

논문 2012-49-9-32

## 액체의 전기 전도도 측정을 위한 저잡음 검출기 설계

### ( Low-Noise Detector Design for Measuring the Electric Conductivity of Liquids )

김 남 태\*

( Nam Tae Kim )

#### 요 약

본 논문에서는 액체의 전기 전도도를 저잡음으로 검출하기 위하여 동기복조를 이용하는 전도도 검출기를 설계한다. 이를 위하여 검출기는 반송파 발생기, 전도도 검출 셀, 전류-전압 변환기 및 동기 복조기로 구성하며, 복조기의 대역폭을 조정하여 검출기의 신호 대 잡음비(SNR)를 개선함으로써, 액체의 극미한 전도도도 용이하게 측정할 수 있도록 한다. 이의 응용 예로써, 반도체 공정의 공기감시용 전도도 검출기를 동기복조를 이용하여 설계하며, 실험을 통하여 설계의 타당성을 확인한다. 실험 결과, 검출기는 설계 성능에 부합하는 특성을 나타내므로, 동기복조를 이용한 전도도 검출기는 액체의 극미한 전도도 측정에 유용하게 사용될 수 있음을 입증하였다.

#### Abstract

In this paper, design of a conductivity detector using a synchronous demodulation is presented to detect the electric conductivity of liquids with low noise. For the purpose, the detector is constructed by the combination of a carrier generator, conductivity detecting cell, and synchronous demodulator. The signal-to-noise ratio(SNR) of the detector is improved by adjusting the frequency bandwidth of the demodulator, whereby infinitesimal conductivity signals can easily be measured under various noise environments. As an application example, a conductivity detector, which is applied to the air monitoring in a fabrication process of semiconductor chips, is designed using the synchronous demodulation. The validity of the design technique is verified by experiments. Since experimental results are shown to approach the design performance of the detector, the synchronous demodulation proves to be useful to the design of a conductivity detector for measuring the infinitesimal electric conductivity of liquids.

**Keywords :** detector; conductivity; infinitesimal; low noise

#### I. 서 론

전기 전도도(electric conductivity)는 액체의 기본적인 물리화학적 양으로서 용질의 농도 및 이온 이동도의 척도가 된다. 액체의 전도도 측정은 음용수의 오염 수준, 발전소 보일러 용수의 순도, 배터리 전해액의 성능 및 유체 해석 시스템에서 화학 물질의 농도를 결정하는데 사용할 수 있으며<sup>[1-2]</sup>, 공기 포집 및 용해 장치를 이

용하면 반도체 제조공정의 공기감시 시스템에도 이를 이용할 수 있다<sup>[3]</sup>. 이러한 응용에서 전도도 측정의 정확도와 반복성은 검출기 성능의 중요한 요건이 되며, 이를 위해서는 잡음 및 간섭 하에서도 미약한 신호를 효과적으로 처리할 수 있는 전도도 검출기(conductivity detector)가 필요하다.

검출기를 구성하는 여러 방법 중<sup>[4-6]</sup>, 동기복조(synchronous demodulation)는 검출기의 잡음 대역폭을 감소시켜 이의 SNR을 개선하는 효과가 있으며, 복조기 내의 여파기는 통과대역 외의 잡음 및 간섭을 제거하여 검출기의 SNR을 향상시키는 기능을 한다<sup>[7-8]</sup>. 따라서

\* 정회원-교신저자, 인제대학교 전자공학과  
(Dept. of Electronic Eng., Inje University)  
접수일자: 2012년7월4일, 수정완료일: 2012년8월29일

동기 복조기는 전도도 검출기를 구성하는 유용한 요소가 되며, 단일 반송파를 이용하는 액체의 전도도 측정에 있어서도 신호를 저잡음으로 처리하는 중요한 역할을 한다.

