

文章编号: 0253-2239(2010)s100301

一种基于电子散斑技术的半导体器件寿命预测方法

袁纵横 宋美杰 熊显名

(桂林电子科技大学电子工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要 通过对微电子器件可靠性检测现状和电子散斑技术(ESPI)的研究,提出根据半导体器件离面位移变化情况预测其寿命。建立了一套电子散斑测量系统,温控系统为试件提供加速温度应力并控温,同时测量试件封装离面位移的变化规律,根据离面位移数据提取失效激活能,并结合寿命预测模型外推不同温度环境下的工作寿命。对样品 S8550 进行了 100 °C~190 °C 的序进应力加速实验,得到了各温度点的离面位移数据,并根据离面位移的变化规律快速地提取出了失效激活能,推算了工作环境温度为 50 °C 和 100 °C 时该试件的可靠寿命。实验数据与相关资料吻合,验证了该方法的可行性。

关键词 激光技术;可靠性寿命;电子散斑;离面位移

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100301

A Method for Evaluating Life Time of Semiconductor Device Based on Electronic Speckle Pattern Interference

Yuan Zongheng Song Meijie Xiong Xianming

(School of Electronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004 china)

Abstract Based on the research of the actuality with microelectronic device reliability testing and electronic speckle pattern interferometer (ESPI), a method that predicts the specimen life time according to the change of out-of-plane displacement of packing is presented. In the method, temperature control system is used to provide the condition of accelerated temperature stress, and the working lifetime of specimen at normal temperature is estimated by the activation energy of specimen extracted according to out-of-plane displacement law. When the specimens S8550 are given the temperature range from 100 °C to 190 °C, the speckle interference stripes are collected at every temperature points. Then the activation energy of specimen is extracted rapidly, and the working lifetime of the specimen at temperature of 50 °C and 100 °C is obtained. The experimental results agree with the data in references well, which demonstrates the feasibility of the proposed method.

Key words laser technique; reliability life time; electronic speckle pattern interference; out-of-plane displacement

OCIS codes 120.4290; 070.6020; 040.1880; 030.6140

1 引 言

随着微电子器件寿命和热可靠性的不断提高,可靠性检测的难度也不断加大,因此找出能够快速评价其可靠寿命的方法,是微电子业急需解决的问题^[1]。目前普遍采用加速寿命实验方法预估微电子器件的可靠寿命,不同国家分别制定了不同的实验标准,但这些方法普遍存在实验时间长,所需实验样品数多、成本高的缺点^[2]。近年来国内外一些学者

利用光学测量技术无损、精度高的优点,从热应力变形角度对半导体器件的可靠性进行了初步研究^[3,4]。但这些研究大都停留在对封装的热变形和热应力分析上,没有对其可靠性寿命进行深入研究,缺乏一个集检测及可靠性寿命预测于一体的完善系统。本文搭建了一套基于电子散斑(ESPI)技术的测量系统,通过测量试件封装离面位移的变化规律来预测器件寿命,得到了较完整的可靠寿命数据。

收稿日期: 2010-06-08; 收到修改稿日期: 2010-07-09

基金项目: 广西科学技术厅基金(桂科基 0731017)资助课题。

作者简介: 袁纵横(1957—),男,博士,教授,主要从事光电测量、光纤传感和光通信等方面的研究。

E-mail: yuanzongheng@sina.com

为解决了以上问题提供了新方法。

2 理论模型

根据反应论微电子器件的失效和退化,从微观上来看都是其内部经历着物理和化学反应,反应速率 k 与温度的关系可用 Arrhenius 模型来描述^[5,6]。考虑电流和电压等电应力时,反应的速率与所处的温度之间遵循如下关系

$$\frac{dM}{dt} = A j^n V^m \exp\left(\frac{-Q}{kT}\right), \quad (1)$$

式中 M 为失效敏感参数, t 为反应时间, $\frac{dM}{dt}$ 为失效参数的退化速率, A 为常数, Q 为失效激活能, k 为波尔兹曼常数, T 为实验温度, j 为电流密度, n 为电流密度幂指数因子, V 为电压, m 为电压幂指数因子。

