

## 테라헤르츠파를 이용한 실리콘 웨이퍼의 도핑 정도와 물리적 특성 측정에 관한 연구

### The Doping Concentration and Physical Properties Measurement of Silicon Wafer Using Terahertz Wave

박성현\*, 오경환\*, 김학성\*†

Sung Hyeon Park\*, Gyung Hwan Oh\* and Hak Sung Kim\*†

**초 록** 본 논문에서는 테라헤르츠파 시간분광영상시스템을 이용하여 도핑된 실리콘 웨이퍼의 물리적 특성을 측정하는 것에 관한 연구를 진행하였다. 투과모드와 30°의 입사각을 가진 반사모드를 이용하여 측정하였으며 실리콘 웨이퍼의 도핑 정도는 N-type과 P-type 모두에서 10<sup>14</sup>에서 10<sup>18</sup>까지 다양하게 준비하였다. 그 결과, 도핑 정도와 테라헤르츠파와의 상관관계를 찾았으며 이를 이용하면 모든 경우에 대한 도핑된 실리콘 웨이퍼의 도핑 정도를 확인할 수 있다. 또한, 각 도핑된 실리콘 웨이퍼의 도핑된 두께, 굴절률, 유전율을 테라헤르츠 시간영역 파형분석을 통하여 계산할 수 있었다. 따라서, 테라헤르츠 시간분광영상화 기술은 도핑된 실리콘 웨이퍼의 굴절률과 유전율과 같은 물리적 특성뿐만 아니라 도핑 정도를 측정할 수 있는 유용한 기술이 될 것으로 기대된다.

**주요용어:** 테라헤르츠파, 실리콘 웨이퍼, 도핑, 굴절률, 유전율

**Abstract** In this study, a terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS) imaging technique was used to measure doping concentration and physical properties (such as refractive index and permittivity) of the doped silicon (Si) wafers. The transmission and reflection modes with an incidence angle of 30° were employed to determine the physical properties of the doped Si wafers. The doping concentrations of the prepared Si wafers were varied from 10<sup>14</sup> to 10<sup>18</sup> in both N-type and P-type cases. Finally, the correlation between the doping concentration and the power of the THz wave was determined by measuring the powers of the transmitted and reflected THz waves of the doped Si wafers. Additionally, the doped thickness, the refractive index, and permittivity of each doped Si wafer were calculated using the THz time domain waveform. The results indicate that the THz-TDS imaging technique is potentially a promising technique to measure the doping concentration as well as other optical properties (such as the refractive index and permittivity) of the doped Si wafer.

**Keywords:** Terahertz Wave, Silicon Wafer, Doping Concentration, Refractive Index, Permittivity

#### 1. 서 론

최근 대부분의 물질에서 독특한 상호작용과 높은 투과성을 가지는 0.1~10 THz의 스펙트럼 영역의 테라헤르츠(terahertz: THz)파 기술이 큰 관심을 끌고 있다[1-4]. 이러한 테라헤르츠파 기술은 지난 몇 년간 보안과 국가안보, 생물과학, 비파괴

검사 등의 다양한 어플리케이션에 사용되어 왔지만[5-9], 금속과 도핑이 많이 된 반도체, 두꺼운 물질에 대한 낮은 투과성을 보이는 단점 때문에 다양한 물질들로 복잡한 구조를 이루고 있는 반도체 분야에서는 제한이 되어 왔다[10]. 그러나, 테라헤르츠파를 이용하여 반도체에 관한 어플리케이션을 찾으려는 노력에 의해, 반도체에 주로

[Received: September 7, 2016, Revised: November 2, 2016 / December 27, 2016, Accepted: February 3, 2017] \*한양대학교 융합기계공학과, †Corresponding Author: Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University, Seoul 04763 Korea (E-mail: farkung@gmail.com)