본 논문에서는 잡음의 영향을 최소화하는 동기복조를 이용하여 반도체 제조 공정의 공기감시용 전도도 검출기를 회로 레벨에서 저잡음으로 설계한다. 검출기는 액체의 전도도를 효과적으로 검출할 수 있도록 반송파 발생기, 전류-전압 변환기 및 동기 복조기의 조합으로 구성하며, 전도도 및 잡음의 영향을 고려하여 복조기의 대역폭을 적절히 조정함으로써 검출기의 SNR을 개선한다. 또한, 실험을 통하여 설계의 타당성을 확인함으로써, 동기복조를 이용하는 전도도 검출기의 설계가 액체의 극미한 전도도 측정에 유용한 방법임을 입증한다.

## II. 잡음 및 전도도

액체의 전도도를 측정하기 위한 검출기는 그림 1과 같이 주어진다. 검출기는 전도도 검출 셀과 연동하여 사용되므로 이도 함께 표시하였다.

그림 1에서 반송파 발생기는 일정한 진폭과 일정한 주파수로 반송파를 발생시켜 이를 전도도 검출 셀에 공급하며, 셀은 이의 진폭이 그 내부에 흐르는 액체의 컨덕턴스(conductance)에 비례하도록 반송파를 변조한다. 전도도 검출 셀은 피 변조 반송파를 전류의 형태로 출력하므로, 전류-전압 변환기는 이를 전압으로 변환한다. 또한, 동기 복조기는 전압으로 변환된 피 변조 반송파를 기저대역의 컨덕턴스로 동기 검파하며, 증폭기는 증산기로 입력되는 반송파의 진폭을 조절하는 역할을 한다.

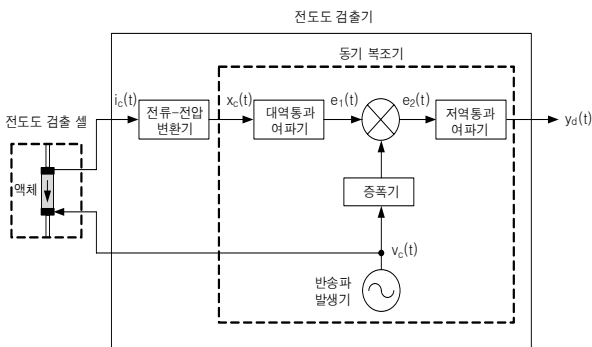


그림 1. 전도도 검출기의 구성도  
Fig. 1. Block diagram of a conductivity detector.

### 1. 반송파 발생기

그림 1에서 반송파 발생기의 출력 신호는 전도도 검출 셀의 변조 반송파 및 동기 복조기의 복조 반송파로 사용된다. 반송파 발생기의 출력은 다음과 같이 주어진다.

$$v_c(t) = A_c \cos(\omega_c t + \theta) \tag{1}$$

여기서  $A_c$ 는 반송파의 진폭이며,  $\omega_c$ 는 이의 각주파수이다.

전도도 검출기는 피 변조 반송파의 진폭에 의하여 전도도를 측정하므로, 변조 반송파의 진폭 안정도는 전도도 측정의 정확도에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 반송파 발생기는 이에 연결되는 부하의 변화, 노화(aging), 전원 및 온도 변화에 대하여 안정된 진폭을 유지하도록 설계하여야 한다. 또한, 이의 고조파 성분도 측정 오차를 초래하므로, 이의 설계 시 파형의 총 고조파 왜곡(total harmonic distortion)도 반드시 고려하여야 한다.

### 2. 전류-전압 변환기

전도도 검출 셀은 변조 반송파를 액체의 컨덕턴스에 비례하는 피 변조 반송파로 변환하며, 이의 출력은 다음과 같이 주어진다.

$$i_c(t) = A_c m(t) \cos(\omega_c t + \theta) \tag{2}$$

여기서  $m(t)$ 는 셀 내 액체의 컨덕턴스이고,  $i_c(t)$ 는 이에 의하여 변조된 양측파대(double-side band) 신호이다.

