

# 다결정 실리콘 박막으로 구성된 Metal-Semiconductor-Metal 광검출기의 제조

이재성<sup>1,a</sup>, 최경근<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 위덕대학교 그린에너지공학부

<sup>2</sup> 나노융합기술원 포항공과대학교

## Metal-Semiconductor-Metal Photodetector Fabricated on Thin Polysilicon Film

Jae-Sung Lee<sup>1,a</sup> and Kyeong-Keun Choi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Division of Green Energy Engineering, Uiduk University, Gyeongju 38004, Korea

<sup>2</sup> National Institute for Nanomaterials Technology (NINT), POSTECH, Pohang 37673, Korea

(Received February 23, 2017; Revised March 17, 2017; Accepted March 20, 2017)

**Abstract:** A polysilicon-based metal-semiconductor-metal (MSM) photodetector was fabricated by means of our new methods. Its photoresponse characteristics were analyzed to see if it could be applied to a sensor system. The processes on which this study focused were an alloy-annealing process to form metal-polysilicon contacts, a post-annealing process for better light absorption of as-deposited polysilicon, and a passivation process for lowering defect density in polysilicon. When the alloy annealing was achieved at about 400°C, metal-polysilicon Schottky contacts sustained a stable potential barrier, decreasing the dark current. For better surface morphology of polysilicon, rapid thermal annealing (RTA) or furnace annealing at around 900°C was suitable as a post-annealing process, because it supplied polysilicon layers with a smoother surface and a proper grain size for photon absorption. For the passivation of defects in polysilicon, hydrogen-ion implantation was chosen, because it is easy to implant hydrogen into the polysilicon. MSM photodetectors based on the suggested processes showed a higher sensitivity for photocurrent detection and a stable Schottky contact barrier to lower the dark current and are therefore applicable to sensor systems.

**Keywords:** MSM photodetector, Polysilicon, Dark current, Photocurrent, Sensitivity

### 1. 서론

광신호를 검출하여 전기적인 신호로 바꾸어 주는 역할을 하는 소자를 광 검출기(photodetector)라고 한다. 반도체 광 검출기로는 내부 광전 효과를 이용한 다이오

드형 광 검출소자와 광전도체형 광 검출소자가 있다. 이들은 반도체 기술의 발전으로 인해 집적화가 가능하게 되면서 각종 광 센서 응용 회로에 사용되고 있다. 센서 회로에 사용되기 위한 광 검출기의 중요한 기능 변수들은 반응성(responsivity), 암전류(dark current), 및 감도 계수(sensitivity) 등이 있다. 반응성은 급속한 빛세기로 생성된 광전류의 속도이며, 일반적으로 A/W로 표시한다. 암전류는 입력되는 빛 신호가 없어도 광 검출기 내에 흐르는 전류이며, 센서 및 통신 시스템에 사용될 때는 잡음의 원인이 되기도 한다. 감도 계수는 입사되는

a. Corresponding author; [jaesung@uu.ac.kr](mailto:jaesung@uu.ac.kr)

Copyright ©2017 KIEEME. All rights reserved.  
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

빛의 변화에 감응하는 광전류의 정도로서, 암전류의 변화와 광전류의 변화에 대한 비로 나타낸다.

다이오드형 및 광 전도체형 광 검출기 중에서 제조비용 및 응용 회로 적응력 측면에서는 광 전도체형 광 검출기가 유리하다 [1,2]. 광 전도체형 광 검출기의 일반적인 구조로는 금속-실리콘-금속(metal-semiconductor-metal : MSM) 구조가 사용된다 [3-5]. 이때 빛의 흡수 영역인 실리콘부분에는 도핑되지 않은 다결정 실리콘을 사용할 수 있으며, 배선 금속과의 접촉을 Schottky 접합을 이루게 함으로써 암전류를 줄이는 효과를 가져 온다. 다결정 실리콘으로 사용하게 되는 경우, 제조비용을 낮출 수 있으나, 고속용 소자로 사용될 때 양자효율(quantum efficiency)이 낮아지는 단점을 갖고 있다 [6]. 그러므로 다결정 실리콘의 물질 특성을 개선시켜 광전도를 높이는 연구가 필요하다.

다결정 실리콘은 각자 방위가 다른 실리콘 결정립(grain)으로 구성되어 결정립계(grain boundary)가 존재하게 된다. 결정립계에는 결합되지 못한 원자들과 불안정한 결합을 유지하는 원자들로 구성되어 있어 전자나 정공의 재결합중심(recombination center) 역할을 하게 된다. 그러나 결정립과 결정립계의 원자 결합 밀도 차이로 인하여 빛의 흡수 깊이는 결정립 보다는 결정립계에서 크게 나타난다 [7,8]. 그러므로 우수한 광 검출기 제조를 위해서는 다결정 실리콘 내 재결합중심 밀도 뿐 아니라 다결정 실리콘의 표면 및 형태에 대한 고려가 필요하다.

