

Modeling the Silicon Carbide Schottky Rectifiers

李 裕 相* · 崔 然 益** · 韓 民 九***
(You-Sang Lee · Yearn-Ik Choi · Min-Koo Han)

Abstract - The closed-form analytic solutions for the breakdown voltage of 6H-SiC RTD(silicon carbide reachthrough diode) having metal-n⁻n⁺ Schottky structure or p⁺-n⁻-n⁺, are successfully derived by solving the impact ionization integral using an effective ionization coefficient. For the lightly doped n⁻ epitaxial layer, the breakdown voltages of SiC RTD are nearly constant with the increased doping concentration while the breakdown voltages decrease for the heavily doped epitaxial layer.

Key Words : 6H-SiC RTD(reachthrough diode), breakdown voltage, effective ionization coefficient

1. 서 론

에너지 밴드-갭(energy band-gap)이 큰 SiC(Silicon Carbide)는 Si이나 GaAs 반도체에 비해 항복전압이 높고 고온 동작에 유리하므로, 차세대 전력 반도체 소자로서 지대한 관심을 끌고 있다. 가장 기본적인 소자는 쇼트키 또는 p⁺n 접합을 이용한 정류기이다.

일반적으로 다이오드는 저농도 영역의 n 에피층(epitaxial layer)이 완전히 공핍(depletion)되는가의 여부에 따라, 논리치스루와 리치스루 구조로 나눌 수 있으며[1], 그림 1에 각 다이오드의 단면도 및 전계분포를 나타냈다.

한편, 논리치스루, 리치스루 다이오드 모두 순방향에서 온-저항은 작을수록 좋고, 역방향에서 항복전압은 클수록 좋다. 따라서 항복전압이 같을 경우, 단위 면적당 온-저항을 작게 하는 것이 유리하다. RTD는 에피층의 두께를 얇게 하고 불순물 농도를 낮게 함으로써, NRTD와 같은 항복전압을 유지하며, 온-저항이 작게 설계할 수 있다. 즉, 에피층의 불순물 농도, N_D와 에피층의 두께, W_{epi}를 조절하여 NRTD보다 우수한 소자를 얻을 수 있다.

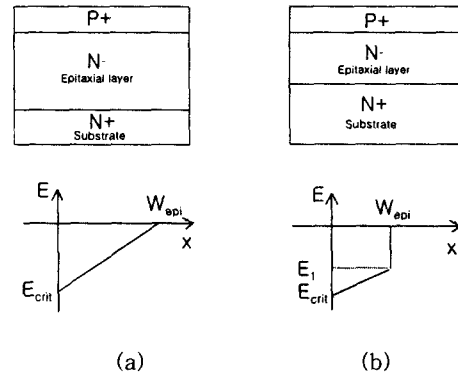


그림 1 논리치스루와 리치스루다이오드의 단면도 및 전계분포
(a) 논리치스루 다이오드 (b)리치스루 다이오드

Fig. 1 Electric field and cross-section of
(a) non-reachthrough and (b) reachthrough diode

현재 SiC 논리치스루 다이오드의 항복전압에 관한 실험 결과 및 해석적 모델이 보고된 바 있으나, 리치스루 다이오드에 관한 실험결과 및 모델은 알려진 바 없다. 따라서 리치스루 SiC 다이오드의 항복전압에 대한 해석적인 식이 필요하다.

그림 2는 1997년 ISPSD(International Symposium on Power Semiconductor Devices)에 발표된 4H-SiC 리치스루 다이오드의 계산된 항복전압을 보여주고 있다[2].

