

수율과 신뢰도의 상충효과를 고려한 번인

김경미^{*}

건국대학교 산업공학과

Burn-in Considering a Trade-Off of Yield and Reliability

Kyungmee O. Kim

Department of Industrial Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701

Burn-in is an engineering method for screening out products containing reliability defects which would cause early failures in field operation. Previously, various burn-in models have been proposed mainly focused on the trade-off of shop repair cost and warranty cost ignoring manufacturing yield. From the view point of a manufacturer, however, burn-in decreases warranty cost at the expense of yield reduction. In this paper, we provide a general model quantifying a trade-off between product yield and reliability, in which any defect distribution from previous yield models can be used. A profit function is expressed in burn-in environments for determining an optimal burn-in time. Finally, the method is illustrated with gate oxide failures which is an important reliability concerns for VLSI CMOS circuits.

Keyword: gate oxide, extrinsic reliability, yield loss, reliability gain

1. 서론

반도체 제조공정에서 수율(yield)이란 하나의 웨이퍼에서 생산되는 모든 칩 가운데 작동하는 칩의 비율을 말한다. 수율은 업체의 수익성을 측정하는 가장 중요한 측도가 되기 때문에 생산현장에서는 수율을 향상시키기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 제조공정상에서 검사를 하여 생산 수율을 직접 관측할 수 있지만 새로운 제품을 설계하거나 기존 제품의 설계를 변경하고자 하는 경우 수율을 예측하기 위해 수율모형(yield model)이 필요하다. 수율모형은 웨이퍼내의 평균 수율 결점(mean yield defect)과 결점의 모여 있는 정도(clustering effect)를 고려하여 수율을 예측하기 위한 것으로 1960년대 이후로 포아송 모형과 부 이항 모형을 포함하는 다양한 수율모형이 꾸준히 개발되어 오고 있다.

제조공정상에서 발생하는 모든 결점이 수율 결점(yield de-

fect)이 되는 것은 아니며 칩의 종류에 따라 결점의 위치나 크기가 즉각적인 고장을 일으키게 되는 경우만 수율 결점 또는 치명적 결점(fatal defect)이 된다. 제품의 즉각적인 고장을 일으키지 않는 작은 결점의 경우 제품 내에 존재하여 소비자에게 양도되었다가 사용 환경이나 시간에 따라 결점의 크기가 증가하면서 궁극적으로는 제품의 고장을 일으키게 된다. 이러한 결점을 신뢰도 결점(reliability defect) 또는 비치명적 결점(nonfatal defect)라고 한다(Kim *et al.*, 2004).

제조공정상의 여러 가지 변동으로 인해 반도체 제품의 모집단내에는 신뢰도 결점을 가지는 제품이 포함되어 있게 마련인데 신뢰도 결점이 소비자에게 전달되는 것을 예방하기 위하여 생산 공정상에서 검사를 통하여 제거하게 된다. 이러한 검사는 단순한 외형 검사나 한시적인 성능 시험만으로 확인할 수 없고 번인(burn-in)을 사용하게 된다. 번인은 제품을 정상 또는 가속상태에서 일정 시간동안 사용하여 고장이 난 제품은 수리

본 연구는 한국과학재단의 연구비지원(특정기초연구, 과제번호 R01-2006-000-10744-0)으로 수행되었으며 연구비를 지원해주신 한국과학재단에 감사드립니다.

*연락처 : 김경미 교수, 143-701 서울시 광진구 화양동 1번지 건국대학교 산업공학과, Fax : 02-450-3525,

E-mail : kyungmee@konkuk.ac.kr

2006년 11월 접수, 1회 수정 후 2007년 01월 게재확정.

또는 폐기 처리하고 생존한 제품만 소비자에게 양도하는 기법이다. 번인의 가속 조건은 각 제품의 특성에 맞게 선택되어야 하며 이로 인해 정상인 제품이 손상되지 않도록 계획되어야 한다. 번인에서 중요한 의사결정의 문제는 최적번인시간을 얼마로 하느냐의 문제이다. 최적번인시간은 번인의 목적에 따라 생존한 제품의 평균 잔여 수명(mean residual life)이나 생존확률(survival probability)을 최대화하거나 또는 번인시험에 드는 비용, 번인 시 고장 및 수리에 의한 비용, 품질 보증 비용 등을 고려한 총 비용을 최소화하여 결정하고 있다.

