

항복전압에 대한 3차원 효과를 고려한 전력 MOSFET의 최적 die설계

*김재형, *최연익, 한민구

서울대 전기공학과 *아주대 전자공학과

Optimal Die Design of the Power MOSFET considering the three dimensional Effect on the Breakdown Voltage

Jae-Hyung Kim, Yearn-ik Choi, Min-Koo Han

Department of Electrical Engineering, Seoul Nat'l University

Department of Electronic Engineering, Ajou University

Abstract

An analytic model for the optimum design of the power MOSFET considering the degradation of the breakdown voltage by the three dimensional effect is proposed. The proposed method gives the optimum design parameters such as the lateral radius of window curvature and the doping concentration of the epi-layer, which does not minimize the on-resistance but also maintains the required breakdown voltage. The analytical results are verified by the quasi 3D simulation tools, MEDICI, and it is found that the proposed method may be a good guideline for the design of power MOSFET.

MOSFET의 모서리 부근에서의 수평곡률반경 설계는 이론이나 엄밀한 계산에 의하지 않고 경험적인 방법에 의존하고 있는 실정으로 항복전압과 on-저항 모두를 만족시키는 에피층의 농도 및 수평곡률반경의 설계 방법은 제시되고 있지 않다.

본 논문에서는 항복전압을 일정전압 이상으로 유지하면서도 최소의 on-저항을 가지는 에피층의 농도 및 수평곡률반경을 구하는 해석적인 방법을 제안하였으며, 이를 quasi-3D 시뮬레이터인 MEDICI를 통해 검증하였다.

I. 서론

전력용 MOSFET은 bipolar 트랜지스터에 비해 입력 임피던스가 크고 스위칭 속도가 빠르기 때문에 power supply, 디스크 드라이브 등 전력전자 회로에서의 응용범위가 광범위하다. 그러나, 소자의 특성상 소자의 순방향 전류가 다수반송자에 의해서만 동작하기 때문에 빠른 스위칭특성에도 불구하고 높은 on-저항이 문제가 되어 왔다. 따라서, 전력용 MOSFET의 설계에 있어서 고려해야 하는 가장 중요한 문제는 항복전압을 일정수준 이상으로 유지하며 동시에 순방향 동작시 소자의 on-저항을 최소로 하는 것이다.[1]

항복전압과 on-저항사이에는 에피층의 농도에 대해 trade-off관계가 존재하며 적절한 에피층의 농도를 이용하여 이 관계를 최적화시킬 수 있다. 그러나 실제 소자의 경우, die 모서리 부근에서의 전계집중에 의한 항복전압의 급격한 감소를 막기 위해 일정한 수평곡률반경을 가지는 확산층을 사용하므로 이 영역에서의 항복전압은 3차원 효과에 의해 원통형 접합의 항복전압보다 낮아진다.[2,3]

그러므로, 항복전압에 대한 최적설계를 위해서는 3차원 효과를 고려한 에피층농도 및 확산층의 수평곡률반경 모두를 고려한 설계가 바람직하다. 그러나, 지금까지의 전력

II. 본론

A. 해석적 모델

본 논문에서는 그림 1과 같은 형태의 수직형 전력 MOSFET을 가정하였다. 소자의 능동영역은 한 변의 길이가 $2a[\mu m]$ 인 정사각형 안에 존재할 수 있으며 수많은 단위 cell이 집적되어 있어서 on-저항은 능동영역의 면적에 반비례하고 소자의 항복은 능동영역의 모서리부근에서 일어난다고 가정하였다. 또한 실제 소자에서 사용되는 것처럼 모서리 부분은 항복전압의 급격한 감소를 방지하기 위해 반지름 $R_m[\mu m]$ 을 가지는 호로 처리되었고 항복전압을 최대한 얻기 위해 외부에 적절한 FLR(Field Limiting Ring)을 사용한 것으로 가정하였다.

