

## 광분광기의 노이즈 감소를 위한 암전류에 대한 실험적 고찰

육영준\* · 이건우\* · 최은종\*\* · 김효영\* · 김기현\*\*

\*한국공학대학교 메카트로닉스공학부, \*\*한국공학대학교 IT 반도체 공학과

### Experimental Study on Dark Current Noise to Reduce Background Voltage Level of Optical Emission Spectroscopy

Youngjun Yuk\*, Keonwoo Lee\*, Eunjong Choi\*\*, Hyoyoung Kim\* and Kihyun Kim\*\*

\*†Tech University of Korea, Department of Mechatronics Engineering,

\*\*Tech University of Korea, Department of IT Semiconductor Convergence Engineering

#### ABSTRACT

As semiconductor devices become highly integrated and process difficulty increases, the need for highly sensitive sensors that can detect micro leaks is increasing. However, the noise contained in the CCD sensor itself acts as an obstacle to detecting fine leaks. In this study, integration time was changed for each condition, the sensor was cooled to 0°C, and the dark voltage level was measured to confirm through experiment the characteristics of the temporal noise included in the CCD sensor, a component of OES (Optical Emission Spectroscopy). When integration time was reduced from 30msec to 10msec, the dark voltage level decreased by about 20.5 % from an average of 151.5mV to 120.5mV. In the case of cooling device, Peltier elements were selected because of their simple structure and small size. During temperature cooling, the target temperature was controlled to within  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  through PID control. When cooled from 20°C to 0°C using this cooling device, it was confirmed that the dark voltage level decreased by about 7% from an average of 147.0mV to 137.0mV.

**Key Words** : Temporal noise, Thermal noise, Shot noise, Image sensor, OES, Peltier element, sensor cooling

#### 1. 서 론

반도체 소자의 집적도를 높이기 위한 반도체 제조기술 및 제조장비에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 특히, 반도체 공정 단계가 복잡해짐에 따라 공정 가스에 의한 오염과 가스의 누설 등에 의한 생산성 저하에 대한 문제가 발생하는 것은 예측이 가능한 일이다. 이에 따라, 반도체 제조 생산성 증가를 위하여 아킹, 오염원, 리크 등의 반도체 공정 이상을 검출할 수 있는 센서 기술이 주목 받고 있으며, 반도체 공정 이상 감지용 실시간 공정 모니터링 센서 기술의 수요는 급속히 증가되고 있다. 반도체

제조 공정에서 사용되고 있는 실시간 공정 모니터링 센서로는 전압-전류 센서, RF 센서, 압력 게이지, 광분광기 (Optical Emission Spectroscopy, OES), 자가 플라즈마 광분광기 (Self-Plasma Optical Emission Spectroscopy, SPOES) 등이 있다.

OES와 SPOES는 시각 과정 등의 반도체 공정에서 발생한 플라즈마의 원소 종류 및 정량을 분석하는 장치로 플라즈마를 활용하는 반도체 공정 제어 및 이상 판단에 활용되고 있으며, 최근에는 반도체 장비의 미세한 갭으로 인한 프로세스 챔버로의 원치 않는 기체누설이 발생할 때마다 변화하는 기체 구성 요소 및 양을 감지하여 이상을 검출하기 위한 센서로서 활용되고 있다 [1-4].

OES의 광을 검출하기 위한 이미지 센서로는 빛을 인식하여 디지털 신호로 변환하는 CCD가 활용된다. 그러나

†E-mail: khkim12@tukorea.ac.kr

CCD센서로부터 기인되는 노이즈가 OES의 감도를 낮추는 요인으로 작용하여 미세 반도체 공정의 이상 현상을 감지하는데 방해요인이 되고 있다. Lee는 SPOES의 신호 감도를 향상시키기 위하여 신호처리 기술을 활용하였다 [4].

