

Special

Thema | 신경망을 활용한 반도체 공정개발

1. 신경망이란?

홍상진 교수
(명지대 전자공학과)

신경망은 이름 그대로 뇌 신경관과 신경세포의 반응 전달과정을 본 따 고안됐다. 손에 어떤 물체를 잡았을 때 손끝에 있는 신경세포는 일종의 전기적인 신호를 발생하고, 그 발생된 신호가 신경관을 통해 다른 신경세포로 전해진다. 이러한 일련의 과정을 통해 우리의 뇌가 물체를 잡았다는 것을 인지할 뿐만 아니라 크기와 감촉, 형태를 아주 빠른 시간 내에 인지하게 된다. 이러한 생물학적인 논리에 근거해 컴퓨터의 연산을 이용해 신경세포망을 모방한 것이 신경망이다.

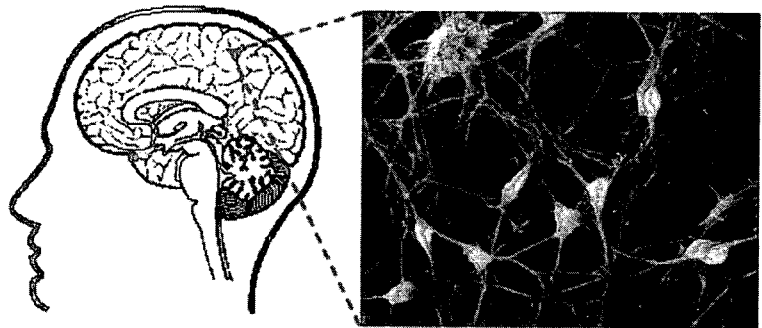


그림 1. 생물학적 인간의 뇌세포 (뉴런)

하나의 신경망 시스템을 사람에 비유해 보자. 갓 태어난 아기는 학습되지 않은 신경망이라고 할 수 있다. 갓 태어난 아기의 뇌에는 아무런 지식이 저장돼 있지 않다. 하지만 반복되는 사람들과의 만남 속에 아빠와 엄마의 목소리나 얼굴을 다른 사람들의 것과 구별할 수 있는 능력이 생기게 된다. 이와 마찬가지로, 3~4세의 아동들은 어떠한 행동을 했을 때 그러한 행동에 대해 부모의 잘했다는 칭찬 또는 하지 말라는 꾸지람으로, 자기들 나름대로의 가치 기준을 세워간다. 신경망도 이러한 원리를 적용해 갓난아기 같은 무지의 신경망 시스템을 반복적인 학습을 통해 스스로 판단을 할

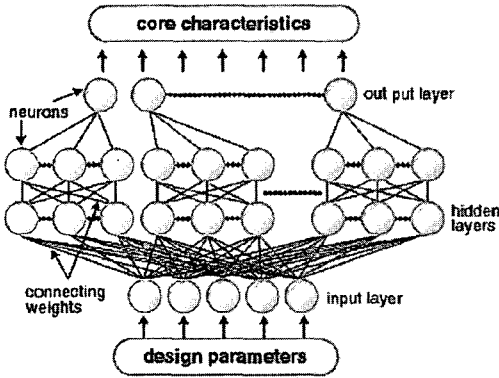


그림 2. 다층구조를 가진 신경망의 구조.

수 있는 시스템으로 창조하는 것이다.

2. 반도체공정과 신경망

컴퓨터가 보편화되기 시작한 이후로 반도체 기술의 발달은 급속히 이뤄졌고, 반도체 생산은 더 저렴한 가격, 더 빠른 속도, 더 많은 용량과 더 작은 크기를 향해서 달려갔다. 이러한 목표를 이루기 위해서는 신기술과 신물질의 개발, 대량 생산뿐만 아니라 오차가 없는 공정이 요구됐다. 공정의 오차를 줄이기 위한 방법으로 통계를 이용한 모델링 기법, 공정 제어 기법들이 대표적으로 사용됐다. 하지만 통계적인 방법의 단점으로 나타나는 선형화 가정이나 실시간 분석 불가능이란 문제점 때문에, 1990년대 초반 이후로 미국의 유명한 회사의 연구기관과 대학의 연구소에서 반도체 공정을 신경망과 접목시키려는 노력을 시도했다. 신경망은 스스로 학습하고 미래를 예측할 수 있다는 장점과 수학적으로 비선형적인 대상에 대해 학습할 수 있다는 장점이 있기 때문에, 복잡한 반도체 공정의 많은 부분에서 기존의 방법보다 성능이 우수하다는 결과가 발표되고 있다 [1].