본 연구에서는 센서 시스템에 응용될 수 있는 다결정 실리콘 구성의 광 검출기를 제조하고자 하였다. 기존의 CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) 제조공정에 새로운 후처리 공정들을 추가하여 광 검출기를 제조한 후 그 광학 응답 특성을 공정 별로 상호 비교하였다. 제조된 광 검출기는 전극용 금속 배선이 schottky 접합을 갖는 MSM 구조를 갖는다. 전체 CMOS 제조 공정 중 세 공정영역에서 본 연구의 내용이 적용되었다. 첫 번째는, 금속 alloy 열처리 공정의 온도를 변화시킴으로써 금속 배선과 다결정 실리콘사이의 접합부분의 전기적 특성을 관찰하였다. 두 번째는, 제조된 다결정 실리콘 박막을 후속 열처리하여 이에 따른 광 검출기의 광 응답 특성을 관찰하였다. 마지막으로 세 번째는, 다결정 실리콘 내 재결합중심을 효과적으로 부동태화(passivation)하기 위한 방법을 연구하였다. 이러한 과정을 통해 가장 적합한 각 제조 공정을 선택함으로써

우수한 광 응답 특성의 MSM 광 검출기를 제조할 수 있었다.

## 2. 실험 방법

실리콘 기판위에 400 nm 두께의 절연용 실리콘 산화막을 형성한 후, 500 nm 두께의 진성 다결정 실리콘을 620°C의 low-pressure chemical vapor deposition (LPCVD) 법으로 제조하여 광 흡수 영역으로 사용하였다. 반사 방지막으로 150 nm 두께의 실리콘 산화막(SiO<sub>2</sub>)을 사용하였다. 빛의 흡수를 돕기 위한 반사 방지막의 두께,  $d$ ,는

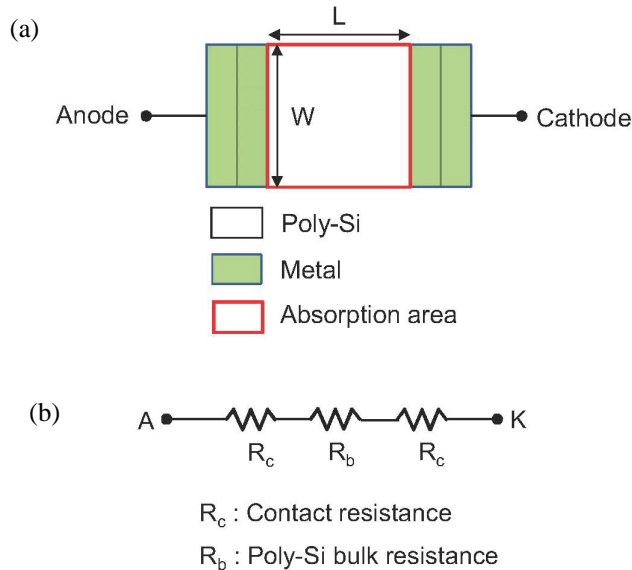
$$d = \lambda / (4n) \quad (1)$$

관계식에 의해 구한다. 여기서  $\lambda$ 는 흡수되는 빛의 파장이며,  $n$ 은 반사 방지막의 굴절률을 각각 나타낸다. 다결정 실리콘의 후속 열처리 공정은 급속열처리(rapid-thermal annealing, RTA) 및 열처리 노(furnace)에서 각각 이루어졌다. 각 후속 열처리공정의 조건 및 실험 결과에서 사용될 시료 표식을 표 1에 나타내었다. 금속 배선으로는 알루미늄(Al)과 티타늄(Ti)의 적층구조를 사용하였다. 다음 공정으로 재결합중심 부동태화를 위한 수소 이온 첨가 공정이 진행되었다. 최종적으로, 금속 배선의 접촉 특성 개선을 위한 금속 alloy 열처리 공정을 진행하였다.

제조된 광 검출기의 구조를 그림 1(a)에 나타내고 있다. 빛의 흡수가 일어나는 정도는 활성 영역의 길이(L) 및 폭(W)에 따라 다르게 나타나게 된다. 측정에 사용된 기본적인 광 검출기는 L=60  $\mu$ m 및 W=10  $\mu$ m의 구조를 갖는다. 본 소자에서는 단순한 직사각 형태의 다결정 실리콘 표면에서 빛의 흡수가 일어나게 되며, 깎지형(interdigitated) 전극 형태의 소자 [9]에 비

**Table 1.** Process split and its marking symbols.

Post-process split	Symbol
Skip post-annealing	A
900°C N <sub>2</sub> 30 min. (Furnace)	B
1,050°C N <sub>2</sub> 1 min. (RTA)	C
1,100°C N <sub>2</sub> 30 min. (Furnace)	D
1,100°C N <sub>2</sub> 60 min. (Furnace)	E



**Fig. 1.** (a) Schematic of photodetector and (b) its equivalent circuit including resistances.

해 광 센서 응용 회로에 쉽게 적용할 수 있다. 소자의 구조에서 발생할 수 있는 저항 요소를 그림 1(b)에 나타내었다. 두 전극과 다결정 실리콘의 접촉 부분에서 발생하는 접촉 저항( $R_c$ )과 다결정 실리콘내 결정립 및 결정립계에 의한 벌크(bulk) 저항( $R_b$ )으로 나눌 수 있다. 두 저항은 암전류와 광전류의 흐름에 영향을 미치게 된다.

