

양성자 조사법에 의한 고속스위칭 사이리스터의 제조

김은동, 장창리, 김상철, 김남균
전력반도체연구그룹, 한국전기연구원

Fabrication of a Fast Switching Thyristor by Proton Irradiation

Eun-Dong Kim, Sang-Cheol Kim, and Changli Zhang

Abstract

A fast switching thyristor with a superior trade-off property between the on-state voltage drop and the turn-off time could be fabricated by the proton irradiation method. After fabricating symmetric thyristor dies with a voltage rating of 1,600V from 350 μ m thickness of 60 Ω cm NTD-Si wafer and 200 μ m width of N-base drift layer, the local carrier lifetime control by the proton irradiation was performed with help of the HI-13 tandem accelerator in China. The thyristor samples irradiated with 4.7MeV proton beam showed a superior trade-off relationship of $V_{TM} = 1.55V$ and $t_q = 15\mu s$ attributed to a very narrow layer of short carrier lifetime($\sim 1\mu s$) in the middle of its N-base drift region. To explain the small increase of V_{TM} , we will introduce the effect of carrier compensation by the diffusion current at the low carrier lifetime region

1. 서론

최근 인버터 등 전력전자 시스템에서 캐리어 주파수의 증가는 고전압/대전류 반도체 정류소자 및 스위치 소자들의 낮은 스위칭(switching) 손실을 요구하고 있다. 통전상태(on-state) 손실이 적은 pn-다이오드나 npnp-사이리스터와 같은 바이폴라 소자(bipolar device)들은 부이송자(minority carrier)에 의해 전도도변조(conductivity modulation)가 일어나기 때문에 파워 MOSFET과 같은 unipolar 소자들에 비해 통전손실이 적은 특성을 가지고 있다. 그러나 바이폴라소자들은 통전상태 동안 드리프트 영역(drift region) 내에 축적된 부이송자들 때문에 소호시간(turn-off time, t_q)이 긴 단점을 가진다.

반도체 결정에서는 에너지 밴드-갭 중앙 부근에 위치하는 에너지상태(energy state)들은 전자-정공 쌍(electron-hole pair)의 재결합중심(recombination center)으로 작용 한다 [1]. 따라서 바이폴라 소자의 고속 스위칭화를 위하여 부이송자들이 축적되는 드리프트 영역 내에 이러한 재결합 중심들을 만들어 소호시간을 단축하는 방법들이 실용화되어 있다. 이렇게 하면 소호과정에서 부이송자들이 주입(injected) 주이송자(majority carrier)와 이들 재결합중심에서 쉽게 재결합하여 빨리 소멸된다.

실리콘 반도체결정에 재결합중심을 만드는 방법으로 귀금속(noble metal) 확산법과 입자조사법이 있다 [2]. 전자는 Au, Pt, Pd 등 귀금속을 이용하는

기술로서 고속회복다이오드(Fast Recovery Diode) 등의 제조에 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 이 방법은 이들 금속의 실리콘 내의 확산 제어가 어려워 품질관리가 어려운 단점이 있다. 한편 후자의 입자조사법 중에서 전자선 조사법은 장치의 간편성과 조사방법의 편의성 때문에 그 응용이 확대되고 있다. 그러나 전자는 질량이 작아 실리콘 결정에서 투과력이 크기 때문에 일반적으로 바이폴라 소자들의 드리프트영역에 고농도의 결함을 만드는 과정에서 소자 두께방향으로 전체적으로 균일한 밀도의 결함을 만들기 때문에 소자 두께방향으로 전 영역에 걸쳐 캐리어 수명을 단축시키는 결과를 가져다 준다. 결국 전자선조사법은 소호시간 단축의 효과도 주지만 통전손실을 비교적 크게 증가시키는 단점이 지적되고 있다. 이를 개선하는 방법으로 경사(傾斜)주사법이 응용되기도 하지만 조사시스템이 복잡하고 제어가 쉽지 않은 단점이 있다.

