

DES 모델링을 통한 고장포용 기법의 Rapid Thermal Process에의 적용 방안 연구
 심영태, 이석주, 김학배
Application of Fault-Tolerant Schemes for the Rapid Thermal Processor
Using DES modeling Techniques

Yeungtae Shim, Seukjoo Lee, Hagbae Kim

Abstract - 실제 공정상에서는 웨이퍼에 열을 가하는 공정뿐만 아니라 다른 형태의 여러 공정도중에도 다양한 종류의 예측 불가능한 고장 또는 기기의 오동작이 발생할 수 있으며 이는 고속열처리장비(RTP)의 throughput과 수율에 심각한 영향을 미치고 있다. 따라서 RTP 공정의 일부분뿐만 아니라 전체 공정에서의 장비의 상태변화를 기반으로 성능인자를 향상시킬 수 있는 modeling기법의 구축이 절실하다. 각각의 여러 수준과 발생 빈도에 의해서 시스템의 동작과 성능이 결정되며 높은 신뢰도(reliability)가 요구되는 시스템일수록 필수적으로 모든 부분의 기능 및 동작상태를 고려한 모델링이 선행되어야 한다. 그러나 시스템의 많은 부분은 분석 및 실험을 바탕으로 한 정확한 상태 방정식을 구할 수 없으므로 추상적이고 개념적인 상태변화 또한 전체 모델링에 포함시킬 수 있는 효율적인 기법이 필요하다. 이에 본 논문은 DES 모델링 기법을 사용하여 RTP의 동작 운용상태를 모델링하고 이를 통해 적절한 성능평가를 하고, 이를 컴퓨터 모의실험을 통해 검증하는 것을 주된 연구내용으로 한다.

1. 서론

RTP는 반도체 생산공정을 위한 유연 생산 시스템의 구축에 이상적인 해로서 웨이퍼를 처리하기 위해서 필요한 공정들 즉, 담금질(annealing), 클리닝(cleaning), 산화(oxidation), 화학적 증기 증착(chemical vapor deposition), 질화(nitridation), 에피 성장(epitaxial growth) 등의 다양한 응용작업을 수행할 수 있는 웨이퍼 가공기이다[1]. 이러한 고속 열처리 공정기는 단일 웨이퍼 공정기로서 최근 반도체 공정에서 웨이퍼가 대형화되고 다품종 소량생산이 요구되면서 주목받기 시작했다. 저렴한 생산시설과 짧은 생산주기 뿐만 아니라 높은 생산성 및 고품질 제품을 보장하는 RTP 시스템의 최적 제어기법 개발 및 실용화를 목표로 기존의 in-process, end-of-process monitoring과 통계적 공정관리기법 대신 효율적인 in-situ monitoring에 의해 실시간 입출력 데이터를 수집하여 모델링 및 최적 운용기법에 대한 연구가 다각적으로 이루어지고 있다[2]. 그러나 기존의 모델링기법은 실제 반도체 공정에서 일어나는 각종 기기의 오동작이나 고장, recipe의 부적합, 치명적인 고장 등에 대해서는 경제적이고 구체적인 모델링이 이루어지고 있지 않다. 따라서 시스템의 고장특성 등을 고려하고 고장포용성(fault-tolerance)을 구현하기 위하여 이산사건시스템(Discrete Event System)을 도입할 것이다. DES 모델링이란 시간의 흐름에 의해 일어나는 일련의 사건에 의한 상태의 변화들을 시간의 기준으로 아닌 사건을 기준으로 묘사하는 기법의 일종으로, 기존의 모델링과는 달리 추상적인 시스템의 상태에 대해서도 이를 정의하고 모델링함으로써 시스템의 전반적인 상태부터 세세한 상태까지 묘사가 가능하며 구체적인 특성이 규명된 부분과 그렇지 아니한 부분까지 혼합하여 전체 시스템을 구성할 수 있고, 따라서 반도체 생산시스템에서는 시스템의 복잡성, 유동적인 특성, 모델링의 불확실성 때문에 공정장비의 감시제어와 최적운영, 그리고 고장포용을 위해서 DES 모델링 기법을 활용하는 것이 유리하다. 즉 입출력 상태값은 상태공간(state-space)식이나 신경회로망 모델로 표현되는 CVDS(Continuous Variable Dynamic System) 특징을 갖고 있으나 복잡한 동적특성을 지닌 반도체 생산시스템에는 이에 적합

