

Optimized doping density and doping profile of pn junction for using high power device

장건태
삼육대학교, 서울특별시
geontaejang@gmail.com

본 논문에서는 dopant density에 의존적인 pn junction의 breakdown 특성을 향상시키기 위하여, doping density와 doping profile에 대하여 분석했다. Doping density와 doping profile은 역방향 junction breakdown voltage를 결정하는 중요한 요소인 공핍영역의 두께와 공핍영역 내에 인가되는 electric field를 결정한다. Uniform doping profile과 Gaussian doping profile을 비교했고, 고전압 환경에서 사용할 수 있는 소자를 제작하는데 더욱 적절한 doping profile과 doping 농도에 대해 기술했다.

INTRODUCTION(또는 서론)

펄스파워는 극도의 빠른 시간 내의 스위칭 기법을 통하여 고전압 또는 대전류를 발생시켜 부하에 효율적인 에너지를 인가해 주는 기술로 1930년대 전자가속을 통한 러더퍼드 원자 모형 검증에서부터 시작하여, 1940년대 군용레이더 및 입자가속기 제어 기술로 각광받았다 [1].

pin구조를 사용하는 광전도성 반도체 스위치(PCSS, photoconductive semiconductor switch)는 빠른 응답속도를 위하여 고전압에서 사용되는 것이 필수적인데, 어느정도 역전압 이후에 junction breakdown 현상이 발생하여 dark 상태에서도 역방향으로 대전류가 흐르게 된다. 그런 현상이 발생되지 않게 하기 위해서는 구조적인 문제를 제외하고, 도핑 방법이나 농도면에서 최적의 방법과 농도를 찾기위한 노력이 필요하다. Pin diode의 구조를 기반으로한 PCSS 연구가 진행되고 있는데 [2], 본 논문에서는 pin diode와 구조가 비슷한 pn diode를 이용하여 분석한다. 도핑의 분포에 따라서도 접합면의 maximum electric field의 변화가 발생되는데, Gaussian distribution인 경우에서 서로 다른 doping fall-off constant(dfc)에 따라 junction에서의 potential에 관한 연구가 보고되었다[3]. Doping의 방법과 농도에 초점을 맞춰 광전도성 반도체 스위치 등 고출력, 고전압 소자의 성능 향상을 위해 breakdown voltage 특성에 대한 경형성을 파악하고자 한다.

CALCULATION METHODS

본 논문에서는 pn junction을 가진 소자의 doping profile과 doping density에 대한 junction breakdown voltage 특성을 파악하기 위하여 'Drift-Diffusion 기반 bulk P/N Junction Diode 특성 해석용 SW'를 이용하였다. 사용된 시뮬레이터는 doping method에 따라 uniform, linear, Gaussian으로 나눌 수 있고, 본 연구에서는 uniform doping profile(UDP)과 Gaussian doping profile(GDP)을 이용하여 각각의 doping density, Gaussian doping profile에서 농도값의 변곡점이 되는 값, 즉 figure 1에서 에 해당하는 값에 따라 junction 특성을 살펴본다.

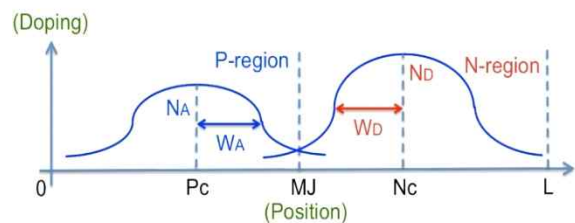


Fig. 1. Gaussian doping profile

pn접합에 전압이 인가된 경우를 포함하여 모든 전기적 특성의 출발점이 되는 열평형 상태의 에너지 대역도를 그리는 과정은 Poisson equation을 이용하여 charge density, electric field, electrostatic potential을 계산하고, junction 내에서 n-type에서 p-type 방향으로 형성되는 electric field의 크기를 관찰한다. 접합에 존재하는 공간전하영역의 폭과 내부에 존재하는 최대 전계는 pn junction을 이용하는 반도체 소자의 전기적 특성을 지배하는 중요한 특성변수다. 특히 공간전하영역은 pn junction을 이용하는 전자소자의 누설 전류와 광응답 특성을 지배하는 중요한 요소이고, 또한 공간전하영역에 의해 결정되는 최대 전계는 pn 접합이 얼마나 큰 역방향 전압까지 붕괴되지 않고 잘 동작할 수 있는지를 결정하는 중요한 지표이기도 하다.

전압이 인가된 공간전하영역의 폭은 다음의 주어진 식에 의해 계산된다.

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_{bi} - V)}, \quad V_{bi} = V_{th} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (1)$$

은 반도체 기판의 dielectric constant, 는 두 영역의 역셉터원자, 도너원자 도핑농도, 는 열평형 상태 내부 전압(built-in voltage), V는 인가된 전압의 크기이다.