사용되는 실리콘 웨이퍼와 폴리머와 같은 물질의 광학 특성에 대한 연구가 최근 보고되는 등 기술에 대한 연구가 진행 중에 있다[11,12]. 또한, 최근 반도체 기술이 발달함에 따라 디바이스 고집적 적층구조 및 하이도핑 물질들이 많이 사용되고 있고 이러한 복잡한 구조의 광학 특성(굴절률)을 구하기 위한 연구가 필요한 실정이다. 그 중, 실리콘 웨이퍼의 일부를 N 또는 P형으로 도핑하는 공정이 반도체를 제작하는 과정에서 매우 중요한 부분이기 때문에 도핑된 실리콘 웨이퍼의 도핑 정도와 도핑된 두께, 도핑된 영역을 측정하는 것이 중요한 이슈로 여겨지고 있었다[12]. 따라서 실리콘 웨이퍼의 도핑 정도와 도핑된 두께, 도핑된 영역 측정하는 적당한 방법에 대한 다양한 연구가 진행 중에 있다[13,14]. 다만, 면저항측정법에 주로 쓰이는 4침법(four-point probe method)을 이용하여 도핑 정도를 측정하고 있으나 4침법으로 도핑된 영역과 도핑된 두께를 측정하는 것에는 한계가 있다. 이러한 복잡한 구조의 광학 특성을 측정하기 위해 time-flight 신호를 이용하여 시간축 상에서의 최고점의 차이값을 이용하였다. 테라헤르츠파 시간분광영상시스템을 이용하여 N 또는 P형으로 도핑된 실리콘 웨이퍼의 도핑 정도를 비접촉으로 측정하는 법을 제안하였다. 또한, 각각의 도핑된 실리콘 웨이퍼의 도핑된 두께와 굴절률과 같은 광학 특성을 테라헤르츠파 시간분광 결과를 이용하여 이론적으로 계산하는데 성공하였다.

## 2. 실험

Fig. 1은 펄스형 테라헤르츠파의 수신부와 송신부의 동기화에 대한 실험적인 설비에 대한 개략도이다. 테라헤르츠 시간분광영상시스템 (THz-time domain spectroscopy : TDS)은 펄스 레이저 모듈과 테라헤르츠 시간분광모듈, 영상용 XY 모션 시편부로 구성되어 있으며 테라헤르츠 시간분광모듈은 하나의 송신부와 수신부 그리고 렌즈와 거울, 빔가이드 등으로 이루어진 광학계로 구성되어 있다. 이러한 테라헤르츠 영상 시스템은 0.1~3.0 THz의 주파수 영역과 11 GHz의 주파수 분해능, 20 fs의 시간 분해능을 가지고 있다. 또한, 60 dB의 신호 대 잡음비(SNR)를 보장하며 영상화 속도와 분해능을 각각 5 mm/s~50 mm/s와

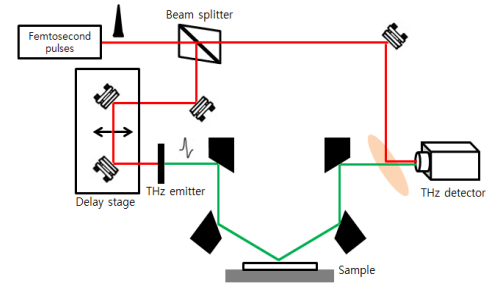


Fig. 1 Schematic of THz-TDS imaging system (Reflection type)

5  $\mu\text{m}$ ~1 mm로 조절할 수 있다. 이 설비의 반복성은 두 개의 연속적인 데이터 세트를 찍어 결과로 규정하며 결과를 규정할 때 사용되는 데이터 세트는 최대 1초안에 99%의 결과 반복성과 100번의 스캔 결과를 평균화한 것이다. 또한, 공기 중의 수증기 흡수를 막기 위해, 1% 이하의 습도를 가지는 건조 공기를 아크릴로 봉인된 설비에 주입한다. 투과도와 반사도를 확인하기 위해, 테라헤르츠 시간분광시스템의 투과모드와 30°의 입사각을 가지는 반사모드로 실험을 진행하였다. 실리콘 웨이퍼는 구입하여 준비를 하였다(Case 3~5: Prolog Semicor Ltd. and Case 1, 2 and 6~10 : Si Microstructures Inc.). 이에, 구입한 실리콘 웨이퍼의 두께는 Table 1에서 보시는 바와 같이 두께가 다르며 이것의 도핑 정도 또한 N 또는 P형에 따라  $10^{14}$ ~ $10^{18}$ 까지 다양하다.