다결정 실리콘의 재료적 특성은 X-ray diffraction (XRD) 및 atomic force microscopy (AFM)을 통해 분석되었다. 광 입사를 위한 LED 광원으로는 650~950 nm 범위의 파장을 사용하였다. 전기적 특성은 semiconductor parameter analyzer를 사용하여 측정하였다. 광 반응 특성은 암전류( $I_{dark}$ )와 광전류( $I_{light}$ ) 측정을 통해 조사되었다.

### 3. 결과 및 고찰

증착된 다결정 실리콘을 후속 열처리 공정을 행하여 형태학적인 변화를 조사하였다. 빛의 흡수 및 금속 전극의 형성은 다결정 실리콘의 표면에서 이루어지므로 다결정 실리콘의 표면 형태는 광 검출기의 제조에 있어 중요하다. 표 2는 표 1에서 언급된 소자에 대한 다

**Table 2.** The morphology of each polysilicon film.

Symbol	Grain size (Å)	Roughness (nm) @ 25 $\mu\text{m}^2$	
		Average	Maximum
A	214	6.67	54.1
B	246	6.67	55.5
C	259	6.64	53.9
D	316	6.96	56.4
E	319	6.98	56.5

결정 실리콘의 결정립의 크기와 표면 거칠기를 각각 나타내고 있다. 각 결과는 XRD 및 AFM 분석을 통해 이루어졌으며, 분석 과정은 다른 문헌에서 발표하였다 [10]. 고온(1,100°C)의 열처리 노에서 진행된 다결정 실리콘(소자 D와 E)은 결정립의 크기가 매우 증가하며, 표면도 거칠어지고 있음을 나타낸다. 이는 고온의 영향으로 결정립이 성장하고 있음을 의미한다. 그러나 RTA의 경우(소자 C)의 경우에는 고온(1,050°C)임에도 불구하고 열처리 시간이 매우 짧아 결정립 성장이 억제되고 있다. 저온(900°C)의 열처리 노에서 진행된 경우(소자 B)에서도 소자 C와 비슷한 결정립 크기를 보이고 있다. 그리고 표면 거칠기도 A 소자와 비슷하게 나타났다. 그러므로 후속 열처리 공정이 생략된 소자 A와 비교해서 소자 B와 C는 비슷한 재료적 형태를 보인다.

광 검출기를 구성하는 금속과 다결정 실리콘 접합은 schottky 접합을 갖게 함으로써 암전류를 줄일 수 있다. 안정된 schottky 접합은 금속 alloy 열처리 공정을 통해 이루어진다. 그러므로 최적의 금속 alloy 열처리 온도가 필요하다. 그림 2는 소자 A에 대한 열처리 온도 변화에 따른 암전류 변화를 나타내고 있다. 전류 값은 5 V 및 10 V에서 각각 이루어졌다. 열처리 온도가 약 400°C일 때 가장 낮은 암전류가 나타났으며, 이는 금속과 다결정 실리콘 접합이 안정되게 형성되었음을 의미한다. 열처리 온도가 약 500°C일 때에는 많은 암전류가 흐르게 되는데, 이는 Ti와 Si과의 금속합성 (metallurgical interaction)이 발생하여  $\text{TiSi}_2$ 와 같은 실리사이드가 형성되었기 때문이다 [11]. 앞으로의 실험 공정에서는 400°C 금속 alloy 열처리를 기본 공정으로 사용한다.

제조한 광 검출기의 기본적인 동작은 다결정 실리콘 표면에서 빛 에너지를 흡수하면 광자와 전자가 상호

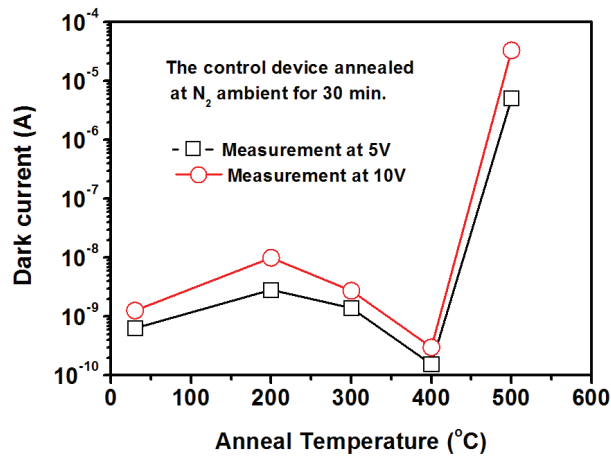


Fig. 2. Dark current of photodetector depending on temperature of metal alloy annealing.

