瑜¹,莫晓丽²,谢敬辉²,刘大禾¹

(1. 北京师范大学 应用光学北京市重点实验室,北京 100875;

2. 北京理工大学 信息科学技术学院,北京 100081)

为了提高扫描全息成像系统的分辨率,对系统中起重要作用的编码孔径—菲涅耳波带板的衍射问题进行了理论分析和实验研究。对波带板的菲涅耳衍射积分方程进行了数值求解,在计算时考虑了透镜的位相调制作用。为了使分析问题简化,通过对比有透镜时波带板的衍射强度分布,求解出无透镜时具有相同分布的等效距离,同时引入了菲涅耳虚衍射面的概念。为了定量描述波带板的衍射效应,定义了临界衍射距离。实验结果表明:当波带板环数为10环、半径为0.75 cm,以及透镜焦距为7 cm时,临界衍射距离约为16 cm。若其它条件不变,但将透镜焦距增大或波带板环数增加,临界衍射距离均增大。等效距离的引入简化了复杂的含透镜系统的分析,临界衍射距离的提出量化了系统参数对衍射效应的影响。研究结果对扫描全息成像系统的结构设计具有指导意义。