当给试件提供温升速率为 β 的序进温度应力,在经历时间 t 后,试件的结温 T 为

$$T = T_0 + \beta t + \Delta T, \quad (2)$$

式中 T_0 为实验的起始温度, ΔT 是试件的结壳温差,对上式求导代入(1)式后积分得:

$$\frac{\Delta M}{M_0} = \frac{A' j^n V^m}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) dT, \quad (3)$$

式中 $A' = A/M_0$, 化简整理得:

$$\ln\left(\frac{\Delta M}{T^2 M_0}\right) = \left(-\frac{Q}{K}\right) \frac{1}{T} + \ln\left(\frac{A' k j^n V^m}{\beta Q}\right). \quad (4)$$

在失效机理保持一致的前提下, Q 值为恒定的常数,当电压和电流保持恒定, $\ln\left(\frac{A' k j^n V^m}{\beta Q}\right)$ 为常数。对温度负倒数 $(-1/T)$ 和测得的失效敏感参数的对数 $\ln\left(\frac{\Delta M}{T^2 M_0}\right)$ 进行拟合,即可提取出失效激活能。当激活能提取出后建立寿命预测模型预测试件寿命。

根据 Nelson 提出的累积失效模型^[7]: 器件的剩余寿命只与器件当时的损伤情况和将要对其施加的应力条件有关,而与其损伤是如何积累的无关。根据此原理,半导体器件在加速条件和正常工作条件下,造成器件的损伤累积量相等时,所不同的仅仅是加速系数不同,即参数的退化速率不同。因此以下关系成立。

设 ΔM 为器件在温度 $T_1 \sim T_2$ 间达到的累积失效量,参数变化前初始值为 M_0 。根据(1)式有

$$\frac{\Delta M}{M_0} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{A'}{\beta} j^n V^m \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) dT, \quad (5)$$

设 ΔM_i 为器件工作在温度 T_i 下的累积失效量,

$$\frac{\Delta M_i}{M_0} = \int_{t_1}^{t_2} A' j^n V^m \exp\left(\frac{-Q}{kT_i}\right) dt, \quad (6)$$

不论在何种加速应力条件下,器件的失效判据是相同的,器件失效前积累的失效能量相同,因此有

$$\frac{\Delta M}{M_0} = \frac{\Delta M_i}{M_0}, \quad (7)$$

式中 τ 为器件工作在温度为 T_i 条件下的寿命

$$\tau = \frac{\int_{T_1}^{T_2} \exp\left(\frac{-Q}{kT}\right) dT}{\beta \exp\left(\frac{-Q}{kT_i}\right)}. \quad (8)$$

3 ESPI 测量系统设计

建立以 ESPI 技术为核心的可靠性测试系统,其系统框架图如图 1 所示。

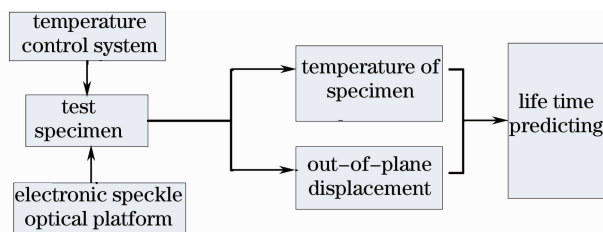


图 1 测试系统框图

Fig. 1 Test system block diagram

测试系统实现功能的流程为:温控系统为试件提供加速温度应力条件并测温。ESPI 光学平台测量试件的表面温度分布以及封装的离面位移,根据离面位移随试件温度的变化规律,建立寿命预测模型外推常温工作寿命。

4 实验结果与分析

实验对半导体器件 S8550 在序进温度应力条件下的离面位移进行测量,温升速率为 16 K/h,实验中给器件加恒定的电流电压: $V_{CE} = 15$ V, $I_C = 41.6$ mA,使其工作在额定功率下。电子散斑光路搭建并调试完毕后,打开 ESPI 软件进行干涉条纹的采集。每只试件离面位移值分三个温度段进行采集,采集不同温度下的条纹样图如图 2 所示。

观察 ESPI 系统采集到的散斑条纹图像发现,干涉条纹从试件热源中心点向外扩散,随着试件温度的升高及时间的增加,散斑干涉条纹逐渐增多,同时条纹变细并越来越密集。图像如图 2 所示,所采集的条纹级数代表了每个时刻相对软件开启时的离