## 3. 결론 및 고찰

Fig. 2(a)와 (c)는 테라헤르츠 시간분광영상화 시스템의 투과모드를 이용하여 실리콘 웨이퍼의 테라헤르츠 영상(case 2와 case3)을 나타낸 것이다. 실리콘 웨이퍼의 왼쪽 부분을 테라헤르츠파가 전반사되도록 알루미늄 호일을 이용하여 덮어 도핑 농도에 따른 테라헤르츠파의 투과 정도를 비교하기 위하여 서로 다른 두 면을 생성하였다. 그 결과로, Fig. 2(c)에 나타난 case 3의 테라헤르츠 영상을 보면 두 개의 다른 부분을 볼 수 있다. 왼쪽 부분은 알루미늄 호일에 덮인 부분이며 오른쪽은 실리콘 웨이퍼이다. 반면에 case 2의 THz 영상을 보면 오로지 하나의 부분만 보이는데 이는 실리콘 웨이퍼에서 테라헤르츠파를 전반

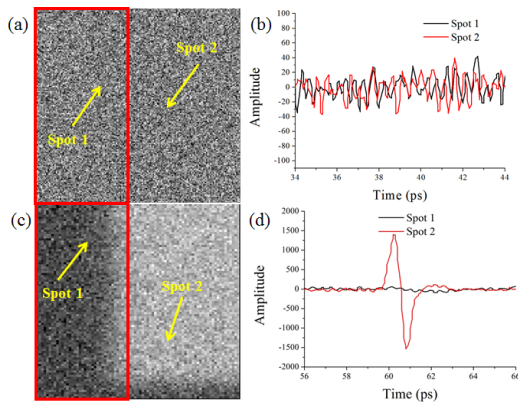


Fig. 2 The THz-TDS transmission image for (a) case 2 and (c) case 3 and THz waveforms for (b) case 2 and (d) case 3

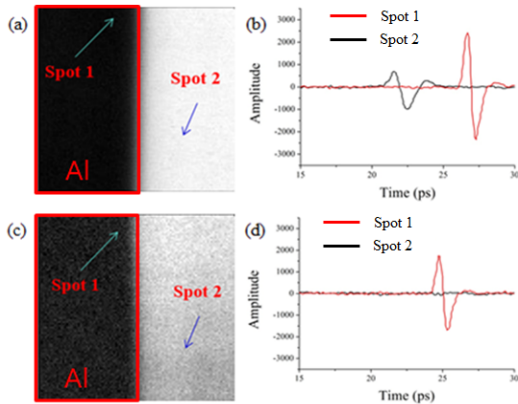


Fig. 3 The THz-TDS reflection image for (a) case 2 and (b) case 3 and THz waveforms for (c) case 2 and (d) case 3

사시커 호일을 감싼 부분과 구분이 되지 않는 것이다. Fig. 2(b)에 나타난 case 2에 대한 테라헤르츠 파형을 보면 테라헤르츠파가 실리콘 웨이퍼와 호일 두 부분을 모두 통과하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 반면에 case 3의 경우, 실리콘 웨이퍼 부분에서 테라헤르츠파가 투과된 것을 Fig. 2(d)에서 확인할 수 있다. 또한, Fig. 3(a)와 (c)는 반사모드를 이용하여 실리콘 웨이퍼의 테라헤르츠 영상(case 2 와 case 3)을 나타낸 것이다. 투과 모드와 마찬가지로 실리콘 웨이퍼의 왼쪽 부분은 테라헤르츠파가 전반사되고, 오른쪽 부분은 도핑 농도에 따른 테라헤르츠파의 반사파의 크기를 측정하였다(Table 1). 이와 같은 방법으로, 식(1)과

Table 1 The specification of the prepared Si wafer and the measured transmittance and reflectance with respect to the prepared Si wafers using THz-TDS technique