본 논문에서는 번인에 의한 제품의 수율 손실(yield loss)과 신뢰도 증가(reliability gain)을 양적으로 평가하고 수율과 신뢰도를 동시에 고려하여 최적번인시간을 결정하고자 한다. 기존의 최적 번인 모형들은 번인이 제품의 신뢰도나 평균 수명을 향상시키고 제품의 전 수명주기로 보면 번인시험에 드는 비용과 번인 시 고장 및 수리에 의한 비용이 품질 보증 비용을 상쇄시키는 효과가 있어 총 비용을 감소시킬 수 있다는 데 초점을 두었다. 그런데 생산자의 입장에서 보면 번인은 수율의 직접적인 감소 즉, 당장의 수익 감소를 가져온다. 따라서 신뢰도의 증가 및 품질 보증 비용의 감소에만 초점을 둔 기존의 최적 번인 모형보다는 수율의 감소를 직접 고려하여 번인의 수율과 신뢰도에 미치는 상충효과를 쉽게 파악할 수 있도록 할 필요가 있다. 제 2장에서는 수율, 번인 그리고 신뢰도에 대한 기존의 문헌을 고찰하고 제 3장에서는 번인에 의한 수율 손실과 신뢰도 증가, 번인에 의한 출하되는 제품의 수의 감소 그리고 번인에 의해 품질보증기간에 고장이 나는 제품의 수의 감소를 평가할 수 있는 일반적 모형을 제안하고 생산자의 입장에서 최적번인시간을 결정하기 위한 순 이익함수를 유도한다. 제 4장에서는 반도체 소자의 가장 기본적인 형태인 MOS(metal-oxide semiconductor) 구조 가운데층으로 전계효과 트랜지스터(field effect transistor)의 성능에 결정적인 역할을 하는 게이트 산화막(gate oxide)의 경우를 예를 들어 3장에서의 모형을 적용해 보도록 한다. 마지막으로 제 5장에서는 결론을 맺는다.

2. 문헌고찰

2.1 수율

수율모형에 대한 연구는 1960년대 이후 꾸준히 진행되고 있다. 초기 연구에서는 웨이퍼내의 결점들이 무작위로 분포되어 있으며 칩 당 수율 결점의 수가 포아송 분포를 따른다고 가정한다. 이때 수율은 하나의 칩이 수율 결점을 가지고 있지 않을 확률로 정의된다(Ferris-Prabhu, 1992). 그 후 실제 생산 현장에서 웨이퍼내의 결점들이 무작위로 분포되기보다는 서로 모여 있는 경우가 관찰됨에 따라 결점의 모여 있는 정도를 고려한 다양한 모형들이 개발되었는데 예를 들면 Murphy, Seeds, 부 이항 모형 등이 있다. 수율모형을 선택하는 문제는 특정 제품의 수율

결점 자료에 가장 잘 적합 되는 모형을 선택하는 것이다. 수율 모형에 대한 설명은 Ferris-Prabhu(1992)와 Kuo *et al.*(2006)을 참조할 수 있고 수율모형의 적합문제에 대한 설명은 Cunningham(1990)을 참조할 수 있다.

2.2 신뢰도

신뢰도는 제품이 특정 환경에서 정해진 시간동안 사용될 때 그 제품이 의도한 기능을 성공적으로 수행할 확률을 말한다. 신뢰도는 수율 모형과는 별도로 시장에서의 제품고장자료에 지수분포나 와이블분포 등의 여러 가지 통계적 수명분포를 적합하여 가장 잘 적합되는 분포를 선택하여 추정된다. 이 경우 제품의 신뢰도는 제품이 생산된 이후 결정되고 제조공정장에서 신뢰도를 고려하여 공정을 통제할 수 없다(Kim *et al.*, 2004).

그런데 전자제품의 신뢰도는 일반적으로 내적 신뢰도(intrinsic reliability)와 외적 신뢰도(extrinsic reliability)의 경쟁위험모형(competing risk model)으로 표현할 수 있다(Kim *et al.*, 2004). 외적 신뢰도란 공정에서 발생하는 결점으로 인해 제한되는 신뢰도를 말하고 내적 신뢰도란 결점이 없는 제품의 고장과 관련된 용어이다. 현대에 오면서 전자제품의 수명주기가 짧아지면서 내적 수명이 소멸되기 이전에 새로운 제품으로의 대체가 이루어짐에 따라 신뢰도 평가의 관심은 내적 신뢰도보다 외적 신뢰도로 집중되고 있다. 이러한 외적 신뢰도는 공정 결점에 의해 전적으로 결정되므로 설계시에 공정 신뢰도를 고려하여 통제할 수 있다. 외적 신뢰도는 수율과 밀접한 연관이 있고 최근에 오면서 수율과 외적 신뢰도 사이의 관계에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Huston and Clarke, 1992; Kim *et al.*, 2004; 2005).

2.3 번인

한편, 번인은 수율보다는 신뢰도와 관련되어 하나의 독립된 연구 분야로 진행되어 왔다. 수리가 불가능한 시스템이 욕조모양(bathtub shaped)의 고장률함수(hazard rate function)를 가진다고 가정하고 신뢰도나 평균수명을 극대화시키는 번인시간을 이론적으로 유도하거나(Mi, 1994; 1997; Nguyen and Murphy, 1982) 수리가 가능한 시스템의 다양한 수리 상황에서 신뢰도나 평균잔여수명을 극대화시키는 번인시간을 결정한다(Park, 1985). 또한 번인시험에 드는 비용과 품질 보증 비용의 상충효과를 고려하도록 하는 다양한 비용함수모형을 제안하였고 이러한 비용함수를 최소화시키는 최적 번인시간을 연구하였다. 최근 번인을 시스템의 생산단계에서 한 단계가 아닌 여러 단계에서 연속적으로 사용하는 경우 최적번인시간을 결정하는 문제가 고려되고 있다. 번인에 대한 문헌고찰은 Block and Savits(1997), Leemis and Beneke(1990) 또는 Jensen and Peterson (1982)를 참조할 수 있다.