* 準 會 員 : 서울大 電氣工學部 博士課程
 ** 正 會 員 : 亞洲大 分子科學技術學科 教授 · 工博
 *** 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 教授 · 工博
 接受日字 : 1999年 5月 31日
 最終完了 : 1999年 12月 29日

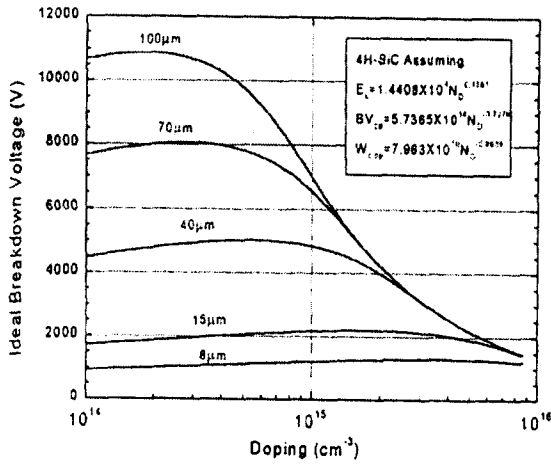


그림 2 4H-SiC RTD의 항복전압의 계산치[2]
Fig. 2 Calculated breakdown voltages in 4H-SiC RTD[2]

그림 2에서 에피층의 불순물 농도가 10^{14} cm^{-3} 에서 10^{15} cm^{-3} 으로 증가함에 따라 항복전압도 증가하고 있다. 이러한 결과는 항복전압을 계산할 때, 리치스루가 아닌 논리치스루 조건의 임계전계(critical electric field)를 사용했기 때문이다.

본 논문에서는 위와 같은 문제점을 인식하고, 리치스루 구조의 임계전계를 구한 후, 이를 사용하여 충돌이온화적분(impact ionization integral)을 수행함으로써, 리치스루-다이오드의 항복전압에 대한 해석적 식을 유도하였다.

2. 항복전압에 관한 해석적 모델

그림 1(b)의 RTD의 단면도와 일차원 전계분포에서, 단방향 계단형(one-sided step) p'-n' 접합과 공핍근사를 가정하면, Poisson 방정식은 식(1)과 같이 된다.

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{dE}{dx} = -\frac{qN_D}{\epsilon_{SiC}} \quad (1)$$

이때, q는 전자전하량, ϵ_{SiC} 는 SiC의 유전율, N_D 는 에피층의 불순물 농도이다.

식(1)을 x에 대해 적분하면 식(2)를, 그림 2에서 사다리꼴 면적을 계산하면 식(3)을 각각 얻는다.

$$E(x) = \frac{qN_D}{\epsilon_{SiC}} x - E_{crit} \quad (2)$$

$$V_B = \frac{1}{2}(E_{crit} + E_1) \times W_{epi} \quad (3)$$

$$\text{where } E_1 = E(W_{epi}), \quad E_{crit} = \frac{V_B}{W_B} + \frac{qN_D W_{epi}}{2\epsilon_{SiC}} \quad (4)$$

한편, avalanche breakdown 조건을 만족해야 하므로, 이온화적분식은 다음과 같이 표시되며[1,3], 상세한 내용은 부

록 1에 나타났다.

$$\int_0^{W_{epi}} 8.0 \times 10^{-54} E^9 dx = 1 \quad 10^{14} \text{ cm}^{-3} \leq N_D \leq 10^{16} \text{ cm}^{-3} \quad (5)$$

식(2), (3), (4)를 식(5)에 대입하여 풀면, 항복전압, V_B , 에피층 두께, W_{epi} 와 불순물 농도, N_D 를 변수로 하는 식(6)이 유도된다.

$$\left(\frac{V_B}{W_{epi}} + \frac{qN_D W_{epi}}{2\epsilon_{SiC}} \right)^{10} - \left(\frac{V_B}{W_{epi}} - \frac{qN_D W_{epi}}{2\epsilon_{SiC}} \right)^{10} - \frac{10qN_D}{8.0 \times 10^{-54} \epsilon_{SiC}} = 0 \quad (6)$$

식(6)의 항복전압을 불순물 농도 및 두께의 함수로 그리면 그림 3과 같이 되며, 그림 2의 결과[2]와 달리, 낮은 불순물 농도 영역에서 항복전압은 불순물 농도에 거의 무관하게 일정한 것을 알 수 있다. 일반적으로 불순물 농도가 낮은 영역(그림 3의 경우 $10^{14} \text{ cm}^{-3} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$)에서, 불순물 농도가 증가해도 RTD의 항복전압은 증가하지 않고 거의 일정하다는 결과와 잘 일치하고 있다.