FLR의 설계는 정해진 에피층 농도에 대해 2차원적인 die의 직선부분에서의 항복전압을 최대한 할 수 있는 설계 방식[4]을 따랐으며 이 때의 실제 항복전압은 이상적인 최대항복전압(BV_m)의 약 80%이다. 이러한 설계에 의한 floating ring의 간격은 3차원적인 곡선영역에서도 일정하게 유지한다. 즉, 그림 1에서처럼 모서리부근에서의 능동영역의 끝단과 각 FLR은 동심원을 이룬다.

소자의 항복은 전계의 집중이 가장 심한 수평곡률반경 R_m 을 갖는 die의 곡선 영역에서 가장 먼저 일어나므로 이 영역에서의 항복전압이 전체소자의 항복전압을 결정한다.

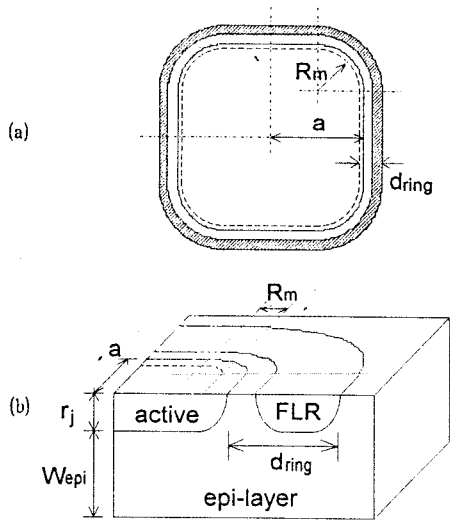


그림 1. (a) 해석에 사용된 소자의 평면도
(b) 단면도

따라서, 해석에 이용한 모델의 항복전압은 능동영역의 확산장 반지름이 R_m 이고 FLR이 여기에 동심원을 이루고 있는 원형 die에서의 항복전압과 같다고 가정할 수 있다. FLR의 ring사이 간격이 곡선영역에서도 일정하게 유지되므로, FLR을 사용할 경우 직선영역에서의 공핍층의 확장과 더불어 곡선영역에서의 공핍층의 확장 역시 이러한 동심원의 형태를 유지할 것이다. 따라서, 직선영역에서 FLR에 의한 항복전압의 증가율과 곡선영역에서의 항복전압의 증가율이 같다고 가정하면, 전체소자의 항복전압, 즉 FLR을 사용한 경우의 곡선영역에서의 항복전압 BV_{3r} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$BV_{3r} = \frac{BV_{2r}}{BV_{cyl}} \cdot BV_x \quad (1)$$

여기서, BV_{2r} 은 FLR을 사용한 경우의 직선영역에서의 항복전압, BV_{cyl} 은 FLR을 사용하지 않는 경우 원통형접합 영역에서의 항복전압[5] 그리고 BV_x 는 FLR을 사용하지 않는 경우 3차원효과가 고려된 곡선영역에서의 항복전압[2]이다.

BV_{2r} 은 실제 FLR설계로부터 얻을 수 있는, BV_m 의 80%를 가정하면

$$BV_{2r} = 0.8BV_{pp} = 0.8 \times \left(\frac{qN_d}{2\epsilon_s} \cdot W_c^2 \right) \quad (2)$$

로 나타낼 수 있으며 이는 에피층의 농도 N_d 의 함수이다.

또한, BV_x 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.[2]

$$\frac{BV_x}{BV_{pp}} = \frac{1}{x-1} \left[\left(\frac{r_j}{W_c} \right)^2 + 2 \left(\frac{7x-1}{8} \right)^{\frac{1}{7}} \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^{\frac{6}{7}} - \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^{x+1} \right]$$

$$+ (x+1) \left(\frac{7x-1}{8} \right)^{\frac{1}{7}} \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^{x-\frac{1}{7}} \left. \right\}^{\frac{2}{x+1}} \quad (3)$$

여기서, W_c 는 일차원적인 항복이 발생할 때의 공핍층의 깊이, r_j 는 접합깊이 그리고, 소자의 항복이 FLR에 의해 확장된 수평곡률반경 $R_m + d_{ring}$ 을 가지는 FLR의 끝단에서 일어나므로 매개변수 x 는

$$x = \frac{1+2(R_m+d_{ring})/r_j}{1+(R_m+d_{ring})/r_j} \quad (4)$$

로서 수평곡률반경(R_m)과 항복전압(BV_x)과의 관계를 나타내는 매개변수이다. d_{ring} 은 그림 1에서 보는 바와 같이 최적 FLR이 차지하는 거리이다.