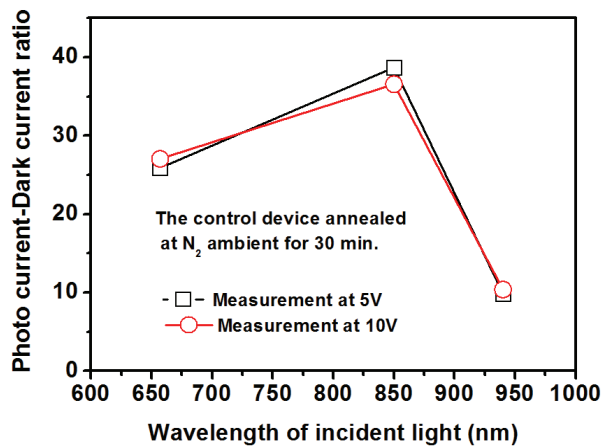


Fig. 3. Sensitivity of photodetector depending on wavelength of incident light.

반응하여 전자를 다결정 실리콘의 가전자대에서 전도대로 이동 시킬 수 있는 가능성에 의존하게 된다. 빛이 흡수되는 전도를 흡수계수로 표시하는데 이는 재료 및 흡수되는 빛의 파장에 따라 다르게 된다. 다결정 실리콘은 여러 종류의 결정립으로 구성되어 있어 흡수 계수를 정확하게 알기는 어렵지만 [12], 빛의 파장 변화에 대해서는 반응하게 된다. 그림 3은 흡수되는 빛의 파장에 따른 제조된 광 검출기의 감도 계수(sensitivity,  $I_{photo}/I_{dark}$ )를 나타내고 있다. 각 입사된 빛은 1 W의 일정한 에너지를 갖게 하였다. 결과에서 원적외선 파장 영역인 850 nm의 빛이 흡수된 광 검출기의 경우가 제일

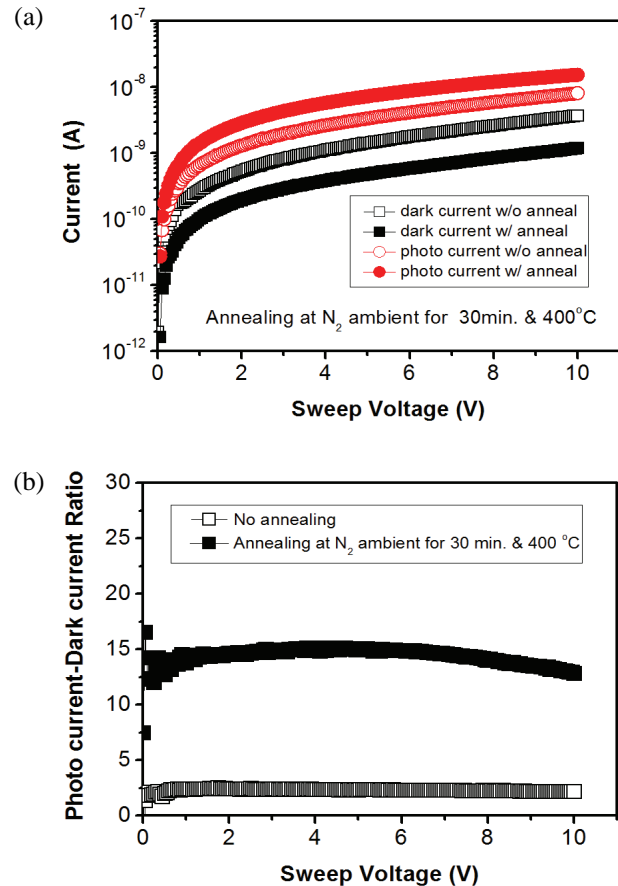


Fig. 4. Dark current and photocurrent (a) and its ratio (b) for photodetectors depending on metal alloy annealing.

높은 감도 계수를 나타내었다. 그러므로 본 실험에서 입사 빛의 파장은 850 nm로 고정하고자 한다. 일반적으로 단결정 실리콘으로 제조된 광 검출기는 파장이 1,100nm 이하의 빛을 사용한다 [13].