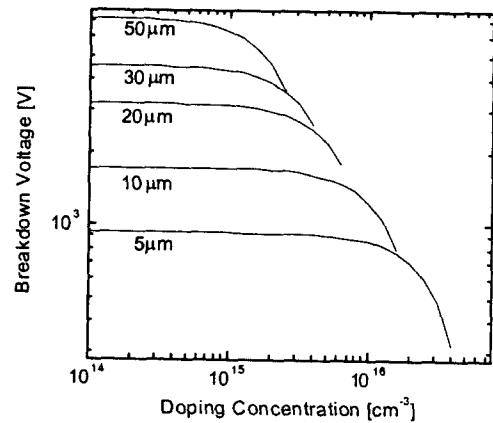


그림 3 6H-SiC RTD에서의 유도된 항복전압
Fig. 3 Derived breakdown voltage of 6H-SiC RTD

그림 1과 같이 불순물 농도가 낮은 영역에서 항복전압이 증가한 것은 RTD가 아닌 NRTD의 임계 전계를 통해 계산되었기 때문이다. 형태와 계산이 복잡한 식(6)을 explicit한 근사 식으로 변형하면[자세한 내용은 부록2 참조], 불순물 농도가 낮을 때는 식(7)로, 불순물 농도가 높을 때는 식(8)로 표현 할 수 있다. 두 영역의 사이에서는 식(9)를 그대로 사용해야 한다.

$$N_D \leq 7.776 \times 10^{11} W_{epi}^{-1.111} \quad \text{일 때, } V_B = 7.937 \times 10^5 W_{epi}^{0.8889} \quad (7)$$

$$N_D \geq 1.818 \times 10^{12} W_{epi}^{-1.111} \quad \text{일 때,}$$

$$V_B = 5.454 \times 10^4 N_D^{0.1} W_{epi} - 9.315 \times 10^{-8} N_D W_{epi}^2 \quad (8)$$

그림 4는 유도된 근사식(7)과 식(8)이 식(6)과 잘 일치하는 것을 보여주고 있어, 근사식의 타당성을 확인하였다.

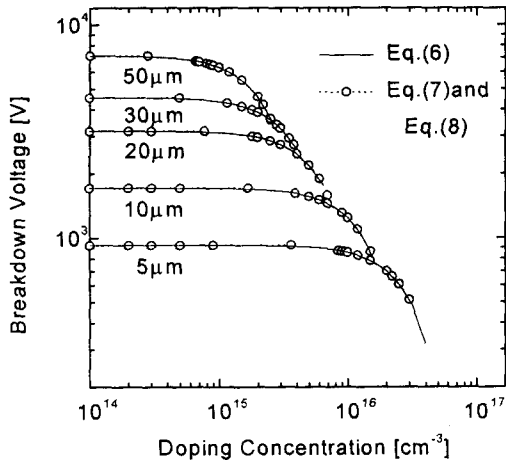


그림 4 유도된 항복전압의 근사식(7), (8)과 식(6)의 비교
Fig. 4 Comparison between approximated eqs. (7) & (8) and the eq. (6)

RTD의 항복전압은, 낮은 불순물 농도에서는 농도와 무관하게 거의 일정하였다. 또한, 높은 불순물 농도에서는 참고문헌 [2]에서 유도된 NRTD의 항복전압과 잘 일치한 것을 확인하였다.

