

플라즈마 프로세스의 최신 제어 기술

성열문 <경성대학교 전기전자공학과 교수> · 박원주 <영남대학교 전기공학과 교수>

1 기술의 개요

1.1 플라즈마프로세스의 특징

플라즈마 프로세스를 고온의 열 프로세스와 비교해서 그 특징을 들면 다음과 같다.

- ① 저온 프로세스이므로 기판재료의 제약이 적다.
- ② 열적 비평형 상태의 새로운 재료의 합성이 가능
- ③ 다양한 프로세스의 제어가 가능
- ④ 이온이나 전자에 의해 표면의 여기(勵起)나 방향성이 있는 재료 프로세스가 가능

이러한 특징을 살려 글로벌플라즈마는 박막(얇은막)형성이나 에칭에 이용되고 있다.

한편 위에 든 특징은 그대로 플라즈마프로세스의 문제점이기도 하다. 즉

- ① 방전용 전원이 필요하고 장치구성이 복잡하고,
- ② 열적으로 비평균적재료가 제작되기 때문에 물성적으로 불안정하며,
- ③ 외부조건에 대해 민감하고 정밀한 제어가 필요
- ④ 이온이 막중에 스며들기 때문에 데미지나 차지업(charge up) 등이 문제가 된다.

특히 ③에 기술한 플라즈마 제어가 큰 과제이다. 플라즈마를 보다 적합한 조건에 최적화시키기 위해서는 제어 파라미터를 늘릴 필요가 있으나, 동시에 그것은 불안정함의 요인을 늘리는 것이기도 하며, 최적화

된 조건의 유지도 중요하다.

1.2 플라즈마프로세스의 과제

위에서 서술한 것과 같이 플라즈마 프로세스는 여러 가지 장점을 가지는 반면, 제어를 잘못하거나 간과하면 본래의 목적을 달성할 수 없는 경우가 있으므로 주의가 필요하다.

플라즈마 CVD등의 박막형성 플라즈마에 있어서는 재료특성의 개선과 함께 성막속도의 증대도 요구되고 있다. 동시에 플라즈마 중에서 발생하는 먼지가 기판에 부착하는 문제도 있어서, 이러한 해결요소들을 모두 충족시켜야 하고, 하드(장치)및 소프트(성막 조건) 면에서의 개발이 진전되어야 한다. 일반적으로 엄격한 공정일수록 허용되는 조건의 범위는 좁아진다. 그러나 플라즈마 주위환경에 대한 민감성이나 재료의 불안정성이 영향을 미쳐 최적화된 조건으로 설정했음에도 불구하고 막 특성이 저하되는 경우도 발생한다.

이상의 문제점은 막 특성에 영향을 주는 플라즈마 파라미터를 계측·제어하여 최적의 플라즈마 분위기를 만들어 주면 된다. 따라서 플라즈마 파라미터를 정확히 계측하고, 모니터링해야 할 필요가 있다. 한편, 플라즈마 속에서 일어나고 있는 물리적 또는 화학적 현상을 모니터링하여 파라미터를 제어할 수 있으면,

성막 조건을 프로세스화 할 수 있으므로, 성막효율을 극대화할 수 있다. 이러한 이유 등으로 플라즈마 프로세싱에서 플라즈마 파라메타 계측 및 제어기술 개발의 중요성이 커지고 있다.

2. 플라즈마프로세스의 제어

플라즈마프로세스의 제어의 의미에는 플라즈마의 발생이나 특성을 시스템적으로 제어하는 경우와 플라즈마나 성막을 위해 여러 가지 동작 조건을 소프트웨어로 제어하는 경우가 있다. 본서에서 서술하고 있는 제어의 의미는 후자이지만 여기에서는 양면에서 간단히 다룬다.