기본적인 광 응답 특성은 암전류와 광전류의 크기로 나타낼 수 있다. 암전류는 금속 schottky 접착의 장벽 (potential barrier) 높이나 폭의 길이에 의존하게 된다. 장벽의 높이는 금속과 실리콘의 일함수 차이에 의해 정해지므로 본 연구에서는 동일한 재료를 사용하였으므로 일정한 장벽 높이( $\approx 0.6$  eV)를 갖는다고 판단된다. 그러나 장벽 영역에 결함 등이 존재하게 되면 장벽의 폭이 짧아지는 효과가 발생하여 암전류와 같은 누설 전류가 증가하게 된다. 다결정 실리콘에 존재하는 결정립계에는 미 결합 원자들이 존재하기 때문에 빛 에너지에 의해 생성되는 전자와 정공이 결정립계에 포획(trap)되어 광전류의 크기를 변화시키는 원인이 될

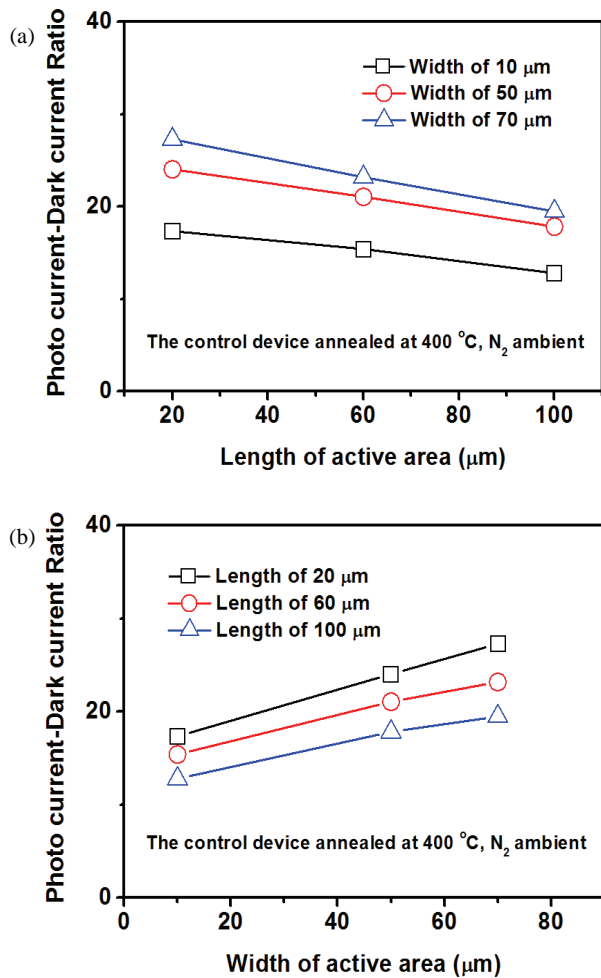


Fig. 5. (a) Photo current-dark current ratio (stability) depending on length and (b) width of active area in photodetector.

수 있다. 그러므로 광 검출기의 감도 계수를 높이기 위해서는 이러한 미 결합 원자의 개수를 줄이는 것이 중요하다. 그림 4는 금속 alloy 열처리에 따른 암전류와 광전류를 크기 및 그 감도 계수를 각각 나타내고 있다. 그림 4(a)에서 알 수 있듯이 기본적인 열처리를 행함으로써 암전류는 줄어들고 광전류는 증가하는 효과가 나타났다. 그리고 열처리를 함으로써 감도 계수가 약 7배 정도 증가하였음을 그림 4(b)에서 알 수 있다. 이는 금속 alloy 열처리를 통해 금속 접촉면 뿐 아니라 다결정 실리콘의 결정립계의 원자 결합이 다소 안정되는 효과가 있음을 알 수 있다.

그림 1(b)에서 언급되었듯이 광 검출기 내부에는 두 종류의 기생 저항,  $R_c$  및  $R_b$ , 성분이 존재하게 된다.

$R_c$ 는 금속-다결정 실리콘 접합의 장벽의 크기에 의존하게 되고,  $R_b$ 는 다결정 실리콘 내 결정립계의 장벽의 크기에 각각 의존하게 된다. 그러므로 광 흡수가 일어나는 영역의 크기에 따라 두 저항 성분의 크기는 다르게 나타나며, 이에 따라 전류의 크기가 다르게 나타나게 된다. 그림 5는 광 흡수 영역의 (a) 길이와 (b) 폭 변화에 따른 광 검출기의 감도 계수를 나타내고 있다. 이때 감도 계수는 4 V에서 측정되었다. 광 흡수 영역에서 폭이 일정하고 길이가 길면,  $R_c$ 는 일정하고  $R_b$ 는 증가하게 되어 광 검출기의 감도 계수가 낮아지게 된다. 다결정 실리콘 내부에서  $R_b$  크기를 줄이게 되면 광전류가 증가할 수 있을 것이다. 광 흡수 영역의 길이가 일정하고 폭이 증가하게 되면 단위 폭 당  $R_b$  값은 감소하게 된다. 그러므로 광 흡수 영역 폭이 증가하면 광전류 뿐 아니라 암전류도 증가하게 된다. 그림 5(b)에서 광 흡수 영역 길이가 100 μm 일 때, 광 흡수 영역 폭이 증가함에 따라 감도 계수가 직선적 증가를 보이지 않고 있다. 이는 폭이 증가할수록 광 전류에 비해 암전류가 상대적으로 많이 증가하였음을 의미한다. 이와 같은 이유로  $R_c$ 는 암전류 억제를 위해 특정 값을 유지해야 하며,  $R_b$ 는 생성된 전자 및 전공의 전도를 방해하지 않을 만큼 작은 값을 갖는 것이 유리하다.