최근 질량이 커 실리콘 결정 내 투과깊이가 제한되는 양성자(H⁺)와 같은 무거운 입자들을 이용하는, 국부 이송자 수명 제어(local carrier lifetime control) 법이 유망한 것으로 보고 되고 있다 [3]. 가속양성자 빔을 실리콘 결정에 조사하면 투과행로의 끝 부분에 고밀도의 유기결함(induced defect)이 형성된다. 따라서 이 방법은 어떤 특정 부위에 고농도의 재결합중심을 만들어 주기 때문에 통전상태 전압강하의 증가를 최소화 하면서 소호시간을 단축시키는데 유효하다. 그러나 이를 위해서 가속에너지 제어하여 빔 투과깊이를 적절히 제어하는 기술이 필요하다. 한편 양성자-조사 다이오드는 소프

트한 역 회복(soft reverse recovery) 특성을 보인다는 것도 [4] 매우 고무적인 현상이다.

본 연구에서는 중국에 있는 HI-13 선형가속기를 이용, 양성자를 조사하여 통전상태 전압강하의 큰 증가 없이 소호시간을 단축시켜 우수한 순방향 전압강하(V_{TM}) - 소호시간(t_d) trade-off 특성을 가지는 고속 스위칭 사이리스터를 제조하고 그 조건을 제시하였다.

2. 실험

두께 $350\mu\text{m}$, 저항을 $60\Omega\cdot\text{cm}$ 의 중성자변환도핑 부유대 (NTD-FZ) 실리콘-(111) 웨이퍼를 이용하여 순방향 및 역방향 정지전압(V_{DRM} 및 V_{RRM})이 각각 1,600V인 대칭형 사이리스터를 제작하였다. 순방향 정격평균전류 500A를 얻기 위해 지름 45mm의 웨이퍼를 이용하였으며 내전압 1,600V를 얻기 위해 N-베이스 두께는 $200\mu\text{m}$ 로 설계하였다. 정합깊이 $75\mu\text{m}$ 의 P-베이스는 알루미늄 확산 법으로 만들어 졌는데, 이 공정은 실험실에서 만든 확산 원료를 이용하여 봉합 석영관 내에서 $1,250^\circ\text{C}$ 의 고온 확산 법으로 수행하였다. N⁻-에미터는 $20\mu\text{m}$ 두께의 인(P) 확산 층으로 만들었는데, 확산 마스크를 위한 열 산화 막은 trichloroethylene (TCE) 분위기에서 만들었다. 이 TCE 분위기 산화 법은 Si/SiO₂ 계면 가까이의 실리콘 결정에서의 불순물 제거에 매우 유용하여, 제작된 소자에서의 높은 이송자 수명을 얻을 수 있게 한다. 다음으로 양극정합(anode junction)을 위해 붕소 확산이 이루어 졌는데, 이때 턴-온 특성 향상을 위한 캐소드 단락 홀(cathode shorting hole)이 동시에 만들어 졌다. 양극과 열용력완화 Mo전극 사이의 오믹성 접합(ohmic contact)은 Al-Si 합금 포일(foil)을 이용한 일반적인 합금 접합 법(alloy contact method)을 이용하여 이루어 졌다. 대전류 소자에서는 소신호 소자들과는 달리 전극이 $5\mu\text{m}$ 이상 두꺼워야 한다. 따라서 실리콘과 금속전극 사이의 큰 열팽창계수 차이 때문에 금속화 공정 후에는 그 계면에 큰 응력이 걸려있다. 따라서 음극의 금속화 공정 후, 500°C 이상의 열처리로 금속과 실리콘 결정사이의 응력을 완화시켰다. 캐리어 수명제어를 위한 양성자선 조사는 음극금속화의 후열처리공정 다음에 이루어 졌다.

양성자 조사는 중국의 HI-13 선형가속기를 이용하여 이루어 졌다 [5]. 자기(magnetic) 렌즈 조사 시스템으로부터 나온 가속 양성자 빔은 샘플소자의 음극 표면에 수직으로 입사되도록 하였다. 양성자 조사 유기(proton-irradiation-induced) 결함들의 안정화를 위하여 350°C 에서 12시간 동안 열처리하였다.