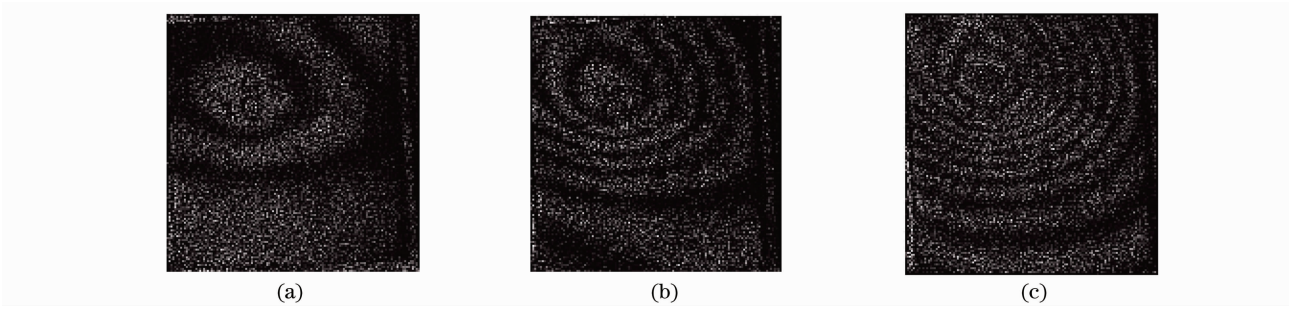


图 2 不同温度下的散斑条纹图样。(a) 106 °C, (b) 119 °C, (c) 160 °C

Fig.2 Speckle interference stripes at different temperatures. (a) 106 °C, (b) 119 °C, (c) 160 °C

面位移变化量。根据采集到的条纹级数可得出每个温度点的离面位移量。根据理论所述以试件的离面位移为失效敏感参数， $\ln\left(\frac{\Delta S}{T^2}S_0\right)$ 和 $\frac{-1}{T}$ 成线性关系，用 Matlab 软件对每个温度段的数据进行拟合，

得出直线的斜率为 $S = \frac{Q}{k}$ ，为波尔兹曼常数，因此根据拟合的直线即可提取出不同温度阶段的失效激活 Q 。其中一只试件不同温度段的离面位移变化规律和激活能提取曲线如图 3~图 5 所示。

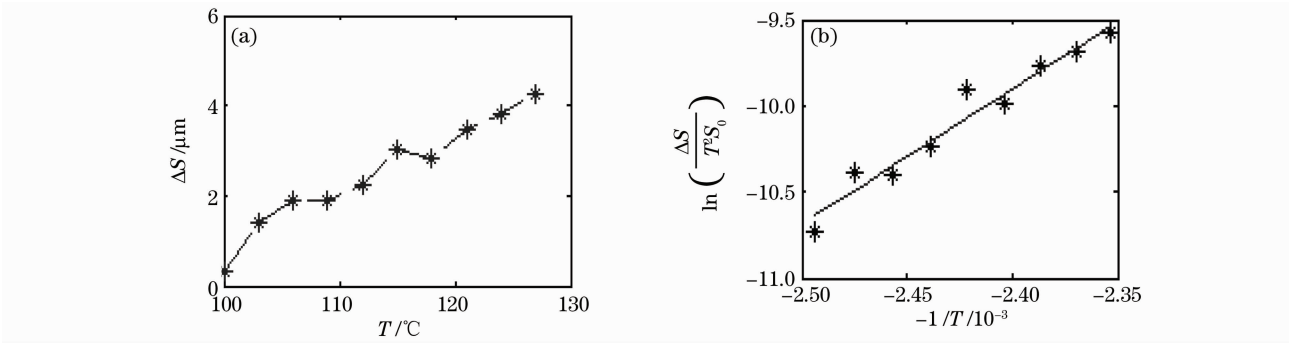


图 3 100 °C ~130 °C 离面位移变化规律及失效激活能提取。(a) 离面位移随温度变化, (b) $\ln\left(\frac{\Delta S}{T^2}S_0\right)$ 和 $\frac{-1}{T}$ 关系

Fig.3 Out-of-plane displacement variation with temperature between 100 °C ~130 °C and activation energy.

