

수평 구조의 MOS-controlled Thyristor에서 채널에서의 길이 및 불순물 농도에 의한 스위칭 특성

Switching Characteristics due to the Impurity Concentration and the Channel Length in Lateral MOS-controlled Thyristor

김남수¹, 최지원^{1,a}, 이기영¹, 주병권², 정태웅¹

(Nam-Soo Kim¹, Zhi-Yuan Cui^{1,a}, Kie-Yong Lee¹, Byeong-Kwon Ju², and Tae-Woong Jeong¹)

Abstract

The switching characteristics of MOS-Controlled Thyristor(MCT) is studied with variation of the channel length and impurity concentration in ON and OFF FET channel. The proposed MCT power device has the lateral structure and P-epitaxial layer in substrate. Two dimensional MEDICI simulator and PSPICE simulator are used to study the latch-up current and forward voltage-drop from the characteristics of I-V and the switching characteristics with variation of channel length and impurity concentration in P and N channel. The channel length and N impurity concentration of the proposed MCT power device show the strong affect on the transient characteristics of current and power. The N channel length affects only on the OFF characteristics of power and anode current, while the N doping concentration in P channel affects on the ON and OFF characteristics.

Key Words : MCT, Channel length, Impurity concentration, Latch-up current, Switching characteristics

1. 서 론

전력소자는 전력 MOSFET, IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor), MCT등 많은 발전을 이루어 왔는데[1,2], 현재의 전력소자는 고속 스위칭, 소형화, 적은 전력손실이 요구되고 있다. 전력 MOSFET 및 IGBT는 고속 스위칭 및 높은 파괴전압의 장점을 가지고 있는 반면, MOS 구동 사이리스터(MCT)는 MOSFET(MOS)으로 ON-OFF의 기능을 수행하고 있어, 상대적으로 빠른 스위칭 속도와 낮은 ON 저항의 특성을 가지고 있다[3,4]. 지

금까지 일반적으로 쓰이는 수직(vertical) 구조의 MCT는 집적화(IC화) 되었을 때, 다른 전자 소자들과 같이 제작되기는 어려운 구조이며, 또한 수직으로 불순물 주입이 이루어져 공정상의 어려움을 가지고 있다[5,6].

본 논문에서는 소자의 구조를 단순화하기 위해 수평(lateral) 구조의 MCT 소자 구조를 채택하였는데, 이는 제조과정이 단순하고 소자의 전류의 흐름을 단순화하여 전력 스위칭 특성에 많은 유리한 점을 가지고 있다. 그리고 누설 전류를 줄이고, 전기적 특성을 좋게 하기 위하여 P-epitaxial(P-EPI) 층을 이용하였다. 지금까지 이와 같은 수평구조의 MCT소자는 많이 연구되어 왔으나[7,8], ON-OFF 채널영역의 길이 및 농도변화에 의한 스위칭 특성 연구는 거의 없는 형편이다.

MCT 소자에서 채널영역은 ON-OFF 스위칭 기능을 담당할 뿐 아니라, 전극사이의 P/N 접합에 영향을 주어 소자의 어느 다른 영역보다 스위칭

1. 충북대학교 전기전자공학부
(충북 청주시 흥덕구 개신동 산 48)
2. 한국과학기술연구원 마이크로시스템
a. Corresponding Author : czy@chungbuk.ac.kr
접수일자 : 2004. 10. 20
1차 심사 : 2004. 11. 5
2차 심사 : 2004. 12. 3
심사완료 : 2004. 12. 10

특성에 중요한 영역이라 생각되어, 본 연구에서는 ON-채널 및 OFF-채널 영역에서 채널길이 및 도핑농도를 변화시켜 DC 특성 및 스위칭 특성을 조사하였다. 이러한 연구는 수평구조를 가지거나, 독립된 스위칭 기능을 가진 다른 유사한 전력소자에도 적용될 수 있는 결과를 제시할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 소자구조 및 등가회로

