

## 실시간 플라즈마 특성 조정기

### A real time regulator of plasma properties

이동호<sup>a</sup>, 김병환<sup>b\*</sup>, 이학성

<sup>a</sup>세종대학교 전자공학과, <sup>b\*</sup>세종대학교 전자공학과, 세종대학교 전자공학과

**초 록:** 본 연구에서는 플라즈마 기본 변수인 전자밀도, 전자온도, 그리고 이온 유량을 제어하는 조정기를 설계하였다. 플라즈마 증착장비를 이용하여 상온에서 SiN 박막을 증착하는 과정에서 in-situ 센서인 Wise Probe를 이용하여 데이터를 수집하였다. 수집된 데이터를 이용하여 플라즈마 확인 (Identification) 모델을 개발하고, 이를 이용하여 Linear Quadratic Regulator를 설계하였다. Noise와 Disturbance에 대한 응답특성을 고찰하였으며, 설계된 Regulator는 비교적 안정된 반응을 보였다.

#### 1. 서론

플라즈마는 박막제조에 핵심적으로 이용되고 있으며, 플라즈마 특성은 박막특성에 밀접하게 관련되어 있다. 즉 플라즈마 특성의 실시간 제어를 통해 박막특성의 개선이 기대된다. 플라즈마 밀도와 균일도를 실시간 제어하는 모델 [1]과 플라즈마 증착특성을 제어하기 위한 모델들[2-3]이 개발된 바가 있다. 또한 Radio frequency (rf) 정합망 시스템에 대한 조정기 (Regulator) [4] 가 발표된 바가 있다.

본 연구에서는 플라즈마 특성을 실 시간으로 조정하기 위한 조정기를 보고한다. RF 플라즈마 센서를 이용하여 플라즈마 특성을 수집하였다. 플라즈마 확인 모델을 개발한 후 조정기를 설계하였으며, 조정 성능을 noise와 disturbance를 변화시키면서 평가하였다.

#### 2. 본론

##### 2.1 플라즈마 확인 모델

플라즈마 장비를 이용한 실리콘 나이트라이드 박막 증착공정에서 in-situ 센서 (Wise Probe)를 이용하여 0.5초 단위마다 플라즈마 변수인 전자밀도, 전자온도, 그리고 이온 유량에 대한 자료를 수집하였다. 공정변수로는 Radio frequency 소스 전력, SiH<sub>4</sub> 유량, 그리고 N<sub>2</sub> 유량이었으며, 중심 조건은 각 500 W, 5 sccm, 그리고 20 sccm으로 구성되었다. 각 조건에서 총 80개의 샘플된 데이터를 이용하여 플라즈마의 확인 모델을 아래와 같은 이산치 상태 방정식을 이용하여 추정하였다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) & (1) \\ y(k) &= Cx(k) & (2) \end{aligned}$$

위 식에서 x는 시스템의 상태 벡터이고 y는 출력 벡터, u는 입력 벡터를 각각 의미한다. 상태 방정식 계수들, 즉 A, B, C 는 수집된 데이터를 적용하여 계산된 Least Square Estimation의 coefficient D를 변환하여 얻어졌다. 아래 식은 Autoregressive moving average model의 일반적인 표현이다.

$$y(k) = D1y(k-1) + D2y(k-2) + D3y(k-3) + D4u(k-1) \quad (3)$$

D를 Autoregressive moving average model의 coefficient 형태에 따라 나누고 이와 같이 구해진 계수를 상태 방정식에 적용하여 구한 A, B, C 값은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0.4429 & 0.6280 & -0.1455 & 0.0869 & 0.6233 & -0.0640 & 0.0753 & 0.0078 & 0.0756 \\ 0.0700 & 0.6793 & -0.0805 & -0.0054 & 0.1409 & 0.0034 & -0.0293 & 0.0541 & 0.0819 \\ -0.0609 & -0.0400 & 0.5268 & -0.0435 & 0.3400 & 0.1861 & 0.0238 & -0.0589 & 0.2473 \\ 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0.0006 & 0.0746 & -0.0017 \\ 0.0000 & 0.0006 & -0.0007 \\ 0.0005 & -0.0040 & -0.0018 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0.4429 & 0.6280 & -0.1455 & 0.0869 & 0.6233 & -0.0640 & 0.0753 & 0.0078 & 0.0756 \\ 0.0700 & 0.6793 & -0.0805 & -0.0054 & 0.1409 & 0.0034 & -0.0293 & 0.0541 & 0.0819 \\ -0.0609 & -0.0400 & 0.5268 & -0.0435 & 0.3400 & 0.1861 & 0.0238 & -0.0589 & 0.2473 \end{bmatrix}$$

### 2.3 조정기 성능 평가

조정기 (Linear Quadratic Regulator)는 Quadratic Cost Function의 Q와 R 그리고 feedback gain K를 정의한 후 Simulation Tool인 MATLAB을 이용하여 그림 1과 같이 설계하였다. 그림 1에서와 같이 오차를 줄이기 위해 Integrator를 추가하였고 Noise와 Disturbance의 반응을 살펴보고자 Generator를 추가하였다.