	Type	DC (cm <sup>-3</sup> )	Tr	R	P
1	P	1.33 × 10 <sup>19</sup>	0	0.81	-
2	P	2.68 × 10 <sup>18</sup>	0	0.68	-
3	P	1.00 × 10 <sup>17</sup>	0.36	0.53	11.9
4	P	4.00 × 10 <sup>16</sup>	0.40	0.47	11.8
5	P	1.50 × 10 <sup>15</sup>	0.52	0.31	11.6
6	Pure	-	0.24	0.41	11.3
7	N	2.92 × 10 <sup>14</sup>	0.67	0.30	11.5
8	N	1.13 × 10 <sup>15</sup>	0.61	0.36	11.4
9	N	1.34 × 10 <sup>16</sup>	0	0.41	-
10	N	2.28 × 10 <sup>17</sup>	0	0.88	-

\* DC : Doping Concentration, Tr : Transmittance, R: Reflectance, P : Permittivity

(2)를 이용하여 도핑 종류와 농도에 따른 테라헤르츠파의 투과율과 반사율을 측정하였다(Table 1).

$$Tr = A_{\text{silicon-wafer}} / A_{\text{free-space}} \tag{1}$$

$$R = A_{\text{silicon-wafer}} / A_{\text{metal}} \tag{2}$$

\* A : THz wave amplitude

실리콘 웨이퍼와 테라헤르츠파의 반사율 상관 관계를 살펴보기 위해서 반사모드 결과를 사용하였는데 이는 투과모드에서는 도핑 농도가 일정량 이상일 때 테라헤르츠파가 전부 투과하지 못하여, 시편이 없는 경우 측정되는 테라헤르츠파의 크기와 실리콘 웨이퍼를 투과한 테라헤르츠파의 peak-to-peak 크기 비인 투과율(transmittance)과의 상관관계를 보기위한 변수가 부족하기 때문이다. Fig. 4에 보이듯이 시편이 없는 free space의 경우 반사판에서 반사되는 테라헤르츠파의 크기와 시편이 존재할 때 반사모드에서 측정되는 테라헤르츠파의 크기의 비를 반사율(reflectance)로 나타내어 도핑 농도와 그래프에 표시해 보았을 때 로그-선형 관계를 갖는 것을 볼 수 있다(Fig. 5). Fig. 5에 표시된 수식을 보면 도핑 종류에 따라 기울기가 다른 것을 확인할 수 있다. 따라서 도핑 종류를 모르는 경우, 같은 도핑 종류의 시편이 최

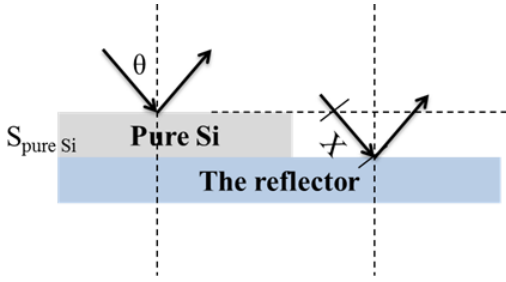


Fig. 4 Schematic diagram of Si wafer thickness and reflectance measurement method

소 두께 이상 있다면 테라헤르츠파를 이용한 도핑 종류 분석 또한 가능하다. 테라헤르츠파의 반사율과 도핑 정도의 선형성을 확인하기 위해 회귀분석을 수행하였다. 이는 선형회귀모델이 자료에 잘 적합하는가를 검증하는 것으로, 다음과 같은 4가지 가정이 필요하다. 오차항의 독립성, 정규성, 등분산성 그리고 변수 간 선형성을 가진다는 것이다. 다음과 같은 총제곱합(total sum of squares, SST), 회귀제곱합(total sum of squares of regression, SSR), 오차제곱합(total sum of squares of error, SSE) 식을 사용되었다.

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (4)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5)$$

여기서  $y$ 는 선형식으로부터 계산되는 테라헤르츠파의 크기이며,  $n$ 은 측정 횟수를 의미한다. 첨자 ‘ $\wedge$ ’은 실험 결과값을 ‘ $\bar{\cdot}$ ’은 실험값의 평균을 의미한다. 일반적으로, SST는 SSR과 SSE의 합으로 표현 가능하며 선형성이 있는 수식에서 SSR 값은 SST와 가깝거나, SSE 값이 0에 가깝다. 따라서, 결정계수  $R^2$  값은 다음과 같은 식(7)을 이용하여 계산되며, 1에 가까울수록 선형성에 가까운 모델을 의미한다. Fig. 5에 나타난 수식의  $R^2$  값은 0.97로 선형모델이 타당함을 확인하였다.