식 (2)에서 피 변조 반송파는 전류이므로, 이를 효과적으로 처리하기 위해서는 전압으로 변환할 필요가 있다. 그림 1에서 전류-전압 변환기의 전달 저항(transfer resistance)을  $R$ 이라고 하면, 이의 출력은 다음과 같이 주어진다.

$$x_c(t) = R A_c m(t) \cos(\omega_c t + \theta) + n(t) \tag{3}$$

여기서  $n(t)$ 는 검출기 외부 및 전류-전압 변환기에 의하여 발생하는 잡음이다. 식 (3)에 의하면 전류-전압 변환기는 검출기의 감도를 높이기 위하여 저잡음의 소자로 구성하여야 한다.

### 3. 대역통과 여파기

그림 1에서 대역통과 여파기는 액체의 컨덕턴스 신호를 수용하고 통과대역 외의 잡음 및 간섭 신호를 제거하는 역할을 한다. 대역통과 여파기의 대역폭이 반송파의 주파수에 비하여 매우 작은 경우, 식 (3)의 잡음은 동 위상 성분과 직교 위상 성분으로 전개할 수 있다<sup>[9]</sup>. 이 경우, 대역통과 여파기의 출력은 다음과 같이 된다.

$$e_1(t) = G_{bpf} [RA_c m(t) \cos(\omega_c t + \theta) + n_c(t) \cos(\omega_c t + \theta) - n_s(t) \sin(\omega_c t + \theta)] \quad (4)$$

여기서  $G_{bpf}$ 는 대역통과 여파기의 이득이며,  $n_c(t)$  및  $n_s(t)$ 는 각각 잡음 전압  $n(t)$ 의 동 위상 및 직교 위상 성분이다. 식 (4)에서 대역통과 여파기의 대역폭을  $B_{bpf}$ , 대역 내  $x_c(t)$ 의 양측파대 잡음 전력밀도를  $N_o/2$ 라고 하면,  $e_1(t)$ 의 총 잡음 전력은  $N_o B_{bpf}$ 가 된다.

식 (4)로부터 승산기(multiplier) 입력에서의 검파 전 SNR은 다음과 같이 주어진다.

$$(SNR)_T = \frac{(RA_c)^2 \overline{m(t)^2}}{2N_o B_{bpf}} \quad (5)$$

식 (5)에서  $m(t)$ 의 대역폭을  $W$ 라고 하면, 검출기의 검파 전 SNR은 대역통과 여파기의 대역폭이  $2W$ 가 될 때 최대가 됨을 알 수 있다.

### 4. 승산기

그림 1에서 승산기는 대역통과 여파기의 출력 신호를 검파하는 역할을 한다. 승산기에 인가되는 복조 반송파의 위상이 피 변조 반송파의 위상과 일치하는 동기 검파의 경우, 승산기의 출력은 다음과 같이 된다.

$$e_2(t) = \frac{1}{2} G_a G_{bpf} A_c G_a [RA_c m(t) + n_c(t) + RA_c m(t) \cos 2(\omega_c t + \theta) + n_c(t) \cos 2(\omega_c t + \theta) + n_s(t) \sin 2(\omega_c t + \theta)] \quad (6)$$

여기서  $G_a$ 는 증폭기의 이득이다. 식 (6)에 의하면 동기 검파는 기저대역의 주파수에서 잡음의 직교 위상 성분을 억압하는 특성을 보인다.

### 5. 저역통과 여파기

그림 1에서 저역통과 여파기는 승산기 출력의 고조파 성분을 제거하고 기저대역의 컨덕턴스를 검출하는 역할을 한다. 식 (6)으로부터 저역통과 여파기의 출력은 다음과 같이 주어진다.

$$y_d(t) = \frac{1}{2} G_{lpf} G_{bpf} A_c G_a [RA_c m(t) + n_c(t)] \quad (7)$$

여기서  $G_{lpf}$ 는 저역통과 여파기의 이득이다. 식 (7)에서 저역통과 여파기의 대역폭을  $B_{lpf}$ 라고 하면, 이의 대역폭 범위는  $W \leq B_{lpf} \leq f_c - W$ 로 주어진다.