(a) out-of-plane displacement variation with temperature , (b) relationship between $\ln\left(\frac{\Delta S}{T^2}S_0\right)$ and $\frac{-1}{T}$

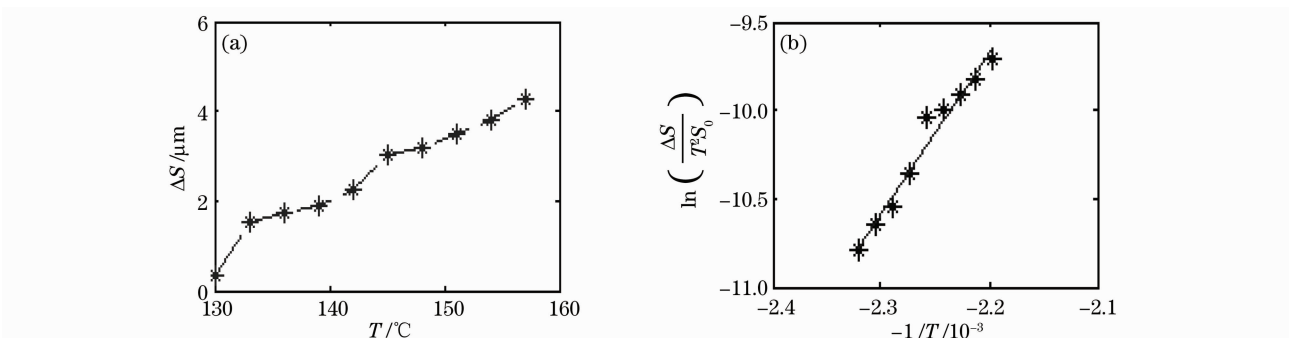


图 4 130 °C ~160 °C 离面位移变化规律及失效激活能提取。(a) 离面位移随温度变化, (b) $\ln\left(\frac{\Delta S}{T^2}S_0\right)$ 和 $\frac{-1}{T}$ 关系

Fig.4 Out-of-plane displacement variation with temperature between 130 °C ~160 °C and activation energy.

(a) out-of-plane displacement variation with temperature , (b) relationship between $\ln\left(\frac{\Delta S}{T^2}S_0\right)$ and $\frac{-1}{T}$

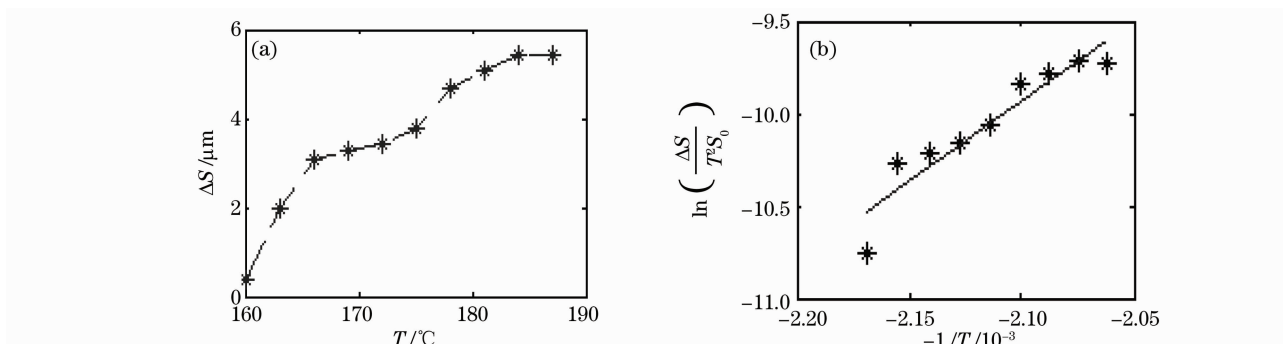


图 5 160 °C ~ 190 °C 离面位移变化规律及失效激活能提取。(a) 离面位移随温度变化, (b) $\ln\left(\frac{\Delta S}{T^2 S_0}\right)$ 和 $\frac{-1}{T}$ 关系

Fig. 5 Out-of-plane displacement variation with temperature between 160 °C ~ 190 °C and activation energy.