한 이산사건 모델 접근법을 적용할 필요가 있다[3]. 실제 공정상에서는 웨이퍼에 열을 가하는 공정뿐만 아니라 다른 여러 공정도중 예측가능하거나 예측 불가능한 고장 또는 기기의 오동작이 일어나고 있으며 이는 RTP의 throughput과 수율에 많은 영향을 끼치고 있다. 따라서 RTP공정의 일부분뿐만 아니라 전체 공정에서의 장비의 상태변화를 기반으로 하여 성능인자를 향상시킬 수 있는 모델링기법이 필요하다[4,5]. 따라서 본 논문에서는 일반적인 시스템에 DES 모델링의 적용기법을 논의하고 RTP 시스템에 이를 적용하여 컴퓨터시뮬레이션을 통하여 고장포용이 적용된 경우와 그렇지 아니한 경우의 성능인자를 비교한다.

2. 본론

2.1 DES 모델링 기법의 장·단점

DES 모델링이 구체적 동작 특성이 밝혀지지 않은 추상적인 부분과 물리적, 논리적 동작 특성이 밝혀진 부분을 모두 함께 모델링할 수 있고 시스템을 위한 소프트웨어로 구현 장점이 있지만 반면, 실제 시스템 모델링에서는 모델링하는 의도와 관점에 따라서 같은 시스템에서도 다양한 모델이 나올 수가 있다. 그러한 모델링은 매우 주관적이므로 시스템의 성능이나 동작 흐름을 잘 나타낼 수 있지만 실제와는 다른 형태로 모델링이 되어 실제 시스템을 제대로 나타내지 못하고 그릇된 결과값을 나타내는 경우가 빈번하다. 그 원인들을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 상태들(states)과 사건들(events)을 정의할 때 뚜렷한 기준이 없이 작성자의 주관에 따라 모델링이 된다. 둘째, 작성자의 인식의 범위와 사고의 한계에 따라 누락된 상태와 사건이 있을 수 있다. 셋째, 모든 상태와 사건을 고려할 경우 이를 처리, 계산하는데 필요한 데이터량의 한계에 따른 생략과 간략화에 의한 오차가 생길 수 있다. 때문에 이러한 단점을 극복하기 위해서 시스템 내 하부시스템의 모델링과 공정순서에 따른 모델링의 표준을 제시한다.

2.2 상태와 사건의 설정

첫번째 문제점을 해결하기 위해서는 모델링을 할 대상을 잘 살펴볼 필요가 있다. 대부분의 시스템은 여러개의 하드웨어와 소프트웨어가 관련된 하부시스템과 이것들이 모여서 모인 본 시스템으로 구성되어 있다. 때문에 하부시스템을 각 모델링의 기본 단위로 잡는다. 또한 이런 하부시스템도 보다 자세하게 모델링할 수 있다. 그러나 이것은 전체 시스템의 관점에서 관찰했을 때 필수적인 것이 아니며 모델링을 복잡하게 하고 처리할 정보량을 늘리기 때문에 중요한 부분만 수행할 필요가 있다.

두번째 문제점을 해결하기 위해서는 각각의 하부 시스템에 대한 구체적인 일반적인 적용 알고리즘이나 모델링의 기준이 필요하다. 또한 이것은 보다 포괄적이며 일반적이어서 하며 예측하지 못한 상태와 사건을 포함하여야 한다. 이를 위해서는 각각의 상태를 분류하고 비슷한 것끼리 합치는(merging) 과정을 거쳐야 한다.