2.1 플라즈마의 발생과 제어

2.1.1 플라즈마의 발생

글로벌방전플라즈마의 발생에 있어서 DC전원을 사용하는 경우와 고주파(RF)전원을 사용하는 경우가 있는데 플라즈마 발생 방법으로 방전의 안정성이나 막의 특성 등을 고려하면, DC방전은 그다지 사용되지 않는다. 고주파전원의 주파수로서는 산업용 주파수로 인정되고 있는 13.56(MHz)와 2.45(GHz) 등이 일반적이다. 그러나 그 이상의 주파수라도 외부로 누설이 되지 않도록 차폐가 되면, 사용상의 문제는 없다. 플라즈마 중에서 전자 혹은 이온의 추종이 가능한 주파수는 전자 플라즈마 주파수 혹은 이온 플라즈마 주파수로 결정되지만, 전자에 대해서는 1(GHz)전후 이하 이온에 대해서 수(MHz) 이하이다. 이러한 이온이나 전자의 가속효과를 고려하여 최근에는 VHF대의 주파수 혹은 UHF대의 주파수 등의 이용도 연구·검토되고 있다[1-2].

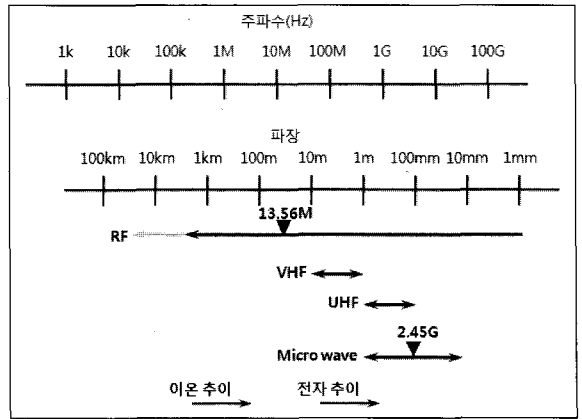


그림 1. 방전주파수와 전자·이온의 추수

표 1. RF및 마이크로파 플라즈마의 발생방법

전자방식	장 치 형 식		
RF방전	용량결합방식	무자장	(일반적)
		유자장	마그네트론
	유도결합방식	원통코일(종래법)	
			평면코일
	에리콘파방식		
마이크로파방전	가두기형		
	개방형	무자장	엔드런치
			표면파
	유자장	ECR	
			휘슬러모드

표 1에서, 일반적으로 이용되고 있는 RF및 마이크로파 플라즈마 발생방법에 대해서 간단히 정리한다.

최근에 종래의 기술을 개량한 고밀도 플라즈마의 발생방법이 활발히 연구·개발되고 있다. RF플라즈마장치에는 금속용기 내에 2장의 평행평판전극을 갖춘 용량 결합형과 석영반응관의 주변에 코일을 감은 유도 결합형 등이 있다. 공업적으로는 용량 결합형이 많이 이용되고 있다. 종래 스퍼터링에 사용되고 있는 전극에 자석을 배열·설치한 마그네트론 방식이 화학 프로세스용 고밀도 플라즈마 원으로서 실용화 되어

있다. 유도결합방식에서는 최근 TCP라 불리는 한 평면에 소용돌이 모양으로 밀린 코일을 이용한 고밀도 플라즈마원의 개발이 진행되고 있다. 그 외에 나선형 안테나를 사용하여 자장 중에 Hellicone wave를 전 반(伝搬)시켜 란다우(Landau)감쇄에 의해 전자를 가속하여 플라즈마를 고밀도화 하는 방법이다[3].

