

α 单粒子效应引发的发动机 EEC 内部故障

樊俊峰

中国南方航空股份有限公司技术分公司 广东 广州 510890

摘要: 本文对 EEC 内部只读存储器的工作原理及 α 单粒子效应产生的原因进行了简单研究和介绍, 为因 α 单粒子效应引发的故障的理解和排故提供一定的支持和帮助。

关键词: α 单粒子效应; EEC; 可编程只读存储器

Internal failure of engine EEC caused by α single particle effect

Junfeng Fan

Technology Branch of China Southern Airlines Co., LTD., Guangzhou, 510890, China

Abstract: This article briefly researched and introduced How EEC internal ROM works and the cause of the α particle single event effect, in order to provide support and help to understand and correct such faults caused by α particle single event effect.

Keywords: α single particle effect; EEC; PROM

引言

自 2016 年起 GE 大发包括 GE90/GENx 在世界机队范围内不断出现起动不成功或者起动失速相关故障信息的案例, 然而经故障隔离后将对应的 EEC 拆下进厂送修得到的检测结果却是大多数的 EEC 都是无故障件 (No Fault Found, NFF)。EEC 制造厂家 FADEC 公司经过调查后发现, 此类故障是其新一代 FADEC 3 型 EEC 内部芯片的存储器受 α 粒子辐射影响产生了电位翻转。本文旨在对此特殊种类故障产生的原理进行研究和分析, 为相关机型类似故障的理解和排故提供一定的支持和帮助。

一、EEC 内部结构

以某型 FADEC 3 EEC 为例, 该 EEC 内部部件主要由如下几个部件组成:

(1) 前面板组件 (Front Panel Assembly, FPA), 主要用于通过电缆连接飞机和发动机各系统;

(2) 压力子系统 (Pressure Subsystem, PSS), 主要用于接受和转换压力信号;

(3) 供电模块 (Power Supply Modules, PSM), 用于提供电源;

(4) 主板 (Main Channel Board, MCB), 接收信息, 对其进行处理和计算, 并输出指令。其中处理和计算功能通过 MPC745 微处理器及其存储器完成, 数字信息的输入和输出通过 MPC555 微处理器及其存储器完成。两块主板分别对应 A/B 通道;

(5) 通用个性电路板 2 (General Personality Board 2, GPB2) 及可扩展个性电路板 (Expanded Personality Board, XPB), 通过内部汇流条与 MCB 交换信息并实现如发动机超速保护 (Electric Overspeed, EOS) 及发动机状态监控等功能。GPB2 通过 MPC755 微处理器及其存储器完成计算功能。

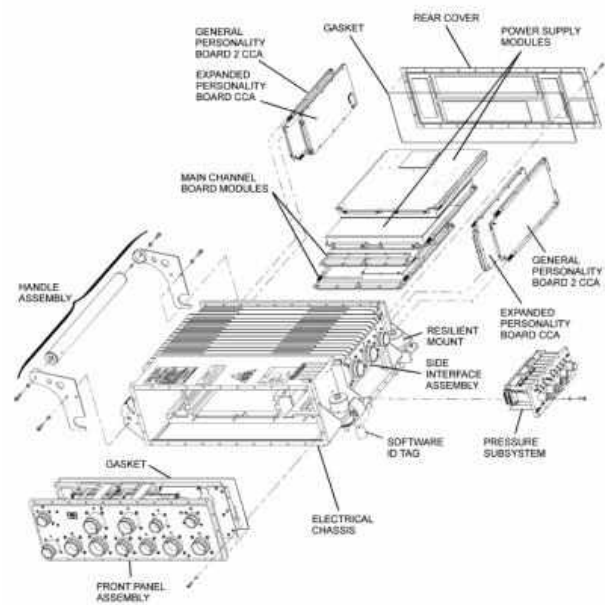


图 1 EEC 内部结构

从该 EEC 内部的结构和功能可以看出, EEC 实现对发动机的控制主要是依靠 MCB 及 GPB2/XPB 各自的微处理器及存储器, 即我们通常所说的芯片。



图 2 EEC 主板芯片示例

二、EEC 中的 PROM

1. PROM

PROM (Read Only Memory) 可编程的只读存储器，是半导体存储器中的一种，它具有断电不丢失数据的特点。PROM 简单来说就是利用晶体二极管作为存储单元来实现对计算机二进制数据的存储，从而完成程序编写或者说完成程序灌入。有的 PROM 在灌入软件时，通过在不需要的保留的存储单元的字线和位线之间加以足够大的脉冲电流，将二极管串接的熔丝熔断。不同存储单元的电路通断即代表了写入的数据信息。这类 PROM 的特点是熔丝熔断之后无法复原，程序一旦写入无法修改。