세번째 문제점은 각 하부 시스템이 순차적으로 변하는 것이 아니라 동시에 여러 시스템이 변하는 것에서 기인한다. 만일 i 번째 하부시스템이 M_i 개의 상태로 나누어진다 보면 본시스템은 $\prod M_i$ 개의 상태가 필요하게 된다. 그러나 실제 시스템은 공정 흐름에 따라 서로 다른 하부시스템 각각의 상태가 서로 독립적이지 않는 경우가 생기며 독립적이다 할지라도 공정흐름에서 전혀 천이되지 않

는 상태들이 생기게 된다. 따라서 하부시스템의 모델링에서 공정흐름에 따라 상태들을 합치는 작업이 필요하다. 결국 정상 상태(normal state)를 공정에 따라 분류를 함으로써 소기의 목적을 달성할 수 있다.

3. RTP 예의 적용

반도체생산은 단일웨이퍼에 수십 또는 수백번의 다양한 공정을 가하면서 이루어지며 물리화학적 공정이 마무리된 후 하나의 웨이퍼를 여러개의 die로 나누어서 다음 공정을 진행하게 된다. 각각의 공정에서 이상이 생긴 부분은 미리 표시해 두었다가 이 과정에서 불량상태인 die를 제거하고 정상상태인 웨이퍼만 마무리 공정으로 접어든다. 이때 전체 불량 die 대 전체 die의 비율을 수율이라 하며 이 수율은 제품의 가격을 결정하는 매우 중요한 요소가 된다. 따라서 매 공정에서 일어나는 공정제어의 비효율성이나 공정기기의 오동작, 혹은 공정기기에 의한 제품의 이상이 누적이 되면 전체 제품의 수율에 큰 영향을 미치게 되고 결국 원가상승의 요인이 되어 그 상품의 경쟁력을 떨어뜨리게 된다.

3.1 RTP의 하부시스템 모델링

RTP를 구성하고 있는 하부시스템은 크게 열처리 시스템, 온도계측 시스템, 공기시스템(pneumatic system), 가스 시스템, 냉각시스템, 운영시스템, 주전원 시스템, 반응실, 진공 시스템, 자동 운송시스템(automatic guided vehicle) 등으로 분류할 수 있다. 이런 각각의 하부시스템을 기본으로 하여서 세부적으로 DES 모델링을 하되 앞에서 언급한 바와 같이 모든 상태와 사건을 포함하면서 모델링을 하기 위해서 그림 1과 같은 형태로 모델링을 한다.

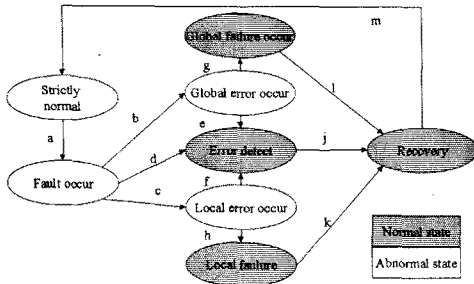


그림 1. 하부시스템의 DES 모델

그림 1에서와 같이 하부 시스템에서 일어난 결함(fault)이 오류(error)로 나타남으로써 검출을 할 수 있고 그렇지 않은 경우 모두 고장으로 발현됨으로써 이를 복구한다. 똑같은 오류가 일어나도 다른 하부 시스템에 영향을 끼치지 않고 그 하부시스템 내부에서 독립적으로 처리될 수 있는 상태를 국소에러(local error)라고 하였고 반면에 시스템 전체에 영향을 끼치는 에러를 광역에러(global error)라 구분을 하였고, 시스템 고장 또한 이런 개념으로 국소와 광역 고장으로 나누었다. a~m까지의 사건들은 단지 개별 사건들을 지칭하는 것이 아니라 같은 상태천이를 일으키는 사건들의 집합이며, 서로 독립적이고 이산사건 분포를 갖는다고 가정한다.