공핍영역은 pn junction내의 최대 전계를 결정하는 중요한 역할을하게 되는데 예를들어, 일방향 접합을 고려하면 최대 전계는 다음과 같이 주어지

게 된다.

$$E_{max} = \frac{eN_D x_n}{\epsilon}$$

위 식에서 사용한 공핍폭은 근사적으로 다음과 같다.

$$x_n \approx \sqrt{\frac{2\epsilon(-V)}{e} \frac{1}{N_D}}$$

주어진 공핍폭은 역방향 전압에 대해서만 유효하고, 인가된 전압 V에 비해 무시할 수 있을 정도로 작으므로 여기에서는 무시해도 무방하다.

Avalanche junction breakdown이 일어나는 전압()은 도핑 농도에 의존하며, breakdown에서의 maximum electric field()는 critical electric field로 정의되며, one side pn junction diode의 경우 doping density와 breakdown voltage의 관계는 다음과 같다[4].

$$V_B = \frac{\epsilon E_{crit}^2}{2qN_B}$$

본 시뮬레이션에서는 온도 300K에서의 반도체의 doping profile과 doping density는 각각 Table 1, Table 2와 같이 설정하고, device의 길이와 metallurgical junction의 위치는 각각 5um, 2.5um로 지정하여 pn diode의 depletion region에서의 maximum electric field 그리고 breakdown을 doping 농도와 분포 의존성에 대해 논하고자 한다.

No.	Doping profile	N _A	N _D
1.	UDP	10 ¹⁷	10 ¹⁷
2.	UDP	3 · 10 ¹⁷	3 · 10 ¹⁷
3.	UDP	5 · 10 ¹⁷	5 · 10 ¹⁷
4.	UDP	7 · 10 ¹⁷	7 · 10 ¹⁷
5.	UDP	8 · 10 ¹⁷	8 · 10 ¹⁷

Table 1. doping profile, impurity concentration

No.	Doping profile	N _A , N _D [cm ⁻³]	σ[cm]
1.	GDP	10 ¹⁷ , 10 ¹⁷	0.1
2.	GDP	10 ¹⁷ , 10 ¹⁷	0.3
3.	GDP	10 ¹⁷ , 10 ¹⁷	0.5
4.	GDP	10 ¹⁷ , 10 ¹⁷	1
5.	GDP	10 ¹⁷ , 10 ¹⁷	5
6.	GDP	10 ¹⁷ , 10 ¹⁷	10

Table 2. Doping profile, impurity concentration, spread of P-doping, N-doping

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1은 pn junction의 breakdown을 결정하는 중요한 요소로서 역할을 하는 열평형 상태에서 doping density의 변화에 따른 pn junction 내의 electric field를 보여준다. 그림에서 보는 것처럼 도핑 농도가 증가함에 따라 pn junction의 공핍영역이 감소하고, 공핍영역이 감소함으로 인해 junction내에 인가되는 electric field의 크기가 커지는 것을 볼 수 있다.

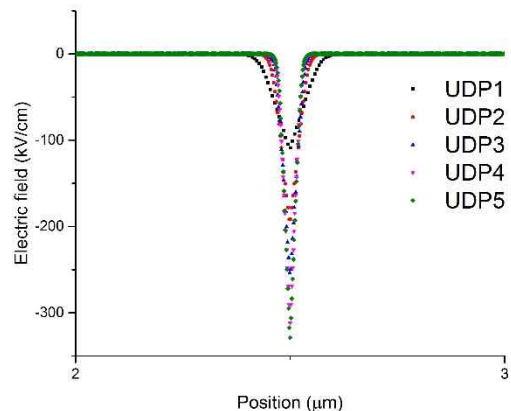


Fig. 1. Uniform doping profile 농도의 변화에 따라 소자내부에 인가되는 열평형상태 electric field

Figure 2는 Gaussian doping profile을 나타낸 것으로, 값이 커지면서 n타입과 p타입의 중심으로부터 dopant의 분포가 넓어지는 것을 볼 수 있고, Figure 3은 값에 따라 소자 내부에 인가되는 electric field를 나타낸 것으로 값이 작아지면서 공핍영역안에 인가되는 electric field가 uniform doping profile에서와 달리 평행한 현상을 보였으며, 다시 시그마의 증가에 따라 uniform doping profile의 electric field와 비슷한 형태이며 그 값은 uniform doping한 소자에서 더 크다. 또, 을 기준으로 하여 서로 다른 모습을 보였다. <1일 때, 의 증가에 따라 공핍영역의 크기가 감소했고, >1 일 때는 의 감소에 따라 공핍영역의 크기가 작아지는 것을 확인했다.