(a) out-of-plane displacement variation with temperature, (b) relationship between $\ln\left(\frac{\Delta S}{T^2 S_0}\right)$ and $\frac{-1}{T}$

采集各温度点的离面位移数据拟合曲线发现, 虽然离面位移随温度的升高逐渐增加, 但其并不遵循线性规律。根据各个温度段离面位移可提取出不同温度段的激活能, 将各个温度段的失效激活能带

入寿命预测模型即可预测出试件 S8550 不同温度条件下的工作寿命, 如工作在温度 50 °C 和 100 °C 寿命数据如表 1 所示。

表 1 样品的激活能及寿命

Table 1 Specimen's invalidation activation energy and predicted life time

Accelerated temperature stress	Temperature during 100 °C ~ 130 °C	Temperature during 130 °C ~ 160 °C	Temperature during 160 °C ~ 190 °C
Activation energy /eV	0.7754	0.7874	0.7483
Average activation energy /eV	0.7704		
The life time of temperature at 50 °C/h	8.3837×10^6	The life time of temperature at 100 °C/h	747.536

由以上结果分析, 根据离面位移变化规律得出的激活能数据与莫郁薇给出的此种试件失效激活能为 0.6~0.9 eV 吻合^[8], 预测其寿命值与郭春生, 李志国等^[6]使用电学方法预测结果一致, 证明了该方法的正确性。

5 结 论

本文基于激光电子散斑的优点设计了一个完整的测评系统, 通过半导体器件的外在表现形式评价其可靠性。通过实验得出了试件离面位移在加速温度应力条件下的变化规律, 并根据离面位移变化规律提取出了失效激活能, 得出了比较完整的可靠寿命数据。该方法针对微电子器件因封装材料、工艺以及功能的复杂化导致的难以快速、准确评估其可靠性问题。提供了一种准确、快速的评价微电子器件可靠性的新思路, 该研究成果对电子产业, 特别是

IC 行业的产品质量控制有着重要参考作用。

参 考 文 献

- Li Zhiguo, Song Zengchao, Sun Dapeng *et al.*. GaAs MESFET'S reliability and new method of rapid evaluation. [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2003, **24**(8): 856~860
李志国, 宋增超, 孙大鹏 等. GaAs MTSFET 可靠性及快速评价新方法的研究[J]. *半导体学报*, 2003, **24**(8): 856~860
- Zhang Chunhua, Wen Xisen *et al.*. Accelerated life testing techniques [J]. *Acta Armamentarii*, 2004, **25**(4): 485~489
张春华, 温熙森 等. 加速寿命实验技术综述[J]. *兵工学报*, 2004, **25**(4): 485~489
- Li Haiyuan, Li Baoming. Test of thermal deformation for electronic devices of high thermal reliability [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, **22**(3): 381~383
李海元, 栗保明. 用激光测量高热可靠性电子器件的热变形[J]. *光谱学与光谱分析*, 2002, **22**(3): 381~383
- Wang Weining, Geng Zhaoxin, Yue Weiwei *et al.*. Study of real-time interferometry of PCB thermal distortion [J]. *Electronics and Packaging*, 2004, **4**(6): 44~48
王卫宁, 耿照新, 岳伟伟 等. PCB 热变形的实时干涉测量研究[J]. *电子与封装*, 2004, **4**(6): 44~48
- A. Mettas, P. Vassiliou. Modeling and analysis of time-

- dependent stress accelerated life data [C]. Seattle: Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2002. 343~348
- 6 Guo Chunsheng, Li Zhiguo *et al.*. A novel method to determine the failure rate using process-stress accelerated test [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2007, **28**(z1): 448~449
郭春生, 李志国 等. 基于序进应力加速实验评价失效率的新方法[J]. *半导体学报*, 2007, **28**(z1): 448~449
- 7 Mao Shisong, Wang Lingling. Accelerated Life Testing [M]. Beijing: Science Press, 2000. 1~40
卯诗松, 王玲玲. 加速寿命实验[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 1~40
- 8 Mo Yuwei. Effect of thermal stress on the semiconductor discrete device failure rate [J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Laboratory*, 1996, **5**: 25~28
莫郁薇. 热应力对半导体分立器件失效率的影响[J]. *电子产品可靠性与环境实验*, 1996, **5**: 25~28