HI-13 선형가속기의 가속시스템을 제어하여 목표하는 가속에너지의 양성자를 재현성 있게 얻을 수 있었다. 그러나 실제 양성자 빔은 가속기로

부터 나와 조사(irradiation) 시스템과 스테이지를 통과하는 동안 창문 등과 같은 것들에 의해 에너지 손실을 가진다. 따라서 샘플에 입사되기 직전의 정확한 에너지를 분석하는 것이 쉽지 않다. 양성자 빔 조사에 의한 실리콘의 저항률 증가는 양성자 조사에 의한 유기결합의 증가에 기인하므로, 본 연구에서는 SRP(spreading resistance profile) 측정법으로 최대저항이 나타내는 지점을 측정하여 양성자 빔의 투과깊이를 동정(identification)하고 TRIM [6] 모사결과와 비교하여 분석하였다.

실험결과 해석을 위하여 상용 소자모사 소프트웨어[7]를 이용하여 이송자 수명, 소자내부 이송자 농도 등을 모사하였다. 사이리스터들의 순방향 전압강하는 상용 사이리스터 테스트(LEM Co., Switzerland)를 이용하여 25°C , 1,570A 첨두전류(peak current)에서 측정하였다.

3. 실험결과 및 검토

본 연구에서는 먼저 HI-13 선형가속기의 양성자 가속응용에서의 재현성과 제어성을 확인하고, 넓은 면적의 실리콘 소자 적용에 중요한 빔 균일성 등을 확인하고자 하였다. 예비실험으로 재현성 확인을 위하여 소자공정을 거치지 않은 순수 중성자 변환도핑 Si 웨이퍼(표면에 $2\mu\text{m}$ 전자빔 증착 알루미늄 층을 가짐)를 이용하여 반복실험 행하였다.

그림 1은 4.7MeV 양성자 빔을 조사하고 350°C 에서 12시간동안 열처리하여 결함을 안정화 시킨 후, 웨이퍼 깊이에 따른 저항률 분포를 SRP 법으로 측정된 결과를 나타내고 있다.

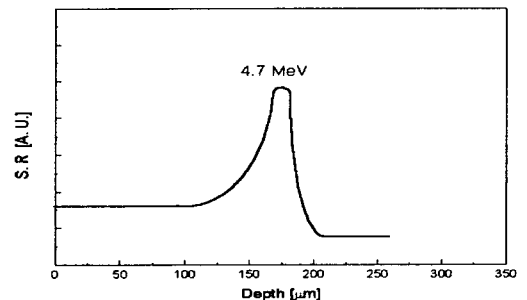


그림 1. 4.7MeV 양성자 조사와 350°C 열처리를 거친 중성자변환 도핑 Si 웨이퍼에 대한 spreading resistance(S. R.) 프로파일로부터 양성자 투과깊이의 결정.

Fig. 1. Determination of the proton penetration depth from spreading resistance(S. R.) profile for a NTD-Si wafer after 4.7MeV proton irradiation and post-annealing at 350°C .

한 웨이퍼 내 측정 부위에 따른 저항을 편차범위는 $\pm 10\%$ 안에 있었고, 웨이퍼를 교체하면서 시차를 두어 행한 반복실험의 결과도 위 그림 1의 결과와 매우 비슷하게 나타났다. 참고로 실험에 사용한 양성자 조사 전 NTD-FZ 웨이퍼의 지름방향 저항을 편차는 $\pm 6\%$ 이고, 일반적인 CZ-Si 웨이퍼인 경우는 수십%에 달한다. 따라서 본 예비실험으로 장치용용성과 그 제어성능이 입증되었다고 볼 수 있으며 대면적용용에서 균일성도 확보되었다고 판단하였다. 한편 TRIM 모사에 의하면, $170\mu\text{m}$ 투과깊이에 대응하는 에너지는 약 4.4MeV 로 계산되었다. 따라서 4.7MeV 의 경우, 가속기 창, stage 창, 샘플백($5\mu\text{m}$ PPS 필름) 등에서의 에너지 손실이 약 0.3MeV 정도인 것으로 판단되었다.