그러나 그림 1과 같이 내게 집합으로 나눌 수 있는 상태들은 관념적인 것에 불과할 수가 있다. 왜냐하면 결함이 발생하더라도 오류가 발생하지 않으면 검출을 해내지 못하기 때문이다. 따라서 이 네가지의 상태를 합쳐서 정상상태(normal states)로 정의의 하고 일정한 패턴에 따라 구분을 한다. 그 구분의 기준은 전술한 바와 같이 공정순서에 따른다. 즉, 각각의 공정에 대해서는 각 하부 시스템이 정해진 임무를 규칙적으로 수행을 하므로 이것은 그림 2와 같이 각 공정에 대한 상태들로 표시를

한다. #N 공정 상태는 그 하부 시스템을 이루는 각각의 부품과 소프트웨어의 상태를 포함한다. 예를 들어 진공 시스템은 공정실내의 압력을 제어하며 진공펌프, 압력계, 스로틀(throttle) 밸브, 개폐밸브 등으로 이루어져서 압력범위에 따라 터보 펌프와 드라이 펌프를 병행하면서 이루어진다. 처음에는 slow rough line을 통해서 서서히 배출을 하고 나중에는 굵은 foreline으로 배출을 한다.

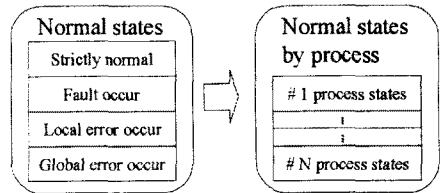


그림 2. 공정에 의한 정상상태 구분

하부 시스템의 모델링에 있어서 가장 큰 영향을 끼치는 반응도(sensitivity)가 높은 요소들은 필수적으로 포함시켜야 한다. 표 1은 이러한 요소들을 모아 놓은 것으로서 RTP 자체 상태와 입력제어값, 웨이퍼 자체 상태와 같은 주변환경 등으로 크게 구분지을 수 있다. 이중 환경(environment)과 관련된 상태는 공정중에 갖추어져야 할 기본적인 환경을 말하며 이 조건을 만족하지 못하는 대부분 비정상 상태로 전이된다.

표 1. RTP 시스템의 중요 요소

주요구분요소	세부 states
RTP 시스템 관련 상태	<ul style="list-style-type: none"> · CHAMBER TEMPERATURE HIGH/LOW · DOOR OPEN/CLOSE · LAMP POWER · GAS FLOW ON/OFF · GAS LEAK · PURGE FAN ON/OFF · COOLING SYSTEM ON/OFF · PYROMETER ON/OFF · POWER ON/OFF · WAFER POSITION, TEMP., SURFACE
ENVIRONMENT 관련 상태	<ul style="list-style-type: none"> · ATMOSPHERE TEMP. · POWER LINE · GAS CONTENT ENOUGH/LACK · COOLING WATER ENOUGH/LACK · UNCERTAIN DISTURBANCE

3.2 RTP 공정 순서에 의한 모델링

RTP의 산화공정(oxidation)을 크게 10단계로 나누어서 모델링하였다. 총 218초가 소요되는 recipe를 선택하였으며 각 n에서 (n+1) 공정으로 넘어가는 사건을 step n으로 정의하였다. step n 사건은 하부시스템에서의 a~m 사건과 달리 일정한 시간 간격을 가지고 일어나는 결정적인(deterministic) 사건이다. RTP에서 일어나는 열 공정은 대부분 특정 온도이상에서 단계적으로 반응이 일어나며 대부분 그 시작점이 약 300℃ 정도가 된다. 그런데 대부분의 온도 추적 제어에서 온도상승 초기에 설정온도와 실제온도와의 차가 크면 온도상승중 damping하는 현상이 생기므로 반응시작온도 보다 낮았을 때 설정온도 또는 웨이퍼 내부온도의 오차가 심할 경우 다시 4의 상태로 돌아가게 하기 위해서 5와 6의 공정을 논리적으로 나누었다.