본 논문에서는 광분광기에 포함되어 있는 노이즈를 저감하기 위해 노이즈 원인에 해당하는 광수집시간과 온도 조건을 변경해가며 시뮬레이션 및 비교실험을 수행하였다. 즉 이미지 센서에 포함되어 있는 샷 노이즈 (Shot noise)와 열잡음 (Thermal noise)이 이미지 센서의 노이즈에 어떠한 영향을 미치는지 비교 분석하였다.

## 2. 이미지 센서의 노이즈 분석

### 2.1 공정 이상 검출 센서 OES

OES센서는 진공프로세스 챔버 내의 플라즈마를 분광 분석하여 가스성분을 실시간 모니터링하는 센서이다. OES의 구조는 Fig.1과 같이 플라즈마의 광신호를 모아주는 슬릿 (Slit)과 광신호를 파장 및 주파수로 나누어 주는 격자 (Grating), 분광 된 광신호의 파장 별 세기 (Intensity)를 분석하여 기체의 종류 및 세기를 측정하는 CCD 센서로 구성되어 있다 [5]. 이때, CCD 센서는 1-Layer CCD로 구성되어 있다. 격자의 경우 플라즈마에서 발생하는 광신호를 분광할 때 동일한 간격으로 분리시켜 주는 역할을 하기 때문에 CCD 센서에 존재하는 각 픽셀은 파장대와 매칭될 수 있다.

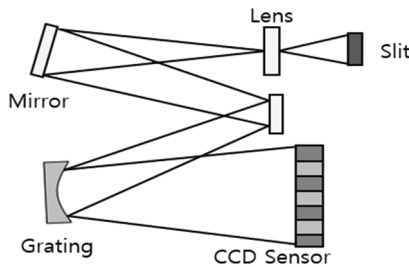


Fig. 1. OES Sensor.

### 2.1.1 이미지 센서 노이즈

이미지 센서에서 발생하는 노이즈 종류는 크게 고정 패턴 노이즈 (Fixed Pattern noise, FPN)와 임시 노이즈 (Temporal noise, TN)로 분류된다[5, 7]. FPN는 주로 2D 이상의 이미지에서 발생하는 노이즈로 픽셀과 픽셀간 감도차이에 의해 발생하는 노이즈이다. FPN는 이미지에서 점이나 선 등이 규칙성을 가지는 형태로 발생한다. 다만 OES의 경우 1-Layer CCD으로 구성되어 있으며, 픽셀 각각의 신호 값을 측정하기 때문에 FPN은 고려하지 않는다[1, 7].

TN는 시간의 변화에 따라 변하는 랜덤노이즈 로써 샷 노이즈, 열잡음, 판독 노이즈 (Readout noise), 그리고 기타 노이즈로 구성된다. TN을 개선시키기 위해서는 해당되는 각각의 노이즈의 분석 및 원인개선이 필요하다.

### 2.1.2 샷 노이즈

샷 노이즈는 광자 (Photon)에 의해 발생하는 노이즈이다. 샷 노이즈는 포아송 (Poisson) 확률 분포를 가지며 다음과 같다.

$$P_N = \frac{(\bar{N})^N * e^{-N}}{N!} \tag{1}$$

여기서  $N$ 은 입자들의 수,  $\bar{N}$ 은 평균값을 나타낸다. 식(1)에서 광자의 수 ( $N$ )가 증가하면 샷 노이즈가 감소함을 알 수 있다. 이미지 센서의 수집되는 광자의 수는 광자 수집 시간 (Integration time)와 비례한다. 때문에 광자 수집시간을 증가시킬 경우 샷 노이즈가 감소함을 기대할 수 있다.