그림 1은 제안된 lateral MOS-controlled thyristor(LMCT)의 단면(cross-sectional) 구조인데, LMCT는 크게 P+N-P-영역으로 형성되는 pnp transistor와 N+P-N-영역으로 형성되는 npn transistor의 결합으로 이루어진 thyristor에 소자의 turn-on을 담당하는 P-channel MOS(그림 1에서 ON-FET)와 turn-off 역할을 하는 N-channel MOS(그림 1에서 OFF-FET)가 공유되어 있다. 그리고 표 1은 그림 1에서 보여준 LMCT 소자의 각 영역의 길이 및 doping 농도이다.

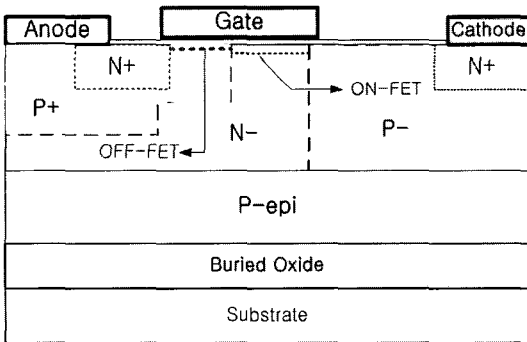


그림 1. P-EPI층을 가진 LMCT의 cross-sectional 구조.

Fig. 1. Cross-sectional structure of LMCT with P-EPI Layer.

본 논문은 2차원 MEDICI 및 PSPICE 시뮬레이터를 이용하여 소자의 모의실험을 한 것인데, 소자의 각 영역에서 불순물농도는 표 1에 나타난 바와 같이 일정하고, 온도는 대기온도(일정)로 가정하였다. MEDICI 시뮬레이터에 의한 전기적 특성 조사에서는 주로 Poisson 방정식과 전류밀도 방정식을 많이 이용하는데, Mesh에 의해 짜여진 각 영역에서 불순물 농도가 주어지면, Poisson 방정식인

$$\text{div}E = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (1)$$

(E;전계, ϵ ;유전상수, ρ ;전하밀도)에서 전계 값이 얻어지고, 전류밀도방정식인

$$J = qn\mu_n E_n + qp\mu_p E_p \quad (2)$$

(J;전류밀도, q;전하, n(p);전자(정공)밀도, μ_n (μ_p); 표동성)을 이용하여 전류값이 구해진다. Mesh에서 최소 폭 및 깊이는 0.125 microns 으로 설정하였던 doping profile에서 characteristics 길이는 0.25 microns 으로 하였다.

표 1. 각 영역별 채널길이 및 불순물농도.

Table 1. Regional channel length and impurity concentration.

	기 준 값	비 고
P ⁻ EPI층 두께	5 μm	
P ⁺ 영역 농도	$10^{19} / \text{cm}^3$	
P ⁻ 영역 농도	$5 \times 10^{15} / \text{cm}^3$	N ⁻ 채널 형성
N ⁺ 영역 농도	$10^{20} / \text{cm}^3$	
N ⁻ 영역 농도	$4 \times 10^{14} / \text{cm}^3$	P ⁻ 채널 형성
N 채널 길이	13 μm	
P 채널 길이	15 μm	

그림 2는 그림 1의 MCT 소자의 등가회로이다. anode의 P+에서 cathode 아래의 P-까지의 pnp와, cathode의 N+에서 N-까지의 npn transistor가 thyristor 구조를 이루고 있고, anode에 PMOS의 source, pnp transistor의 emitter, NMOS의 drain이 연결되어있다. 동작과정을 보면, gate에 음의 전압을 가하면, ON-FET의 P-channel이 형성되어, anode의 정공이 cathode전극 아래의 P-영역으로 흘러들어가 npn transistor의 base 전류를 형성한다. 그리고 이것은 npn transistor의 emitter인 N+ 영역에서 N-영역으로 전자를 주입하게 되므로, pnp transistor가 turn-on되고, MCT는 turn-on된다. 반대로 gate에 양의 전압을 가하면, OFF-FET의 N-channel을 통해 전자가 pnp transistor의 base인 N-로부터 emitter인 N+영역으로 흘러들어가 간다. 이는 pnp transistor의 emitter-base 접합을 turn-off시켜, npn transistor의 base인 P-영역으로의 정공전류가 차단되어 npn transistor를 turn-off시키게 된다.

