

# 금이 도우핑된 P-I-N 다이오드의 전기적 및 광학적 스위칭 특성

민남기\* 하동식\* 이성재\*\*  
\* 고려대학교 \*\* 대림전문대학

## Electrical and Optical Switching Characteristics of Gold-Doped P-I-N Diodes

Nam Ki Min\*, Dong Sik Ha\*, Seong Jac Lee\*\*  
\* Korea University, \*\* Daerim College

**Abstract** - The electrical and optical switching characteristics of gold-doped silicon p-i-n diodes have been investigated. The device shows a dark switching voltage of about 500 V. The switching voltage decreases rapidly when the illumination level is increased. The differential sensitivity of optical gating over linear region is  $d(V_{Tn}/V_{Tho})/dP_{ph}=0.25/uW$ . The turn-on delay time and the turn-on rise time decrease with increasing optical pulse power. The turn-off delay and the fall time are negligible.

### 2. 소자의 기본 구조와 동작 원리

그림 1은 금을 도우핑한 Si p-i-n 다이오드의 기본 구조를 나타낸 것이다. n<sup>+</sup> 음극은 전자 주입 전극, p<sup>+</sup> 양극은 정공 주입 전극이다. 금은 실리콘의 에너지 갭 중간 부근에 억셉터 준위를 형성하며, 이것은 매우 유효한 재결합 중심으로 작용한다. 열평형 상태에서, 금 억셉터(N<sub>Au</sub>)는 shallow donor가 제공하는 보상 전자에 의해 (-)로 대전되어(N<sub>Au</sub><sup>-</sup>), 정공에 대한 포획 단면적이 전자에 대한 포획 단면적에 비해 대단히 크다. 따라서, 열평형 상태에서 전자의 수명은 정공의 수명보다 훨씬 길다.

### 1. 서 론

고전압, 대전력을 고속으로 제어하는 스위치는 jitter발생이 없고, 고신뢰성, 고속도, 우수한 절연 성능을 가져야 하며, EMI 나 EMP에도 강해야 한다. 종래의 전기적 스위칭 소자로는 위에 열거한 요구 조건을 동시에 만족시키는 것이 매우 곤란하여, 빛에 의해 작동하는 각종 반도체 스위치(OASS)가 개발되고 있다.<sup>1)-3)</sup> 현재 절연파괴장도 200 kV/cm 이상, 10<sup>4</sup> ~ 10<sup>6</sup> A/cm<sup>2</sup>의 광 스위치가 개발되고 있으며, 통신 및 진단용 고속 검출기, 고압펄스발생회로, 대전력 초광대역(UWB) 마이크로파 발생등에 적용되고 있다. 이와 같이, OASS는 응용 분야가 넓고 우주·군사적 분야에서 매우 중요한 스위칭 소자로 되어가고 있지만, 국내에서는 아직 이에 관한 기초 연구 조차 이루어지지 않고 있는 실정이다.

지금 그림 1의 소자에 순방향 바이어스를 인가하면, 음극과 양극으로부터 각각 전자와 정공이 채널 영역에 주입된다. 매우 낮은 전압에서는 주입 캐리어 농도가 열평형 상태치에 비하여 무시할 정도로 작으므로, 소자에 흐르는 전류는 옴의 법칙에 따른다. 인가 전압이 증가함에 따라, 주입 전자는 양극을 향해 채널 내부로 이동하지만, 주입 정공의 대부분은 부로 대전된 금 억셉터(N<sub>Au</sub><sup>-</sup>)에 의해 포획되어 채널 영역의 정공 농도는 변하지 않는다. 그러므로 소자에는 주입 전자가 지배하는 공간 전하 제한 전류(I∝V<sup>2</sup>)가 흐른다.

본 연구에서는, 금(Au)을 확산한 고저항 실리콘에 p<sup>+</sup>와 n<sup>+</sup> 전극을 설치한 p-i-n 다이오드의 전기적 및 광학적 스위칭 특성을 고찰하였다. 이 소자는 벌크 OASS 소자의 단점인 높은 접촉 저항 문제를 해결하는 동시에 순방향 모드에서 동작하므로 역방향 모드에 비해 스위칭 속도를 향상시킬 수 있다. 또한 스위칭 전압을 i-영역의 길이 뿐만 아니라 Au농도에 의해 결정되며, 특히 Au가 캐리어 수명을 매우 짧게 만들므로 턴 오프 시간은 무시할 정도로 작아진다.

