

반복측정이난해한 환경을 고려한 라인간 계측동일성검정

김형산, 조형석,* 이호양, 동승훈, 이상갈*

경기도 화성시 반월동 삼성전자(주) 메모리사업부 품질보증실 양산 QA 팀, 제조센터 생산기술 1 팀

ABSTRACT

반도체 산업에서 동일제품을 여러 라인에서 생산하는 것은 일반적이다. 모든 라인에서 생산된 제품의 품질수준의 동일 여부는 반도체 공정 계측데이터의 동일성 여부로 결정된다. 이러한 의사결정에 앞서 계측 데이터를 생산하는 라인간 계측시스템의 동일성 검정은 필수적이다. 일반적인 두 집단의 동일성검정 방법은 동일시료를 두 집단에서 반복 측정하여 측정값의 차이를 비교하는 방법이다. 그러나, 반도체 계측특성은 동일시료를 반복 측정할 때, 물리적 영향 등에 의해 시료가 변화하여 반복측정이 난해한 특징을 가지고 있어 일반적인 반복측정 방식의 동일성 검정방법은 적합하지 않다. 본 연구에서는 반복측정이 난해한 반도체 계측 특성 하에서 가설검정을 이용한 라인간 계측 동일성 검정방법을 제시하고 실제 반도체 공정에 적용한 사례를 소개하고자 한다.

1서론

최근 반도체 산업은 동일제품을 여러 라인에서 생산하므로 라인간 제품이 동일한 품질수준을 유지하는 것은 필수적인 고객 요구사항이다. 반도체 산업은 이를 만족시키기 위해 "라인간 표준화 (Copy Intelligently, 라인間 上向 一致化)" 활동이 추진되고 있다. 이는 양산 라인간 공정/설비/소재/Recipe 등의 표준화를 통해 제품 확산 기간을 단축하여 성숙 수율을 조기 달성하고, 라인간 동일품질을 확보하는 것을 목적으로 하고 있다.

라인간 표준화 핵심은 공정 Output Parameter 를 일치화 하는 것인데, 측정시스템에서 생산되는 계측 데이터는 공정 Output Parameter 를 대변하므로 공정 Output Parameter

표준화에 앞서 라인간 계측 데이터의 일치화를 통한 계측시스템 표준화는 필수적이다. 라인간 계측시스템 표준화는 두 라인간 계측기준을 100% 일치화 한다는 개념으로 두 라인간 계측기준이 "동일하다"는 것에 대한 명확한 기준을 수립하여 라인간 계측기준 일치 여부를 판정해야 하는 것이 관건이다.

Paired t Test 는 두 집단의 데이터가 동질적인 쌍의 형태를 띠 때 측정값의 차이를 이용하여 두 집단의 동일 여부를 판정하는 방법으로 널리 적용되고 있다. 반도체 공정에서 Paired t Test 는 동일 wafer 의 여러 point 를 두 집단에서 반복 측정하여 두 집단간 동일 여부를 결정하는데 적용할 수 있다.