생산 공정을 진행하는 동안 어떤 이상이 발생하였거나 in-situ sensing되는 값들이 만족한 값을 보내오지 않았을 때 이를 제품의 품질에 얼마나 영향을 미치는 지를 결정하여 input값들을 결정을 하여야 하며 만일 제품에 가해진 손실이 경제적인 한도값을 넘었을 경우 최소의 경제적 비용손실을 가져오는 방법으로 전환을 하여야 한

다. 따라서 각각의 공정 상태에 따라서 같은 사건에 대해서 대처하는 방법과 변화되는 state가 다를 수 있다. 또한 제품에 가해진 손실이 경제적인 한도값을 넘지 않았을 경우는 비록 수율이 낮아지더라도 계속 공정을 진행하는 것이 이익이다. 이는 반도체 공정이 비용에 미치는 요소와 각각의 상태에 따른 사건들을 멤버십 함수(membership function)를 이용, 퍼지(fuzzy)화하여 결정할 수 있다.

표 2. 공정순서 모델링

n step	상태	소요시간 t_{ps} (sec)
1	웨이퍼 전송	5
2	웨이퍼 장착 및 도어 잠금	20
3	예비 퍼지	20
4	램프 전원 ON, 초기화, 안정화	42
5	일체의 반응이 일어나기 시작하는 온도 이하 상승	4
6	일체의 반응이 일어나기 시작하는 온도 이상 상승	12
7	최고 반응 온도 유지	60
8	램프 온도 하강	8
9	마무리 퍼지	42
10	도어 잠금 해제 및 웨이퍼 탈착	5

3.3 전체시스템에서의 모델링

공정흐름에 따른 서브시스템의 상태를 종합하여 상태를 정의한다. 즉 A~J까지의 서브시스템의 상태를 포함하여 모든 상태를 나타내고 합칠 수가 있다. 상태는 각 공정에 따른 하부시스템의 상태를 그림 3과 같이 서브시스템(공정번호)와 같이 나타내어 A1~A10과 같이 대응시키고, error 검출을 A11, 국소 failure발생을 A12번, 광역 failure발생을 A13번, 복구를 A14번으로 대응시킨다. 또한 사건에 있어서는 step사건을 event1~10까지로 대응시키고 그 외의 사건들을 순서대로 정렬시킨다. 상태변화는 아래의 예와 같은 와 같은 해당 상태백터들의 변화 흐름으로 나타낼 수 있고 시스템내의 모든 상태를 포함할 수 있으며 1~10까지의 state들은 충분한 실험데이터를 통해서 묶어서 간략화 시킬 수가 있다.

{1,1,1,1,1,1,1,1,1,1}->{2,2,2,2,2,2,2,2,2,2}->{3,3,3,3,12,3,3,3,3,3}->{3,3,3,3,14,3,3,3,3,3}->{4,4,4,4,4,4,13,4,4}->{1,4,3,3,4,3,4,14,4,3}->...

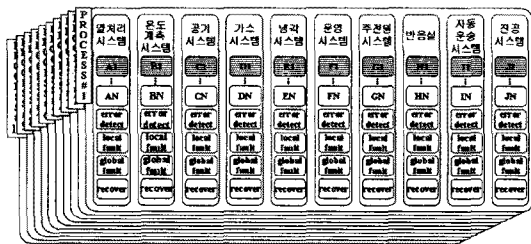


그림 3. 전체시스템의 모델링

4. 시뮬레이션

시뮬레이션의 검증을 위해서 10개의 결정적인 사건과 5번 공정에서 광역 사건을 일으키면서 4번 공정으로 회귀하는 비결정적인 사건 한 개를 포함시켜 시뮬레이션을 하여 계산값과 비교를 하고, 성능지수로 가격함수(cost function)를 정의하여 고장포용이 된 경우와 되지 않은 경우의 값의 비교를 하였다. T는 전체작업시간, t_{ps} 는 한번의 순환공정에 걸리는 공정시간, t_{ps} 를 #번째 공정의 공정시간, t_{ps} 를 고장포용이 없을 때의 t_{ps} , t_{ps} 는