이러한 모형들은 변인이 제품의 신뢰도나 평균수명을 향상시키고 전 수명주기로 보았을 때 총 비용을 감소시킬 수 있다는 데 초점을 두었다. 그런데 생산자의 입장에서 보면 변인은 수율의 직접적인 감소로 출하되는 제품의 수가 감소하고 이에 따라 수익이 감소하게 된다. 즉, 신뢰도의 증가 및 품질 보증 비용의 감소에만 초점을 둔 기존의 최적변인모형을 수정하여 수율의 감소를 직접 다루어 변인의 상충효과를 쉽게 파악할 수 있도록 할 필요가 있고 이러한 문제가 3절에서 다루고자 하는 본 논문의 목적이 된다.

3. 수율과 신뢰도의 상충효과

3.1 변인에 의한 수율 손실

제품의 전체 면적이 A 이고 단위 면적당 평균 결점 밀도 (mean defect density)가 D_0 라고 하면 제품 전체에 있는 결점의 수 N 은 평균이 AD_0 인 확률 질량 함수 $\pi(n)$ 을 가진다고 가정할 수 있다. 웨이퍼 상에 다양한 크기의 결점이 발생하고 제품의 수명은 제품내의 가장 큰 결점에 의해 결정된다. 결점의 크기를 확률변수 X_0 라고 하고 제품 내에 결점의 크기가 x^* 보다 큰 결점이 존재한다면 이 결점은 수율결점이므로 제품의 즉각적인 고장을 초래한다. 이제 하나의 제품 안에 있는 각 결점이 수율결점인지를 관찰하는 확률실험을 고려해 보자. 실험을 N 번 반복하며 실험결과를 서로 독립이라고 가정할 수 있고 이때 수율 결점의 수를 N_y 라고 하자. 그러면 $N=n$ 이 주어졌을 때 N_y 의 조건부 분포함수는 모수가 n 과 $\Pr(X_0 > x^*)$ 인 이항분포가 된다. 즉,

$$\Pr(N_y = n_y | N = n) = \binom{n}{n_y} [\Pr(X_0 > x^*)]^{n_y} [\Pr(X_0 \leq x^*)]^{n-n_y}.$$

이다. 따라서 N_y 의 주변분포함수는 총 확률법칙(law of total probability)을 사용하여

$$\Pr(N_y = n_y) = \sum_{n=0}^{\infty} \binom{n}{n_y} [\Pr(X_0 > x^*)]^{n_y} [\Pr(X_0 \leq x^*)]^{n-n_y} \pi(n),$$

로 나타낼 수 있다. 수율이란 수율 결점의 수가 0일 확률 (Ferris-Prabhu, 1992)로 식 (1)과 같다.

$$Y = \Pr(N_y = 0) = \sum_{n=0}^{\infty} [\Pr(X_0 \leq x^*)]^n \pi(n). \quad (1)$$

예를 들어서 N 이 평균이 AD_0 인 포아송 분포를 따른다고 가정하면 식 (1)은

$$Y = \exp[-AD_0 \Pr(X_0 > x^*)]$$

와 같이 표현할 수 있다. 결점의 모여 있는 정도(clustering effect)를 고려하고자 한다면 N 이 평균이 AD 인 포아송 분포를 따른다고 가정 후 추가적으로 D 가 감마분포를 따른다고 가정하여 $\pi(n)$ 이 부 이항분포가 되도록 하여 적용할 수 있다. 또는 D 에 대해 일양분포, 삼각분포, 지수분포 등을 가정하면 Murphy나 Seed 수율모형 등을 얻을 수 있다(Ferris-Prabhu, 1992; Kuo *et al.*, 2006). 웨이퍼 당 총 K 개의 칩이 생산된다면 수율검사 이후 출하되는 웨이퍼 당 총 칩의 수는 KY 가 된다. 즉, $K(1-Y)$ 개의 칩은 수율결점을 포함하고 있어 제품의 즉각적인 고장을 일으키게 된다.