$B_{lpf} \leq B_{bpf}/2$ 인 경우, 식 (7)로부터 동기 복조기의 검파 후 SNR은 다음과 같이 계산된다<sup>[9]</sup>.

$$(SNR)_D = \frac{(RA_c)^2 \overline{m(t)^2}}{2N_o B_{lpf}} \quad (8)$$

식 (8)에서 복조기의 검파 후 SNR은 저역통과 여파기의 대역폭이  $W$ 가 될 때 최대가 되며, 이의 대역폭이 증가할수록 검파 후 SNR은 감소함을 알 수 있다.

### 6. 전도도

전도도 검출 셀을 통과하는 액체의 컨덕턴스를 전도도로 변환하면<sup>[10]</sup>, 식 (7)은 다음과 같이 된다.

$$\sigma_d(t) = \frac{1}{2} K G_{lpf} G_{bpf} A_c G_a [RA_c m(t) + n_c(t)] \quad (9)$$

여기서  $K$ 는 전도도 검출 셀의 셀 상수(cell constant)이다. 식 (9)로부터 검출기는 액체의 극미한 전도도를 효과적으로 측정하기 위하여 동위상 잡음성분을 최소로 유지하여야 함을 알 수 있다.

## III. 전도도 검출기

본 장에서는 상기한 잡음의 영향을 고려하여 반도체 제조 공정의 공기감시용 전도도 검출기를 저잡음으로 설계한다. 설계할 검출기의 전도도 측정 범위는 0.05~51.2 $\mu$ S/cm이며, 이에 상응하는 검출기의 출력 전압은 0.007~7.02V이다. 검출기 설계에 사용되는 전도도 검출 셀은 TOA-DKK사의 ICA-P009이며, 이의 셀 상수는 13.7 $cm^{-1}$ 이다.

1. 설계

검출기 구성 요소의 설계 규격은 전도도 측정 범위를 컨덕턴스 측정 범위로 환산함으로써 구할 수 있다. ICA-P009 검출 셀의 경우, 상기 전도도에 대응하는 컨덕턴스의 범위는 0.0036~3.74 $\mu$ S로 주어진다. 식 (2)에서 반송파의 진폭을 2.5V, 이의 주파수를 3.5kHz로 설정하면, 피 변조 반송파의 진폭 범위는 0.009~9.35 $\mu$ A로 계산된다. 식 (3)에서 전류-전압 변환기의 전달 저항을 590k $\Omega$ 으로 선택하면, 이의 출력에서 전압의 진폭 범위는 0.005~5.52V로 주어진다. 또한, 대역통과 여파기의 이득을 1, 이의 대역폭을 200Hz로 설정하면, 이의 출력에서의 전압은 상기 전류-전압 변환기의 출력 전압 레벨과 동일하다.

한편, 그림 1에서 승산기의 출력은 그 진폭이 액체의 컨덕턴스에 비례하는 전파 정류된 정현파가 되며, 이 경우 기저대역 컨덕턴스는  $e_2(t)$ 의 Fourier 변환으로부터 구할 수 있다<sup>[9]</sup>. 액체의 컨덕턴스 주파수와 잡음의 영향을 고려하여 증폭기의 이득을 0.8, 저역통과 여파기의 대역폭을 10Hz, 이의 이득을 2로 설정하면, 검출기 출력에서의 컨덕턴스( $y_d$ ) 변화 범위는 0.007~7.02V로 계산된다. 이와 같이 검출기 구성 요소의 규격은 상기 계산 과정으로부터 유도할 수 있으며, 이는 표 1과 같이 주어진다. 여기서 저역 및 대역통과 여파기는 2차 Butterworth 여파기로 설정한다.