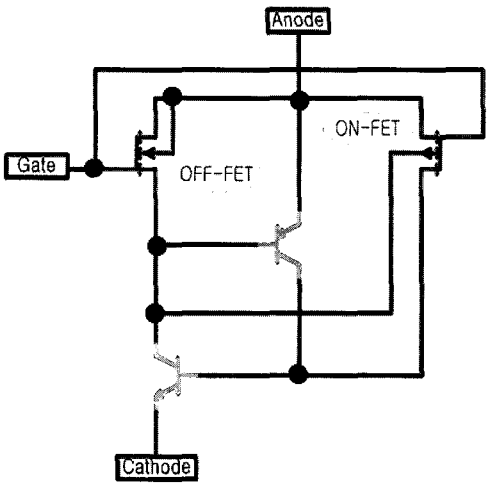


그림 2. MOS 구동 사이리스터의 등가회로.
Fig. 2. Equivalent circuit of MOS-controlled thyristor.

3. 결과 및 고찰

3.1 EPI층에 따른 소자의 전기적 특성

그림 3은 P-EPI층의 유무에 따른 anode 전류 및 전압 특성(y축; 전류, x축; 전압)을 나타내고 있다. 전류 특성은 latch-up 발생 전후의 anode 전류가 많은 차이를 보이고 있는데, 스위칭 소자로 사용 영역인 latch up 발생 후는 낮은 ON 저항 값을 보이고 있다. 그림에서 breakover voltage, latch-up 전류, forward voltage drop를 조사하였는데, breakover voltage는 전류 값이 갑자기 변화하는 전압이고, latch-up 전류는 breakover현상이 일어난 후, 전류가 일정하게 증가하는 지점을 선택하였고, forward voltage drop은 전류 값이 5×10^{-4} A/um 일 때 전압강하를 측정하였다. 그림에서 P-EPI층을 가진 소자는 breakover voltage, latch up 전류, forward voltage drop이 각각 3.4 V, 1.5×10^{-4} A/um, 3.5 V 정도로, P-EPI층이 없는 소자의 4.4 V, 3.4×10^{-4} A/um, 3.7 V 보다 우수한 전류-전압 특성을 나타내고 있다. 이는 oxide에 의해 절연이 이루어지지만, 에피층이 존재함으로써 P-영역이 확장되어, anode에서 cathode로의 등전위선(equipotential-line)이 균일하게 이루어져, 전류의 흐름에 유리하게 되고, substrate로의 leakage current(누설전류)도 줄이기 때문으로 사료된다.

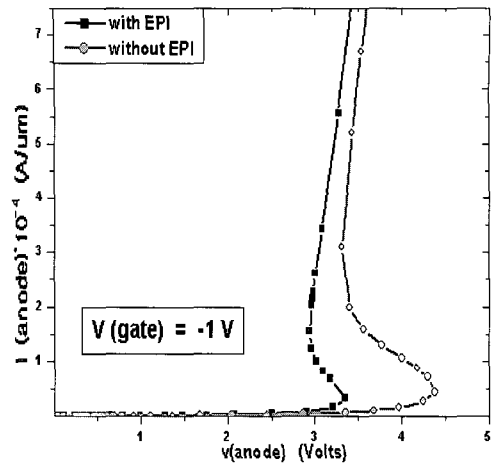


그림 3. EPI 층의 적용에 따른 I-V 특성 비교.
Fig. 3. Comparison of I-V characteristics with application of EPI layer.