표 1에 양성자 가속에너지 변화에 따른 사이리스터 샘플소자에서의 SRP에서 최대 저항을 나타내는 깊이, 즉 실측 양성자 투과깊이를 나타내었다. 한편 실측 투과깊이에 대응하는 빔 에너지를 TRIM 모사법으로 구하여 비교하였다. 3.7MeV 의 경우, 실측 깊이는 $85\mu\text{m}$ 로 나타났는데, TRIM 모사로부터 구한 상응하는 빔 에너지는 2.8MeV 로 두 값 사이에는 큰 차이가 있었다. 반면, 5.9MeV 의 경우에는 그 차이가 0.2MeV 밖에 나지 않았다. 이와 같이 가속기 계기상의 에너지와 실제 측정투과깊이로부터 구한 빔 에너지 사이의 차이는 에너지가 낮을수록 크게 나타났는데, 그 원인은 명확치 않다.

표 1. 양성자 가속에너지에 따른 SRP 법으로 측정된 양성자 투과깊이 및 사이리스터 구조에서의 피크 결합 농도 위치. 측정 깊이로부터 계산된 양성자 에너지를 비교하였다.

Table 1. Variation of proton penetration depth measured by SRP method and the equivalent location of peak defect concentration in the designed thyristor structure with acceleration energy, comparing the calculated proton energy corresponding to the measured penetration depth.

Proton energy [MeV]	Measured penetration depth [μm]	Equivalent location of peak defect concentration	Calculated corresponding proton energy [MeV]
3.7	85	Close to the junction J_2	2.8
4.7	170	Middle of N-base	4.3
5.9	270	Close to the junction J_1	5.7

표 2는 양성자 빔의 가속에너지 변화에 따른 순방향전압강하(V_{TM}) 및 소호시간(t_q) 변화를 보여주고 있다. 이 측정결과는 4.7MeV -양성자 조사의 경우가 가장 우수한 $V_{TM} - t_q$ trade-off 특성을 나타

는다는 것을 보여주고 있다.

표 2. 양성자 가속에너지에 따른 사이리스터 V_{TM} 및 t_q 의 변화(도오즈량 $1 \times 10^{11}/\text{cm}^2$).

Table 2. Variation of V_{TM} and t_q of sample thyristors with proton energy in a dosage of $1 \times 10^{11}/\text{cm}^2$.

Energy [MeV]	V_{TM} [V]	t_q [μs]
0.0	1.45	80
3.7	1.80	30
4.7	1.55	15
5.9	3.54	23

전자빔 조사의 경우, 이송자 수명 τ 와 조사 도즈(dose) 양 ϕ 와의 관계는

$$\frac{1}{\tau_f} = \frac{1}{\tau_0} + K\phi \dots (1)$$

로 표시되어진다 [2]. 여기서 τ_f 는 전자빔 조사 후 이송자 수명, τ_0 는 조사 전의 이송자 수명, K 는 Si 결정의 종류 등에 의해 결정되는 상수이다. 이 식은 양성자 조사의 경우에도 적용이 가능한데, 이 경우에는 τ_f 는 국부 이송자 수명(local carrier lifetime) τ_l 이 되어야 할 것이다. 결국 양성자 조사의 경우, 가속에너지에 따라 각기 특정 영역에서만 τ_l 을 가지게 될 것이다. 식 (1)과 그림 1의 실험 자료를 이용하여 4.7MeV 양성자를 도오즈량 $1 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 으로 조사 시, 소자 두께방향에서의 이송자 수명을 계산(모사)해 보면 그림 2와 같다.

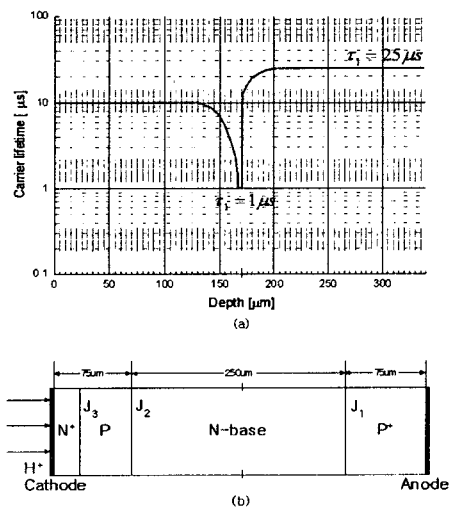


그림 2. 4.7MeV 양성자 조사 후, 사이리스터 구조에서의 이송자 수명분포 모사결과.

Fig. 2. Carrier lifetime profile in the designed thyristor after 4.7MeV proton irradiation.