고장포용이 되었을 때의 t_{ps} , B는 웨이퍼 장당 이익, L은 불량웨이퍼 발생에 따른 장당 손실, λ 는 MTTF(Mean Time To Failure)의 역수, 즉 불량웨이퍼를 발생시키는 사건의 평균 비율이라고 하면 식(1)이 되게 된다.

$$T_{psFT} = t_{psE} + (\lambda + \lambda^2 + \lambda^3 + \dots)t_{ps}(2t_{ps} + t_{ps})/2$$

이 값을 가지고 가격함수를 통해 식(2)와 같이 고장포용의 유무에 따른 성능비교를 할 수 있다.

$$C = (\text{평균정품개수} \times \text{웨이퍼당이익}) - (\text{평균불량품개수} \times \text{웨이퍼당손실})$$

$$= \frac{(1-\lambda)BT}{t_{ps}} - \frac{\lambda LT}{t_{ps}} = \frac{T(B-\lambda(B+L))}{t_{ps}}$$

임의로 B,C,T를 10000으로 놓고 10⁶번 반복하여 그 결과를 정리한 표3에서 보면 시뮬레이션을 통하여 역으로 실제 MTTF를 구할 수 있고 고장포용을 통하여 성능지수를 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

표 3. 성능 평가

	$\lambda=0.1$	$\lambda=0.2$	$\lambda=0.3$
T_{psFT} (계산값)	237.333	261.500	292.571
T_{psFT} (모의실험값)	238.446	262.674	292.764
C(고장포용 무)	366972.4	275229.3	183486.2
C(고장포용 유)	419382.1	380700.0	341572.0

5. 결론

많은 시스템은 다양한 동작 특성을 갖고 있으며 그러한 시스템이 모여서 하나의 시스템을 이룬다. 그러나 이 모든 시스템의 정확한 특성을 파악하지 못하는 경우가 많은데 파악을 한다 하더라도 모델링 과정의 오차와 주위환경의 변화 등 예측할 수 없는 변수에 의한 시스템의 오동작과 그 영향등을 구체화, 수치화 시키는 것은 더욱 어려운 일이다. 본 논문에서는 고장 포용을 포함한 DES 모델링의 일반화된 적용방법을 제안하고 구체적인 RTP시스템에 적용을 해보았다. 성능인자를 수율과 관련이 깊은 가격함수로 정하여 고장포용기법을 적용한 결과 뚜렷한 향상을 보였으며, 모의 실험을 통해서 복잡한 변화의 시스템의 성능지수 및 MTTF를 구할 수 있음을 보여 주었다. 또한 시스템이 바뀔 경우에도 쉽게 변경가능하고 다른 시스템과의 연계도 바로 가능한 장점을 갖고 있음을 알 수 있다.

6. 참고문헌

- [1] Attemis Theodoropoulou and Evangelhos Zafriou, "Model Reduction for Optimization of Rapid Thermal Chemical Vapor Deposition Systems", *IEEE Trans. Semiconduct. Manufact.*, vol.11, no.1, pp.85-98, Feb. 1998.
- [2] B. DeHart, K. Johnsgard, "New developments in rapid thermal processing," *Solid State Technology*, pp. 107-109, February. 1996.
- [3] Duane S. Boning and Emanuel M. Sachs, "A General Semiconductor Process Modeling Framework", *IEEE Trans. Semiconduct. Manufact.*, vol.5, no.4, pp.266-280, Nov. 1992.
- [4] Charles Schaper and Krishna Sarawat, "Control of MMST RTP : Repeatability, Uniformity and Integration for Flexible Manufacturing", *IEEE Trans. Semiconduct. Manufact.*, vol.7, no.2, pp.202-218, May 1994..
- [5] F. Roozeboom, "Rapid thermal processing : Status, problems and options after the first 25 years" *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol.303, 1993.