마이크로파 플라즈마에서는 크게 가두기 형과 개방형으로 나누어진다. 전자(前者)는 석영관을 도파관속에 삽입하는 식으로 그 속에 플라즈마를 발생시키는 방법이다. 넓은 면적의 플라즈마를 만들 수는 없지만 국소적으로 고밀도 플라즈마를 생성시켜 다이아몬드 박막의 제작 등에 이용되고 있다. 한편 개방형은 넓게 퍼진 플라즈마를 사용하여 어느 정도 넓은 면적에 박막형성이나 에칭을 실행할 수 있다. 그러나 이 경우 플라즈마밀도를 증대하기 위해 ECR 조건의 875 [Gauss]나 그 이상의 크기의 자장이 이용된다. 최근에는 도파관에 복수의 슬롯을 설치하여 그것을 아테나로 전반하는 마이크로파에 의해 표면과 여기에 의한 플라즈마 발생의 연구도 행해지고 있다. 이 방법에서는 높은 밀도로 넓은 면적의 플라즈마를 만들 수가 있다. 또 반응진공조(反応眞空槽) 자체를 공동공진기(空洞共振器)로 한 엔드라치형도 개발되고 있다[4].

2.1.2 플라즈마의 제어

플라즈마를 제어하는 방법으로 펄스변조나 자장을 사용한 기술이 최근 연구되고 있다. 또 입사하는 이온이나 전자를 제어하기 위해 기판에 대해 바이어스전압을 인가(印加)하거나 특별히 전극을 설치하는 경우도 있다. 펄스변조는 RF나 마이크로파 보다도 낮은 주파수의 펄스로 전원을 온·오프해서 전자의 속도·온도·밀도의 과도기적 변화상태를 이용한다. 플라즈마가 온 혹은 오프한 후 처음에 전자속도가 다음에 전자온도가 그리고 마지막에 전자밀도도 순으로 변화가 생긴다. 따라서 플라즈마를 온한 초기에 있어서는 정

상상태보다도 전자온도는 높다. 역으로 오프 한 순간에는 전자온도는 낮고 중성입자로의 전자부착이 일어나기 쉽다. 이러한 펄스변조의 특징이 플라즈마 프로세스에 이용되고 있다. RF 실란 플라즈마에 의한 아몰퍼스 실리콘 박막제작 과정에 있어서 파워더 발생억제를 위해 펄스변조가 이용되었다. 이 경우는 파워더의 핵이 되는 클러스터(고차 폴리실란)가 성장하기 전에 방전을 오프하여 동시에 과도기적으로 발생하는 높은 에너지 상태의 전자로 해리(解離)를 촉진해서 성장속도를 증대하는 효과를 얻는다. 한편, 드라이에칭에 있어서도 ECR플라즈마에 펄스변조가 응용되어, charge up이나 선택성 등이 양호한 특성을 나타내는 것이 보고되어 있다. 이 예에서는 방전의 오프기간에 있어서 저속전자를 중성입자에 부착시켜 부이온을 생성하고 기판에서 그것을 흡수하여 플라즈마 온기간에 정이온의 축적으로 charge up한 패턴의 상태를 전기적으로 중화하는 효과를 가진다. 또 CHF_3 플라즈마 속의 해리반응이 억제되어 F/CF_2 비가 저하하여 프로로카본 폴리머의 퇴적이 많아진 결과 SiO_2/Si 에칭의 선택성이 증가하는 효과도 있다.

플라즈마에 자장을 인가해서 제어하는 기술은 핵융합 플라즈마나 스파터링 플라즈마에 있어서 오래전부터 연구되어 왔다. 플라즈마화학 프로세스에 있어서 플라즈마 제어기술의 최근 발전은 이들의 응용에 의한 것이 많다. 평행평판형의 글로방전장치의 캐소드측 전극에 영구자석을 삽입하여 전자를 가두는 마그네트론 플라즈마나 자장중의 전자의 사이클로트론 주파수를 마이크로파의 주파수와 공명시켜 전자의 에너지와 밀도를 증대시키는 ECR플라즈마에 대해서는 2.1.1의 플라즈마 발생법에서 서술하였다. 발생한 플라즈마의 가두기나 분포를 제어하기 위한 방법으로서 멀티카스프 자장이나 미러자장이 ECR 드라이에칭에 이용되어 이방성이 큰 에칭이 실현되어 왔다. 또 자기중성 루프 방전의 이용에 의해 고밀도 플라즈마를 임의 공간분포로 제어할 수 있는 것이

보고되어 있다[5].

