

CNIC-01644
CAEP-0106

集成电路抗辐射筛选技术研究
A STUDY OF RADIATION HARDNESS
SCREENING TECHNIQUES OF
INTEGRATED CIRCUITS
(In Chinese)

中国核情报中心
China Nuclear Information Centre

CNIC-01644
CAEP-0106

集成电路抗辐射筛选技术研究

王旭利

(中国工程物理研究院电子工程研究所, 绵阳, 621900)

摘 要

讨论了用辐射 - 退火法和多元回归分析法对集成电路进行筛选的基本原理和步骤。对两者的关键技术和优缺点进行了比较, 并针对国内外集成电路抗辐射加固筛选技术的现状给出了一些建议。

关键词: 集成电路 筛选 辐射 - 退火 回归分析

**A Study of Radiation Hardness
Screening Techniques of Integrated Circuits**
(In Chinese)

WANG Xuli

(Institute Electronics Engineering, CAEP, Mianyang, 621900)

ABSTRACT

The principle and operational procedure of Integrated Circuits (ICs) screening with irradiation-and-anneal and multicomponent regression analysis are discussed. The key technology, advantages and shortcomings of the two methods are described in contrast, and some advices are given with the state-of-the-art of the screening technology.

Key words: Integrated circuits, Screening, Irradiation-and-Anneal, Regression analysis

引言

集成电路的抗辐射能力在电子系统抗辐射加固中占有重要地位。对将要用在辐射环境中的集成电路进行无损筛选，即从器件辐照前的电性能和工艺及微观物理参数推测其在辐照环境中的性能，是确保和提高电子系统抗辐射能力的有效方法。

在国外，抗辐射筛选方法也叫加固保证方法，这种技术所要解决的问题是：对将用在辐射环境中的半导体器件进行适当的处理和测试，从器件辐照前的电路性能推断其在辐照环境中的性能，进而筛选出抗辐射性能较好的器件^[1]。

一般半导体器件的筛选方法主要有：电参数测量法、辐射 - 退火法以及多元回归分析法^[2]。但由于集成电路的电参数与中子辐照注量 Φ 和 γ 总剂量的关系非常复杂，不能直接只利用电参数测量法进行筛选。目前采用较多也比较成熟的抗辐射筛选方法有两种：第一种是多元回归分析法，借助于统计方法，通过在辐照试验前后对事先选定的、能代表器件的辐照性能的电参数进行筛选，偏重于分析、计算。第二种是辐射 - 退火筛选方法，偏重于试验测量。

1 筛选方法

下面对现有的适用于集成电路的主要筛选方法做简单综述。

1.1 辐射 - 退火筛选法

这是一种最直接的可筛选出具有符合抗辐射能力要求的器件的方法，该方法以试验测量为主。筛选时选择一种或几种灵敏参数，测量其电参数值，然后，通过辐照至规定的中子注量或 γ 剂量，器件的参数将退化至一定值。经过电参数测量，剔除不符合抗辐射要求的器件，将符合要求的器件进行高温退火，以恢复其电参数性能，以便备用。一般说来，如果退火温度及退火时间控制得当，器件的电性能可以恢复得很好，而再次辐射 - 退火也可以得到很好的重复性。

辐射 - 退火方法的关键是电参数的选择和最佳退火条件的控制。对于特定的集成电路筛选过程，有以下几个步骤：

(1) 选择最佳的辐照源。不同应用条件下，用来筛选集成电路的辐照源不同。对于卫星和其它航天器上使用的集成电路，应该用 γ 射线辐照筛选源（即 γ 总剂量筛选）。

(2) 选择最佳辐照筛选条件。不同类型和不同抗辐射能力的集成电路，其最佳辐照筛选条件（中子注量）也不同。抗辐射能力差的器件，用以筛选的中子注量应该低一些，而抗辐射能力强的器件，其筛选注量要相应的提高。

(3) 选择最佳退火条件。不同注量的中子辐照后，最佳退火条件不一样。辐照注量越高（位移损伤越严重），要使器件恢复到辐照前的功能，所需的退火温度越高，时间更长。其实，低温长时间和高温短时间退火都能使器件的退化特性得到满意的恢复。但比较而言，高温短时间退火效果更好一些，而且退火时间短，可以缩短实验周期。