인가 전압을 더욱 증가시키면, 주입 정공의 농도와 수명이 증가하고, 정공이 음극에 도달하는 시점에서 소자는 전기적으로 스위칭한다. 이때, 스위칭 전압은 다음식으로 된다.<sup>14)</sup>

$$V_{Tho} = kL^2 \tag{1}$$

여기서, k는 비례 계수, L은 채널 길이이다.

지금, dark 스위칭 전압(V<sub>Tho</sub>)이하로 순방향 바이어스된 p-i-n 소자의 채널 영역에 빛을 조사하면, 금 억셉터 센터는 이온화 되고, 이것과 이중 주입의 상호 작용에 기인해서 정공 주입에 대한 장벽이 제거된다. 따라서 양극-음극간 전압이 V<sub>Tho</sub>이하에서도, 전자와 정공의 수명이 거의 같게 되고 채널에 주입된 정공이 쉽게 음극에 도달하여, p-i-n 다이오드는 스위칭한다. 즉, p-i-n 소자의 스위칭 전압은 빛에 의해 제어된다.

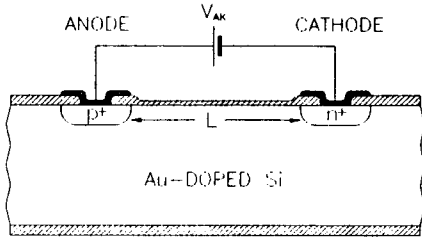


그림 1 p-i-n 다이오드의 기본 구조

### 3. 소자 제작

소자는 비저항이  $6\sim 9 \Omega \cdot \text{cm}$ 인 n형 (100) Si 웨이퍼를 사용해서 제작하였다. 양극은 보론(B)를  $1000^\circ\text{C}$ 에서, 음극은 인(P)를  $1000^\circ\text{C}$ 에서 열확산에 의해 형성하였다. 금은 indirect 확산법에 의해서 웨이퍼의 뒷면으로 부터 확산시켰다. 즉 소자 웨이퍼와 동일한 비저항과 크기를 갖는 웨이퍼위에 금 실리카 필름을 코우팅하여 소오스 웨이퍼를 만든 후, 이 소오스 웨이퍼와 소자 웨이퍼를 1 mm 간격으로 보오트에 로딩하여  $1000^\circ\text{C}$ 에서 1 시간동안 확산시켰다. 금 확산 후 측정된 웨이퍼의 비저항은  $80 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ 로 증가하여 i-영역이 형성됨을 확인하였다. 채널 길이는  $100\sim 120 \mu\text{m}$ 이다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 암전류-전압 특성

소자의 전류-전압 특성은 먼저 curve tracer로 관측하였다. 모든 측정은 실온의 암실에서 수행하였다. 그림 2는 curve tracer로 관측한 전류-전압 특성을 나타낸다. 그림에서 스위칭 전압은 약 500 V, 호출딩 전압은 160 V, 스위칭 전류는  $100 \mu\text{A}$ 이며, 스위칭 전압이 상당히 높은 데도 불구하고 매우 우수한 오프 상태 전류 특성을 보여 주고 있다.

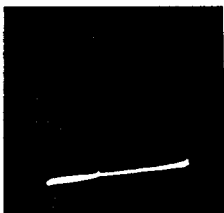


그림 2 curve tracer로 관측한 암전류-전압 특성.

전류-전압 특성을 자세히 고찰하기 위해서 point-by-point 측정된 결과를 나타내면 그림 3과 같다. 그림에서 오프 상태는 세 영역으로 나누어진다. 낮은 전압에서 ohmic 영역( $n=0.963$ ), sublinear 영역( $n=0.51$ ), 마지막으로 높은 바이어스 전압(또는 스위칭 발생점 부근)에서 자승 영역( $n=2.08$ )이 존재한다.