반도체 공정을 크게 구분하면, 세척(Cleaning), 사진기술(Photolithography), 에칭(Etching), 증착(Deposition) 등으로 나눌 수 있다. 현재는 이들 모든 분야에서 신경망을 이용해 다각도의 연구가 진행 중이며, 특히 에칭 부분에서의 연구가 가장 활발하다.

에칭은 크게 습식 에칭과 건식 에칭으로 나뉘고, 진공 상태의 플라즈마를 사용하는 건식 에칭이 신경망 적용의 대상이 된다. 플라즈마 에칭은 복잡한 물리적, 화학적인 반응을 통해 이뤄지며 그 반응이 비선형성을 강하게 갖고 있어 통계적인 방법은 허용치 이상의 오차를 만들어 내기도 한다. 다음 장에서는 에칭을 중심으로 신경망 연구의 예와 실제 적용의 예를 들어 보겠다.

3. 반도체 생산공정제어를 위한 신경망의 활용

공정제어에 쓰이는 보편화된 방법은 통계적인 해석을 이용한 것이다[2]. 통계를 이용한 공정제어의 방법으로는 관리도(Control Chart)를 이용한다. 일

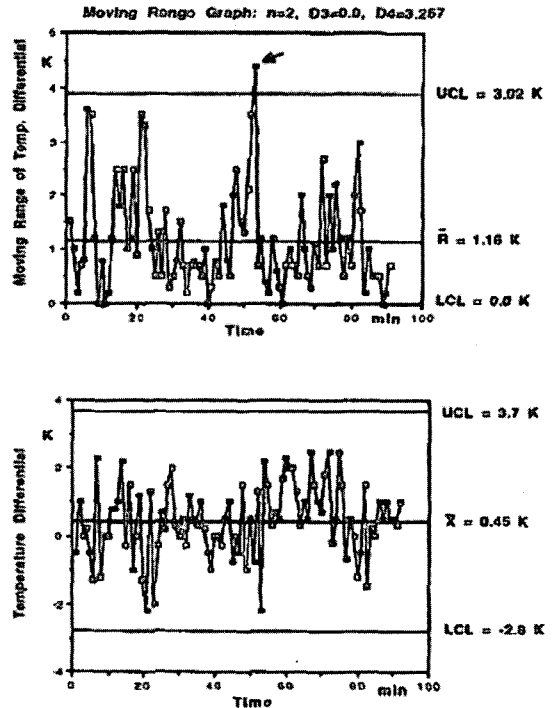


그림 3. 폴리실리콘 리액터의 온도제어 관리도[2].

정기간 동안 수집된 데이터에 대한 확률 분포 모델을 기초로 하여 측정치 평균과 분산에 의한 관리도를 작성하고 그 관리도에 따라 공정의 이상 유무를 확인할 수 있는 방법이다.

다음에 설명하는 바와 같이 통계적인 방법은 많은 부분에서 선형화를 가정하고 이뤄지며, 일련의 공정이 끝난 후에 측정된 값에 근거를 두기 때문에 실시간으로 적용할 수가 없다. 하지만 플라즈마 공정(에칭 또는 증착) 등의 핵심적인 공정은 매우 복잡하고 비선형적인 특성을 갖고 있고 또한 물리적 해석이 어렵기 때문에 기존의 통계적인 방법으로 만족을 얻기에 부적합하다.

이러한 이유로 신경망이 다음의 일에 대해 새로운 방법으로 부각되고 있으며, 신경망 알고리즘으로는 Feed Forward Error Back-propagation(BP) 알고리즘이 가장 널리 사용되고 있다[3-6].