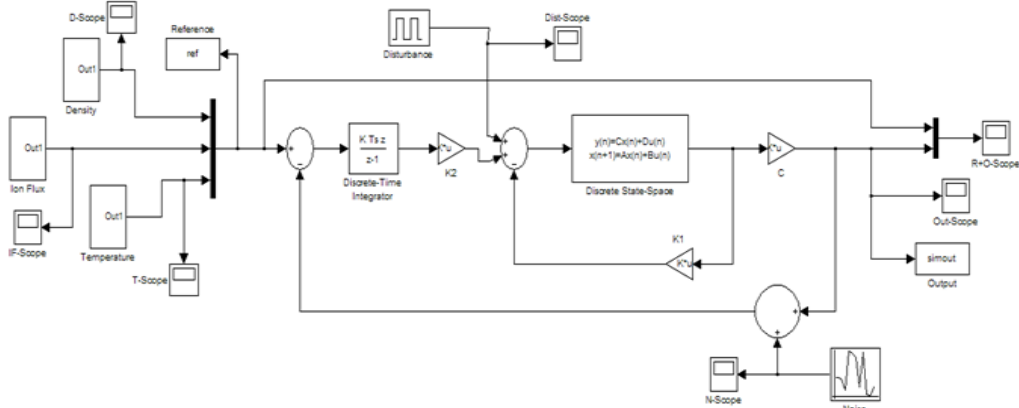


Fig. 1 The Diagram of Linear Quadratic Regulator

입력의 계단 응답에 대한 조정기 응답 특성은 그림 2에 나타내었다. 굵은 선으로 각 응답 변수의 기준 신호를 표시하고 얇은 선은 입력신호에 대한 출력신호를 나타낸다. 그림 2에서와 같이 이온 유량에 대해서 과도 응답이 현저하였고, 나머지 두 응답의 경우 미미한 과도 응답 후 곧 안정되었다. Noise의 영향을 보기 위한 sample noise는 normally Gaussian distributed random signal이 사용되었고 평균 값은 "0"으로 고정시키고 표준편차는 0.05, 0.1, 0.2 3단계로 변화시켰다. 각각의 noise 에서의 RMSE 값은 0.3271, 0.3283, 0.3325로 미미하게 증가하였다. Disturbance는 계단함수와 펄스 발생기를 이용하여 발생시켰으며, 일정구간에서의 크기 (amplitude)의 변화로 반응을 확인한 결과, 그 영향이 미미하였고 곧 플라즈마 특성의 안정화를 이루었다.

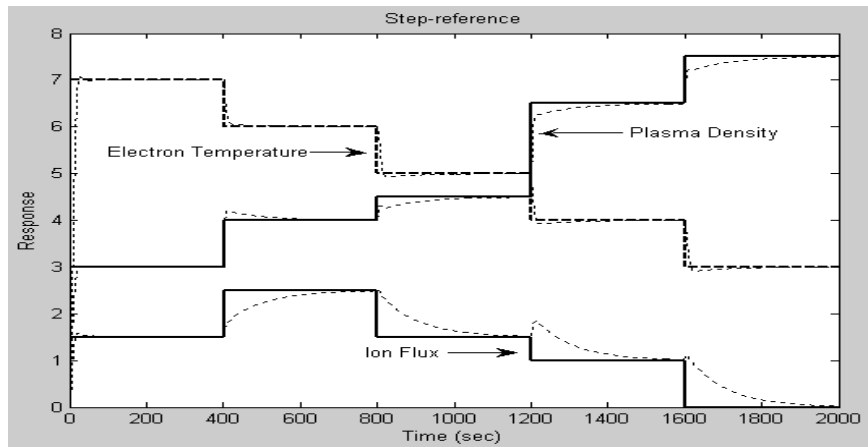


Fig. 2 Real-time responses of LQR

### 3. 결론

본 연구에서는 플라즈마 특성을 조정하기 위한 실시간 LQR을 설계하였다. 박막 증착 중에 Wise Probe를 이용하여 실시간으로 플라즈마 특성을 수집하였다. 설계한 LQR은 Noise와 Disturbance에 강인한 (Robust) 특성을 보였으며, 이는 플라즈마 특성의 실시간 조정이 가능함을 의미한다.

### 참고문헌

1. Naoki Yamada, Peter I. G. Ventzek, Y. Sakai, and H. Tagashira, Simulations of a feedback control scheme for an inductively coupled plasma source for etching applications, J. Electrochem. 143, 1375 (1996).
2. T. J. Knight, D. W. Greves, X. Cheng, B.H. Krogh, IEEE Trans. Semicond. Manufact. 10, 137 (1997).
3. D. Ni, Y. Lou, P. O. Christofides, L. Sha, S. Lao, and J. P. Chang, IEEE Trans. Semicond. Manufact. 17, 221 (1997).
4. B. Kim, J. H. Park, and B. S. Kim, Control of plasma equipment by regulating radio frequency impedance matching, Microelectron. Eng. 71, 7 (2004).