또, 스위칭 이후 전류가 급격히 증가하는 현상을 보이고 있는데, 스위칭 소자의 최대 전류 정격이 온 상태 전류에 의존하므로 이와 같은 current filament 현상은 매우 바람직하다고 생각된다.

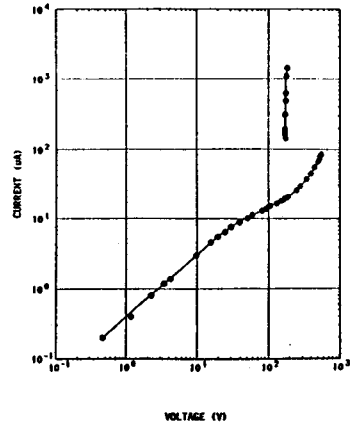


그림 3 point-by-point 측정된 암전류-전류 특성.

### 4.2 광학적 스위칭 특성

p-i-n 소자의 optical switching 특성 측정은 광원으로 LED를 사용하여 측정하였다. p-i-n 소자와 광센서(thermopile)를 x-y 스테이지에 설치하고, microscrew 사용하여 소자를 원하는 위치로 정확히 이동하였다. LED는  $222\Omega$  저항과 직렬로 접속한 후 직류 전원 또는 펄스 발생기로 구동시켰다. 소자에 입사하는 빛의 power는 thermopile을 사용하여 측정하였다. 저잡음 마이크로 파워 op amp가 검출기와 함께 사용되었다. p-i-n 소자의 전류-전압 특성은 먼저 빛의 세기를 변화시키면서 curve tracer로 관측하였다.

그림 4는 전류-전압 특성에 대한 빛의 영향을 나타낸 것으로, 빛의 조사에 의해 스위칭 전압이 크게 감소함을 분명히 보여주고 있다. 빛의 세기에 따라 스위칭 전류도 약간씩 증가하나, 빛에 대한 의존성은 스위칭 전압에 비해 훨씬 약하다. 사실상 스위칭 전류는 dark 스위칭 전류와 거의 같았으며, 단지 홀딩 전압 근처에서 오프 상태 전류와 스위칭 전류의 증가가 관측되는 데, 이것은 빛의 세기가 너무 강하기 때문이다.

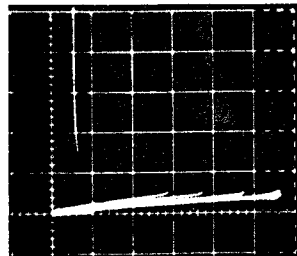


그림 4 빛에 의한 p-i-n 다이오드의 스위칭

스위칭 전압의 광 전력 의존성을 DC 광과 펄스 광에 대하여 측정하였다. 그림 5는 소자의 광( $V_{Th}$ ) 및 dark( $V_{Th0}$ ) 스위칭 전압의 비를 DC 광 전력의 함수로 나타낸 것이다. 광 스위칭 전압은 빛의 세기가 증가함에 따라 빠르게 감소하였다. 바이어스 전압이 dark 스위칭 전압( $V_{Th0}$ )에 접근할수록 소자는 빛에 더욱 민감하게 되며, 턴온에 필요한 광전력도 감소하고, 이 영역에서 거의 직선으로 된다. 선형영역에서 optical gating의 미분감도(differential sensitivity)는  $d(V_{Th}/V_{Th0})/dP_{Ph}=0.25 [uW]$  또는  $dV_{Th}/dP_{Ph}=142.12 [V/uW]$ 로 된다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 바이어스 전압이 호울딩 전압에 접근함에 따라 소자를 턴온시키는데 더욱 큰 광 전력이 필요하며, 반대로 게이트 감도는 감소한다. 이 결과는 낮은 바이어스 전압에서 대부분의 금 역셉터가 부로 대전되어 있어 중성의 금 농도가 상대적으로 훨씬 적기 때문인 것으로 생각할 수 있다.