결점 크기의 최빈값을 x_0 라고 하면 전자제품의 경우 결점 크기의 확률밀도함수 $s(x)$ 는 일반적으로 식 (2)와 같이 표현되는 것으로 알려져 있다(Huston and Clarke, 1992; Kim *et al.*, 2004).

$$s(x) = \begin{cases} (q+1)(p-1)/(p+q)x_0^{-q-1}x^q, & 0 \leq x < x_0 \\ (q+1)(p-1)/(p+q)x_0^{p-1}x^{-p}, & x_0 \leq x < \infty \end{cases} \quad (2)$$

이때 $p \neq 1$ 이고 $q > 0$ 이며 p 와 q 의 값은 제조공정에 따라 달라지지만 $q=1$ 과 $p=3$ 이 자료와 잘 적합 되는 것으로 알려져 있다. 수율 결점, 신뢰성 결점 그리고 식 (2)의 확률밀도함수사이의 관계는 Kim *et al.*(2004)의 <Figure 1>을 참조할 수 있다.

이제 제품을 고객에게 양도하기 전에 가속 환경에서 b 단위 시간 동안 변인을 한다고 하자. X_b 를 변인 후 결점의 크기라고 하고 N_b 를 변인동안 찾아낸 결점의 수라고 하면 X_b 와 N_b 는 변인 시간과 변인 환경의 영향을 받는다. $N=n$ 이고 $N_y = n_y$ 가 주어졌 있을 때 N_b 의 조건부 분포함수는 모수가 $n-n_y$ 과 $\Pr(X_b > x^* | X_0 \leq x^*)$ 인 이항분포이다. 변인 수율이란 수율 검사를 통과한 제품에서 변인동안 찾아낸 결점의 수가 0일 확률로 다음과 같이 표현된다.

$$Y_b = \Pr(N_b = 0 | N_y = 0) = \sum_{n=0}^{\infty} [1 - \Pr(X_b > x^* | X_0 \leq x^*)]^n \pi(n).$$

예를 들어서 $\pi(n)$ 이 평균이 AD_0 인 포아송 분포라고 가정하면 변인 수율은 다음과 같다.

$$Y_b = \exp[-AD_0 \Pr(X_b > x^* | X_0 \leq x^*)].$$

변인 후 전체 수율은

$$Y_{all} = \Pr(N_y = 0, N_b = 0) = Y Y_b,$$

이므로 변인으로 인한 수율의 손실은 식 (3)과 같다.

$$Y_{loss} = Y - Y_{all} = Y(1 - Y_b). \quad (3)$$

고정된 변인환경과 변인시간에서 수율의 손실은 변인하기 이전의 수율에 따라 달라진다. 수율검사와 변인검사이후 출하

되는 웨이퍼 단위당 칩의 수는 KYY_b 이고 $KY(1 - Y_b)$ 개의 칩은 번인동안 고장이 나므로 수리 또는 폐기처리를 하게 된다.

3.2 번인에 의한 신뢰도 증가

먼저, 번인 없이 소비자에게 양도되는 제품의 경우 신뢰도를 고려해 보자. X_t 를 원래 결점크기가 X_0 인 하나의 결점이 제품의 정해진 사용 환경에서 t 단위시간동안 사용되고 난 이후 결점의 크기를 나타낸다고 하자. N_t 를 t 단위시간의 소비자 사용 동안 실현되는 신뢰도 결점의 수라고 하자. $N = n$ 이고 $N_y = n_y$ 가 주어져 있을 때 N_t 의 조건부 분포함수는 모수가 $n - n_y$ 과 $\Pr(X_t > x^* | X_0 \leq x^*)$ 인 이항분포이다. 여기서 결합 확률 대신 조건부 확률을 사용한 이유는 제품의 신뢰성이 제품이 시장에 출하되는 시점을 시간 0으로 잡게 되고 출하되는 제품은 수율검사를 통과한 제품이 되므로 결점의 크기가 x^* 보다 작다는 것이 확인된 것이기 때문이다. 따라서 번인이 수행되지 않는 경우 제품의 신뢰도는 다음과 같이 표현된다.

$$R(t) = \Pr(N_t = 0 | N_y = 0) = \sum_{n=0}^{\infty} [1 - \Pr(X_t > x^* | X_0 \leq x^*)]^n \pi(n).$$

예를 들어서 $\pi(n)$ 이 평균이 AD_0 인 포아송 분포라고 가정하면 번인 신뢰도는 다음과 같다.

$$R(t) = \exp[-AD_0 \Pr(X_t > x^* | X_0 \leq x^*)].$$

이 경우 웨이퍼 당 K 개 칩 중 고객에게 양도되는 칩의 수는 KY 이며 고객 사용기간 t 동안 고장이 나는 칩의 수는

$$KY[1 - R(t)]$$

이다. <Figure 1>은 번인을 수행하지 않는 경우 단계별로 출하되는 제품의 수와 수율 및 신뢰도의 관계를 나타내고 있다.