앞에서 언급되었듯이, 광 검출기의 감도 계수를 증가하기 위해서는 schottky 접합의 장벽 내 결합 농도를 줄이고, 다결정 실리콘 결정립계의 미 결합 원자의 농도를 동시에 줄여야 한다. 이 두 영역에서 불안정 결합 요소(trap 또는 defect)를 줄이기 위해서 불순물을 주입하여 완전한 결합을 형성하는 부동태화 공정이 필요하다. 이는 MOS 구조에서 미 결합 계면 결합을 부동태화하는 원리와 동일하다고 판단된다. 표 1에 표시된 5 종류의 다결정 실리콘으로 구성된 광 검출기의 기본적인 전기적 특성과 광 응답특성을 조사하였다. 그 중에서 D와 E 시료에서는 매우 큰 암전류가 관찰되어 광 검출기로써의 기능을 할 수 없었다. 상대적으로 큰 결정립 및 거친 표면 상태에 의해 금속-다결정 실리콘 접합에서 완전한 전위 장벽이 형성되지 못한 것으로 판단된다. 그러므로 이후의 실험에서는 두 시료를 배제하였다.

그림 6은 A, B, 및 C 시료에 대해 기본적인 금속 alloy 열처리를 행한 후 측정된 감도 계수를 나타내고 있다. 열처리는 400°C에서 30분 동안 진행되었다. 증

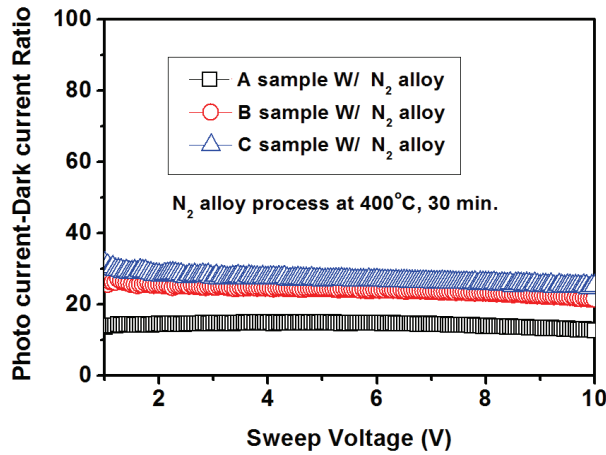


Fig. 6. Variation of sensitivity for A, B, and C samples annealed at N<sub>2</sub> ambient.

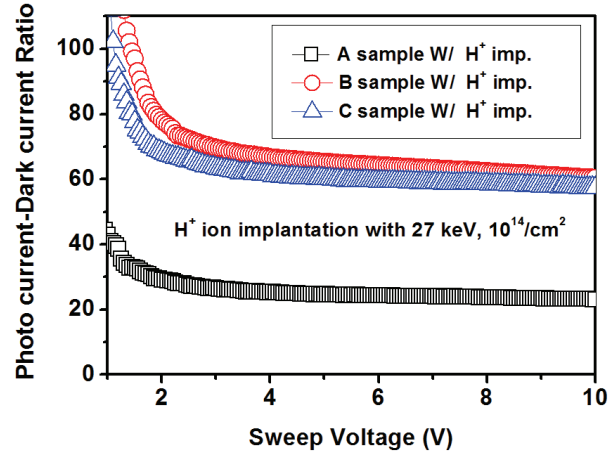


Fig. 8. Variation of sensitivity for A, B, and C samples processed with H<sup>+</sup> ion implantation and subsequent annealing.