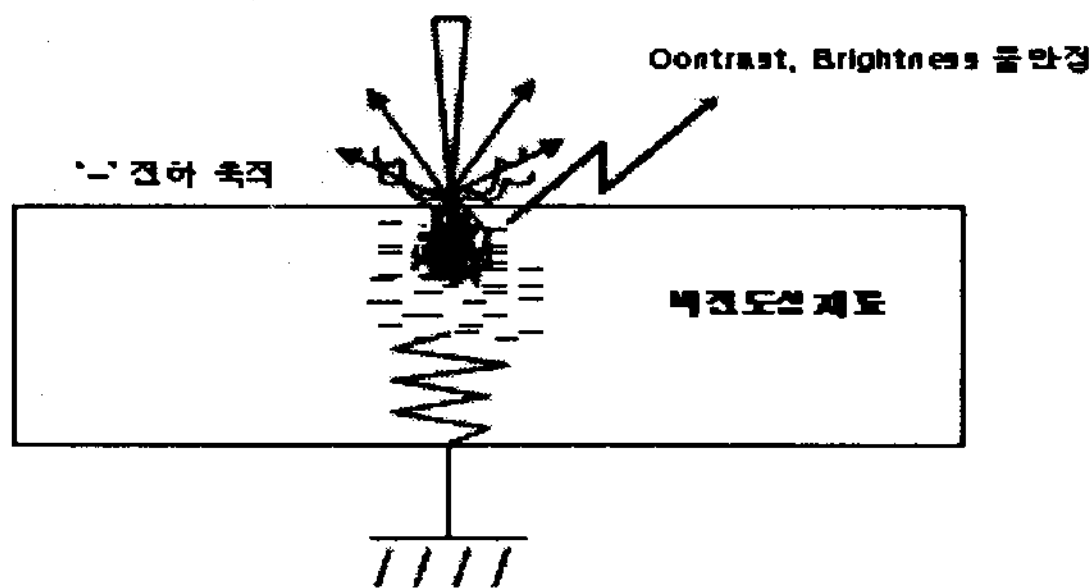
그러나, 반도체 계측 특성은 동일시료의 동일 point 를 반복 측정하면 물리적 또는 시간적인 영향 등에 의해 시료가 변화하는 반복측정이 난해한 특징을 가지고 있다. 따라서 반도체 공정에서 라인간 계측동일성 검정은 반복측정에 의한 물리적 Bias 를 제거해야 한다.

또한, 라인간 계측동일성 검정의 최종목적은 계측기 개선 여부 결정하여 라인간 계측기준을 일치화하는 것인데, 반도체 계측설비는 나노 단위 측정설비로 설비 제조사에서 제시하는 계측기 고유오차가 존재하기 때문에 개선 여부를 최종 판정할 때는 계측기 고유오차를 고려해야 한다.

본 연구에서는 반도체 계측특성인 반복측정이 난해한 환경을 고려한 라인간 계측동일성 검정 방법을 제시하고, 계측기 고유오차를 고려한 계측기 개선 여부 판정절차를 소개하여 반도체 계측 공정에 적합한 실용적인 라인간 계측동일성 검정방법을 소개한다.

2 반도체 계측 특성

반도체 계측 특성 상 동일 시료를 반복측정 할 경우, 측정된 시료가 물리적인 변화를 일으켜 반복측정이 난해한 항목이 있다. 예컨대 반도체 CD 공정 측정설비인 CD SEM은 도체 Sample인 경우 입사 빔이 Sample과 충돌하였을 시, SEM Signal로 생성되어 방출된 전자 외에, 잔류 전자가 대부분 Sample 내에서 소멸되거나 Stage로 Ground 된다. 그러나 반도체나 부도체 Sample인 경우, 전도성이 거의 없어 <그림 1>에서 보는 바와 같이 전자는 Ground 되지 못하고 입사 빔이 충돌한 주변에 '+' 전하가 축적되어 Charge-up 현상이 발생된다. 이는 영상의 Contrast와 Brightness를 요동치게 만들어 실제 측정값을 변화시키는 요인이 된다. 이를 반도체 공정에서는 일반적으로 CD SEM Charging Effect라 하며 반복측정이 난해한 항목으로 구분된다.[1]



<그림 1. CD SEM Charging Effect>

또한, Oxide THK 공정은 시간에 흐름에 따라 Oxide막질이 성장하는 특징을 가지고 있어 반복측정시 시간을 고려한 측정이 필요한 항목이다.