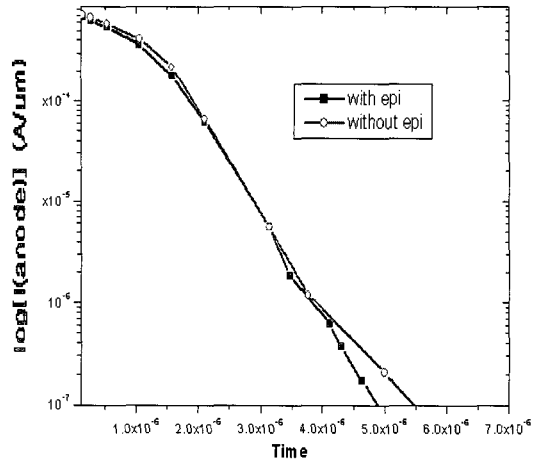


그림 4. EPI층의 적용에 따른 아노드 전류의 turn-off 특성.
Fig. 4. Comparison of turn-off characteristics of anode current with application of EPI layer.

그림 4는 EPI층의 유무에 따른 anode 전류의 turn-off 특성을 보여주고 있는데(y축; anode전류, x축; 시간), EPI층을 가진 소자가 EPI층이 없는 소자에 비해 더 빨리 전류가 감쇄하는 특성을 보인다. 표 2는 그림 3과 4의 결과를 요약한 것인데, P-EPI층이 존재하는 소자의 전류감쇄율이 큰 것을 보여준다.

표 2. P-EPI층의 유무에 따른 전기적 특성의 비교.

Table 2. Comparison of electrical characteristics with and without P-EPI layer.

	EPI (X)	EPI (O)
Forward Voltage Drop [V] (at $I_A = 5 \times 10^{-4} \text{ A}/\mu\text{m}$)	3.5	3.3
Latching Current [$10^{-4} \text{ A}/\mu\text{m}$]	3.0	1.5
Breakover Voltage [V]	4.4	3.4
Current decay rate, $\frac{di}{dt}$ at $4.2 \mu\text{s}$	0.75	1
Breakdown Voltage (Ratio)	1.2	1

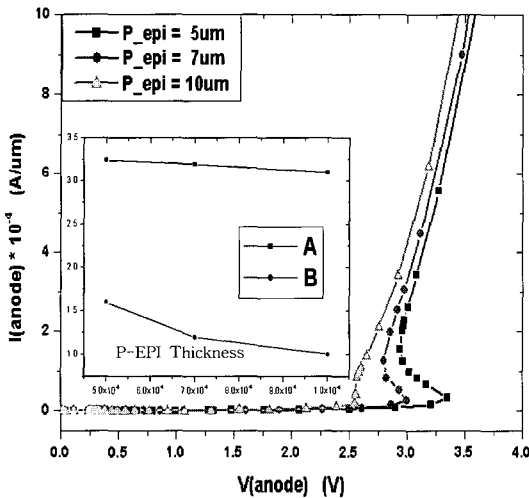


그림 5. P-EPI층의 두께에 따른 I-V 특성.

Fig. 5. The I-V characteristics with variation of the thickness of P-EPI layer.

(A; forward voltage drop (V) and B; latching current(amps/um))

P-EPI층의 두께에 따른 전류-전압 특성은 그림 5에 보여주고 있는데, 두께가 두꺼워질수록 latch-up 전류 및 forward voltage drop은 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 EPI층의 두께증가는 같은 P형의 drift층에 영향을 주어 저항성분의 감소를

가져왔기 때문으로 보인다. Box안의 도표는 본 그래프에서 얻어진 것으로 latch-up 전류(A)와 forward voltage drop(B)은 P-EPI층의 두께가 증가할수록 감소함을 나타내고 있다.