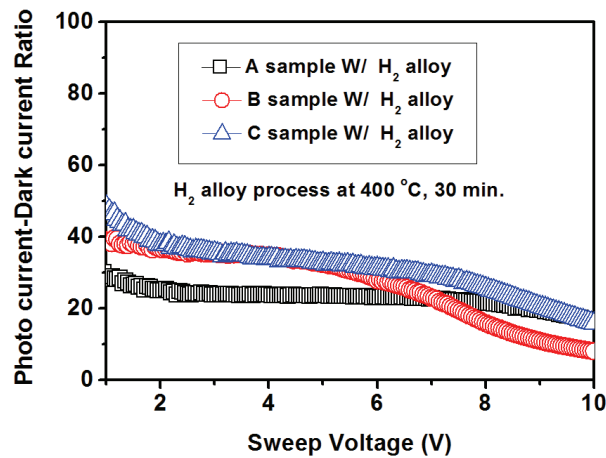


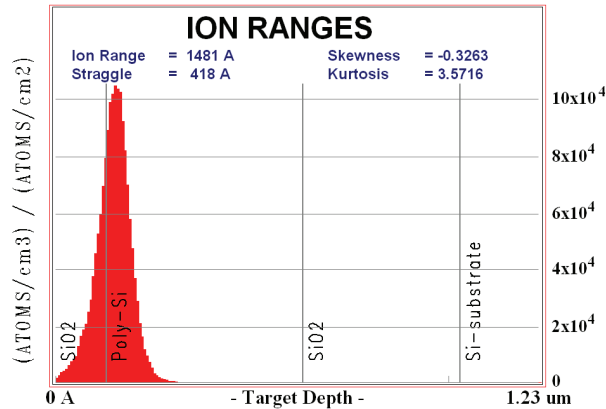
Fig. 7. Variation of sensitivity for A, B, and C samples annealed at H<sub>2</sub> ambient.

착된 다결정 실리콘을 그대로 사용한 A 시료에 비해 후속 열처리 공정을 행한 B와 C 시료에서 보다 높은 감도 계수가 측정되었다. 표 2에서 알 수 있듯이 B와 C 시료의 다결정 실리콘은 A 시료에 비해 큰 결정립을 보이지만 표면 거칠기는 변화가 거의 없다. 이는 암전류의 크기는 일정하게 유지되면서 광 전류는 증가하게 하여 감도 계수를 증가하게 만든다.

반도체 소자에서 부동태화 공정은 일반적으로 수소 이온을 사용한다. 질량이 가장 작은 수소 이온이 반도체 물질내의 미 결합 원자와 결합함으로써 결합 농도를 효과적으로 줄일 수 있다. 그림 7은 A, B, 및 C 시

료에 대해 금속 alloy 열처리를 수소 분위기 400°C에서 30분 동안 진행한 후 측정된 감도 계수를 나타내고 있다. 질소 분위기에서 열처리된 그림 6의 결과와 비교하여 개선된 감도 계수 특성을 보이고 있다. 이는 질소에 비해 수소를 사용하는 것이 부동태화를 증대시킬 수 있음을 나타낸다. 그러나 실리콘내의 수소 확산 계수는 약 10<sup>-15</sup> cm<sup>2</sup>/s 범위이므로 [14], 400°C 열처리 공정을 통해서 대부분의 부동태화는 다결정 실리콘의 표면 근처에서 발생하게 된다. 그림 7에서 인가전압 6 V 이상에서 A와 B 시료는 감도 계수가 낮아지고 있다. 이는 암전류의 상대적 증가를 의미하며, 금속과의 장벽 상태와 관련이 있을 것으로 판단되나 현재 그 원인을 찾고 있다.

광 흡수 깊이 측면에서 다결정실리콘의 표면 뿐 아니라 깊이 방향으로도 부동태화가 충분히 발생한다면 광 검출기의 개선된 특성이 나타날 수 있을 것이다. 그림 8은 이를 위해 수소 이온 주입법을 사용하여 A, B, 및 C 시료에 수소를 주입한 후 측정된 각 소자의 감도 계수이다. 수소 이온(H<sup>+</sup>)은 10<sup>14</sup>/cm<sup>2</sup>의 양으로 27 keV의 에너지로 주입되었다. 이온 주입 후에는 이온의 활성화를 위해 400°C 질소 분위기에서 30분 동안 열처리하였다. 열처리 공정과 관련된 그림 6과 7 결과와 비교하면, 수소 이온을 주입한 A와 B 시료에서 개선된 감도 계수 특성을 나타내고 있다. 그러므로 이온 주입에 의해 다결정 실리콘 내에서 부동태화가 효과적으로 진행되어 광전류를 증가시켰다고 판단된다.



**Fig. 9.** Illumination of ion ranges for  $H^+$  ion implantation used in this study.

**Table 3.** Specification for photodetectors fabricated in this study.

Description	Range
Operating voltage range	DC 0-10 V
Responsivity	0.03-0.04 (A/W)
Sensitivity (Iphoto/I <sub>dark</sub> )	60-100
Dark current/active area	$10^{-14}$ (A/ $\mu\text{m}^2$ )
Absorption light wavelength	850 nm

그림 9는 본 연구에서 사용된 시료 구조에서 분석된 이온 주입 깊이(ion range)를 나타내고 있다. 선택된 이온 주입 조건에서 수소 이온은 다결정 실리콘 표면에서부터 약 148 nm 깊이까지 분포되었다. 더 큰 에너지를 사용하여 이온 주입 깊이를 크게 하면 다결정 실리콘 표면에서 물질적 손상(damage)이 발생할 수 있다. 그러므로 소자 구조에 따른 적절한 이온 주입 공정이 요구된다. 결론적으로, 빛 흡수층인 다결정 실리콘의 표면 거칠기를 억제하면서 결정립계 밀도를 적절하게 유지함으로써(B와 C 시료), 암전류를 줄이고 광전류를 증가시킬 수 있었다. 또한 다결정 실리콘에 존재하는 결함을 부동태화하기 위해서 이온 주입법을 사용함으로써 감도 계수 특성을 개선할 수 있었다.