### 2.1.3 열잡음

열잡음 전자 회로 내부의 자유전자들의 랜덤한 열운동에 의해 발생하는 잡음이다. 전자회로 내부의 저항성 소자의 온도가 상승할수록 내부 자유전자의 운동이 활발해지고, 이는 하나의 전압원으로 작동할 수 있다. 때문에, 전자 회로 내부 저항성 소자의 온도가 증가함에 따라 열잡음의 영향이 증가한다. 열잡음은 존슨 노이즈 (Johnson noise)라고도 불리며, 열잡음의 특징으로는 시간영역에서

Table 1. Noises in Image sensor

Category	Fixed Pattern noise	Temporal noise
Characteristics	Fixed Noise	Random noise
Causes	Differences in sensitivity between pixels	Shot noise + Thermal noise + Readout noise ..
Reduction method	DSNU, PRNU	Thermal noise : Temperature reduction Shot noise : Integration time reduction Readout noise : resolution increase

발생하는 변동값 (Fluctuations)은 가우스 분포를 보인다. 또한 모든 주파수 영역 전반에 걸쳐 균일하게 분포하는 특징을 가지고 있다. 이러한 특징으로 열잡음은 백색잡음 (White noise)과 동일하게 취급된다[6-7].

일반적으로 열잡음( $V_T$ )은 다음과 같은 수식으로 구할 수 있다고 알려져 있다[5].

$$V_T^2 = 4kTR\Delta f \quad (2)$$

여기서  $k$ 는 볼츠만 상수를 의미하며,  $T$ 는 주변의 온도,  $R$ 은 센서의 저항값,  $\Delta f$ 는 주파수를 의미한다. 식(2)에서 열잡음은 온도와 비례함을 알 수 있다. 때문에 센서의 온도를 저감시킬 경우 열잡음의 감소를 기대할 수 있다.

### 2.2 노이즈 시뮬레이션

Jord Prangma 등[9]의 연구에서는 CCD 센서의 온도에 따른 압전류 레벨 변화에 대한 연구를 하였으며, 온도 및 광수집시간이 감소할 경우 압전류 레벨이 감소한다고 제안한다. Mikhail Konnik 등[7]의 연구에서는 CMOS, CCD 센서의 노이즈의 수치적 시뮬레이션을 연구하였으며, 본 논문에서 제공한 소스코드를 수정하여 온도 및 광수집시간과 압전류 레벨의 상관관계를 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

제공된 시뮬레이션에서 온도가 감소함에 따라 따른 압전류 레벨  $D_R$  (e-/sec/pixel)는 감소하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 10). 압전류 레벨  $D_R$  (e-/sec/pixel)의 수식은 다음과 같다.

$$D_R = P_A D_{FM} T^{3/2} e^{-\frac{E_{gap}}{2 * kT}} \quad (3)$$

여기서  $P_A$  [ $\text{cm}^2$ ]는 CCD 센서의 픽셀 면적을 의미하며,  $D_{FM}$  [ $\text{nA}/\text{cm}^2$ ]는 300K에서의 figure-of-merit을 의미하며,  $E_{gap}$  [eV]는 온도에 따라 달라지는 반도체의 에너지 갭을 의미하며,  $T$ 는 K일때의 온도,  $k$ 는 볼츠만 상수 (Boltzman's constant)를 의미한다 [7].

또한 제공된 시뮬레이션에서 광수집시간에 따라 압전류간 상관관계를 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다 (Fig. 8). 샷 노이즈가 고려된 압전류 레벨  $I_{dc}$ 는 다음과 같다.

$$I_{dc.e^-} = t_1 * D_R \quad (4)$$

여기서  $t_1$ 는 광수집시간을 의미한다 [5]. 본 수식을 이용한 시뮬레이션은 광수집시간(Fig. 8)과 온도(Fig. 10)가 증가함에 따라 노이즈가 증가하는 결과를 나타낸다.

### 3. 실험장치

TN을 분석하기 위한 실험장치로써 사용된 OES 및 제어용 소프트웨어는 나노텍社의 제품(Fig. 2)을 사용하였다. 해당 제어용 소프트웨어는 Ethernet 통신을 이용하여 PC에서 OES의 광수집 시간을 변경하며 테스트가 가능하다는 점이 있다.

열잡음과 온도의 관계를 확인하게 위해 개발한 냉각장치는 안정성 및 소형화를 고려하여 펠티어 소자를 사용해 개발하였다. 냉각장치에 사용된 펠티어 소자는 펠티어 효과에 의해 양 전극에 전압을 인가할 경우 한쪽면은 발열하고 한쪽면은 냉각하는 소자이다[9-11]. 사용한 펠티어 소자는 Laird사의 16505-302 모델을 사용하였다.