3. 결론

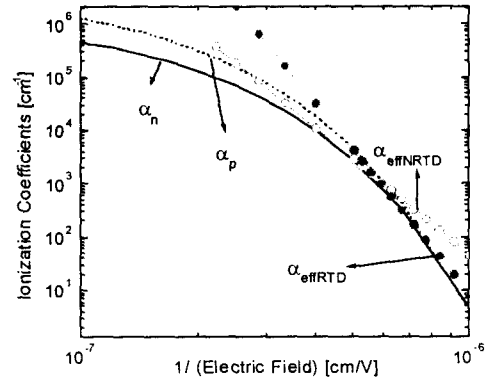
RTD의 이온화적분과 근사 기법을 사용하여, SiC RTD의 항복전압에 관한 해석적 모델을 간단한 closed-form으로 유도하였다. 낮은 불순물 농도에서 RTD의 항복전압은 농도와 무관하게 거의 일정하였으며, 참고문헌[2]의 오류를 수정하였다. 또한, 높은 불순물 농도에서는 참고문헌 [2]에서 유도된 NRTD의 항복전압과 잘 일치한 것을 확인하였다. 한편, 이온화 계수를 알면, 항복전압을 구할 수 있도록 일반적 수식을 유도하여, 4H-SiC나 Si에서도 RTD의 항복전압을 계산식에 의해 쉽게 얻을 수 있도록 하였다. 본 해석적 모델은 리치스루 구조를 도입한 전력 MOSFET이나 정류기와 같은 SiC 정류기의 설계에 도움이 될 것으로 기대된다.

부록

1. 6H-SiC의 유효 이온화 계수는, RTD의 바탕 농도인 10^{14} cm^{-3} 과 10^{16} cm^{-3} 영역에서 전자 및 정공의 이온화 계수, α_n and α_p 를 근사 통합하여 다음 식(1-1)과 같이 추출했다.

$$\alpha_{eff} = 8.0 \times 10^{-34} E^3 [\text{cm}^{-6}] \quad \text{for } 6\text{H-SiC in } 10^{14} \leq N_D \leq 10^{16} \quad (1-1)$$

부록 그림 1은 새롭게 추출된 유효 이온화 계수가 낮은 에피층 불순물농도 영역에서 기존의 NRTD에서의 유효 이온화 계수보다 더욱 타당함을 보여주고 있다.



부록 그림 1 6H-SiC의 α_n , α_p 와 추출된 유효 이온화 계수

Appendix Fig 1 α_n , α_p and extracted effective ionization coefficient of 6H-SiC.

2 낮은 불순물 농도영역과 높은 불순물 농도영역으로 구간을 나누어 설정한다. 아래와 같이 a, b, c를 정의하면, 본문의 식(7)을 부록 식(2-1)로 표현할 수 있다.

$$(\alpha + \beta)^{10} - (\alpha - \beta)^{10} = \gamma \quad (2-1)$$

여기서 $\alpha = \frac{V_B}{W_{epi}}$ $\beta = \frac{qN_D W_{epi}}{2\epsilon_{SiC}}$ $\gamma = \frac{10qN_D}{8.0 \times 10^{-34} \epsilon_{SiC}}$

식(2-1)을 풀어서 정리하면, 아래와 같은 식(2-2)를 얻는다.

$$20\alpha\beta(\alpha^8 + 12\alpha^6\beta^2 + 63\alpha^4\beta^4 + 12\alpha^2\beta^6 + \beta^8) = \gamma \quad (2-2)$$

$(\alpha + \beta)^{10} \gg (\alpha - \beta)^{10}$ or $(\alpha + \beta)^{10} \gg 100(\alpha - \beta)^{10}$ 인 영역1에서는, (2-1)은 (2-3)으로 근사할 수 있다.

$$(\alpha + \beta)^{10} \approx \gamma \quad (2-3)$$

한편, $\alpha^2 \gg 12\beta^2$ or $\alpha^2 \gg 120\beta^2$ 인 영역2에서는, (2-2)는 (2-4)로 정리된다.