随着半导体技术的发展，随后出现了浮栅晶体管存储器，每个存储单元存储的是 0 还是 1 取决于电容是否有电荷。断电之后电荷被储存束缚在电容中，数据信息不会丢失，但另一方面该类存储器单元可以通过从不同方向施加一定强度的电压使得电荷穿过隧道氧化层，进入或者脱离浮栅，从而完成程序的写入和擦除。这类存储器即为可擦除可编程只读存储器 (Erasable Programmable Read Only Memory, EPROM)。根据擦除方式的不同，EPROM 由原来的紫外线擦除发展成为了使用高电压擦除的电可擦除可编程只读存储器 (Electrical Erasable Programmable Read Only Memory, EEPROM)。软件逻辑即是通过其内部相关电路板上各 EEPROM 元件中的每一个存储单元的电位状态，即“1”或“0”的不同组合来实现和储存的。我们现代 EEC 内部装载软件的硬件载体便是这种具有断电不丢失数据，同时可以利用电压反复灌入和擦除程序特点的 EEPROM。略有不同的是，现代 EEC 使用的是性能更高的 flash EEPROM，这种只读存储器不仅具有可擦除可编程特性而且还可以快速读取数据，单元尺寸更小，集成度更高。

2. Flash EEPROM 工作原理

如下图 3，一个典型的 Flash EEPROM 存储单管的剖面示意图，在氧化物中有两个栅，控制栅和浮栅，他们与其他部分均不连接，处于完全绝缘状态。当隧道区的电场强度到一定程度后，在浮栅和衬底之间出现导电隧道，在电场的作用下电荷

脱离束缚定向移动。

当需要进行编程时，在控制栅上施加一个大的正电压，同时将源端、漏端以及衬底接地，此时在衬底和浮栅之间形成高电场，在高电场的作用下负电荷从衬底通过隧道到达浮栅。当电荷在浮栅上累计到足够多，超过阈值电压，存储单元被写入“1”，写入成功。由于绝缘，断电后累计的负电荷仍无法脱离浮栅，因此信息不会丢失。

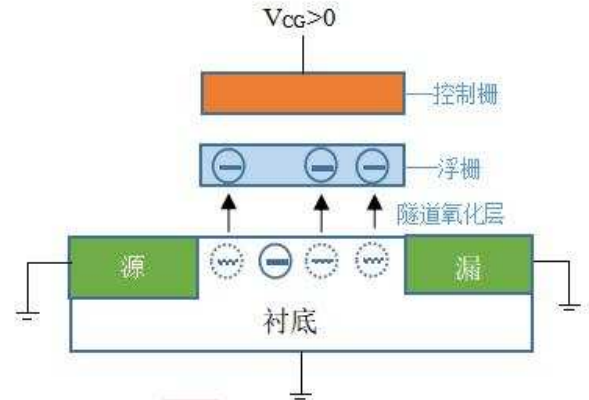


图 3 Flash EEPROM 写入过程示意

当需要进行擦除时，对源端、漏端以及衬底接大的正电压，同时控制栅接地，形成反方向高电场，在高电场的作用下浮栅内的负电荷脱离浮栅，通过隧道到达衬底。存储单元被写入“0”，擦除成功。

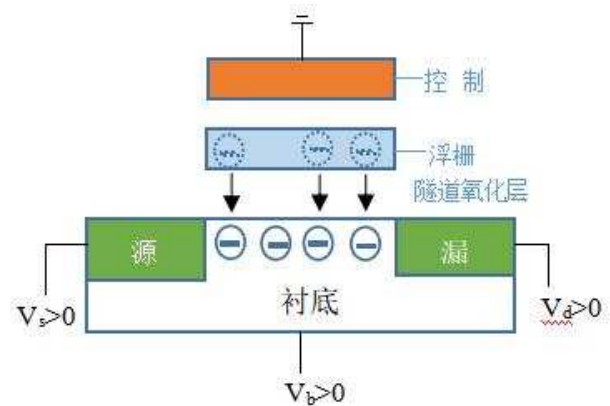


图 4 Flash EEPROM 写入过程示意

三、α 粒子辐射引发的单粒子效应

半导体器件的各种制造和封装材料中存在痕量的铀、钍等杂质，这些杂质具有天然放射性，其释放的 α 粒子具有较强的电离能力。另外在地球辐射带中存在有大量的带电粒子，主要是地球磁场捕获的质子、α 粒子、电子和少量其它元素的核离子。高能辐射粒子入射到微电子器件中，与器件材料(硅，二氧化硅等)中的原子核及核外电子发生相互作用损失的能量产生电子空穴对，引发辐射效应。