펠티어 소자 및 OES 내부 CCD 센서의 온도는 TDK사의 써미스터(Thermistor)를 사용하였다. 써미스터의 경우 높은 정밀도와 빠른 응답특성을 가져 온도를 모니터링과 동시에 적은 오차범위의 제어가 가능하다. 센서 냉각 장치를 이용하여 OES의 온도가 +0.38 °C ~ -0.24 °C 사이에서의 신호를 측정하였다. 이때, OES의 백그라운드 노이즈 (Background noise)를 측정하기 위해서 플라즈마가 발생하지 않는 상태 및 광이 들어오는 슬릿부를 밀봉한 상태로 테스트를 진행하였다.

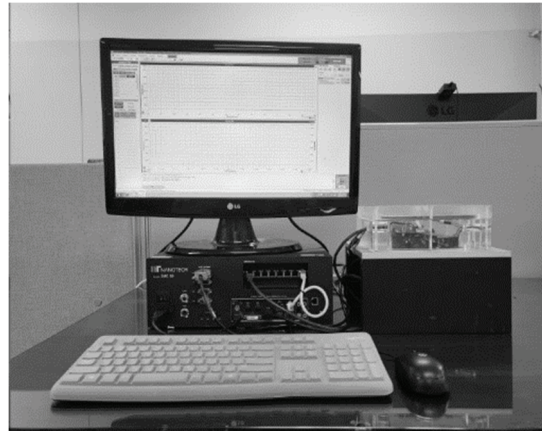


Fig. 2. OES Data acquisition system.

Table 2. Peltier element Specification

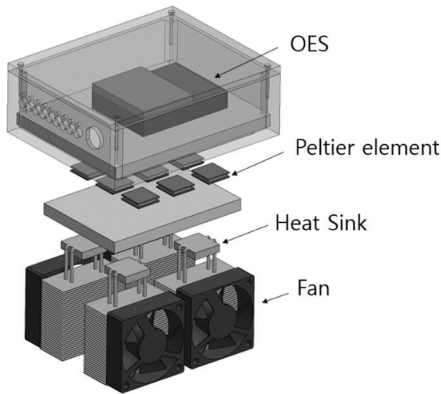
Product No.	16505-302
Q max (W)	16.4
I max (A)	2.8
V max (V)	15.7
dT max (°C)	87

**Table 3.** Thermistor Specification

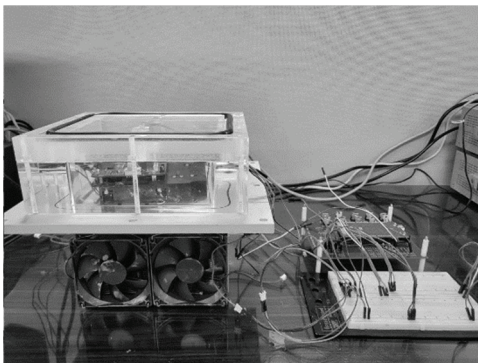
Product No.	B57861S0103F040
Measurement Range (°C)	-55~125
Max. Power (mW)	60
Resistance tolerance (%)	±1

**Table 4.** OES Specification

Number of pixel (pixels)	2048
Spectral range (nm)	200~850
Optical resolution	<0.95nm @25um slit
A/D resolution (bit)	16bit
Integration time (msec)	Min. 7msec
Interval time (msec)	Min. 50msec



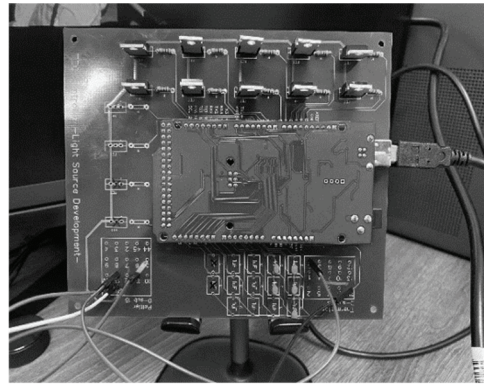
**Fig. 3.** Schematic of OES Cooling device.