3. 라인간 계측동일성검정

3-1. Basic Modeling

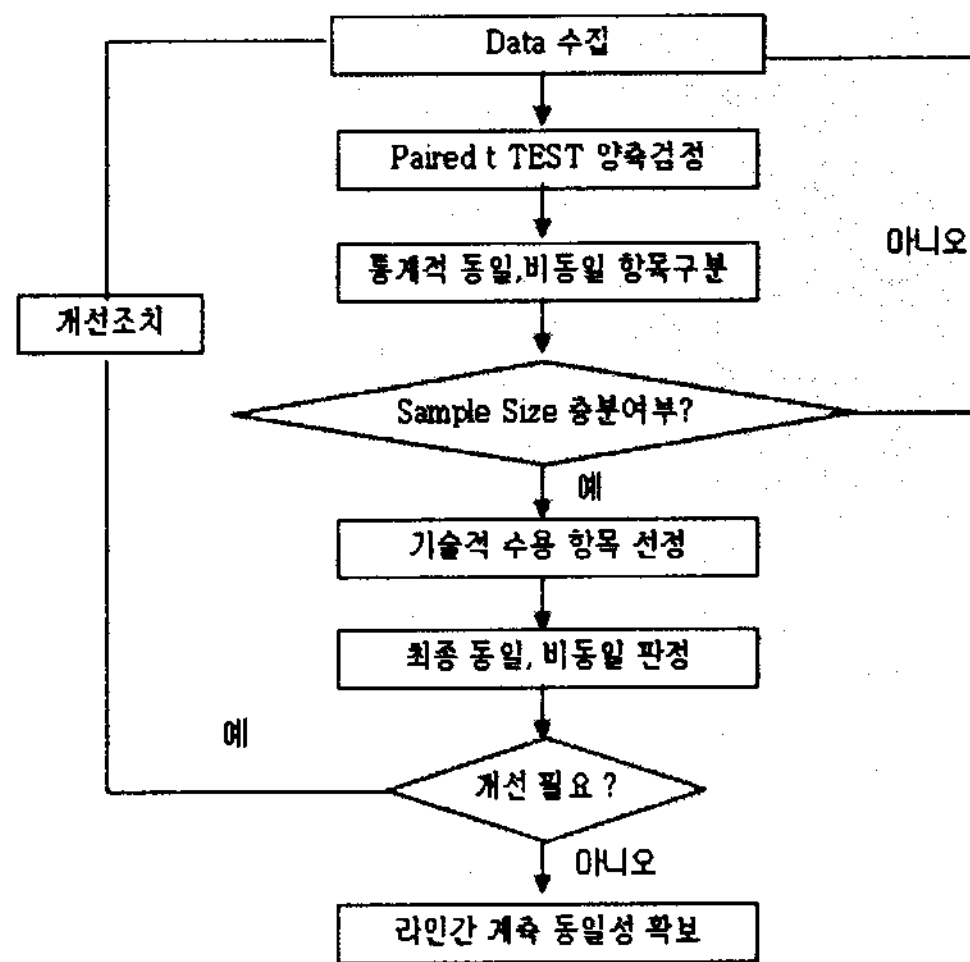
반도체 공정에서 계측하는 최소측정단위는 Wafer로써, CD, THK 등 output parameter의 라인간 계측동일성검정을 위한 계측 데이터는 주로 Wafer 안에서 여러 point를 측정하여 얻어지며, Basic Model은 다음과 같다.

$$X_i = R_i + e_i \quad (1)$$

여기서 X_i 는 i 번째 point의 측정치이고, R_i 는 i 번째 point의 참값이다.

3-2. 라인간 계측동일성검정순서도

라인간 계측동일성검정은 두 라인 계측기에서 수집된 DATA를 Hypothesis Test로 통계적 동일 여부를 판정 후, 통계적 비동일 항목 중에서 기술적 수용 항목을 선정하여 최종판정하고 계측기 개선 여부를 결정하는 방법으로 순서도는 <그림 2>와 같다.



<그림 2. 라인간 계측동일성검정순서도>

3-3. DATA 수집

일반적인 라인간 계측동일성검정을 위한 DATA 수집은 동일한 wafer의 여러 point를 두 라인 계측기에서 각각 측정하여 동일한 쌍체의 형태를 띤 데이터를 수집한다.[2] 이때, 공정 process는 안정된 상태이어야 하며, 라인간 계측기 사이에는 4M+1E 등 외부조건에 의한 물리적인 변화가 없는 동일한 측정조건이어야 한다. <표 1>은 동일 Wafer의 5point를 일반적인 방법으로 계측기 A, B에서 수집한 예이다.