따라서 소자의 실제 항복전압(BV_{3r})은 식(1)에서 N_d , R_m , r_j 그리고 FLR의 설계방식등에 의존한다.

전력용 MOSFET에서의 die면적을 고려한 on-저항은 도핑농도가 낮은 에피층에서의 저항이 거의 대부분을 차지하므로[1],

$$R_{on} = \rho \cdot \frac{l}{S} = \frac{1}{q\mu N_d} \cdot \frac{W_{epi}}{4a^2 + (\pi-4)(R_m-0.8r_j)^2} [\Omega] \quad (5)$$

으로 표시할 수 있으며 역시 수평곡률반경 R_m 과 에피농도 (N_d) 그리고 접합깊이(r_j)의 함수이다. 여기서, S 는 그림 1에서 보듯이 능동영역의 수평확산거리를 포함한 면적이며, l 은 에피층의 두께 W_{epi} 로서 W_c 보다 큰 non-punchthrough로 해석하였으며, ρ 는 에피층의 비저항으로서 농도에 관한 함수이다.

식(1)과 식(5)로부터 항복전압과 on-저항 모두 수평곡률 반경(R_m)과 에피층의 농도(N_d)의 함수임을 알 수 있으며, 따라서 일정한 a , W_{epi} , r_j 에 대해 N_d 와 R_m 쌍으로부터 해석적으로 항복전압과 on-저항을 계산할 수 있다. 최적화의 조건을 일정이상의 항복전압(BV)에서 최소의 on-저항을 가지는 것으로 정하면, 위의 해석적인 방법으로 구한 R_m , N_d 쌍으로부터 이러한 조건을 만족시킬 수 있다.

B. 결과 및 분석

해석에 이용된 고정된 조건은 $a=1000[\mu m]$, $W_{epi}=300[\mu m]$ 로서 식(1)에서 (5)까지로부터 알 수 있듯이 non-punchthrough인 경우에는 항복전압과 무관하다.

그림 2에서는 R_m 과 N_d 에 따른 on-저항의 변화를 나타내었다. 일정한 농도에 대해 R_m 이 작아지면 능동영역의 면적이 늘어나므로 저항은 감소하며 농도가 높아지는 경우에는 비저항이 작아지므로 저항이 감소한다.

그러나, on-저항을 감소시키기 위한 두 조건 모두 항복전압을 감소시키는 요인이 되므로 앞서 언급한 바와 같이 최적화를 위한 조건으로써 소자의 항복전압을 일정전압이상으로 유지시키는 것이 필요하다.