(4) 实验数据分析。分析辐照对集成电路的加固作用，分析辐照 - 退火对产品可靠性的影响，分析辐照 - 退火对集成电路电性能的影响等。

图 1 是集成电路辐射 - 退火筛选法的程序框图。

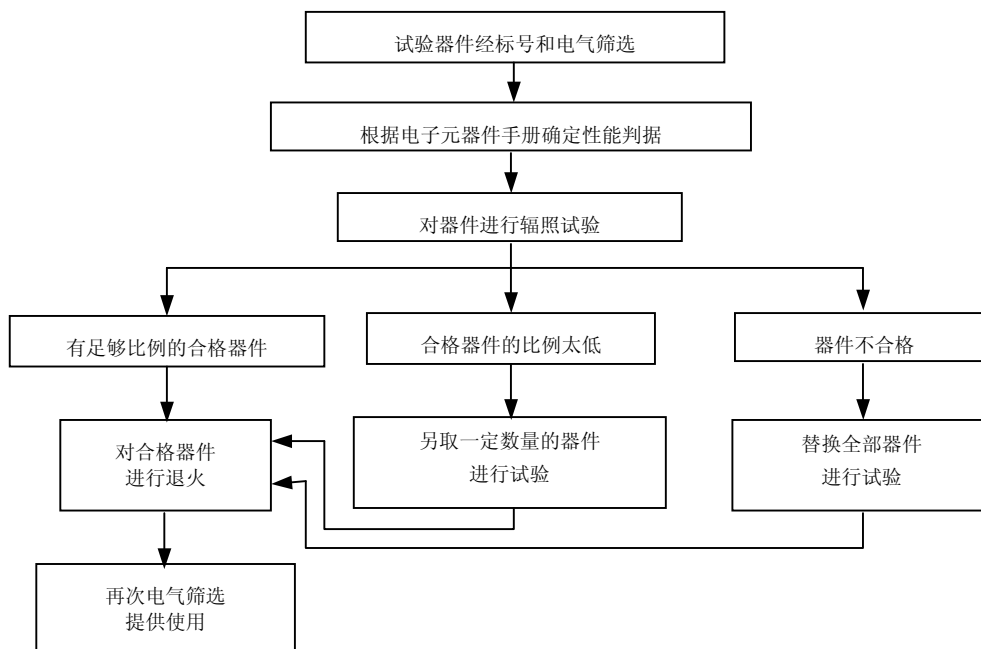


图1 集成电路辐射-退火筛选法程序框图

1.2 多元回归分析法

由于大量同一工艺制造出来的器件的参数服从一定的统计分布，基于数理统计基础的多元回归分析法，可以很好地揭示辐照试验与器件所采用的制造工艺及其参数间的关系，也可以考查器件的某些参数如何随辐射条件和其它有关电参数等的变化规律。该方法具有很强的应用价值。

这种筛选方法不要求从工艺上采取加固措施，关键是要有大量同一工艺制造出来的器件，通过从中随机选取一定数量的样品进行辐照试验，进而找出信息参数与辐射性能参数之间的函数关系，并利用此函数关系由器件辐照前的信息参数推测出器件在辐射环境中的性能，进而可以实现对未辐照器件的筛选。该方法的主要步骤^[3]如下：

(1) 选定半导体集成电路，根据经验和理论知识对集成电路的辐射响应进行深入的物理分析，挑选出所关心的辐射响应参数，即初步确定下来的辐射性能参数和多个待选信息参数。