이송자수명은 조사 전 $25\mu\text{s}$ 에서 4.7MeV 양성자 조사 후에는 약 $1\mu\text{s}$ 의 매우 짧은 수명을 가지는 영역이 약 $170\mu\text{m}$ 깊이, 즉 N-드리프트 영역 중간 지점에서 약 $10\mu\text{m}$ 폭으로 나타난다. 따라서 4.7MeV 양성자 조사 시 가장 우수한 t_0 특성을 보이는 이유는 N-드리프트 영역 중간지점에 고농도의 결함이 만들어져 재결합 중심을 형성하고 이 재결합중심에서 과잉의 부이송자(정공)들이 재결합하여 빨리 제거되기 때문이라는 것이 이 모사로부터 증명되고 있다. 다른 에너지(3.7 및 5.9MeV)로 조사한 경우, 재결합중심이 만들어졌다 하더라도 N-드리프트 영역의 과잉전하를 제거하기에 부적절한 위치에 만들어졌기 때문에 소호시간 단축의 효과는 적은 것으로 판단된다.

한편 순방향 전압강하 특성 또한 4.7MeV 의 경우가 가장 우수한 것으로 나타났다. 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 N-베이스 층중에 약 $10\mu\text{m}$ 의 매우 얇은 고 농도 결함층에서만 이송자 수명이 $1\mu\text{s}$ 정도로 매우 낮고, 비록 양성자 빔이 지나 갔더라도 표면부터 투과깊이까지는 이송자 수명이 약 $10\mu\text{s}$ 를 유지하는 것이 전자빔의 경우와 상이한 점이다. 이러한 이유로 4.7MeV 의 경우, V_{TM} 에서의 열화가 비교적 작게 일어난 것으로 해석할 수 있다. 5.9MeV 의 경우 순방향 전압강하가 크게 증가한 이유는 J_1 정합부근에 많은 결함이 만들어져 사이리스터 정귀환(正歸還) 루프를 형성하는 NPN 및 PNP 트랜지스터에서 PNP 트랜지스터의 N-베이스로의 정공 주입능력의 급격한 감소와 캐소드에서부터 에노드 정합까지의 매우 광범위한 구간에서의 양성자조사 유기결함에 의한 이송자 수명감소 때문이라고 믿어진다. 또한 3.7MeV 의 경우도 V_{TM} 의 증가가 약간 일어나는데 이는 주로 J_2 정합까지에 이르는 비교적 얇은 영역에서의 이송자 수명감소와 J_2 정합 부근의 과다 결함에 의한 NPN의 전류이득의 감소에 따른 현상으로 설명될 수 있다.

한편 DD-DLTS (double-double deep level transient spectroscopy)법을 이용한 분석에 의하면 [8], 2.73MeV 양성자를 조사하고 300°C 안정화 열처리한 경우, 이송자 수명단축에 대응하는 주요한 재결합중심으로는 H(148K), E(174K) 등의 탄소-관련 결함인 것으로 판명되었다. 본 실험의 경우, 에너지에서의 차이는 있지만 앞서의 연구결과와 비슷한 특성이 얻어지므로 같은 결함기구로 설명 가능할 것으로 사료된다.

그림 3(a)는 4.7MeV 양성자 조사의 경우, 소자 특성 모사를 통해 구해진 N-베이스 영역에서의 재결합속도이다. 캐소드 표면으로부터 약 $170\mu\text{m}$ 깊이에 약 $10\mu\text{m}$ 폭의 높은 재결합속도를 가지는 좁은 영역이 나타남을 보여주고 있다. 이결과는 그림 2(a)의 결과에 잘 부합한다.

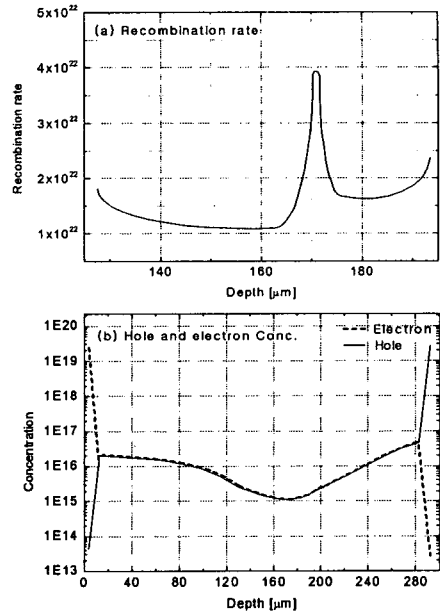


그림 3. 4.7MeV 양성자 조사 처리 사이리스터 구조에 대하여 소자모사법으로 구한 (a) 재결합속도 및 (b) 이송자 농도 구배.