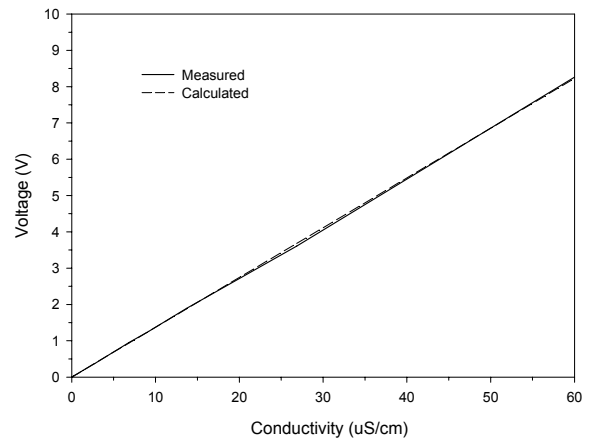
요구 규격을 만족하는 전도도 검출기는 표 1의 구성 요소를 그림 1과 같이 조합함으로써 구성할 수 있으며, 이의 설계 성능은 그림 2와 같이 주어진다. 그림 2에서 검출기의 성능은 0.05~51.2 $\mu$ S/cm의 전도도 범위에서 0.007~7.02V의 전압을 선형적으로 출력하는 것으로 계산된다. 여기서 검출기를 구성하는 소자들은 이상적인 것으로 간주하였다.

표 1. 검출기 구성 요소의 규격  
Table 1. Specifications of detector components.

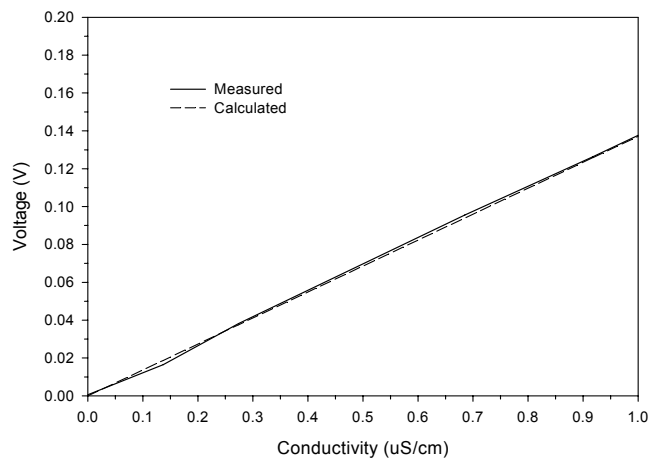
구성 요소	설계 규격
반송파 발생기	$A_c=2.5V, f_c=3.5kHz$
전류-전압 변환기	$R=590k\Omega$
대역통과 여파기	$B_{bpf}=200Hz, G_{bpf}=1$
승산기	이득=1
증폭기	$G_a=0.8$
저역통과 여파기	$B_{lpf}=20Hz, G_{lpf}=2$

2. 구현 및 실험

설계된 전도도 검출기는 Analog Device사의 AD744, AD707 및 Maxim사의 Max038 등을 이용하여 두께 0.8mm, 비유전율 4.2의 유전체 기판 상에 구현하였다. 구현된 검출기의 측정 성능은 그림 2와 같이 주어지며, 그림 2(a) 및 그림 2(b)는 각각 전체 전도도 측정 범위인 0.05~51.2 $\mu$ S/cm 및 저 전도도 영역인 0.05~1.0 $\mu$ S/cm에서의 검출기 성능을 나타낸다. 그림 2에서 검출기는 0.05~51.2 $\mu$ S/cm의 전도도 범위에서 0.009~7.03V의 전압을 선형적으로 출력하는 것으로 측정된다. 따라서 검출기의 측정 성능은 설계 성능에 근접하는 특성을 보인다.



(a)



(b)

그림 2. 전도도 검출기의 성능: (a) 0.05~51.2 $\mu$ S/cm, (b) 0.05~1.0 $\mu$ S/cm

Fig. 2. Performance of a conductivity detector: (a) 0.05 to 51.2 $\mu$ S/cm, (b) 0.05 to 1.0 $\mu$ S/cm.