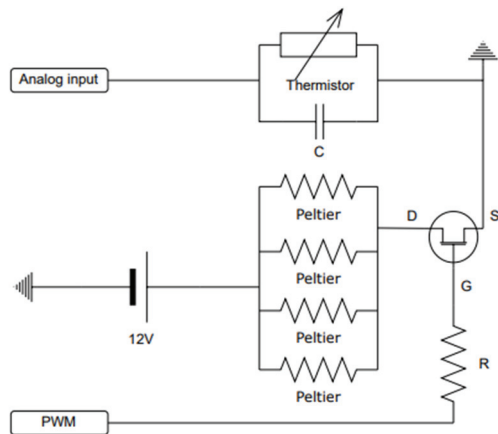
**Fig. 4.** OES cooling system.

센서 냉각장치(Fig3)는 크게 냉각대상(OES), 냉각부, 방열부로 이루어져 있다. 펠티어 소자의 냉각부는 OES 하부 플레이트를 냉각시키는데, 냉각부 온도는 발열부의 온

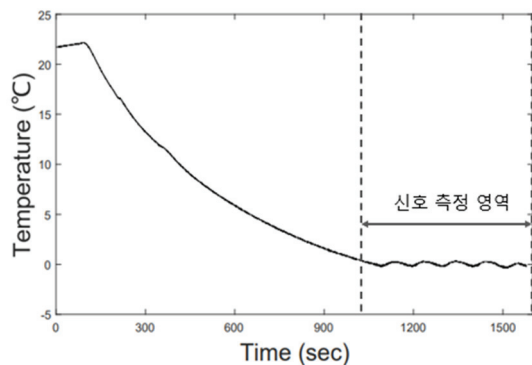
도에 영향을 받는다[11]. 따라서 펠티어 소자의 발열부의 온도를 식혀주기 위해 방열부(Heat sink, Fan)을 이용하여 센서 냉각장치의 냉각성능을 확보할 수 있었다.



**Fig. 5.** Cooling Control board.



**Fig. 6.** Control board Circuit.



**Fig. 7.** Time response of Cooling system.

### 4. 실험 방법 및 결과

#### 4.1 샷 노이즈 실험 방법

제어용 소프트웨어(Fig. 2)를 이용하여 OES의 광수집 시간 10, 30, 50 msec 에서의 노이즈를 각각 측정하여 노이즈를 비교 실험을 진행하였다. 각각의 데이터는 500 msec를 간격으로 수집되었고, 5분동안 측정된 데이터의 평균을 구하여 비교하였다.

#### 4.2 샷 노이즈 실험 결과

시뮬레이션 결과(Fig. 8)와 마찬가지로 광수집 시간이 줄어들수록 암전류 레벨이 감소함을 확인할 수 있었다. 진행한 비교실험(Fig. 8)에서는 50 msec에서 평균 151.5 mV, 10 msec에서 평균 120.5mV의 값을 얻을 수 있었다. 이는 약 31 mV정도의 저감효과를 보였고, 전체 20.5 % 저감됨을 확인할 수 있었다.

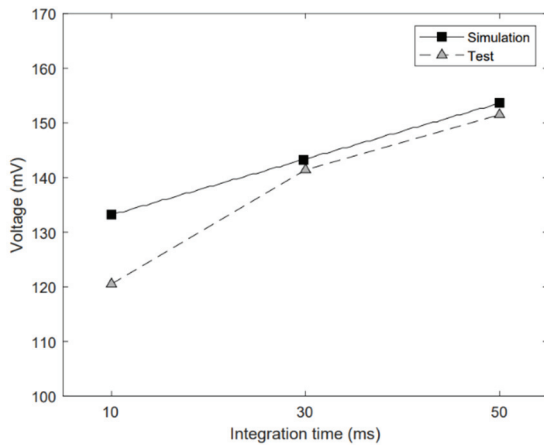


Fig. 8. Darkcurrent of Shot noise.