둘째로, 제품을 고객에게 양도하기 전에 가속 환경에서 b 단

위시간 동안 번인한다고 가정하자. X_{b+t} 를 번인을 통과한 제품을 소비자가 정해진 사용 환경에서 t 단위시간동안 사용하고 난 이후 결점의 크기라고 하자. $N = n$, $N_y = n_y$, $N_b = n_b$ 가 주어져 있을 때 N_t 의 조건부 분포함수는 모수가 $n - n_y - n_b$ 과 $\Pr(X_{b+t} > x^* | X_b \leq x^*)$ 인 이항분포이다. 따라서 번인을 수행하는 경우 제품의 신뢰도는 다음과 같이 표현된다.

$$R(t|b) = \Pr(N_t = 0 | N_b = 0, N_y = 0) = \sum_{n=0}^{\infty} [1 - \Pr(X_{b+t} > x^* | X_b \leq x^*)]^n \pi(n).$$

따라서 번인으로 생기는 신뢰도 증가는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{gain}(t) = R(t|b) - R(t).$$

번인을 수행하는 경우 K 개의 칩 중 출하되는 칩의 수는 KYY_b 이며 고객 사용동안 고장이 나는 칩의 수는

$$KYY_b[1 - R(t|b)]$$

이다. <Figure 2>는 번인을 수행하는 경우 단계별로 출하되는 제품의 수와 수율 및 신뢰도의 관계를 나타내고 있다.

3.3 최적번인조건의 결정

칩 단위당 판매가격이 c_s 원이고 품질보증기간동안 고장나는 칩 단위당 잠재고객상실을 포함한 품질보증비용이 c_w 원이라고 하자. 번인을 수행하지 않은 경우 생산자가 기대할 수 있는 총 수익은

$$c_s KY - c_w KY[1 - R(t)]$$

이다. 일반적으로 신뢰도의 계산에서 임무시간 t 는 미리 고정되어 있는 것으로 가정한다. 주어진 제품의 고정된 임무시간이 없는 경우 품질보증기간을 사용할 수 있는 데 이 경우 생산자의 총 수익은 판매수익에서 품질보증비용을 뺀 것이 된다.

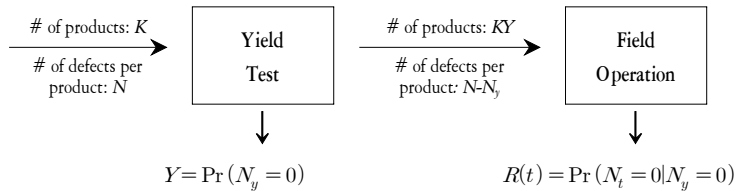


Figure 1. Number of products released, yield and reliability without performing burn-in

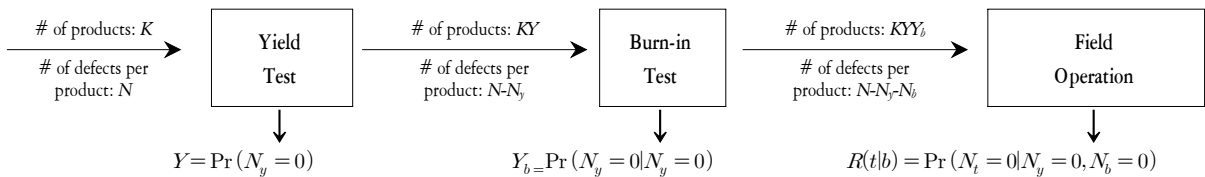


Figure 2. Number of products released, yield and reliability with burn-in

한편, 단위당 번인을 수행하기 위한 고정비가 c_0 이고 변동비가 c_b 라고 하면 번인을 수행한 후 생산자가 기대할 수 있는 총 수익은 다음과 같다.

$$c_s K Y Y_b - c_w K Y Y_b [1 - R(t|b)] - K Y (c_0 + b c_b).$$

여기서 $K Y (c_0 + b c_b)$ 는 총 번인비용을 말한다. 따라서 번인을 고려하여 기대되는 순이익(net profit)은

$$E(NP) = c_s K Y Y_b - c_w K Y Y_b [1 - R(t|b)] - K Y (c_0 + b c_b) - c_s K Y + c_w K Y [1 - R(t)] \quad (4)$$

가 된다. 따라서 $E(NP) > 0$ 가 되기 위한 필요조건은

$$R_{gain}(t) \geq \frac{c_0 + b c_b}{c_w} \frac{Y}{Y - Y_{loss}} + \left[\frac{c_s - c_w}{c_w} + R(t) \right] \left(\frac{Y_{loss}}{Y - Y_{loss}} \right) \quad (5)$$

이 된다. 만약 번인 환경이 고정되어 있다면 최적 번인시간 b^* 는 식 (4)을 극대화시키는 b 가 된다. 현실적으로는 제조공정상 고려할 수 있는 번인 조건이나 시간의 후보군이 있고 이 후보군에 대해 식 (4)을 평가함으로써 식 (4)가 극대화되는 조건을 선택하게 된다.