3.2 스위칭 특성

LMCT 전력소자에서 스위칭 특성에 영향을 주는 변수는 ON-OFF FET영역에서의 채널길이 및 불순물 농도라 생각되는데, 이는 두 BJT 트랜지스터의 P/N 접합영역일 뿐 아니라, MOSFET의 채널영역이기 때문이다. N-채널길이 변화할 때의 스위칭 특성은 그림 6과 7에 나타나있다. 여기서 N-채널은 PNP 트랜지스터의 에미터 영역이면서 또한 OFF-FET의 채널영역이기도하다. 그림 6은 MEDICI 시뮬레이션에 의해 얻어진 anode 전류의 turn-off특성을 나타내는데, 채널길이 증가할 때 전류감쇄율 di/dt는 감소하는 것을 보여주고 있다. 이는 감쇄율이 저항(R) 및 커패시턴스(C)의 곱인 RC에 반비례하기 때문이고, 채널길이는 저항(R)에 비례하기 때문으로 사료된다.

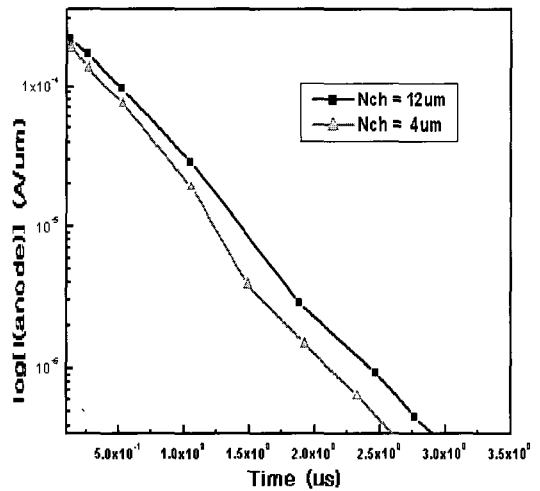
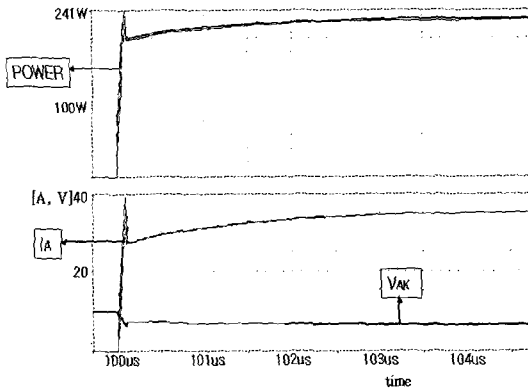


그림 6. N-채널 길이 변화에 따른 turn-off 특성.

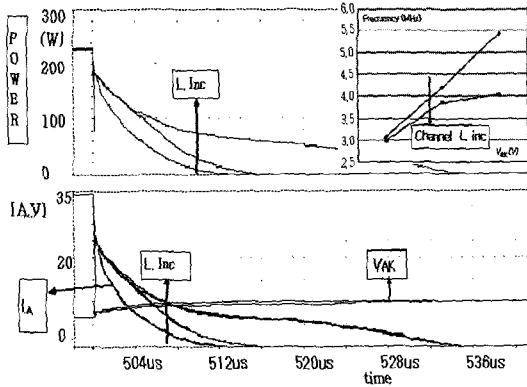
Fig. 6. Turn-off characteristics with variation of the N-channel length.

그림 7은 그림 2의 등가회로에 PSPICE 시뮬레이션을 적용하여 얻어진 ON-OFF 스위칭 특성이다. PSPICE 변수(parameter)들은 MEDICI 시뮬레이션에서 얻어진 결과를 근거로 얻어질 수 있는데,

스위칭 특성을 조사하기 위해서는 복잡한 전력소자구조를 고려할 때, PSPICE 시뮬레이션이 효율적이라 생각된다. 그림 7에 사용된 PSPICE 변수는 N-MOS의 채널길이와 pnp 트랜지스터의 에미터 저항(Re)의 변수를 이용하였다.