플라즈마에 대해 기판에 바이어스를 거는 경우는 대향하는 전극과의 사이에 전압을 인가시키거나 기판에 RF를 인가시켜 그 셀프바이어스에 의해 제어하는 방법이 있다. 마이크로와 플라즈마에 의한 다이아몬드 박막제작에 있어서 대향한 전극에 대해서 기판 측에 200[V] 정도의 부 바이어스를 인가해서 이온 발생 밀도를 증대시키고, 에피텍셀 성장이 실현되었다. 또 무전극형 플라즈마장치에 있어서 RF셀프바이어스를 인가해서 기판에 정이온을 끌어당기도록 한 반응성이온에칭(RIE)도 개발되어 있다.

2.2 반응프로세스의 제어

반응성 프로세스를 제어해서 목표로 하는 재료특성으로 하려는 경우 반드시 그 특성을 직접적으로 모니터링하면서 피드백 해야 하는 것은 아니다. 반응프로세스 중에 있어서 시료의 특성을 실시간으로 직접적으로 평가하는 데는 장치적인 곤란함이 있어 필요에 따라서 간접적 방법에 의존하는 경우가 많다. 프로세스 장치나 모니터링 장치의 가능한 범위 내에서 최적의 제어수단을 취할 수 있지만 그 프로세스의 모니터링 및 제어방법에 있어서 그림 2와 같이 4가지의 레벨로 분류할 수 있다. 여기서 반응프로세스를 제어하는 조건을 그림 3과 같이 3가지로 나누어서 생각한