$$SST = SSR + SSE \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (0 < R < 1) \quad (7)$$

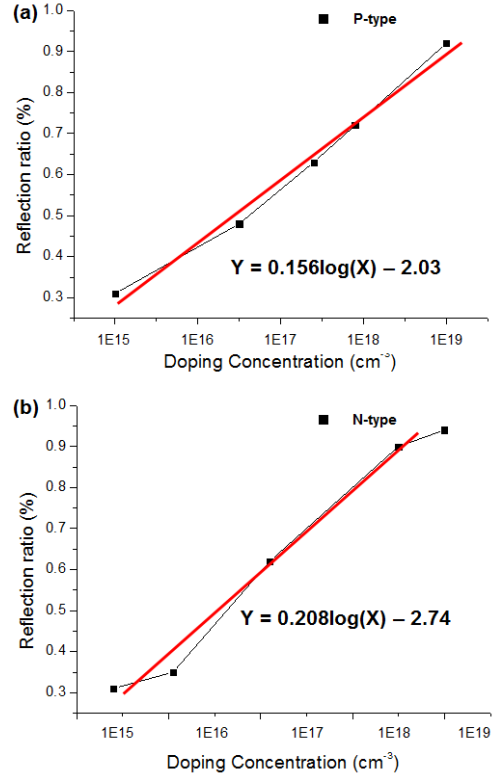


Fig. 5 The correlation between the doping concentration of (a) P-type and (b) N-type Si wafers and reflectance of terahertz wave

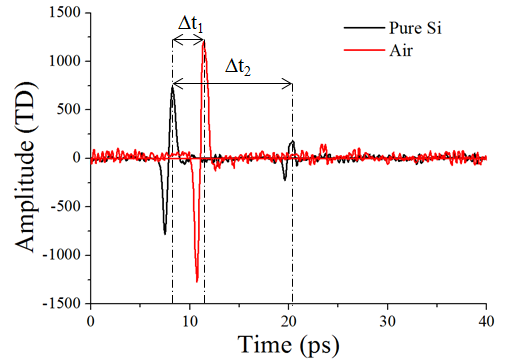


Fig. 6 The reflected THz waveform of pure Si wafer and reflector

도핑된 부분의 두께와 유전율을 측정하기 위해서 반사판과 순수 실리콘 웨이퍼의 테라헤르츠파 반사파형을 측정하였다(Fig. 6). 먼저, 도핑된 실리콘 웨이퍼의 두께를 계산하기 위해서 순수 실리콘 웨이퍼 그래프의 첫 번째 최고점과 반사판

그래프의 첫 번째 최고점의 시간차를 측정된 결과 4.139531 ps였다(Fig. 4). 이 값을 이용하여, 순수 실리콘 웨이퍼의 두께를 아래 간단한 식(8), (9)을 이용하여 유도된 식(10)을 계산을 통해 구할 수 있다.

$$X \cdot \cos\theta = S_{\text{Pure-Si}} \quad (8)$$

$$\Delta t = 2X/C \quad (9)$$

$$S_{\text{Pure-Si}} = (C \cdot \Delta t \cdot \cos\theta)/2 \quad (10)$$

여기서  $X$ 는 실리콘 웨이퍼 내에서의 광 경로,  $S$ 는 실리콘 웨이퍼의 두께,  $C$ 는 공기 중에서 THz파의 속도( $2.998 \times 10^8$  m/s),  $\Delta t_1$ 은 실리콘 웨이퍼와 반사판 그래프 첫 번째 최고점 간의 시간차,  $\theta$ 는 테라헤르츠파의 입사각을 의미한다(Fig. 4). 공기 중에서의 THz파 속도  $C$ ( $2.998 \times 10^8$  m/s)와 입사각  $\theta$ ( $=30^\circ$ ), 측정된 값인  $\Delta t_1$ 을 대입하여 실리콘의 두께를 계산한 결과,  $S_{\text{Pure-Si}}$ 는 540.43  $\mu\text{m}$ 이고 실제 두께는 540  $\mu\text{m}$ 로 오차율이 0.08%로 매우 작은 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 다음으로 순수 실리콘 웨이퍼의 유전율을 구하기 위해서 순수 실리콘 웨이퍼 그래프의 첫 번째 최고점과 두 번째 최고점의 시간차를 이용하였다.