(2) 从同一批集成电路中随机抽取 20~30 个样品，精确测量出样品的信息参数，并记录测试条件。

(3) 对随机抽取的样品进行辐照试验，并精确测量辐射性能参数。

(4) 借助数学工具对实验数据预处理，检验数据是否服从正态分布并剔除异常数据。

(5) 计算参数的信息量系数，确定筛选使用的信息参数。

(6) 建立信息参数与辐射性能参数间的筛选回归预测方程。

(7) 用筛选回归方程对同批其他集成电路进行筛选，预测单个集成电路的辐射性能。

关于多元回归分析法的数学模型如下：

以一批器件作为“抽样母体”，从中按照简单随机抽样原则抽取“随机子样”，此时子样的个体与母体具有相同的分布。对于离散型母体，进行“有放回”的抽样，可以保证每次抽样相互独立。对子样进行回归分析，从子样得到的概率结论可以推广到母体。

对于正态分布的子样，可使用多元回归分析模型建立起各变量之间的统计关系，由几个变量来预测另一个正态变量。即由多个变量的取值去估计另一个与之相关的随机变量的取值。多元回归分析的模型如下：

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \cdots + \beta_m x_{im} + \varepsilon_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中： y_i ——第 i 次试验中独立的正态变量观察值的取值；

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ ——参数；

$x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}$ ——已知常数，为第 i 次试验中自变量的取值；

ε_i ——随机误差项，服从正态分布 $N(0, \sigma^2)$ 。诸 ε_i 相互独立，其方差 $D(\varepsilon_i) = \sigma^2$ ，对于 $i \neq j$ 有协方差 $\text{COV}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$ 。

根据以上线性回归模型，就可以用已知的 n 组数据 $(y_i, x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})_{i=1,2,\dots,n}$ 来估计模型参数 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ 。由数理统计理论可知，当样本数 n 足够大时，多采用最小二乘法估计参数，所得到的估计值 $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_m$ 能保证模型的残差平方和 $S = \sum_{i=1}^n \hat{\varepsilon}_i^2$ 为最小，同时也能保证 $\hat{\varepsilon}_i$ 最接近于 $N(0, \sigma^2)$ 分布。

此线性回归模型的矩阵形式^[4]为：

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (2)$$

其中：

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_m \end{bmatrix}, \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

由此可得，该模型参数的最小二乘估计为：

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (3)$$

假设 \hat{Y} 是对 Y 的估计，残差 $\varepsilon_i = Y_i - \hat{Y}_i$ 。则估计值和残差方程分别为：

$$\hat{Y} = X\hat{\beta} \quad (4)$$

$$\varepsilon = Y - \hat{Y} = Y - X\hat{\beta} \quad (5)$$

方差平方和为：

$$\text{SSE} = \varepsilon^T \varepsilon \quad (6)$$

残差均方 MSE 为:

$$\text{MSE} = \frac{\text{SSE}}{n - m - 1} \quad (7)$$

由线性回归分析理论, 可以根据以下的 t 分布确定某一个回归参数 β_k 的置信区间,

$$\frac{\hat{\beta}_k - \beta_k}{\text{SE}(\hat{\beta}_k)} \sim t(n - m - 1) \quad k = 0, 1, \dots, m \quad (8)$$

其中 $\text{SE}(\hat{\beta}_k)$ 是 $\sigma(\beta_k)$ 的无偏估计,

$$\text{SE}(\hat{\beta}_k) = \sqrt{\text{MSE} [X^T X]_{kk}^{-1}} \quad (9)$$

$t(n-m-1)$ 是自由度为 $(n-m-1)$ 的 t 分布。

回归参数 β_k 的 $100(1-\alpha)\%$ 置信区间由下式确定:

$$\hat{\beta}_k - t(\alpha/2; n - m - 1)\text{SE}(\hat{\beta}_k) \leq \beta_k \leq \hat{\beta}_k + t(\alpha/2; n - m - 1)\text{SE}(\hat{\beta}_k) \quad (10)$$

假设在 $100(1-\alpha)\%$ 置信度下, 给定一组 $X_h = [1, x_{h1}, x_{h2}, \dots, x_{hm}]^T$ 具体值, 则对应因变量新值 $Y_{h\text{new}}$ 的预测区间是:

$$\left[\hat{Y} - t(\alpha/2; n - m - 1)\text{SE}(Y_{h\text{new}}), \hat{Y} + t(\alpha/2; n - m - 1)\text{SE}(Y_{h\text{new}}) \right] \quad (11)$$