4. 공정모델링

입력과 출력의 관계를 설명하기 위한 모델링의 방법으로 실험 계획법, 회귀분석이나 응답 표면법이 보편적으로 사용되는 방법이다. 이러한 방법들을 사용하기 위해서는 많은 실험 데이터가 필요하고, 많은 실험으로 인한 실험비용은 상당하다. 하지만 비선형적인 입력과 출력의 관계를 잘 해석하는 능력을 갖고 있는 신경망을 이용하면 제한된 데이터를 갖고도 더 정확한 관계를 알아낼 수 있으므로 신경망을 이용한 모델링이 기존의 통계적 방법보다 우수하다. 이것을 증명하기 위해 많은 연구들이 진행됐으며 긍정적인 결과들이 발표됐다[7].

미국의 조지아텍에서 발표된 바에 의하면, 반도체 후공정에서 Via Hole의 에칭은 배선공정상에서 중요한 공정으로 간주 된다. 불완전한 Via의 형성은 배선의 Open Circuit을 만들어 낼 수 있으며, 기형적인 Via 또한 필요이상의 또는 이하의 전기적 저항성을 유발할 수 있으며, Via의 비정상적인 에칭으로 인해 Via 속에 금속을 채우는 다음 공정에 영향을 줄 수 있다는 점이다. 후공정에서 흔히 사용될 수 있는 절연막중 BCB(Benzocyclobutene)의 Via 에칭공정의

모델링에서는 Optical Emission Spectroscopy를 이용하여 실시간으로 공정상태를 파악하며 취득된 실시간 데이터와 그 때의 공정파라미터를 매칭시키고, 에칭이 끝난 후 측정된 웨이퍼 상의 에칭 프로파일

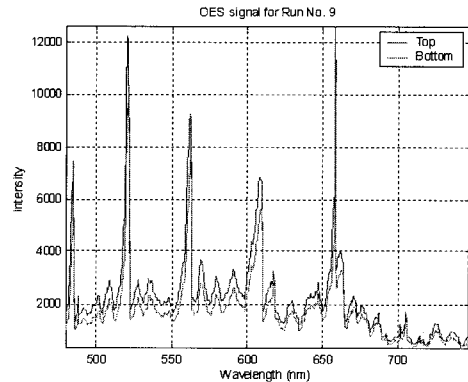


그림 4. BCB 에칭의 Optical Emission Spectra.

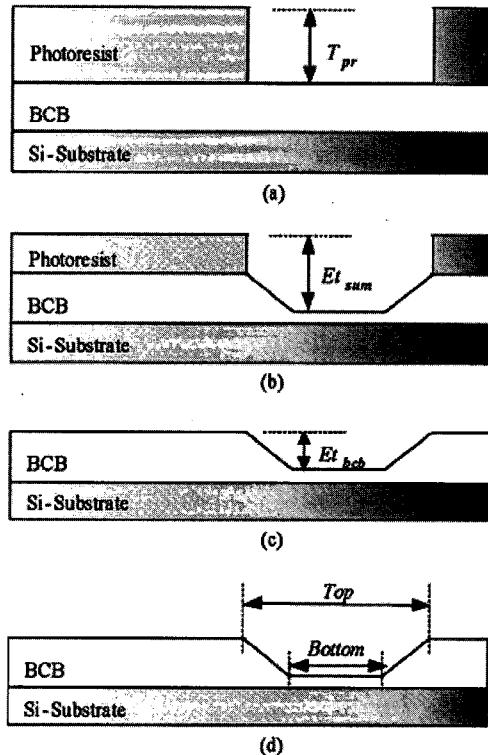


그림 5. Via 에칭 패턴 측정 방법.

에 매핑을 하는 연구가 진행되었다. BCB라는 물질은 저유전률 물질로 신호의 전달속도를 향상시킬 수 있고, 배선간의 커패시턴스를 낮출 수 있는 물질이므로 후공정의 절연막으로 사용될 수 있다. 특히, Spin-on Polymer인 점에서 그 장점이 있으나, BCB는 Divinylsiloxane-bisbenzocyclobutene(DVS-BCB) Monomer에서 형성된 실리콘을 포함하고 있는 폴리머이기 때문에 드라이에칭으로만 그 패턴의 식각이 가능한 단점이다.