$$S_{\text{Pure-Si}} = V_{\text{Pure-Si}} \cdot \Delta t \cdot \cos\theta/2 \quad (11)$$

$$V_{\text{Pure-Si}} \cdot \sin\theta = V_{\text{air}} \cdot \sin\theta_{\text{Pure-Si}} \quad (12)$$

$$\sin 2\theta_{\text{Pure-Si}} = (4S_{\text{Pure-Si}} \cdot \sin\theta) / (\Delta t \cdot V_{\text{air}}) \quad (13)$$

여기서  $V_{\text{Pure-Si}}$ 는 순수 실리콘 웨이퍼에서의 속도,  $\theta_{\text{Pure-Si}}$ 는 실리콘 웨이퍼의 굴절각,  $\Delta t_2$ 는 순수 실리콘 웨이퍼 그래프 첫 번째와 두 번째 최고점의 시간차를 의미한다. 식(13)을 통해  $\theta_{\text{Pure-Si}}$  값을 구한 후에,  $V_{\text{Pure-Si}}$ 는 식(12), (13)을 통해 구한  $\theta_{\text{Pure-Si}}$  값을 대입하여 계산할 수 있다. 이러한 과정을 통해 얻은  $V_{\text{Pure-Si}}$  값을 이용하여 다음과 같은 식(14)를 통해 유전율을 쉽게 계산할 수 있다.

$$\epsilon = 1/V_{\text{Pure-Si}}^2 \mu \quad (14)$$

여기서  $\epsilon$ 는 유전율을 나타내며,  $\mu$ 는 투자율을 나타낸다. 일반적으로, 투자율은 강자성체를 제외한 강자성체와 반자성체 물질에서는 무시하는데 이는 공기에서의 투자율과 비슷하기 때문이다 [15,16]. 따라서, 식(14)를 다음과 같은 식으로 변

환할 수 있다.

$$\epsilon = 1/V_{\text{Pure-Si}}^2 \quad (15)$$

순수 실리콘 웨이퍼의 유전율을 계산한 결과 값은 11.28로 일반적으로 알려진 값인 11.9와 오차율이 5.21%인 것을 확인하였다[17]. 같은 방법을 통해서, 도핑된 실리콘 웨이퍼의 두께와 유전율을 계산하였다(Table 1). 결론적으로, 테라헤르츠 시간분광기법을 이용한 실리콘 웨이퍼의 도핑 농도와 두께, 굴절률, 유전율의 비접촉 측정 방식의 활용 가능성을 확인할 수 있었다. 따라서, 이러한 테라헤르츠 시간분광기법은 도핑된 실리콘 웨이퍼의 도핑 농도를 측정하여 반도체 불량제품 검출을 위한 독자적인 방법이 될 것으로 기대된다.

#### 4. 결론

이 논문에서는 테라헤르츠 시간분광영상화 기법을 이용하여 실리콘 웨이퍼의 도핑 농도와 굴절률, 유전율과 같은 물리적 성질을 측정하였다. 준비된 N-type와 P-type 실리콘 웨이퍼의 도핑 농도의 범위는  $10^{14}$ 부터  $10^{18}$ 까지이며, 도핑 농도와 테라헤르츠파의 투과율 및 반사율의 선형적 상관관계를 알 수 있었다. 또한, 각각의 도핑된 실리콘 웨이퍼의 도핑된 두께와 굴절률, 유전율을 테라헤르츠파의 시간영역 파형을 통해 계산해낼 수 있었다. 그러므로, 테라헤르츠 시간분광영상화 기법은 도핑 농도와 굴절률, 유전율과 같은 물성들을 측정할 수 있는 유망한 기법으로 기대된다.