4. 게이트 산화막에의 적용

게이트 산화막(gate oxide)은 반도체 소자의 가장 기본적인 형태인 MOS(metal-oxide semiconductor) 구조 가운데 층으로 전계효과 트랜지스터(field effect transistor)의 성능에 중요한 역할을 한다. 여기서는 Lee *et al.*(1988)이 제안한 게이트 산화막의 결점크기와 수명사이의 관계 모형을 사용하여 수율과 신뢰성의 상충효과를 고려한 번인을 예시하고자 한다. Lee *et al.*(1988)에 따르면 산화막의 두께가 w 이고 운영 전압이 V , 운영 온도가 섭씨 27도인 경우 결점의 크기가 x 라고 하면 x 에 따른 산화막의 수명시간(단위: 초)은

$$t_{x0} = \tau_0 \exp \left[\frac{G}{V} (w - x) \right] \quad (6)$$

라고 나타낼 수 있고 이때 $\tau_0 = 10^{-11}$ 초이고 G 는 상수로 $350 MV/cm$ 이다. King *et al.* (1994)에 따르면 산화막의 수명에 미치는 절대온도 T 의 영향은

$$\tau_0(T) = \tau_0 \exp \left[- \frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{300} \right) \right] \text{와}$$

$$G(T) = G \left[1 + \frac{\delta}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{300} \right) \right]$$

로 나타낼 수 있으며 이때 k 는 볼츠만의 상수로 $8.617 \times 10^{-5} eV^0K$ 이고 E_a 는 활성화 에너지이다. Moazzami and Hu (1990)는 온도가 섭씨 25에서 125도 사이인 경우 $\delta = 0.0167$ 와

$E_a = 0.28 eV$ 가 적당하다는 것을 관찰하였다. 예를 들어서 제품이 섭씨 25도에서 사용된다면 식 (6)의 τ_0 는 9.3×10^{-12} 이고 $G = 351.517$ 이 된다.

이제 초기결점의 크기를 확률변수 X_0 로 나타낸다면 이 결점과 관련된 산화막의 수명시간은 그에 대응하는 확률변수 T_{x0} 로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{x0} = \tau_0 \exp \left[\frac{G}{V} (w - X_0) \right].$$

따라서 식 (2)의 결점크기의 분포를 이용하여 산화막의 수명 분포를 구할 수 있다.

$$F(t) = \Pr(T_{x0} \leq t) = \int_0^\infty \Pr(T_{x0} \leq t | X_0 = x) s(x) dx$$

$$= \begin{cases} \Pr \left(X_0 \geq w - \frac{V}{G} \ln \frac{t}{\tau_0} \right), & 0 < t < \tau_0 \exp \left(\frac{G}{V} w \right) \\ 1, & t > \tau_0 \exp \left(\frac{G}{V} w \right). \end{cases}$$

예제 1. 식 (2)의 결점크기 분포함수에서 $q = 1$ 과 $p = 3$ 를 가정한다면 $t < \tau_0 \exp \left(\frac{G}{V} w \right)$ 인 경우

$$F(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[\frac{x_0}{w - (V/G) \ln(t/\tau_0)} \right]^2, & w - (V/G) \ln(t/\tau_0) > x_0 \\ 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{w - (V/G) \ln(t/\tau_0)}{x_0} \right]^2, & w - (V/G) \ln(t/\tau_0) \leq x_0 \end{cases} \quad (7)$$

가 성립된다. <Figure 3>은 w 가 32 오스트롱이고 x_0 가 0.1 마이크로미터일 때 서로 다른 사용환경에서 식 (7)의 분포함수를 비교하고 있다. 사용 환경이 나쁠수록 결점과 관련된 수명이 작아짐을 알 수 있다. ||

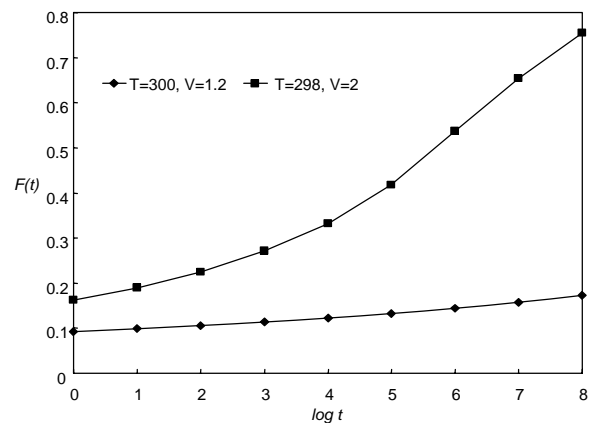


Figure 3. Lifetime distribution of gate oxide for two different operating conditions.

원래 결점크기가 X_0 인 결점이 절대온도 T_b 와 전압 V_b 인 가속상태에서 b 단위시간동안 번인 된다면 번인 이후의 결점

기를 구하기 위해

$$\Pr\left\{\tau_0(T_b) \exp\left[\frac{G(T_b)}{V_b}(w-x^*)\right] \leq T_{x_0} \leq t\right\} \\ = \Pr(X_b \geq x^*, X_0 \leq x^*)$$

를 이용하면

$$X_b = X_0 + x^* - w + \frac{V_b}{G(T_b)} \ln \frac{b}{\tau_0(T_b)}$$

가 됨을 알 수 있다. 즉, 번인동안 증가하는 결점의 크기가 초기 결점의 크기와는 무관하며 사용 환경의 영향만 받는다.