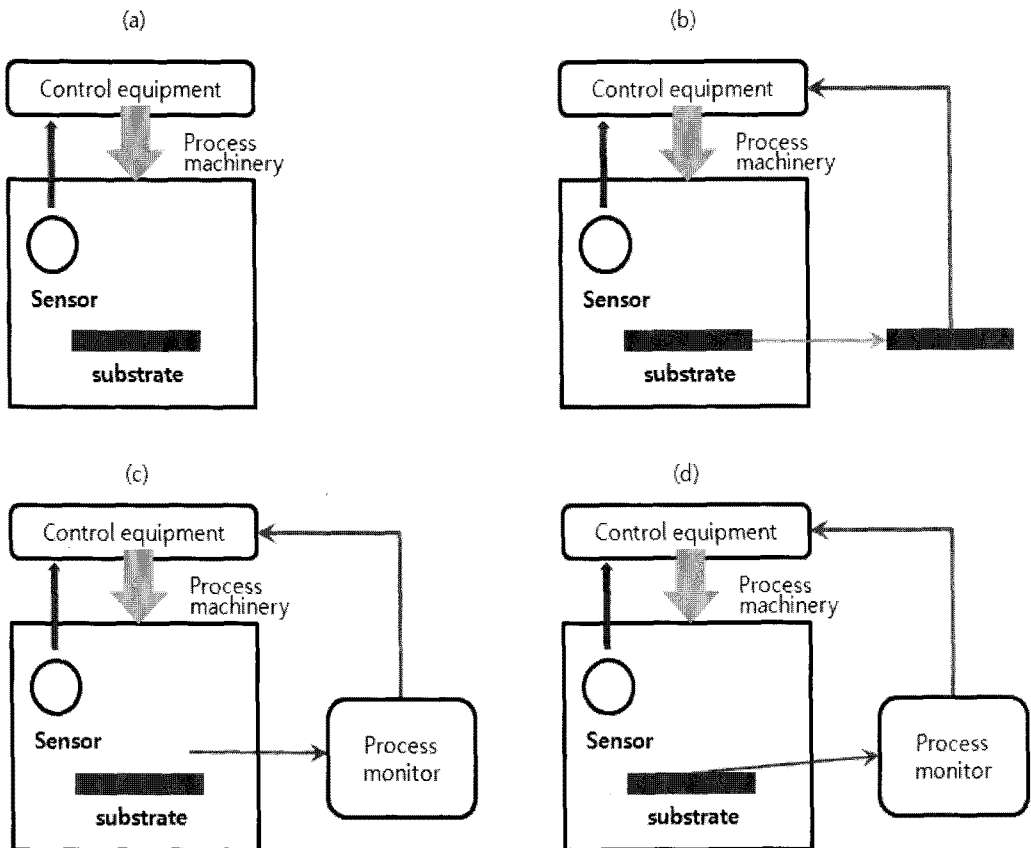


그림 2. 프로세스제어의 4단계 (a)프로세스조건 안정화 제어 (b)프로세스조건 보정안정화 제어 (c)간접검출 인프로세스 제어 (d)직접검출 인프로세스 제어

다. 곧 조작조건은 장치조작에 관계하는 조건으로 압력, 가스유량, 방전전력, 기판온도 등이다. 반응조건이란 플라즈마밀도 온도나 래디컬의 밀도 분포 등의 프로세스 환경의 물리 화학적 상태이다.

재료조건이란 막후, 막조성, 전기전도율 등의 목적으로 하는 시료표면의 재료특성이다.

제1레벨(프로세스조건 안정화제어)에서는 예를 들면 압력계나 전력계 등으로 모니터링하면서 조작조건을 제어하는 것으로 안정된 특성을 얻는다(그림 2(a)). 이 단계는 가장 간단하고 종래의 박막프로세스에 있어서 이용되어온 방법으로 장치조작조건과 막의 특성과의 관계를 미리 조사해 두어 소용(所用) 재료조건을 충족시키도록 조작조건을 일정 범위 내에서 제어한다.

다음 제2레벨(프로세스조건 보정 안정화제어)에서는 제1레벨의 제어에 더해 재료의 특성을 프로세스 처리 후에 평가하고 소정의 특성에 보정해야만 할 다음배치(batch일괄)의 조작조건을 조정한다(그림 2(b)). 이 제어의 방법은 인라인제어(평가)라고도 불리어 지고 있다.

제1레벨 및 제2레벨에서는 반응의 내용은 해석하지 않고 말하자면 블랙박스의 상태이다. 입력조작조건과 출력의 재료특성만을 대조하여 프로세스를 제어하기 때문에 그 상관에 관한 충분한 데이터를 축적이 필요하다. 또한, 미지의 환경인자나 외란요인이 프로세스를 좌우하는 경우도 있어 확실한 제어방법은 아니지만 모니터링에 있어서 기술적 곤란함은 적다.

한편, 제3레벨(간접검출 인프로세스제어)는 기상을 계측에 의해 평가하거나 또는 모니터링 기판의 표면을 프로세스 중에 평가하여 반응조건(프로세스환경)를 파악해서 소정의 값과 엇갈림을 보정해야만 할 조작조건으로 피드백 하는 방법이다(그림 2(c)). 이 단계에서는 본서에서 다루고 있는 말하자면 인프로세스모니터링과 해석·제어기술이 필요하다. 결국 반응과정 중에 들어가 계측을 행하는 것은 재료표면반응

프로세스에 의해 접근한 현상을 파악하는 것이고 또 상세한 해석을 가능하게 한다.