(a)



(b)

그림 7. N 채널길이에 따른 anode 전류 및 power의 ON-OFF시 감쇄특성.

Fig. 7. The ON and OFF transient characteristics of power and anode current with variation of the N-channel length.

(a : The ON transient characteristics and b : The OFF transient characteristics)

그림 7(a)는 turn-on 상태에서의 전력(power), anode 전류와 전압의 시간에 대한 변화율을 표시하고 있는데, 3개의 서로 다른 채널길이(10 μ m, 20

μ m, 30 μ m)에서 power, 전류변화율(di/dt), 전압변화율(dv/dt)은 거의 일정함을 나타내고 있다. 그러나 그림 7(b)에 보여준 turn-off 특성은 채널길이가 증가할 때, power, 전류변화율(di/dt), 전압변화율(dv/dt)은 감소함을 나타내고 있다. 그래프에서 전류 값이 제일 작은 것은 10 μ m 일 때이고, 가장 큰 것은 채널길이가 30 μ m일 때 이다. 감쇄 시간상수 τ 는 다음과 같이[9] 정의되어 있는데, 여기서 감쇄 주파수는 시간상수 τ 의 역으로 정의하였다.

$$f = \tau^{-1} = \frac{1}{RC} = \frac{\ln I_1 - \ln I_2}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

여기서 f , I , t , R 와 C 는 각각 감쇄주파수, 전류, 시간, 저항 및 정전용량이다.

그림 7(b) 내에 존재하는 그래프는 그림 7(b)의 data값을 요약한 것인데, 채널길이나 anode전압이 증가할 때, 감쇄주파수는 감쇄함을 보이고 있다. 여기서의 감쇄시간상수는 그림 6의 MEDICI 시뮬레이션에서 얻은 전류의 감쇄율과 거의 같은 값을 나타낸다. 그림 7(a)에서의 ON상태에서의 일정한 power는 static power이고, 그림 7(b)의 OFF상태에의 감쇄하는 power는 dynamic power에 비례하는 것으로 생각되는데[10], 그림 7의 결과를 요약해보면 OFF-FET 채널(N-채널)은 ON상태에서의 전류 및 전력에 거의 영향을 주지 않으며, OFF상태에서만 영향을 주었으며, static power의 ON 저항 Ron은 ON 및 OFF-FET 채널에서 ON-FET 채널에만 관련성을 보여주었다. 그림 7의 결과를 이용하여 ON-FET 채널(P-채널)에서의 채널길이나 불순물 농도의 변화의 결과를 예측해보면, ON상태의 전력 및 전류에만 영향을 줄 것으로 사료된다. 즉 P-채널은 ON 상태의 특성, N-채널은 OFF 상태의 특성만 영향을 줄것으로 생각된다.

채널에서의 불순물 농도도 스위칭 특성에 중요한 줄 것으로 생각되는데, 이는 불순물 농도가 P/N 집합의 정전용량 과 소자의 저항에 영향을 주어 ON 및 OFF의 스위칭 특성에 복합적인 영향을 주기 때문이다. 그림 8과 9는 P-채널 즉 ON-FET 채널에서의 불순물 농도가 변화할 때의 스위칭 특성변화이다. 여기서 P-채널은 npn 트랜지스터의 베이스영역 이면서 npn transistor의 콜렉터 영역이기도하다. 그림 8은 MEDICI 시뮬레이션으로 구한 turn-off 특성인데, N 도핑농도가 증가할 때, anode전류의 감쇄율은 증가함을 보여주고 있다. 그림에서의 OFF특성은 anode 전류가 latch-up 발생

후에 전류가 특정영역이 아닌 thyristor의 전 영역으로 anode에서 cathode로 흐르고 난 후 일어난 현상으로, N 도핑농도의 증가는 그림 1에서의 N-영역의 저항감소를 의미 하게 되고, 공식3을 참고 하면 저항감소는 감쇄주파수 f 를 증가시킨다. 본 그림의 anode 전류의 transient현상에서 구한 감쇄주파수는 N 도핑농도가 증가할 때 증가함을 나타내고 있다.