Point	계측기 A	계측기 B
1	X_1	Y_1
2	X_2	Y_2
3	X_3	Y_3
4	X_4	Y_4
5	X_5	Y_5

<표 1. 일반적인 DATA 수집예>

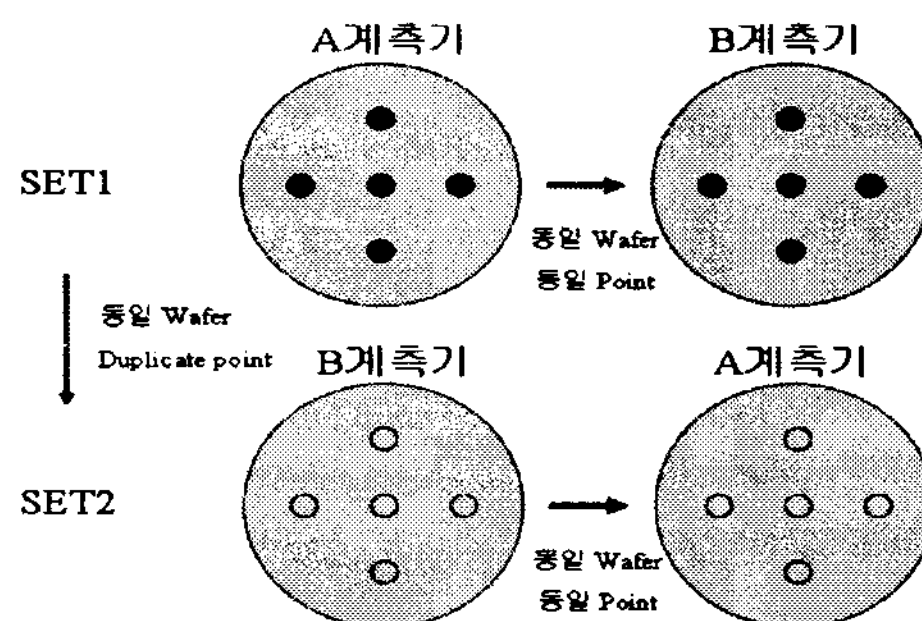
반복측정이 난해한 CD 항목을 <표 1>과 같은 방법으로 DATA 를 수집할 경우 Charging Effect 의 물리적 영향에 의해 측정값이 변화하므로 A, B 계측기에서 측정된 값은 다음과 같다.

$$A_i = R_i + e_{ai} \quad (2)$$

$$B_i = R_i + e_{bi} + c_i \quad (3)$$

여기서, A_i 는 i 번째 측정 point 를 A 계측기에서 측정한 값, R_i 는 i 번째 point 의 참값, C_i 는 i 번째 point 를 반복 측정할 경우 발생하는 Charging Effect 값이다. 즉, A 계측기에서 측정한 point 를 B 계측기로 반복측정 시, Charging Effect(C)만큼 참값이 Bias 되어 정확한 측정값을 얻을 수 없다.

이와 같이 동일 point 반복측정 시 물리적 영향(C)에 의해 반복측정이 난해한 경우는 C_i 를 제거하는 DATA 수집이 되어야 한다. C_i 를 제거하는 DATA 수집 방법은 original point 와 homogeneous 한 인접 duplicate point sampling 을 이용한다. [3] 즉, original point 를 두 계측기에서 측정한 후, 인접한 duplicate point 를 두 계측기에서 재 측정하는 방법이다. 이때, original point 와 duplicate point 는 동일한 물리적 영향 (C) 값을 갖는 point 임을 가정해야 한다. 반도체 CD SEM 측정기술은 original point 와 동일한 C_i 값을 갖는 homogeneous 한 인접 duplicate point 를 sampling 할 수 있는 측정능력을 갖고 있어 위의 가정을 뒷받침 해준다. <그림 3>에서 보는 바와 같이, SET1 과 SET2 로 구분하여 DATA 를 수집한다. SET1 에서는 동일 wafer 의 동일한 original point 를 A 계측기 → B 계측기 순으로 1 회씩 측정한다. SET2 에서는 SET1 과 동일한 wafer 를 original point 와 인접한 duplicate point 를 sampling 하여 SET1 계측기 역순인 B 계측기 → A 계측기 순으로 1 회씩 측정한다.