4가지 공정변수(SF6, O2, Pressure, RF Power)를 변화시켜 다양한 실험조건을 형성시키기 위해 실험을 위한 시스템적인 접근방법으로 알려져 있는 실험계획법을 통하여 에칭의 조건을 형성하였다. 24 완전인자요인실험을 통하여 에칭공정이 이루어 졌으며 일정한 시간이 지난 후 에칭이 된 패턴의 측정을 정의하기 위해 그림5와 같은 방법으로 측정을 하고 아래의 수식을 이용하여 에칭결과를 수치화 하였다. 이렇게 수치와 된 에칭패턴을 신경망으로 모델링한 결과 평균 3%이하의 오차율을 보였으며, Etch Rate에 대한 모델의 평가가 그림6에 제시되어 있다.

국내에서도 세종대 김병환 교수팀이 신경망 예측 모델을 이용해 반도체 플라즈마 공정변수의 마이크로트렌치에 대한 영향을 삼차원적으로 시뮬레이션한 결과, 고압에서의 전력의 영향과 저전력에서의 압력의 영향이 서로 상충하는 등, 플라즈마 조건에 따라 마이크로트렌치에 대한 공정변수의 영향이 상당히 복잡함을 밝혔다. 이 연구팀은 새로운 학습 알고리즘을 개발해 신경망 이용 플라즈마 식각 공정모

델을 소자의 신뢰도를 떨어뜨리는 마이크로트렌치(반도체 패턴의 측면 하단부 양쪽이 미세하게 파이는 현상) 생성조건 연구에 최초로 적용했다고 밝혔다. 이로써 연구팀은 신경망 모델의 응용범위가 넓어졌을 뿐 아니라 신경망을 이용하지 않은 기존 모델링 방식보다 약 75% 예측성능이 향상됐다고 밝혔다[2].

플라즈마는 고온에서 음전하를 가진 전자와 양전하를 띤 이온으로 분리된 기체상태로, 전하분리도가 매우 높으면서도 전체적으로 음과 양의 전하수가 같아 중성을 띤다. 반도체 소자는 여러 공정을 거쳐 제조되며 이중 플라즈마를 이용한 식각과 증착 공정은 박막의 증착과 미세 패턴 형성에 활발히 이용되고 있다. 일반적으로 플라즈마 공정에는 압력·가스·전력 등의 변수가 관여하고 있으며 미세한 변화에 따라 플라즈마 특성이 크게 변화되는데 이는 패턴의 이상을 야기해 결과적으로 소자 수율을 저하시키는 요인이 된다. 따라서 효과적인 공정 제어를 위해 플라즈마 예측모델이 중요한 역할을 하고 있다.

그러나 지금까지 주로 쓰이고 있는 물리적 모델은 수식의 정립 과정에 여러 가지 가정이 설정되기 때문에 신뢰도가 저하되며 계산에 많은 시간이 소요된다. 또 모델 변경이 어려워 새로운 장비나 공정의 최적화에 적합하지 않다. 이에 비해 인간의 뇌 기능을 컴퓨터로 모사한 시스템인 신경망은 모델의 형성이 쉽고 예측 정확도가 우수한 모델방식으로, 사전

Lateral etch rate	$L_{BCB} = \frac{Top - Bottom}{2t}$
Selectivity of BCB vs. PR	$S_{PR} = \frac{R_{BCB}}{R_{PR}}$
Uniformity within wafer Anisotropy	$U = \left\{ \frac{R_{BCB,C} - R_{BCB,E}}{R_{BCB,C}} \right\} \times 100$
Anisotropy	$A = \left(1 - \frac{L_{BCB}}{R_{BCB}} \right) \times 100$

그림 6. BCB 에칭의 Etch Rate 모델의 성능평가.