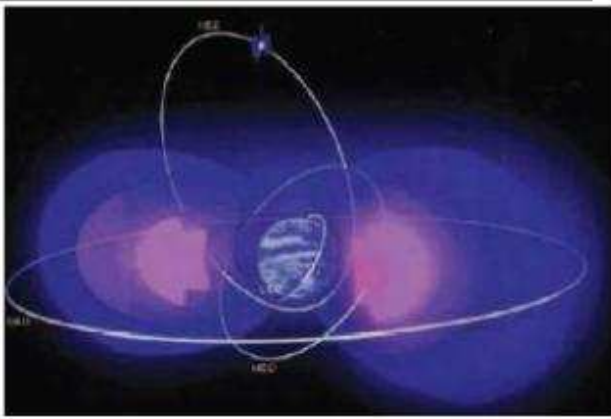


图 5 地球辐射带

Flash EEPROM 存储技术虽然已经进入了成熟阶段,但是低功耗、高集成度、高编程效率仍然是其不断发展的方向,因此编程电压趋于降低,信号电荷和氧化层介质厚度不断减小,功耗、尺寸减小的同时存储效率得到了提升。然而这样的变化也导致存储单元更易受到单粒子效应的影响。单粒子效应是辐射粒子在器件灵敏体积内电离产生的电子空穴对引起的。根据其导致结果的不同单粒子效应可以分为两类:软错误和硬错误。

当单粒子轰击存储单元的敏感节点时会引起衬底处硅的离子化,电路会因此收集额外电荷,若此电荷达到一定数量,电路将发生翻转,造成程序错误,这类错误即为软错误。软错误对器件电路产生的影响是暂时的、非破坏性的,并且这些影响可以通过对器件逻辑单元重新编程进行恢复。硬错误,是指当单粒子轰击敏感节点,单粒子效应发生后器件的电流持续增大,导致氧化层击穿或者器件烧毁。硬错误是破坏性的,如果发生则有可能引起器件损坏。

四、 α 粒子效应引发的 EEC 内部故障

GE90 与 GENx 目前采用了新一代的 FADEC 3 型 EEC,该型 EEC 使用了性能更高的集成芯片,但是正如前面所述,其新一代的 flash 存储器元件也对 α 粒子效应更敏感。比如 GE90 发动机因为 α 粒子翻转导致控制逻辑错误,在启动阶段不断地重置启动活门控制通道,造成启动失败。类似的 GENx 发动机因为 α 粒子翻转可能造成单通道的推力控制错误,也是体现在不断地向另外一侧通道切换。例如,曾有一台 GENx-1B 发动机,在启动前 EEC 需要自动执行 TCMA (Thrust Control Malfunction Accommodation) 测试,该测试无论主通道是 A 还是 B,启动前均需要主、次通道依次执行一遍,但由于 EEC 内部 EOS (Engine Over Speed) 模块的 flash 存储器产生了 α 粒

子翻转,导致某一通道不断切换到对侧,TCMA 测试无法完成,产生了 ENG OVSPD PROT SYS R (75-13682, 75-23682) 和 FDE ENG FUEL VALVE R (73-32082) 信息,飞机不放行,根据 FIM 手册需要更换 FMU 和 EEC。



图 6 TCMA 测试失败故障界面

五、结束语

α 粒子翻转本质上来说由于元器件引起的 EEC 软件程序错误,根据单粒子效应的原理可知,对于 α 粒子翻转引起的软错误,我们可以通过重装 EEC 软件来恢复其功能,因此如上故障案例可以通过重新安装 EEC 软件得到解决。当然,如果 EEC 内部存储器遭受了单粒子效应而没有及时得到保护,则可能导致硬错误,对元器件造成不可恢复的损伤,此时则必须更换 EEC 送修。

参考文献:

- [1] 张月.EEPROM 中栅氧化层的可靠性研究[D].西安:西安电子科技大学,2009.
- [2] 习凯.微电子器件质子单粒子效应敏感性预估研究[D].兰州:中国科学院近代物理研究所,2016.
- [3] 习凯.微电子器件质子单粒子效应敏感性预估研究[D].兰州:中国科学院近代物理研究所,2016.
- [4] 赵乐. α 粒子注入对 SRAM 存储单元的影响研究[J].微电子学,2011,第 45 卷第 1 期:72-74
- [5] 赵扬.基于栅氧化层损伤 EEPROM 的失效分析[J].可靠性,2020,第 41 卷第 3 期:451-455

作者简介 樊俊峰(1989—),男,中国南方航空股份有限公司技术分公司,发动机工程师。