따라서 미지의 환경인자나 외란요인이 존재할 때도 그것에 의해 반응조건이 변화할 경우는 반응조건 그 자체를 파악하고 있으면 그 변동에 알맞은 보정을 행하면 된다. 게다가 프로세스 중에 기판이 운동하고 있거나 고온에 가열되어 있거나 혹은 장치의 배치관계 등에 의한 모니터링의 곤란함을 극복할 수 있는 경우는 직접적으로 재료표면을 그 장소에서 모니터링하게 된다. 결국 최종적으로는 제4레벨(직접검출 인프로세스 제어)로 나타내듯이 직접적인 시료의 특성평가를 행하면서 프로세스조건에 피드백하면(그림 2(d)), 제어의 신뢰성은 가장 높고 성막효율도 향상할 것이다. 그러나 이 경우도 데이터의 해석에 시간이 너무 많이 걸리거나, 일정처리가 진행되지 않으면 측정을 행할 수 없는 경우는 소용 있는 재료조건으로부터 초과했을 때 그 배치를 살리기 어렵고 결과적으로 제2단계와 같은 공정효율이 된다.

실리콘 집적회로의 웨이퍼프로세스에 있어서는 이러한 프로세스모니터링이 절실히 지고 있다. 칩1개당 이익률을 증가시키기 위해 최종적인 성막효율과 설비 코스트와의 균형을 생각할 필요가 있다. 가능한 한 빠른 단계에서 프로세스의 변경을 할 수 있으면 그 후의 쓸데없는 장치가동을 회피할 수 있고 그 부분이 이익으로 되돌아오는 비율은 크기 때문에 개개의 재료 프로세스에 있어서 모니터링 설비를 갖추는 쪽이 이득이라고 생각된다. 많은 인프로세스 모니터링의 수단으로 얻은 계측데이터를 쌓아 그 결과에서 조작조건을 총합적으로 또한 자동적으로 제어할 수 있도록 하기 위해서는 개발단계에 있어서 프로세스내의 물리적·화학적 제량(諸量)과의 상관뿐만 아니라 현상의 확실한 해석도 필요하다.

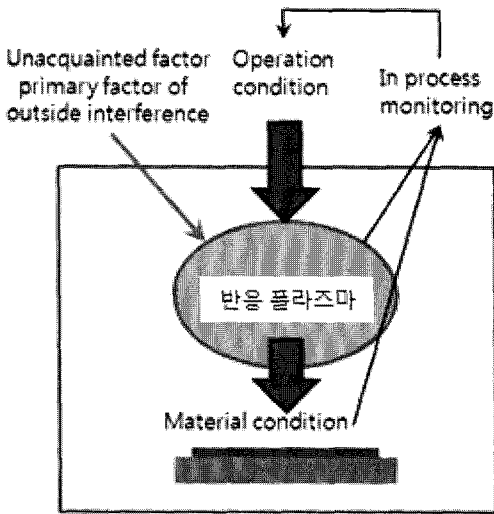


그림 3. 플라즈마 프로세스의 제어

Reference

- [1] S.Oda, Jpn. Appl.Phys.28(10),p.1860.1989.
- [2] S.Samukawa et al.: Appl. Phys. Let t67(10) p.1414,1995.
- [3] J.B.Carter et al.:Semiconductor World 1993, P.J., p.60, 1993.
- [4] S.Matsuo, et al., Jpn. Appl. Phys. 22(4), p.210. 1983.
- [5] T.Uchida : Jpn. Appl.Phys.33(1A),p.43.1994.

◇ 저자 소개 ◇



성열문(成烈汶)

1966년 11월 2일생. 1992년 부산대 전기공학과 졸업. 1994년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997~1998년 일본 Kyushu대학(Pos-doc.). 1998~1999년 Kyushu대학 조수. 2000~2006년 Miyazaki대학 조교수. 2006년부터 경성대학교 전기전자공학부 부교수.

Tel : (051)620-4777

Fax : (051)624-5980

E-mail : ymsung@ks.ac.kr



박원주(朴元柱)

1954년 3월 14일생. 1978년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1993년 (일본) 큐우슈우대학 대학원 졸업(박사). 현재 당 학회 편수위원장. 현재 영남대학교 전기공학과 교수.

E-mail : wzpark@yumail.ac.kr