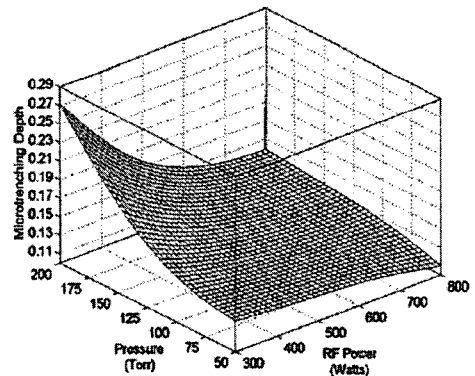


그림 7. 마이크로트렌치 깊이에 대한 표면반응도[7].

에 실험을 통해 체계적으로 수립한 데이터의 실제 값에 맞추기 위해 여러 보정을 반복하고 이를 테스트하는 학습과정을 통해 만들어지며, 모델이 만들어지면 일정한 범위 안에서 임의의 입력값에 대해 결과가 산출된다. 따라서 가정이 필요 없고 실험하지 않은 조건에 대해서도 예측할 수 있어 공정의 질을 높일 수 있다.

5: 공정최적화

반도체 생산 공정은 비용이 많이 드는 공정이므로 언제나 최적화문제가 중요하게 제기된다. 최적화 문제는 앞에서 서술되었듯이 신경망이나 유전자 알고리즘으로 해결할 수 있다. 버클리 대학은 신경망으로 최적화된 폴리 실리콘 증착을, 조지아 공대는 유전자 알고리즘을 이용한 최적화된 증착 레서피 합

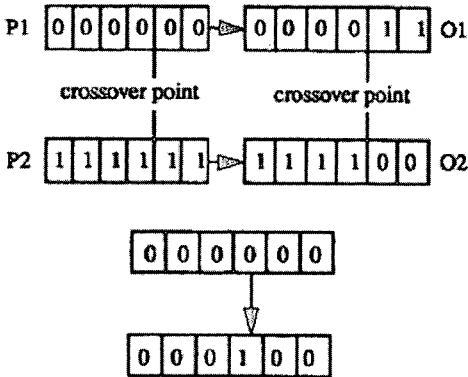


그림 8. 유전자 알고리즘의 crossover and mutation.

	% Non-Uniformity	Permittivity	Residual Stress	Impurity Level (H ₂ O/SiO ₂)
SiH ₄ (sccm)	335	368	369	257
N ₂ O (sccm)	613	673	411	662
Temperature (°C)	352	376	280	214
Pressure (torr)	1.68	1.19	0.89	1.67
RF Power (watts)	102	145	143	137
Simulation Result	0%	3.04	-0.001 MPa	0.37% / 0.03%
Measured Result	8.67%	4.02	-102.6 MPa	1.64% / 4.31%

그림 9. 유전자 알고리즘으로 합성된 레서피의 예[8].

성에 성공했다[8].

Crossover와 Mutation을 거듭하여 여러 가지 가능한 최대의 조합을 이루어, 그 조합들의 결과를 비교하는 방법을 근간으로 하는 유전자 알고리즘은 신경망과 유사한 방법이며, 이를 통해 최적의 Recipe를 찾는데 효과적으로 사용될 수 있다.

6. 공정제어

기존의 보편화된 반도체 공정 제어의 방법은 통계적 공정제어(Statistical Process Control)다. 각각의 공정마다 과거에 측정된 값을 근거로 허용 한계선(Control Limits)을 정해 놓고, 공정이 끝난 후에 측정해 그 공정의 이상 유무를 판단하는 방법이다. 이 방법은 하나의 공정이 끝난 후에 측정된 값을 근거로 하기 때문에 실시간 제어가 불가능하다는 단점이 있다. 앞서 설명한 바와 같이 신경망은 공정의 모델링에 뛰어난 능력을 갖고 있고, 과거의 기록에 근거를 두고 미래를 예측할 수 있는 예측 모델링 기능 때문에 공정 제어에 응용되고 있다. 기존의 제어 이론과 접목된 신경망 제어 시스템(Neural Control System)은 더 이상 놀라운 신기술이 아니다. 태양열 전지를 생산하는 미국의 Kopin이라는 회사는 신경망 제어 기술을 이용해 높은 함량의 태양열 전지를 생산하는 데 성공했고, 벨연구소에서는 초과 예정 시간을 계산하는 데 신경망을 사용했다. 또한, MIT 대학과 조지아 공대는 광학 센서(Optical Emission Spectroscopy)와 분자 분석기(Mass Spectroscopy)를 이용한 실시간 센싱과 제어 방법을 신경망에 적용해