Table. 5. Simulation & Test result of Shot noise

Integration time (msec)	10	30	50
Simulation	133.2	143.2	153.6
Test	120.5	141.4	151.5
Error (%)	9.53	1.26	1.37

#### 4.2.1 열잡음 실험 방법

OES 내부 이미지 센서의 온도를 낮추기 위하여 펠티어 소자를 이용한 냉각시스템(Fig.3 ~ 4)를 구축하였고, 제어용 보드(Fig.5 ~ 6)를 이용하여 온도센서에서의 데이터 수집 및 펠티어 소자의 제어를 할 수 있는 시스템을 구축하였

다. 위 센서 냉각 시스템을 통해 +0.38 °C ~ -0.24 °C 사이의 온도에서 OES의 신호를 확인할 수 있었다. 각각의 데이터는 500 msec를 간격으로 수집되었고, 5분동안 측정된 데이터의 평균을 구하여 비교하였다.

#### 4.2.2 열잡음 실험 결과

열잡음은 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 온도가 감소할수록 암전류 레벨이 감소함을 확인할 수 있었다(Fig.10). 상온 (20°C)에서 Voltage값은 평균 148.8(mV)의 값을 얻을 수 있었고, 온도 냉각(0°C)시 평균 138.2(mV)의 값을 얻을 수 있었다. 결과적으로 상온 대비 0°C에서 암전류 레벨이 약 10(mV)감소함을 확인할 수 있었고, 이는 약 7.2% 감소한 수치임을 알 수 있다. 또한 상온에서 0°C까지 순차적으로 냉각하였을때, 온도가 감소함에 따라 암전류 레벨이 감소함을 확인할 수 있다.

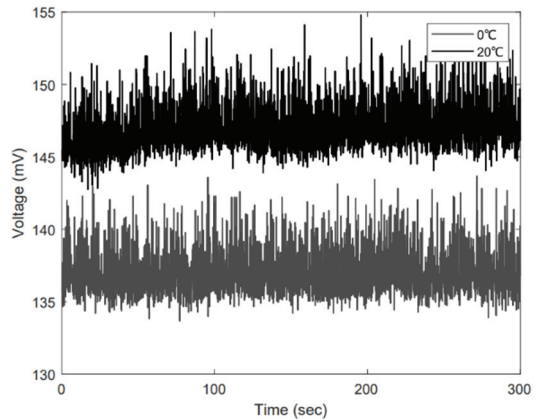


Fig. 9. OES Thermal noise.

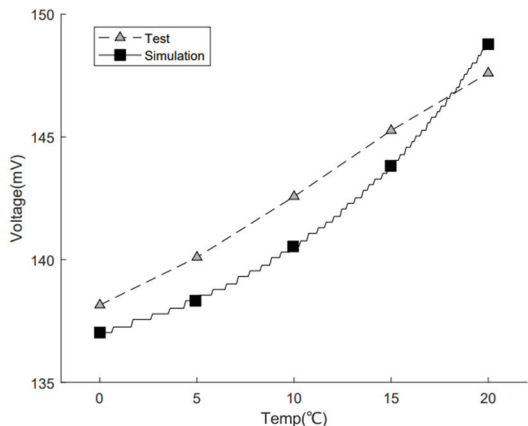


Fig. 10. Darkcurrent of Thermal noise.