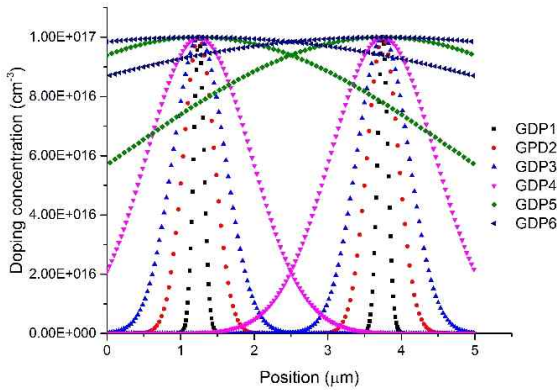


Fig. 2. Gaussian doping profile

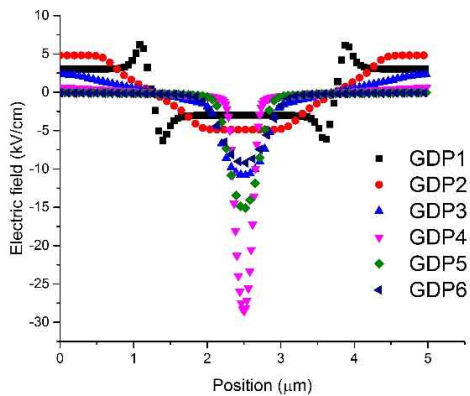


Fig. 3. 크기의 변화에 따라 소자 내부에 인가되는 열평형상태 electric field

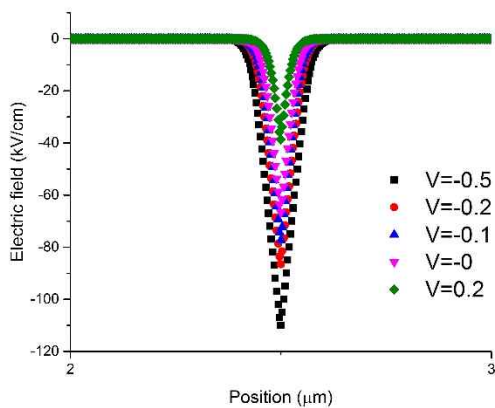


Fig. 4. Forward, reverse bias voltage 에 따른 소자 내 electric field

Figure 4는 p-type과 n-type 반도체를 uniform 하게 doping하여 forward, reverse bias voltage에 따라 소자 내에 발생하는 electric field의 크기를 나타낸 것이다. 위의 그림에서 볼 수 있듯이 reverse voltage가 인가되었을때, 그 크기가 커질 수록 공핍영역의 길이가 길어지고 그에따라

maximum electric field의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있고, forward voltage가 인가되면 외부 전압이 없을때보다 공핍영역이 좁아지고 공핍영역 내에서 maximum electric field가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

CONCLUSION(또는 결론)

본 논문에서는 doping profile, doping density, 외부 인가 전압에 따른 공핍영역 내의 electric field를 확인해 보았다. Pn junction의 breakdown voltage를 결정하는데에는 공핍영역 내에 인가되는 electric field, 그리고 doping density등이 있다. 우리가 사용하고자 하는 pulsed power device는 우리가 사용하고자 하는 상태에서 고전압을 인가하더라도 impact ionization에 의한 junction breakdown이 일어나지 않아야 하는데 그러기 위해서는 pn junction 내부에 인가되는 electric field가 작아야 한다. 내부에 작은 electric field를 발생시키기 위해서는 낮게 도핑을 하는 것이 필요로 하며, 그에 따라 넓은 공핍영역이 필수적이다. Gaussian doping을 하면 같은 uniform하게 doping한 pn junction에 대하여 더 적은 electric field를 발생시키고, 의 값이 작아짐에 따라 electric field의 크기가 작아지는 것을 확인했고, high power device에서 사용하기에 좋을것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGEMENT(또는 감사의 글)

본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (2012M3C1A6035302)

REFERENCES(또는 참고문헌)

- [1] Martin, J.C., "The pre-history of pulsed power", IEEE Colloquium on Pulsed Power, pp.1-3, 1995.
- [2] C.-H. Lee, Junsung Park, Jae-hyung Jang and Sung-Min Hong, "Fabrication and modeling of photoconductive switch based on p-i-n structure", Korean conference on semiconductor, 2016
- [3] Saptaka, A. A. N., T. Abuzairi, and Djoko Hartanto. "Effect of Gauss doping profile on electric potential of pn diode." *QiR (Quality in Research)*, 2013 International Conference on. IEEE, 2013.
- [4] Sze, Simon Min. *Semiconductor devices: physics and technology*. John Wiley & Sons, 2008.