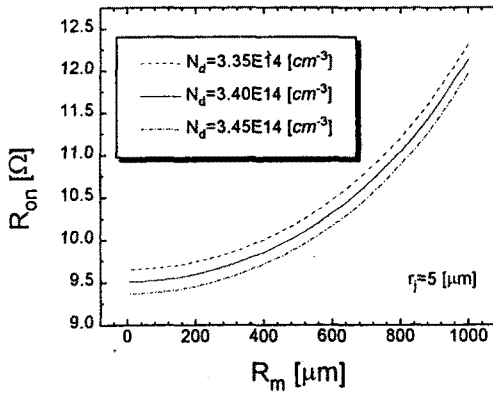


그림 2. R_m 과 N_d 에 의한 on-저항의 변화

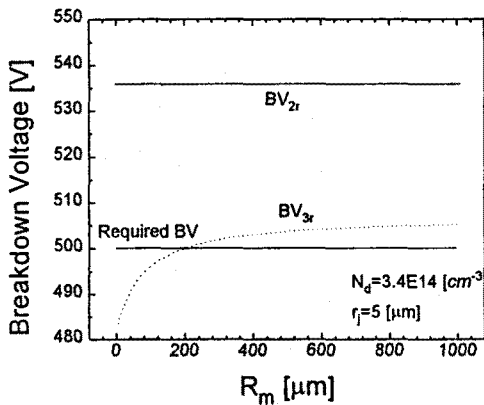


그림 3. N_d 가 일정한 경우의 R_m 에 의한 항복전압의 변화

그림 3은 이러한 조건($BV=500$)을 만족하는 한 예로서 500[V]이상의 항복전압을 유지하고자 할 때 도핑농도가 3.4×10^{14} 인 경우이다. FLR을 사용한 경우의 직선영역에서의 항복전압(BV_{2r})과 3차원효과에 의한 곡선영역에서의 항복전압이 수평곡률반경 R_m 에 대해 나타나 있다. 이 경우 조건을 만족하는 R_m 은 200[μm] 이상이고 그림 2에서 알 수 있듯이 R_m 의 감소에 따라 on-저항도 감소하므로 조건을 만족시키며 최소의 on-저항을 갖는 R_m 은 200[μm]이다.

Die의 직선영역에서의 항복전압은 수평곡률반경 R_m 에 관계없이 일정한 반면, 곡선영역에서의 항복전압은 작은 R_m 범위에서 급격히 감소하는 것을 알 수 있다.

다음으로 수평곡률반경과 도핑농도가 모두 변하는 경우 항복전압의 변화를 그림 4에 나타내었다.

다음 그림에서 도핑농도가 3.7×10^{14} [cm^{-3}] 이상인 경우 BV_{2r} 의 감소에 의해 원하는 항복전압 500[V]을 얻지 못하며, 3.1×10^{14} [cm^{-3}]이하인 경우에는 지나치게 높은 항복전압을 유지함으로써 on-저항의 손실을 가져온다. 즉, 3.4×10^{14} [cm^{-3}]인 경우에 비해 R_m 에 의한 on-저항의 이득은 상대적으로 작은 반면 N_d 에 의한 on-저항의 손실은 매우 크

다. 계산에 의하면 3.35×10^{14} [cm^{-3}], $R_m=65$ [μm]인 경우 최소 $R_{on}=9.66[\Omega]$ 이고 $N_d=3.4 \times 10^{14}$ [cm^{-3}], $R_m=200$ [μm]인 경우 $R_{on}=9.59[\Omega]$ 으로서 후자의 경우가 on-저항이 작다. 또한 3.1×10^{14} 의 농도에서 이러한 on-저항을 최소화하기 위해 BV_{3r} 을 500[V]정도가 되게 설계하려 한다면 R_m 이 65[μm]부근에서 설계되어야 한다. 이러한 경우 앞에서 언급했듯이 R_m 에 의해 항복전압이 급격한 변화를 보이므로 소자의 설계에 바람직하지 못하다.