**Table 6.** Simulation & Test result of thermal noise

Temperature (°C)	0	10	20
Simulation (Mean)	137.0	140.5	147.6
Test (Mean)	138.2	142.6	148.8
Test (STD)	20.81	20.88	21.68
Error (%)	-0.88	-1.49	-0.81

## 5. 결 론

이미지 센서에 존재하는 노이즈는 FPN와 TN으로 나뉘나, 픽셀 각각의 감도차이에 의해 발생하는 FPN는 픽셀 각각의 값을 측정하는 OES에 있어서 큰 의미가 없어 TN만을 분석하였다. 시뮬레이션 및 수식 통해 OES에 존재하는 TN(샷 노이즈, 열잡음)이 온도 및 광수집시간에 의해 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 또한 실험을 통해 TN는 온도 및 광수집시간과 상관관계가 있음을 확인할 수 있었는데, 광수집시간이 30 msec에서 10 msec까지 감소하였을 때, 암전류 레벨이 약 20.5 % 감소됨을 확인하였으며, 광수집 시간의 양에 비례하여 감소함을 확인할 수 있었다. 마찬가지로 온도 20 °C에서부터 0°C까지 냉각 시 암전류 레벨은 약 7.0 % 감소함을 확인할 수 있었고, 구간별로 측정하였을 때 온도가 감소하는 양에 따라 암전류 레벨 또한 감소함을 확인할 수 있었다.

결과적으로 OES에 존재하는 암전류 레벨은 온도와 광수집 시간을 줄임으로써 개선할 수 있음을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

본 논문의 결과를 바탕으로 추후 반도체 공정( $N^2$ ,  $N^2O$ ,  $NH^3$ ,  $SiH^4$  등 Gas Flow)에서 미세량의 Air(약 4 ppm)를 투입하여 Leak 상황을 구현했을 때, 자가 플라즈마 광분광기에서 신호에 포함되어 있는 TN의 특성을 추가적으로 연구하고자 한다. 두 실험을 통해 TN의 원인과 신호에 미치는 영향 등을 파악하고, 실험 결과를 바탕으로 리크 검출 시스템에 적용하고자 한다.

## 감사의 글

이 논문은 산업통산자원부(MOTIE)에서 지원하는 2023년도 전자부품산업 기술개발(1415185203), 산업혁신인재양성사업(P0008458), 차세대지능형반도체기술개발(20023103) 그리고 한국공학대학교 연구년 지원을 받아 연구되었음.

## 참고문헌

1. S.C.Pyun, On monitoring of gas leak in the plasma vacuum process with optical emission spectroscopy, Center for Vacuum Technology, Korea Research Institute of Standards and Science, 2010.
2. S.C.Kim, A Semiconductor Etching Process Monitoring System Development using OES Sensor, Journal of The Korea Society of Computer and Information Vol.18, No. 3, March 2013.
3. J.J.Cho, Improved Self Plasma-Optical Emission Spectroscopy for In-situ Plasma Process Monitoring : Improved Self Plasma-Optical Emission Spectroscopy for In-situ Plasma Process Monitoring, Journal of the Semiconductor & Display Technology Vol.16, No. 2, March 2017.
4. J.Y.Lee, OES based PECVD Process Monitoring Accuracy Improvement by IR Background Signal Subtraction from Emission Signal, Journal of the Semiconductor & Display Technology Vol.18, No. 1, January 2019.
5. S.G.Do, Noise analysis and noise reduction circuit for CMOS Image sensor, Hanyang University, 2009.
6. Russell S. Brayfield II, Optical Emission Spectroscopy of High Voltage Cold Atmospheric Plasma Generated Using Dielectric Barrier Discharges, Purdue University, 2016.
7. D. R. White, The status of Johnson noise thermometry, metrologia, 1996.
8. Mikhail Konnik, High-level numerical simulations of noise in CCD and CMOS photosensors: review and tutorial, Faculty of Engineering and Built Environment, University of Newcastle, Australia, 2009.
9. Jord Prangma, The effect of cooling CCD detectors for spectroscopy, Ibsen photonics, 2015.
10. Du-Yeol Pang, Temperature Control of the Aluminum Plate with Peltier Module by PWM Current Control, Korean Society for Precision Engineering, 2005.
11. Dong-Ryul Lee, Investigation of the Optimal Cooling Performance Using Peltier Module and Heat sink, Korea Institute of Science and Technology Information, 2006.

접수일: 2023년 11월 27일, 심사일: 2023년 12월 14일, 게재확정일: 2023년 12월 18일