其中:

$$[\text{SE}(Y_{h\text{new}})]^2 = \text{MSE} + [\text{SE}(\hat{Y}_h)]^2 = \text{MSE} [1 + X_h^T (X^T X)^{-1} X_h] \quad (12)$$

在文献[1]和[3]中, 对多元线性回归分析法的基本原理和数学基础做了比较详尽的论述, 特别是对信息参数选取、参数测量和分析计算等筛选技术的难点做了研究, 并且给出了筛选的具体步骤和实例。

2 国外所使用的抗辐射筛选方法及其比较

目前在国外, 美国比较擅长于使用的方法是偏重于实验测量的辐射 - 退火法, 而前苏联常采用侧重于利用数学工具进行分析计算的多元线性回归分析法。这两种方法各有利弊, 下面对比分析如下:

2.1 辐射 - 退火法

(1) 关键技术及技术难点: 选择合适的测量参数、合适的预辐照剂量及最佳的退火温度和时间;

(2) 优点: 成本低, 可在芯片阶段进行, 操作简单, 不需要特殊的试验装置, 对不同批次的器件百分之百的有效, 实用性强, 适用于多种工艺的多种器件;

(3) 缺点: 由于需要进行多次辐照试验和不同条件下的反复退火研究以及可靠性试验, 故而研究所需的时间周期较长; 最后筛选出的器件全部是经过辐照的, 属“有损”筛选。

2.2 多元回归分析法

(1) 关键技术及技术难点：选择合适而有效的辐射性能参数和信息参数、测量和分析工作；

(2) 优点：使用范围广，适用于各种工艺的各种器件；由于只需进行一次辐照试验，其主要工作量都集中于利用数学工具进行分析计算上，故而研究所需时间周期可以视分析计算的复杂程度来控制其长短，方法本身具有较强的可操作性，适用于各种电路的抗辐射加固设计；此方法筛选出的器件全部是未经过辐照的，属器件的“无损”筛选，有利于提高和确保器件的抗辐射能力；

(3) 缺点：由于使用数学工具来分析预测，故而方法对研究者的数学分析能力要求较高，不及辐射 - 退火法简单易行，方便实施；采用数学工具对集成电路的信息参数和辐射性能参数进行回归分析，进而对集成电路在辐射环境中的辐射性能进行预测，计算工作量比较大。

3 结论及建议

作为在国内外广泛采用的半导体集成电路筛选方法，辐射 - 退火法和多元回归分析法都是经过证明的可靠而有效的筛选方法。随着集成电路在新一代武器、卫星系统上的广泛应用，对半导体集成电路进行抗辐射筛选的有效方法也将得到进一步的完善和改进。

同时注意到，由不同的厂家生产出来的半导体集成电路，即使工艺相同其抗辐射性能也存在着较大的差异，是否考虑对不同厂家生产的同一工艺的器件进行筛选进而选取抗辐射性能明显优于其他厂家的器件进行使用，也可以作为筛选方法的一种形式。

参 考 文 献

- 1 茹科夫. [俄罗斯] 电子器件辐射性能预估和筛选方法报告, 1996 年 4 月
(Y. U. Zukov. [Russia] Electron Device Performance under Radiation Prediction and Screening Techniques Report, 1966. 4)
- 2 赖祖武, 等. 抗辐射电子学——辐射效应及加固原理. 国防工业出版社, 1998 年 7 月
(LAI Zuwu, et al. Radiation Hardening Electronics: Radiation Effects and Hardening Techniques. Defence Industry Publishing House, 1998. 7)
- 3 徐曦. 半导体器件无损筛选研究. 第六届全国抗辐射电子学与电磁脉冲学术交流会论文集, 1999 年
(XU Xi. Study on Nondestructive Screening of Semiconductor. In: The 6th Symposiums on Radiation Hardening Electronics and Electromagnetism Pulse. 1999)
- 4 杨叔子, 吴雅, 等. 时间序列分析的工程应用. 华中理工出版社, 1996 年 5 月
(YANG Shuzi, WU Ya, et al. Time Series Analysis in Engineering Application. Huazhong University of Technology Publishing House, 1996. 5)