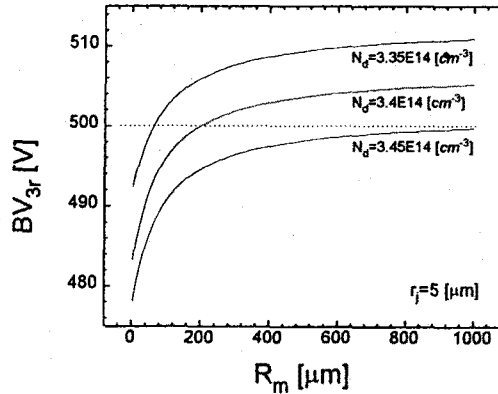


그림 4. R_m 과 N_d 에 의한 항복전압의 변화

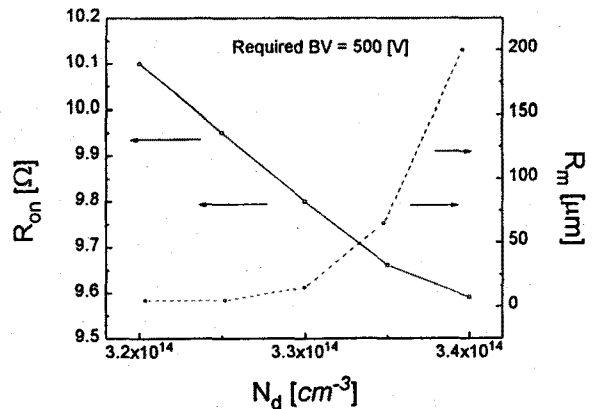


그림 5. 농도에 따른 최소 on-저항과 그에 대응하는 R_m

그림 5에 $BV=500$ [V]인 경우의 여러 도핑농도(N_d)에 대해 가장 낮은 on-저항을 가지는 수평곡률반경과 그에 대응하는 on-저항을 도시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 $N_d=3.4 \times 10^{14}$, $R_m=200$ [μm]인 조건에서 가장 낮은 on-저항을 갖는 것을 알 수 있다.

위와 같은 방법으로 $BV=500, 1000$ [V] 그리고 각각에 대해 $r_f=5, 10$ [μm]로 변화시키면서 계산한 최적화 조건을 < 표 1 >에 나타내었다. 여기서, a 는 1000[μm], W_{opt} 는 300[μm]로 고정시켰다.

<표 1> BV와 r_f 에 따른 최적화 조건

BV [V]	500		1000	
	r_f [μm]			
r_f [μm]	5	10	5	10
Nd [cm^{-3}]	3.4×10^{14}	3.35×10^{14}	1.35×10^{14}	1.3×10^{14}
BV _{pp} [V]	670	678	1340	1378
BV _{eyt} [V]	229	306	306	440
BV _x [V]	214	283	286	399
Rm [μm]	200	190	125	35
Ron [Ω]	9.6	9.7	24.0	24.9

단, a=1000[μm], Wepi=300[μm]

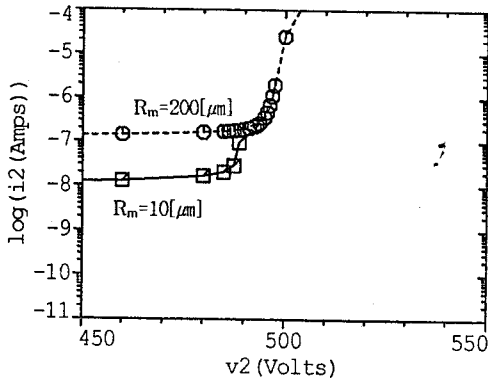


그림 6. 항복전압 시뮬레이션 결과

그림 6은 500[V]의 항복전압을 원하는 경우에 대해 R_m 이 10[μm]인 경우와 200[μm]인 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 계산결과가 각각 485[V], 500[V]인 것과 비교하여 잘 일치함을 볼 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 소자의 제조공정에서 필연적으로 발생하는 3차원효과에 의한 항복전압의 감소를 고려하여 전력 MOSFET에서의 최적화 die설계에 대한 해석적인 방법을 제시하였다. 지금까지는 경험적 방법에 주로 의존했던 전력 MOSFET의 die모서리 부근에서의 수평곡률반경과 에피층의 불순물농도를 주어진 항복전압이상으로 유지하면서 on-저항이 최소가 되게하는 조건에서 해석적으로 구하였으며, 이는 기존의 방법에 필요한 시간과 노력을 줄이는 데 많은 도움이 될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] C.Hu, M.H.Chi and V.M.Petel, "Optimum design of power MOSFET's," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol.31, pp.1693-1700, 1984.
- [2] I.J.Kim, S.D.Kim, Y.I.Choi and M.K.Han, "Analytic expressions for the three-dimensional effect on the breakdown voltage of planar junctions in nonpunchthrough and punchthrough cases," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol.41, pp.1661-1665, 1994.
- [3] A.Yabuta, C.G.Hwang, M.Suzumura and R.W.Dutton, "Numerical analysis of breakdown voltage using quasi three dimensional device simulation," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol.37, pp.1132-1140, 1990.
- [4] K.D.Suh, S.W.Hong, K.R.Lee and C.K.Kim, "An analysis for the potential of float guard rings," *Solid State Electronics*, Vol.33, pp.1125-1129, 1990.
- [5] B.J.Baliga, *Modern Power Devices*, John Wiley & Sons, New York, 1987.