제조된 다결정 실리콘의 기본 사양을 표 3에 정리하였다. 반응성(responsivity)은 광 검출기에 입사된 빛의 출력(power)대비 생성된 전류의 비이다. 본 연구에서는 새롭게 제안한 공정 방법을 확인할 목적으로 광 검출기를 설계하였기 때문에 그 소자의 규모가 다소

크게 제조되었다(L=60  $\mu\text{m}$  및 W=10  $\mu\text{m}$ ). 소자 규모를 더욱 줄이게 되면, 표 3에 나타난 사양들을 더욱 개선시킬 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 금속-다결정 실리콘-금속(MSM) 구조를 갖는 광 검출기의 광 응답 특성을 개선시키기 위한 새로운 공정 방법을 제안하였다. 금속과 다결정 실리콘과의 안정된 재료적 접촉은 암전류의 흐름을 억제할 수 있으며, 다결정 실리콘내 낮은 재결합 결함 농도는 수송자(carrier)의 수명을 증가시켜 광 전류를 증가시킬 수 있다. 이를 위해서 본 연구에서는 금속 alloy 열처리, 다결정 실리콘의 후속 열처리, 및 수소 이온 주입을 각각 추가하였다. 이와 같은 공정으로 제조된 광 검출기는 안정된 schottky 장벽을 유지하면서 다결정 실리콘 결정립계의 불안정한 이온 결합을 부동태화시켜줌으로써 재현성 있는 감도 계수 특성 및 낮은 암전류 특성 등을 갖게 되었다. 그러므로 본 연구에서 제조한 광 검출기는 앞으로의 광 센서 응용 분야에 유용하게 사용될 수가 있다고 판단한다.

#### 감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다 (No. 2013R1A1A2057681). 또한, 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단-나노·소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(2009-0082580). 이온 주입은 양성자가속기연구센터 (KOMAC)의 도움으로 진행되었습니다.

#### REFERENCES

- [1] M. Siegert, M. Loken, Ch. Glingener, and Ch. Buchal, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **4**, 970 (1998). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/2944.736086>]
- [2] W. H. Park, D. K. Ban, H. Kim, H. S. Kim, M. Patel, J. H. Yoo, and J. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron.*

- Mater. Eng.*, **29**, 445 (2016). [DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2016.29.7.445>]
- [3] C. S. Lin, L. P. Tu, R. H. Yeh, and J. W. Hong, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **15**, 966 (2003). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2003.813445>]
- [4] R. P. MacDonald, N. G. Tarr, B. A. Syrett, S. A. Boothroyd, and J. Chrostowski, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11**, 108 (1999). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/68.736410>]
- [5] R. Pownall, J. Kindt, P. Nikkel, and K. L. Lear, *J. Lightwave Technol.*, **28**, 2724 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2010.2063016>]
- [6] M. Y. Liu, S. Y. Chou, S. Alexandrou, C. C. Wang, and T. Y. Hsiang, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **40**, 2145 (1993). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/16.239836>]
- [7] A. Irreraa, F. Iaconaa, G. Franzòb, S. Boninellib, D. Pacificib, M. Miritellob, C. Spinellaa, D. Sanfilippoc, G. D. Stefanoc, P. G. Fallicac, and F. Priolob, *Opt. Mater.*, **27**, 1031 (2005). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2004.08.058>]
- [8] N. M. Jokerst, T. K. Gaylord, E. Glytsis, M. A. Brooke, S. Cho, T. Nonaka, T. Suzuki, D. L. Geddis, J. Shin, R. Villalaz, J. Hall, A. Chellapa, and M. Vrazel, *IEEE Trans. Adv. Packag.*, **27**, 376 (2004). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TADVP.2004.831894>]
- [9] G. Yuan, M. D. Stephens, D. Dandy, and K. L. Lear, *Proc. SPIE*, **5557**, 140 (2004). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.560195>]
- [10] J. S. Lee, *J. Korean Phys. Soc.*, **69**, 60 (2016). [DOI: <http://dx.doi.org/10.3938/jkps.69.60>]
- [11] J. S. Lee, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **16**, 6193 (2016). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2016.12109>]
- [12] G. Harbeke, *Polycrystalline Semiconductor Physical Properties and Application*, (Springer-Verlag, 1984) p. 165.
- [13] M. Casalino, G. Coppola, M. Iodice, I. Rendina, and L. Sirleto, *Sensors*, **10**, 10571 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/s101210571>]
- [14] R. W. Lee, R. C. Frank, and D. E. Swets, *J. Chem. Phys.*, **36**, 1026 (1962). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1732632>]