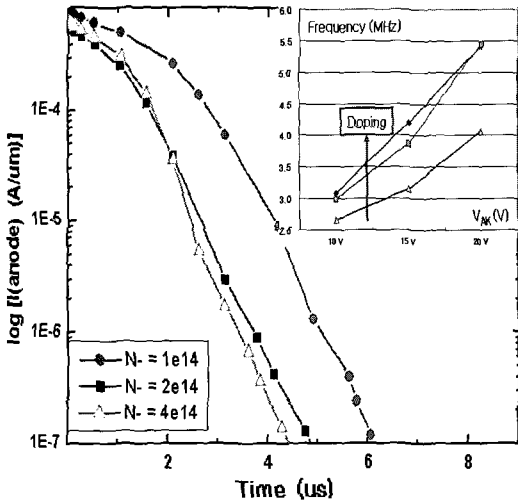


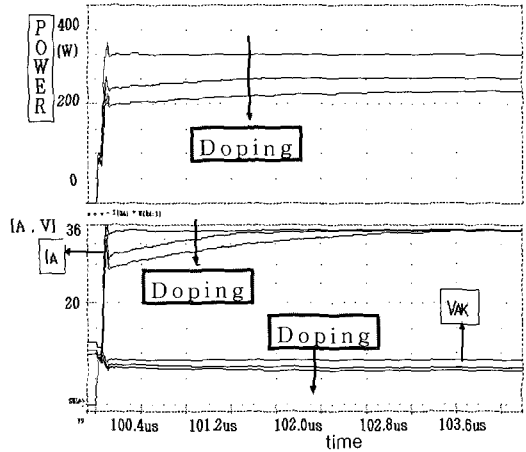
그림 8. N-영역에서 도핑농도 변화에 따른 anode 전류의 감쇄특성.

Fig. 8. The transient characteristics of anode current with variation of the N-impurity concentration.

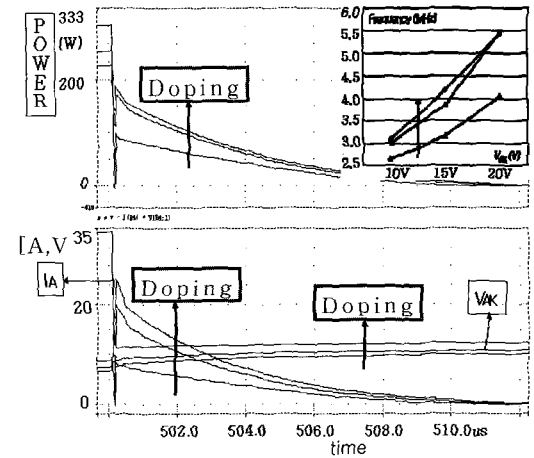
그림 9는 PSPICE 시뮬레이션으로 구한 ON-FET 채널에서의 N 도핑농도가 변화할 때의 ON-OFF 특성이다. N 도핑농도에 관련된 SPICE parameters는 npn트랜지스터에서 베이스저항 R_b , junction capacitance C_{je} , C_{jc} 이고, pnp트랜지스터에서는 콜렉터저항 R_c 이다. 그림 9(a)의 ON특성이 보여주듯이, N 도핑농도가 증가할 때 anode전류의 감쇄율은 증가하고, 전력소모는 감소한다. OFF특성도 같은 결과를 보이고 있는데, 여기서 감쇄율은 저항(R) 및 정전용량(C)의 곱인 RC상수에 반비례하는 양이다. P/N접합에서의 정전용량 C는 불순물 농도가 증가할 때 증가하지만, 저항R은 감소하고 RC상수는 감소한다.