한편, 그림 2(b)로부터 검출기 출력에서의 동위상 잡음 성분은 0S/cm의 전도도에서 0.6mV의 진폭으로 측정된다. 이러한 잡음 레벨은 식 (6) 및 (7)에서와 같이 동기 복조기가 직교위상 잡음성분을 억제하고, 저역통과 여파기가 통과대역 내로 잡음 전력을 제한한 결과이다. 이와 같은 잡음 전력의 감소는 검파 후 SNR을 향상시켜 검출기의 감도를 개선하며, 이로 인하여 검출기는 전도도의 측정 하한인 0.05 $\mu$ S/cm보다 낮은 0.003 $\mu$ S/cm의 전도도도 안정적으로 검출할 수 있는 것으로 나타난다<sup>[7]</sup>. 따라서 동기복조를 이용하는 전도도 검출기는 액체의 극미한 전도도 측정에 유용하게 사용될 수 있다.

### 3. 기준선 보정

식 (9)의 전도도는 전도도 검출 셀을 통과하는 액체의 온도에 따라 변화하므로, 전도도 측정의 기준이 되는 기준선(baseline)은 측정 온도에 대하여 보정될 필요가 있다. 본 논문에서 측정 온도에 대한 전도도 기준선은 일정 온도로 유지되는 전도도 검출 셀에 0S/cm의 표준 용액을 주입하여 이로부터 측정되는 전도도를 0레벨로 정규화 함으로써 보정하였다.

본 연구에서는 이러한 보정에 의하여 암모늄( $NH_4^+$ ) 용액의 전도도를 45°C의 온도에서 측정하였으며, 이에 대한 크로마토그래피(chromatography)는 그림 3과 같이 주어진다. 그림 3에서  $NH_4^+$  용액의 농도가 3 및

5ppb인 경우, 이들의 전도도는 각각 0.118 및 0.192 $\mu$ S/cm인 것으로 측정된다.

## IV. 결 론

본 논문에서는 동기복조를 이용하여 저잡음 전도도 검출기를 설계하였다. 검출기는 극미한 전도도 측정을 위하여 반송파 발생기, 전류-전압 변환기 및 동기 복조기로 구성하였으며, 이의 SNR은 동기 복조기의 대역폭을 적절히 조정함으로써 개선하였다.

이의 응용 예로써, 반도체 제조 공정의 공기감시용 전도도 검출기를 0.05~51.2 $\mu$ S/cm의 전도도 범위에서 설계하였으며, 실험을 통하여 이의 성능을 확인하였다. 이에 의하여 잡음의 영향을 최소화하는 동기복조 방식은 저잡음 전도도 검출기의 설계에 유용하게 이용될 수 있음을 입증하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. L. Schiefelbein, N. A. Fried, and K. G. Rhoads et al., "A high-accuracy calibration-free technique for measuring the electrical conductivity of liquids," *Rev. of Scientific Instrum.*, vol. 69, pp. 3308-3313, Sept. 1998.
- [2] H. Ma, J. H. Lang, and A. H. Slocum,