예제 2. w 가 32 옴스트롱인 산화막 제품이 x_0 가 0.1 마이크로미터일때 전압이 V 이고 섭씨 27도인 환경에서 운용된다고 하자. 식 (2)의 결점크기 분포함수에서 $q=1$ 과 $p=3$ 이라고 가정하고 결점크기가 $x^*=0.24$ 마이크로미터 보다 큰 결점이 존재한다면 제품이 고장난다고 하자. 제품 당 평균 결점의 수가 $AD_0=1.87221807$ 이라고 하고 결점들이 제품에 포아송 분포로 발생한다고 가정하면 번인을 수행하기 전 제품의 수율은 다음과 같다.

$$Y = \exp[-AD_0 \Pr(X_0 > x^*)] \\ = \exp\left[-0.5AD_0 \left(\frac{x_0}{x^*}\right)^2\right] = 0.85.$$

번인이 $V_b=2$, $T_b=125^\circ C$ 에서 24시간동안 진행된다면

$$Y_b = \exp[-AD_0 \Pr(X_b > x^* | X_0 \leq x^*)] \\ = \exp\left\{-AD_0 \frac{\Pr\left[w - \frac{V_b}{G(T_b)} \ln \frac{b}{\tau_0(T_b)} \leq X_0 \leq x^*\right]}{\Pr(X_0 \leq x^*)}\right\} \\ = 0.343343$$

따라서 수율손실은

$$Y_{loss} = Y(1 - Y_b) = 0.85(1 - 0.343343) = 0.558158$$

이 된다. 부이항 수율모형, Murphy, Seed 수율모형 등의 다양한 수율모형에서 가정한 분포를 고려하여 비슷하게 수율손실을 계산할 수 있다. ||

원래 결점의 크기가 X_0 인 결점이 포함된 제품이 온도가 27도이고 전압이 V 인 환경에서 t 단위시간동안 사용되고 난 이후 결점의 크기는

$$X_t = X_0 + x^* - w + \frac{V}{G} \ln \frac{t}{\tau_0}$$

가 된다.

Moazzami and Hu(1990)에 따르면 초기 결점의 크기가 x 로 주어 진 경우 번인을 수행하고 난 이후 남아있는 산화막 수명은

$$t_r = \tau_0 \exp\left[\frac{G}{V}(w-x)\right] \left\{1 - \frac{b}{\tau_0(T_b)} \exp\left[-\frac{G(T_b)}{V_b}(w-x)\right]\right\}$$

로 나타낼 수 있다. 따라서 번인 이후 소비자 사용 환경에서 t 단위시간동안 사용되고 난 이후 결점의 크기는

$$X_{b+t} = X_0 + x^* - c \quad (8)$$

로 나타낼 수 있으며 이때 c 는 $t=t_r$ 이 성립하는 x 를 나타낸다.

예제 3. w 가 32 옴스트롱인 산화막 제품이 x_0 가 0.1 마이크로미터일때 전압이 V 이고 섭씨 27도인 환경에서 운용된다고 하자. 만약 번인이 $V_b=2V$, $T_b=125^\circ C$ 에서 24시간동안 진행된다면 초기 결점의 크기가 $8.851734169268868 \times 10^{-8}$ 인 결점의 원래 수명은 1.08×10^{22} 년이었으나 번인 후 남아있는 수명은 약 2년이 된다. 따라서 식 (8)에서 번인 이후 2년 동안 사용된 제품에서의 결점크기는

$$X_{b+t} = X_0 + x^* - 8.851734169268868 \times 10^{-8}$$

가 된다. ||

예제 4. w 가 32 옴스트롱인 산화막 제품이 x_0 가 0.1 마이크로미터일때 전압이 V 이고 섭씨 27도인 환경에서 운용된다고 하자. 식 (2)의 결점크기 분포함수에서 $q=1$ 과 $p=3$ 이라고 가정하고 결점크기가 $x^*=0.24$ 마이크로미터 보다 큰 결점이 존재한다면 제품이 고장난다고 하자. 포아송 결점분포를 가정하면 제품의 신뢰도는 다음과 같다.

$$R(t) = \exp[-AD_0 \Pr(X_t > x^* | X_0 \leq x^*)] = 0.1668405.$$

만약 번인이 $V_b=2$, $T_b=125^\circ C$ 에서 24시간동안 진행된다면 번인을 통과한 제품의 신뢰도는

$$R(t|b) = \exp[-AD_0 \Pr(X_{t+b} > x^* | X_b \leq x^*)] = 1$$

이 된다. 따라서 이 경우 번인을 수행하여 얻게 되는 신뢰도는

$$R_{gain}(t) = R(t|b) - R(t) = 1 - 0.1668405 = 0.8331595$$

이다. 식 (4)에서 $c_s = c_w$ 라고 하면 즉, 판매가격과 품질보증비용이 같다고 가정하자.