표 3은 LMCT 전력소자의 ON-OFF FET 채널

에서 채널길이와 불순물 농도가 변화할 때의 anode전류 및 감쇄주파수의 스위칭 특성을 요약한 것으로, P-채널 도핑농도가 증가할 때 낮은 전력 소모와 빠른 스위칭 속도를 기대할 수 있을 것이다.



(a)



(b)

그림 9. P 채널의 불순물 농도변화에 따른 anode 전류 및 power의 ON-OFF시 감쇄특성.

Fig. 9. The ON and OFF transient characteristics of power and anode current with variation of the doping concentration in P-channel.

(a : The ON transient characteristics and b : The OFF transient characteristics)

표 3. 채널길이와 불순물 농도 변화에 의한 스위칭특성의 요약.

Table 3. Summary of switching characteristics with variation of channel length and doping concentration.

증가	ON		OFF	
	주파수 f	Power	주파수 f	Power
채널길이(P·ch)	길어짐	증가	영향없음	영향없음
채널길이(N ch)	영향없음	영향없음	짧아짐	증가
불순물농도(P ch)	길어짐	감소	길어짐	증가
불순물농도(N ch)	짧아짐	감소	짧아짐	감소

4. 결론

EPI층을 가진 수평 구조의 MOS-controlled thyristor 전력소자의 스위칭 특성을 MEDICI 와 SPICE simulator를 이용하여 조사하였다. LMCT 소자에서 P-EPI층은 전류-전압 및 스위칭 특성에서 우수한 효과를 보여주었는데, 낮은 latch-up current 와 breakover voltage 특성 및 빠른 스위칭 특성을 보여주었다.

스위칭 특성에서 중요한 전기적 변수라고 생각 되는 채널길이 및 불순물 농도를 변화시켜 전력, anode전류, 감쇄주파수의 ON-OFF특성을 조사한 바에 의하면, 채널길의 변수에서 P 채널길이는 전류 및 전력의 ON특성에만 영향을 주는 반면, N 채널길이는 OFF특성에만 영향을 주었다. 불순물 농도의 변수에서는 N 도핑농도가 증가할 때, ON-OFF 시 anode전류는 빨리 감쇄하는 경향을 보였다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

[1] Mohan, Undeland, and Robbins, "Power Electronics", Wiley, 2nd ed., p. 505, 1995.
 [2] B. J. Baliga, "The future of power semi-

conductor device technology", Proceedings of the IEEE, Vol. 89, p. 822, 2001.
 [3] V. A. K. Temple, "MOS-controlled Thyristor", IEEE Int. on Electron Devices Meeting, p. 282, 1984.
 [4] V. A. K. Temple, "MOS-controlled Thyristor - A New Class of Power Devices", IEEE Trans. on Electron Devices, ED-33, p. 1609, 1986.
 [5] Mohamed N. Darwish, "Lateral MOS-gate power devices-A unified view", IEEE Trans. Electron Device, Vol. ED-38, p. 1600, 1991.
 [6] B. J. Baliga, "Power integrated circuits - A brief overview", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. ED-33, p. 1936, 1986.
 [7] Seong-Dong Kim, Han-Soo Kim, Yern-Ik Choi, Byung-Ha Kim, and Min-Koo Han, "A lateral MOS controlled thyristor with shorted anode structure", in Proc. of 1995 IEEE Int. Conf. Power Electronics and Drive Systems, p. 82, 1995.
 [8] Mohamed N. Darwish, "A new lateral MOS-controlled thyristor", IEEE Trans, Electron Device Letter, Vol. EDL-11, p. 256, 1990.
 [9] R. A. Serway, "Physics", Saunders, p. 524, 1982.
 [10] Sedra and Smith, "Microelectronics Circuits", Saunders, 3rd ed., p. 912, 1991.