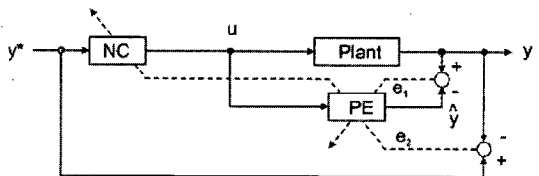


그림 10. Indirect Adaptive Control Scheme[10].

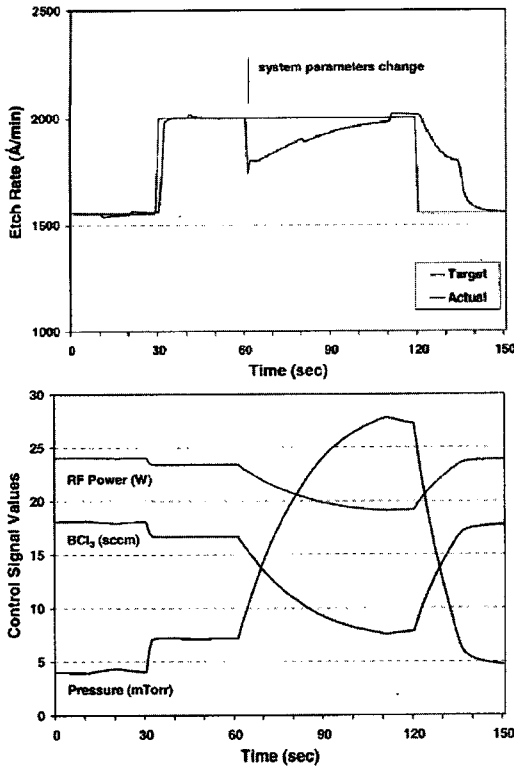


그림 11. Indirect Adaptive 제어기의 성능평가.

플라즈마 에칭에 활용하고 있다[9, 10].

7. 결론

인간의 생물학적인 논리 사고에 근거하여 반복적인 컴퓨터 연산으로 표현을 하는 신경망은 1980년대 이후로 수많은 연구를 통해 많은 발전을 가져 왔으며 1990년대 이후 소수의 연구팀들에 의해 반도체 공정 분야에 적용이 되기 시작하였다. 과거에는 신경망이란 소위 블랙박스로 표현된다는 점 때문에 많은 신뢰를 얻지 못하였음에도 불구하고, 최근에는 반도체 공정에 신경망이 활용되는 연구가 증가하고 있으며, 일부 양산을 목적으로 하는 기업체에서도 적극적으로 받아들여지고 있는 추세이다.

일례로, 미국 IBM의 MLC 패키징 부서에서는

IBEX Process라는 회사와 합작으로 IBM의 반도체 생산팀에서 신경망 프로젝트를 처음 시작할 때는 많은 어려움이 있었다고 한다. 팀에 합류할 당시는 두 번째 신경망 프로젝트를 시작한 시점이었다. 많은 비용이 지출되는 프로젝트였지만 결정권을 갖고 있는 사람들이 신경망에 대한 지식이 없었기 때문에, 마법과도 같이 계산돼 나오는 결과에 대한 투자를 꺼려했던 것이다. 프로젝트 진행 후 최종 발표 때에도 몇몇 사람들의 입에서는 ‘신경망이 뭔지도 모르겠고 아직도 그 테스트 결과를 믿을 수가 없다.’는 말이 들렸지만, 신경망 시스템의 설치 3개월 후의 결과는 불신감을 말끔히 씻어줬다. 신경망을 통한 시스템 모델링과 과거의 에칭 공정 데이터를 바탕으로 한 결과의 예측이 선행됐고, 장비의 사용시간과 정비 기록을 바탕으로 미래에 예측되는 고장 부분의 정비를 권해 주는 신경망시스템으로 한 대의 양산장비에서 기대이상의 비용을 절감할 수 있었다.