<그림 3. 반복측정이 난해한 경우 DATA 수집>

이때, SET1 과 SET2 에 대한 A, B 계측기 측정값은

$$\begin{aligned} A_{1i} &= R_{1i} + e_{1ai} \\ B_{1i} &= R_{1i} + e_{1bi} + C_{1i} \\ B_{2i} &= R_{2i} + e_{2bi} \\ A_{2i} &= R_{2i} + e_{2ai} + C_{2i} \end{aligned} \quad (4)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서, A_{1i} 는 SET1 의 A 계측기에서 i 번째 point 를 측정한 값이다. 식(4)로부터 각 SET 내 두 계측기 간 차이에 대한 기대값(expected value)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E[A_{1i} - B_{1i}] &= E[R_{1i} + e_{1ai} - R_{1i} - e_{1bi} - C_{1i}] = \mu_a - \mu_b - \mu_c \\ E[A_{2i} - B_{2i}] &= E[R_{2i} + e_{2ai} + C_{2i} - R_{2i} - e_{2bi}] = \mu_a + \mu_c - \mu_b \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)의 결과로부터 두 기대값에 대한 평균은

$$\frac{1}{2}(E[A_{1i} - B_{1i}] + E[A_{2i} - B_{2i}]) = \frac{1}{2}(\mu_a - \mu_b - \mu_c + \mu_a + \mu_c - \mu_b) = \mu_a - \mu_b \quad (6)$$

으로 μ_c 가 제거 된다. 따라서, 반복측정이 난해한 경우, 이와 같은 방법으로 DATA 를 수집하여 라인간 계측동일성검정을 수행한다.

<표 2>는 이러한 방법으로 수집한 DATA 예이며, 여기서 X_{11} 은 SET1 에서 A 계측기로 측정한 첫 번째 point 값이고, X_{21} 은 SET2 에서 A 계측기로 측정한 X_{11} 의 인접한 duplicate point 값이다.

Point	SET1		SET2	
	계측기 A	계측기 B	계측기 A	계측기 B
1	X_{11}	Y_{11}	X_{21}	Y_{21}
2	X_{12}	Y_{12}	X_{22}	Y_{22}
3	X_{13}	Y_{13}	X_{23}	Y_{23}
4	X_{14}	Y_{14}	X_{24}	Y_{24}

5	X_{15}	Y_{15}	X_{25}	Y_{25}
---	----------	----------	----------	----------

<표 2 반복측정이난해한 경우 DATA 수집예>

3.4. 통계적 동일/비동일 항목 구분

두 라인간 계측 차이에 대한 통계적 동일/비동일 항목을 판정하는 것으로 Paired t Test 양측검정의 대한 100(1- α)% 신뢰구간을 추정하여 판정한다. Paired t Test 양측검정에 대한 가설검정은 다음과 같다.[4]

$$\begin{aligned} H_0 : \mu_d &= 0 \\ H_1 : \mu_d &\neq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

두 라인간 계측 차이에 대한 점추정량은

$$d_i = \frac{|\Delta_{1i} + \Delta_{2i}|}{2} \quad (8)$$

이다. 여기서 Δ_{1i} 는 SET1 의 두 라인간 계측차이 $X_{1i} - Y_{1i}$ ($i=1,2,\dots,n$), Δ_{2i} 는 SET2 의 두 라인간 계측차이 $X_{2i} - Y_{2i}$ ($i=1,2,\dots,n$)이다.

d_i 의 평균값과 분산은

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}, S_d^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1} \quad (9)$$

이고, 두 라인간 계측 모평균 차(μ_d)에 대한 100(1- α)% 신뢰구간은 다음과 같다.[2]

$$\bar{d} - t_{(n-1; \alpha/2)} \frac{S_d}{\sqrt{n}} \leq \mu_d \leq \bar{d} + t_{(n-1; \alpha/2)} \frac{S_d}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

두 라인간 계측 차이에 대한 통계적 동일/비동일 판정기준은 식(10)으로부터 100(1- α)% 신뢰구간이 0 을 포함하면 동일, 0 을 포함하지 않으면 비동일로 판정한다.