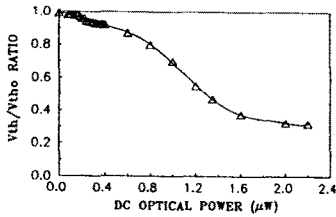


그림 5  $V_{Th}/V_{Th0}$ 비의 dc 광 전력 의존성

광 펄스 전력에 대한 스위칭 전압의 변화를 나타내면 그림 6과 같다. 그림에서 스위칭 전압은 펄스 광에 덜 민감하며, 따라서 펄스 광으로 소자를 턴온시키기 위해서는 DC광 보다 더 큰 optical power가 요구된다. 이것은 펄스광의 평균 광 전력이 DC광 전력에 비해 훨씬 작기 때문인 것으로 생각할 수 있다.

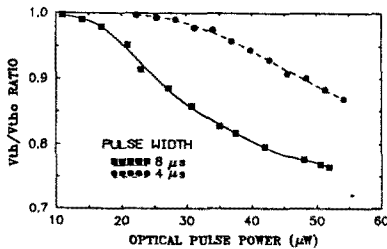


그림 6  $V_{Th}/V_{Th0}$ 비의 광 펄스 전력 의존성

그림 7과 8은 측정된 턴온 지연 시간과 상승 시간의 펄스 광 전력 의존성을 나타낸 것이다. 지연 시간과 상승 시간은 모두 펄스 광 전력이 증가하면 감소하였다. 한편 턴 오프 지연 시간과 하강 시간은 무시할 수 있을 만큼 작았다. 이것은 Au에 의해 캐리어 수명이 대폭적으로 감소하는 것에 기인한다고 생각된다.

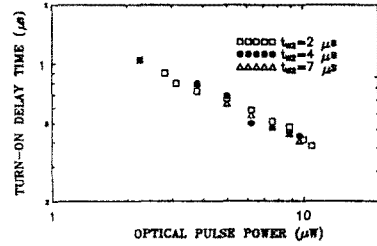


그림 7 턴온 지연 시간의 광 펄스 전력 의존성

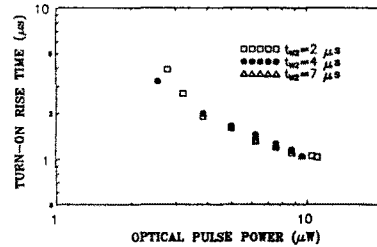


그림 8 턴온 상승 시간의 광 펄스 전력 의존성

## 5. 결론

본 연구에서는 금을 확산한 고저항 실리콘에 p'와 n' 전극을 설치한 p-i-n 다이오드를 제작하여 전기적 및 광학적 스위칭 특성을 간단히 고찰하였다.

제작된 p-i-n 소자의 스위칭 전압은 LED를 사용해 쉽게 제어할 있었다. dc 광 및 펄스광을 사용해 광 스위칭 전압을 측정된 결과, p-i-n 소자는 dc 광에 더 민감하였으며, 일반적으로 펄스 광에 대해 더 큰 광 전력이 요구되었다. 이 소자는 벌크 OASS 소자의 단점인 높은 접촉 저항 문제를 해결하는 동시에 순방향 모드에서 동작하므로 역방향 모드에 비해 스위칭 속도를 향상시킬 수 있다. 특히 Au가 캐리어 수명을 매우 짧게 만들므로 턴 오프 시간이 무시할 정도로 작아져서, 금을 도우핑한 p-i-n 소자는 고속 파워 스위치로 사용할 수 있는 가능성을 보였다.

## 인용 문헌

- [1]C.K.Sun et al, "Simulation and Interpretation of Fast Rise Time Light-Activated p-i-n Diode Switches," IEEE Trans. on Electron Devices, vol.33, no.10, p.2240, 1982.
- [2]A.Rosen and F.Zutavern, *High-Power Optically Activated Solid-State Switches*, Artech House, inc., Boston, 1984.
- [3]R.A.Roush et al, "Bistable Behavior of the Dark Current in Coper-doped Semi-insulating Gallium Arsenide," J. Appl. Phys., vol.71, 1982, p.4345.
- [4]M.A.Lampert and P.Mark, *Current injection in Solids*, Academic press, New York(1970).