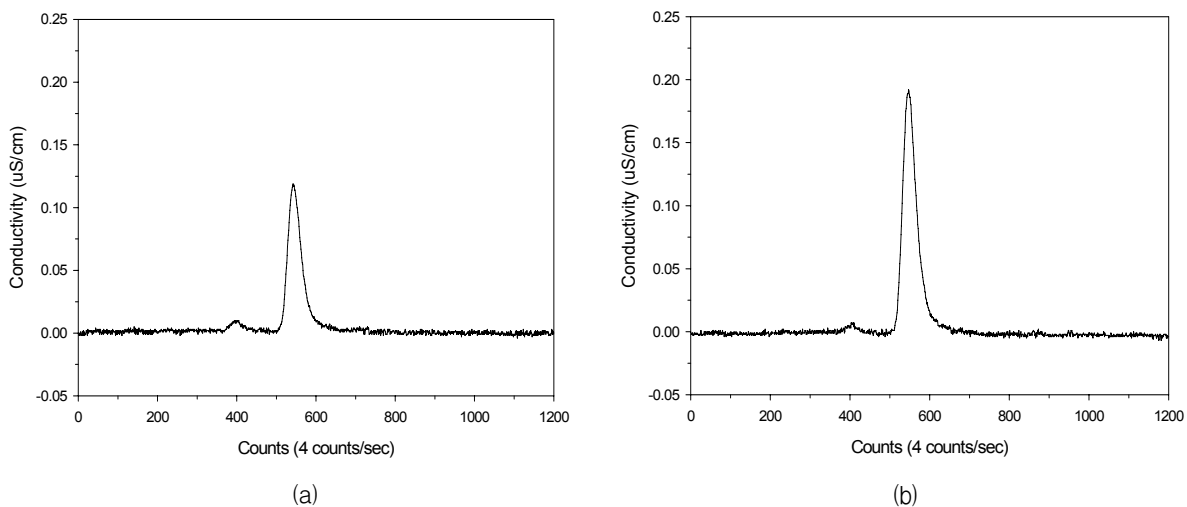


그림 3. 45°C에서 측정된  $NH_4^+$  표준 용액의 크로마토그래피: (a) 3ppb, (b) 5ppb

Fig. 3. Chromatography of the  $NH_4^+$  standard solutions measured at 45°C: (a) 3ppb, (b) 5ppb.

- “Calibration-free measurement of liquid permittivity and conductivity using electrochemical impedance test cell with servomechanically adjustable cell constant,” *IEEE Sensors J.*, vol. 9, pp. 515-524, May 2009.
- [3] S. Ma, J. Schroder, and P. Hauptmann, “Sensor impedance spectrum measurement interface with lock-in amplifier,” *2002 Proc. of IEEE Sensors*, vol. 2, pp. 1313-1316, June 2002.
- [4] P. Wasilek, L. J. Golonka, and A. Gorecka-drzazga et al., “LTCC liquid conductivity detector,” *26th Int. Spring Seminar on Electronics Technol.*, pp. 202-206, Stara Lesna, Slovak Rep., May 2003.
- [5] M. O. Sonnaillon, R. Urteaga, and F. J. Bonetto et al., “Implementation of a high-frequency digital lock-in amplifier,” *2005 Canadian Conf. on Electrical and Computer Eng.*, pp. 1229-1232, Saskatoon, Canada, May 2005.
- [6] L. Zheng and C. He, “A new test method for electrical conductivity of aviation fuel,” *2008 Conf. on Precision Electromagnetic Measurem.*, pp. 576-577, Broomfield, USA, June 2008.
- [7] A. De Marcellis, G. Ferri, and M. Patrizi et al., “An integrated analog lock-in amplifier for low-voltage low-frequency sensor interface,” *2007 2nd Int. Workshop on Advances in Sensors and Interface*, pp. 1-5, Bari, Italy, June 2007.
- [8] A. E. Moe, S. R. Marx, I. Bhinderwala, and D. M. Wilson., “A miniaturized lock-in amplifier design suitable for impedance measurement in cells,” *2004 Proc. of IEEE Sensors*, vol. 1, pp. 215-218, Oct. 2004.
- [9] R. E. Zimmer and W. H. Tranter, *Principles of Communications*, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [10] P. R. Roberge, *Corrosion Engineering: Principles and Practice*, McGraw-Hill Book Co., 2008.

---

 저 자 소 개
 

---



김 남 태(정회원)-교신저자

1986년 2월 한양대학교  
전자공학과 졸업  
(공학사)

1988년 2월 한양대학교 대학원  
전자공학과 졸업  
(공학석사)

1992년 2월 한양대학교 대학원 전자통신공학과  
졸업 (공학박사)

1992년 6월~1995년 9월 한국전자통신연구소  
선임연구원

2003년 8월~2005년 1월 Univ. of Maryland,  
visiting scholar

1995년 10월~현재 인제대학교 전자공학과  
부교수

<주관심분야 : 각종 도파계와 복사계의 전자계  
해석, 광대역 무선부품 설계, RF 소자 모델링 및  
극미량 검출회로 설계 등>