3.5. Sample Size 충분여부 검토

통계적 동일/비동일 판정 후, 유의수준 α 인 Paired t Test 양측검정에서 두 라인간 계측차 $|\mu_A - \mu_B|$ 가 δ 일 때의 제 2종오류가 β 이기 위한 Sample Size 크기를 결정한다.[4]

두 라인간 계측차 $|\mu_A - \mu_B|$ 가 δ 일 때 검정력이 1- β 이기 위한 Sample Size 크기는

$$m \approx \frac{(Z_{1-\alpha/2} + Z_{1-\beta})^2 \cdot S_d}{\delta^2} + 0.5Z_{1-\alpha}^2 \quad (11)$$

으로 결정 할 수 있다. [5] Sample Size 충분여부 검토는 현재 수집된 DATA 개수(n)과 검정력이 1- β 이기 위한 Sample Size 크기(m)을 비교하여 판정한다. 즉, $n < m$ 일 때, 현재의 수집된 DATA 개수가 부족한 것으로 판정하여 Sample Size 필요수($m-n$) 만큼 추가 데이터를 수집하여 Paired t Test 양측검정을 재 실시한다.

3.6. 기술적 수용항목 선정

반도체 계측설비는 나노 단위 측정설비로 계측설비의 고유오차가 존재하기 마련이다. 즉, 계측설비 제조사는 계측설비간 고유오차를 인정하기 때문에 기술적으로 계측설비를 고유오차 이내로 일치시키는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서, 기술적 수용이란, 통계적 비동일 항목이지만, 라인간 계측기 차이가 계측설비 고유오차 이내 있는 것이다.

기술적 수용항목 선정 방법은 Paired t Test 양측검정을 통한 통계적 비동일 항목으로부터 기술적 수용 항목을 선정하며, 가설검정은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} H_0 : \mu_d &= \delta \\ H_1 : \mu_d &> \delta \end{aligned} \quad (12)$$

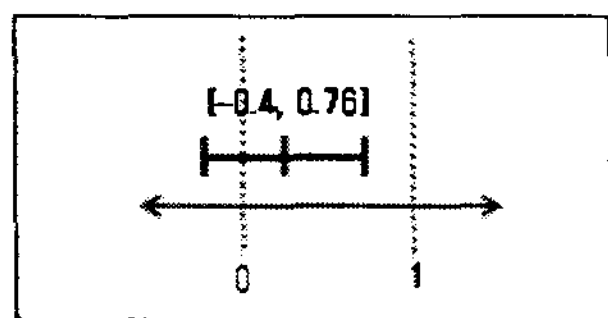
여기서, δ 는 계측설비 고유오차 이며, Paired t Test 양측검정 100(1- α)% 신뢰구간이 δ 를 포함하면 기술적수용 항목으로 선정된다.

3. 적용결과

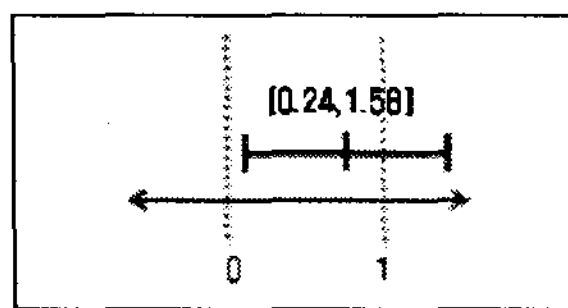
본 연구에서 제안한 라인간 계측 동일성 검정 방법을 DRAM 제품 계측 공정에 적용한 사례를 소개한다. <그림 4> ~<그림 6>은 DRAM 제품에 대한 라인간 계측동일성검정 사례이다. 파란색 선은 두 라인간 계측 차이에 대한 95% 신뢰구간을 나타낸다. <그림 4>는 통계적동일항목으로 신뢰구간이 0 을 포함하고 있으며,

<그림 5>는 기술적 수용항목으로 신뢰구간이 0 을 포함하고 있지 않으나, 계측설비 고유오차($\delta=1$)을 포함한다. <그림 6>은 비동일 항목으로 신뢰구간이 0 과 계측설비고유오차($\delta=5$)를 포함하고 있지 않다.