$$20\alpha^9\beta = \gamma \quad (2-4)$$

이제 α, β, γ 의 치환하기 이전의 값을 (2-3), (2-4)에 각각에 대입하여 정리하면, RTD의 항복전압을 아래의 (2-5), (2-6)과 같이 두 영역에서, 에피층의 불순물 농도와 에피층 두께의 함수로 유도할 수 있다.

$$N_D \leq 7.7764 \times 10^{11} W_{epi}^{-1.111} \text{ 일 때,} \\ V_B = 7.937 \times 10^3 W_{epi}^{0.8889} \quad (2-5),$$

$$N_D \geq 1.8178 \times 10^{12} W_{epi}^{-1.111} \text{ 일 때,} \\ V_B = 5.454 \times 10^4 N_D^{0.1} W_{epi} - 9.315 \times 10^{-8} N_D W_{epi}^2 \quad (2-6),$$

3. 4H-SiC 와 6H-SiC 또한 Si의 경우 모두, 유효 이온화 계수는 다음과 같이 일반화 할 수 있다.

$$\alpha_{eff} = M \cdot [E(x)]^m \quad (3-1)$$

이 때, m은 정수

(3-1)을 본문 식(5)에 대입하여 풀면, 다음과 같은 일반화된 RTD의 항복전압을 구할 수 있다.

$$N_D \geq k \frac{m+1}{q} \left(\frac{\epsilon}{M} \right)^{\frac{1}{m}} W_{epi}^{-\frac{m+1}{m}} \quad \text{일 때}$$

$$V_B = \left\{ \frac{q(m+1)}{M \cdot \epsilon} \right\}^{\frac{1}{m+1}} N_D^{\frac{1}{m+1}} W_{epi}^{\frac{1}{m}} - \left(\frac{q}{2\epsilon} \right) N_D W_{epi}^2 \quad (3-2)$$

$$\text{단, } k = \frac{100^{\frac{1}{m+1}} - 1}{100^{\frac{1}{m+1}}}$$

$$N_D \leq \sqrt{\frac{6}{m(m-1)}} \left(\frac{\epsilon}{5q} \right) M^{\frac{1}{m}} W_{epi}^{-\frac{m+1}{m}} \quad \text{일 때,}$$

$$V_B = \left(\frac{1}{M} \right)^{\frac{1}{m}} W_{epi}^{\frac{m-1}{m}} \quad (3-3)$$

(3-3)에서 보듯이, 물질의 종류에 상관없이, RTD의 경우에 피층의 불순물 농도가 낮은 경우에는 항복전압이 불순물 농도와 무관하게 거의 일정하다는 것을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 1998년도 한국대학교육협의회 대학교수 국내교류 연구비 지원에 의한 것임.

참 고 문 헌

[1] B. J. Baliga, *Modern Power Devices*, Jone Wiley & Sons, 1987.
 [2] J. W. Palmour, et al., Silicon carbide for power devices, Proc. ISPSD'97, pp. 25-32, 1997.
 [3] Dae-Seok Byeon, Min-Koo Han, and Yearn-Ik Choi, Analytical solution of the breakdown voltage for 6H-silicon carbide p+n junction, J. Appl. Phys., Vol.79, No.5, pp. 2796-2797, 1996.

저 자 소 개



이 유 상 (李 裕 相)
 1973년 12월 9일 생. 1997년 서울대학교 전기공학부 공학사. 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 1999년~현재 동 대학원 전기공학부 박사과정.
 Tel : 02-880-7254



최 연 익 (崔 然 益)
 1953년 11월 23일생. 1976년 서울대 공대 전자공학과 졸업. 1981년 한국과학기술원 졸업(공학). 1982년 UC Berkeley 전기 및 전산공학과 Research Associate. 현재 아주대 분자과학기술학과 교수. 주관심분야 : 전력반도체소자, TFT.



한 민 구 (韓 民 九)
 1948년 7월 21일생. 1971년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 미국 Johns Hopkins Univ. 졸업(공학). 1979년 미국 뉴욕 주립대 조교수. 현재 서울대 공대 전기공학과 교수