#### 후 기

This research was also supported by a National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean Government (MEST) (2013M2A2A9043280) Also, this work was supported by a National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education (2015R1D1A1A09058418) Also, This work was supported by the Industrial Strategic Technology Development Program (201500000002212, In-line Semiconductor Chip/Package Inspection system with THz imaging) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea).

## References

- [1] T. Probst, S. Sommer, A. Soltani, E. Kraus, B. Baudrit, G. Town and M. Koch, "Monitoring the polymerization of two-component epoxy adhesives using a terahertz time domain reflection system," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Vol. 36(6), pp. 569-577 (2015)
- [2] N. Palka, R. Panowicz, F. Ospald and R. Beigang, "3D non-destructive imaging of punctures in polyethylene composite armor by THz time domain spectroscopy," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Vol. 36(8), pp. 770-788 (2015)
- [3] J. Zhou, X. Rao, S. Tu, L. Duan and X. Chen, "In temperature and doping dependence of the optical properties of silicon at terahertz frequencies," *Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, pp. 1-3 (2015)
- [4] A. V. Andrianov, A. N. Aleshin, A. K. Khripunov and V. N. Trukhin, "Terahertz properties of bacterial cellulose films and its composite with conducting polymer PEDOT/PSS," *Synthetic Metals*, Vol. 205, pp. 201-205 (2015)
- [5] J. F. Federici, B. Schulkin, F. Huang, D. Gary, R. Barat, F. Oliveira and D. Zimdars, "THz imaging and sensing for security applications-explosives, weapons and drugs", *Semicond Sci Tech*, Vol. 20(7), S266 (2005)
- [6] R. Appleby and H. B. Wallace, "Stand off detection of weapons and contraband in the 100 GHz to 1 THz region," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 55(11), pp. 2944-2956 (2007)
- [7] R. Woodward, V. Wallace, D. Arnone, E. Linfield and M. Pepper, "Terahertz pulsed imaging of skin cancer in the time and frequency domain," *Journal of Biological Physics*, Vol. 29(2-3), pp. 257-259 (2003)
- [8] F. Wahaia, G. Valusis, L. M. Bernardo, A. Almeida, J. A. Moreira, P. C. Lopes, J. Macutkevici, I. Kasalynas, D. Seliuta and R. Adomavicius, "Detection of colon cancer by terahertz techniques," *Journal of Molecular Structure*, Vol. 1006(1), pp. 77-82 (2011)
- [9] S.-H. Park, J.-W. Jang and H.-S. Kim, "Non-destructive evaluation of the hidden voids in integrated circuit packages using terahertz time-domain spectroscopy," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 25(9), 095007 (2015)
- [10] T. Nagashima and M. Hangyo, "Measurement of complex optical constants of a highly doped Si wafer using terahertz ellipsometry," *Applied Physics Letters*, Vol. 79(24), pp. 3917-3919 (2001)
- [11] T. Arnold, W. Muehleisen, J. Schicker and C. Hirschl, "In inspection of mechanical and electrical properties of silicon wafers using terahertz tomography and spectroscopy", *SPIE Sensing Technology+ Applications*, pp. 94830W-94830W-6 (2015)
- [12] C. Richter and C.-Y. Jen, "Doping profile measurement using terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS)," US Patent 20,160, 139,044 (2016)
- [13] T.-I. Jeon and D. Grischkowsky, "Nature of conduction in doped silicon," *Physical Review Letters*, Vol. 78(6), pp. 1106-1109 (1997)
- [14] M. Van Exter and D. Grischkowsky, "Optical and electronic properties of doped silicon from 0.1 to 2 THz," *Applied Physics Letters*, Vol. 56(17), pp. 1694-1696 (1990)
- [15] T. Zedler, A. Nikanorov and B. Nacke, "In investigation of relative magnetic permeability as input data for numerical simulation of induction surface hardening," *Proceedings of the International Scientific Colloquium, Modelling for Electromagnetic Processing*, pp. 26-29 (2008)
- [16] A. Cansiz, "Static and dynamic analysis of a diamagnetic bearing system," *Journal of Applied Physics*, Vol. 103(3), 034510 (2008)
- [17] K. Young and H. Frederikse, "Compilation of the static dielectric constant of inorganic solids", *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Vol. 2(2), pp. 313-410 (1973)