$$c_w \geq \frac{c_0 + bc_b}{0.176503}$$

이면 번인으로 인한 순이익이 발생한다. 즉, 품질보증비용이 번인비용과 비례하여 크면 순이익이 발생한다. ||

이제 제조공정상에서 고려할 수 있는 몇 가지 번인 정책들에 대해 각각 순이익을 계산하고 순이익이 최대가 되는 번인 정책을 선택함으로써 최적번인시간과 번인조건을 결정할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 반도체 제조공정상에서 번인으로 인한 수율 손실과 신뢰도 증가를 평가할 수 있는 일반적인 모형을 제안하였다. 기존 문헌들에서 제시된 여러 가지 수율모형에서 사용하고 있는 어떤 결점분포든지 고려할 수 있다는 점에서 일반적이다.

기존의 번인모형들은 번인이 제품의 신뢰도나 평균수명을 향상시키고 전 수명주기로 보았을 때 총 비용을 감소시킬 수 있다는 데 초점을 두고 제조공정상의 수율은 고려하지 못하였다. 본 논문에서 제안한 번인모형은 생산자의 입장에서 번인으로 인한 수율의 직접적인 감소와 신뢰도의 증가를 동시에 고려하여 번인의 상충효과를 쉽게 파악할 수 있도록 하였다. 또한 기존의 번인모형들이 최적번인을 선택하는데 있어 번인의 조건은 고정시키고 최적번인시간을 결정하는데 주력하였다면 본 논문에서는 번인의 가속조건을 직접적으로 고려하여 번인환경과 번인시간을 동시에 고려할 수 있도록 하였다.

마지막으로 반도체 소자인 게이트 산화막의 수명분포를 이용하여 수율손실, 신뢰성증가 그리고 순이익의 평가를 단계별로 적용하는 예제를 다루었다.

참고문헌

Block, H. W. and Savits, T. H. (1997), Burn-in, *Statistical Science*, 12(1), 1-13.
 Cunningham, J. A. (1990), The Use and Evaluation of Yield Models in Integrated Circuit Manufacturing, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 3(2), 60-71.
 Ferris-Prabhu, A. V. (1992), *Introduction to Semiconductor Device Yield Modeling*,

Artech House, Boston, MA.

Huston, H. H and Clarke, C. P. (1992) Reliability Defect Detection and Screening during Processing: Theory and Implementation, *Proc. Int. Reliability Physics Sympos*, 268-275.
 Jensen, F. and Peterson, N. E. (1982), *Burn-in : An Engineering Approach to the Design and Analysis of Burn-in Procedures*, John Wiley & Sons.
 Kuo, W., Kim, K. O. and Kim, T. (2006), Modeling and Analyzing Yield, Burn-in and Reliability for Semiconductor Manufacturing, *Springer Handbook of Engineering Statistics*. Pham, Hoang (Ed.).
 Kim, K. O., Kuo, W. and Luo, W. (2004), A Relation Model of Gate Oxide Yield and Reliability, *Microelectronics Reliability*, 44(3), 425-434.
 Kim, K. O., Zuo, M. J. and Kuo, W. (2005), On the Relationship of Semiconductor Yield and Reliability, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 18(3), 422-429.
 King, J. C., Chan, W. Y. and Hu, C. (1994), Efficient Gate Oxide Defect Screen for VLSI Reliability, *IEEE/IEDM*, 597-600.
 Lee J. C., Chen, I. C. and Hu, C. (1988), Modeling and Characterizing of Gate Oxide Reliability, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 35(12), 2268-2277.
 Leemis, L. M. and Beneke, M. (1990), Burn-in Models and Methods: a Review, *IIE Transactions*, 22(2), 172-180.
 Mi, J. (1997), Warranty Policies and Burn-in, *Naval Research Logistics*, 44(2), 199-209.
 Mi, J. (1994), Burn-in and Maintenance Policies, *Advances in Applied Probability*, 26(1), 207-221.
 Moazzami, R. and Hu, C. (1990), Projecting Gate Oxide Reliability and Optimizing Reliability Screens, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 37(7), 1643-1650.
 Nguyen, D. G. and Murphy, D. N. P. (1982), Optimal Burn-in Time to Minimize Cost for Products Sold under Warranty, *IIE Transactions*, 14(3), 167-174.
 Park, K. S. (1985), Effect of Burn-in on Mean Residual Life, *IEEE Transactions on Reliability*, 34(2), 522-523.



김경미

연세대학교 응용통계학과 학사
 연세대학교 응용통계학과 석사
 Texas A&M University 산업공학과 박사
 현재: 건국대학교 산업공학과 조교수
 관심분야: 품질 및 신뢰성 공학, 응용통계, 확률과정