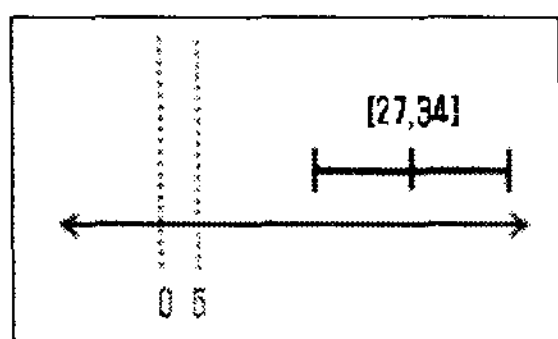
라인간 계측동일성 검정의 최종 목적은 비동일 항목에 대해 계측기 개선여부를 결정하는 것이다. 라인간 계측동일성 검정의 최종 판정은 동일/비동일 항목으로 구분할 수 있다. 동일 항목은 통계적 동일 항목과 통계적 비동일 항목 중 기술적 수용항목을 포함한다. <그림 6> 과 같이 통계적, 기술적 모두 비동일로 판정한 항목은 반드시 라인간 계측 기 동일성 확보를 위한 Engineer 개선활동이 필요하다.



<그림 4> 통계적 동일



<그림 5> 기술적 수용



<그림 6> 비동일

4. 결론

본 연구에서는 반도체 공정의 라인간 계측수준 일치화를 위한 라인간 계측동일성 검정 방법을 제시 하였다. 라인간 계측동일성 검정은 반도체 계측 특성인 반복측정이 난해한 환경을 고려하여 데이터 수집 방법을 개선한 Hypothesis Test 이다. 이는 계측설비의 고유오차를 고려하여 계측기 개선여부를 최종 판정 하므로 통계적, 기술적 측면이 모두 고려된 실용적인

검정 방법이다. 본 연구는 현재 DRAM, FLASH 신제품 라인 확산 시, 라인간 계측 동일성 확보를 위한 검정 방법으로 적용 중이다.

시간에 따라 계측 특성이 변화하는 반복측정이 난해한 항목은 반도체 공정에서 기술적 검토결과, 변화량이 미약하여 본 연구에서 세부적인 라인간 계측동일성 검정방법에 대해 논하지 않았다. 그러나, 변화량이 큰 항목의 경우, 본 연구에서 제시하는 라인간 계측동일성 검정의 DATA 수집 방법과 같이 반복측정이 난해한 환경을 고려해야 한다.

마지막으로 측정시스템 산포 관리는 라인간 계측수준 일치화와 더불어 Gage R&R Study[6]를 통한 측정시스템의 산포 수준 파악과 개선 활동이 요구된다. 반도체 계측 시스템의 재현성(Reproducibility)은 계측시스템 자동화로 인해 “동일한 부품을 측정하였을 때에 계측기간에 나타나는 산포”로서, 반복측정이 난해한 경우 라인간 계측동일성 검정 방법을 적용하여 산포추정이 가능 하다. 그러나, 반복성(Repeatability)은 “동일한 계측기가 동일한 부품을 반복 측정하였을 때 나타나는 산포”로서, 반복측정이 난해한 경우 산포를 추정에 대한 어려움이 따른다. 이에 향후 반복측정이 난해한 경우, Gage R&R 평가 방법에 대해 연구하고자 한다.

REFERENCES

- [1] Mark Davidson, Neal T. Sullivan, “An Investigation of the Effect of Charging in SEM based on CD Metrology”, SPIE, Vol.3050, pp226~228
- [2] 노부호, 민재형, 이군희, “통계학의 이해(제 2 판)”, 법문사, pp 321~325, 2000
- [3] David Benham, DaimlerChrysler Corporation, “Non-Replicable GRR Case Study”, www.aiag.org/files/Non-Replicable GRR Case Study.pdf, pp 1~3, 2002
- [4] 이승훈, “Minitab 을 이용한 공학통계 자료분석”, 이래테크, pp 104, 2006

- [5] J.R. Davidson, "Verification of the Accuracy of Sample Size Equation Calculation for Visual Sample Plan Version 0.9C", EPA Guidance for Data Quality Assessment, pp3.2~3.3,1996
- [6] Douglas C. Montgomery, "Introduction to Statistical Quality Control(4th)", pp 377~384, 2001