현재 미국의 반도체 학계와 업계에서는 공정과 장비에 대해 실시간 진단과 제어를 꿈꾸고 있다. 진공 상태에서 이뤄지는 작업이 많기 때문에 작업이 끝나기 전까지는 공정의 결과를 알기가 불가능하지만, 이러한 제약에도 불구하고 몇 가지 센서를 사용해 장비 및 공정 상태를 진단하여 오류공정으로 인한 손실을 최소화하고자 하는 움직임이 있다. 실시간 진단이 효과적으로 이뤄진다면 공정이 잘못 되기 전에 바로 잡을 수 있고, 이에 따라 공정 실패로 인한 손실을 0으로 줄일 수 있다. 이러한 면을 볼 때 향후 신경망이나 유전자알고리즘은 또 한 번 큰 역할을 할 것이다.

참고 문헌

- [1] C. Himmel and G. May, "Advantages of plasma etch modeling using neural networks over statistical techniques," IEEE Trans. Semi. Manufac., Vol. 6, No. 2, p.103, May 1993.
- [2] C. J. Spanos, "Statistical process control in semiconductor manufacturing," Proceedings of the IEEE, Vol. 80, No. 6, p.819, Jun. 1992.
- [3] E. Rietman, E. R. Lory, "Use of neural networks in modeling semiconductor manufacturing

processes: an example for plasma etch modeling," IEEE Trans. Semi. Manufac., Vol. 6, No. 4, Nov. p.343, 1993.

[4] B. Kim and G. May, "An optimal neural network process model for plasma etching," IEEE Trans. Semi. Manufac., Vol. 7, No. 1, p.12, Feb. 1994.

[5] F.M. Salam, C. Piwek, G. Erten, T. Grotjohn, and J. Asmussen, "Modeling of a plasma processing machine for semiconductor wafer etching using energy-functions-based neural networks," IEEE Trans. Semi. Manufac., Vol. 5, No. 6, p.598, Nov. 1997.

[6] S. Hong, G. May, and D. Park, "Neural network modeling of reactive ion etching using optical emission spectroscopy data," IEEE Trans. Semi. Manufac., Vol. 16, No. 4, pp. 598-608, Nov. 2003.

[7] Y.L. Huang, T.F. Edgar, D.M. Himmelblau, and I. Trachtenberg "Constructing a reliable neural network model for a plasma etching process using limited experimental data," IEEE Trans. Semi. Manufac., Vol. 7, No. 3, p.333, Aug. 1994.

[8] S. Han and G. May, "Using neural network process models to perform PECVD silicon dioxide recipe synthesis via genetic algorithms," IEEE Trans. Semi. Manufac., Vol. 10, No. 2, p.279, May. 1997.

[9] D. A. White, D. Boning, S. W. Butler, G. G. Barna, "Spatial characterization of wafer state using principal component analysis of optical emission spectra in plasma etch," IEEE Trans. Semi. Manufac., Vol. 10, No. 1, p.52, Feb. 1997.

[10] D. Stokes, G. May, "Real-time control of reactive ion etching using neural networks," IEEE Trans. Semi. Manufac., Vol. 13, No. 4, p.469, Nov. 2000.

저|자|약|력



성 명 : 홍상진

◆ 학 력

- 1999년 명지대 전기전자공학부 공학사
- 2001년 미국 조지아텍 공학석사
- 2003년 미국 조지아텍 공학박사

◆ 경 력

- 2001년 - 2001년 미국 IBM, East FishKill, Process Engineer
- 2004년 - 2004년 일본 동북대 유체과학연구소 외국인 특별연구원
- 2004년 - 현 재 명지대 전자공학과 조교수