Fig. 3. Simulated profiles of (a) recombination rate and (b) carrier concentration for the thyristor with 4.7MeV proton irradiation.

한편 그림 3(b)는 4.7MeV 양성자 조사한 후, 통전상태 사이리스터에서의 이송자들의 농도분포를 보여주고 있다. 그림 3(a)에서는 $170\mu\text{m}$ 깊이에 재결합속도가 매우 높은 $10\mu\text{m}$ 정도의 좁은 영역이 존재하는 것과는 대조적으로 그림 3(b)는 비교적 완만한 이송자 농도분포를 보여주고 있는데, $170\mu\text{m}$ 깊이에서조차도 이송자농도 감소가 비교적 작게 일어났음을 알 수 있다. 이것은 이송자수명이 매우 짧은 영역이 매우 좁기 때문에 확산전류에 의해 이송자들의 수가 보충될 수 있었기 때문이라고 믿어진다. 따라서 양성자 조사의 경우 V_{TM} 열화가 작게 일어나는 이유는 재결합속도가 높은 영역이 특정위치에 매우 좁은 영역에만 나타나는 때문이라는 일반적인 알려진 이유 외에도 그 좁은 결함 층에서조차 이송자들의 수가 비교적 크게 유지될 수 있기 때문이며 이는 확산전류에 기인한다고 설명할 수 있다. 이러한 해석은 본 연구에서 처음으로 시도되어진 것으로 그림 3(b)의 통전상태의 이송자농도 모사결과를 이를 충분히 입증하고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 중국의 HI-13 선형가속기를 이용하여 대면적 사이리스터의 고속 스위칭화를 시도하였다. 가속 양성자 빔의 평균에너지는 SRP 법에 의한 투과깊이 측정과 TRIM 모사로부터 분석될 수 있었다. 가속에너지가 낮을수록, 가속기로부터 시편에 입사되기 전까지의 에너지 손실이 컸으며 5.9MeV의 경우 약 0.2MeV 정도의 에너지 손실이 있는 것으로 분석되었다. 가속 에너지가 낮을수록 시료에 입사되기 전까지의 에너지 손실이 큰 이유는 본 연구에서는 밝히지 못하였다.

지름 45mm 웨이퍼 내에서의 SRP 측정결과들은 지름방향에서 위치별 저항을 편차는 $\pm 10\%$ 이내로 나타나, 빔 균일성을 확인할 수 있었다. 한편 시차를 두어 실행한 반복된 조사실험에서도 비슷한 SRP 측정결과를 얻을 수 있었다. 따라서 양성자조사 설비의 제어성도 충분히 확보되었다고 판단하였다.

가속에너지를 변화시키면서 행한 실험 결과, 4.7MeV의 경우가 가장 우수한 순방향전압강하-소호시간 trade-off 관계를 나타내었다. 이것은 4.7MeV의 경우 양성자에 의한 최대결함분포 지역이 N-베이스 중간에 위치하며 그 폭이 약 $10\mu\text{m}$ 정도로 매우 좁게 나타나기 때문이라고 설명될 수 있다. 특히 4.7MeV 양성자 조사에 따른 순방향전압강하 열화가 최소화될 수 있었던 이유는, 3.7MeV 및 5.9MeV의 경우와는 달리 사이리스터 정함(J_1 , J_2 및 J_3)들 부근에서의 결함농도가 낮기 때문에 전류증폭을 a_1 및 a_2 에서의 감소가 비교적 적은 때문이다. 또한 N-베이스 영역의 중간에 생긴 다량의 결함에 의한 이송자수명의 급격한 단축은 이송자농도의 급격한 저하를 낳아 순방향전압강하를 크게 할 것으로 예측되지만 이송자수명이 매우 크게 단축된 영역이 약 $10\mu\text{m}$ 정도로 매우 좁아 그 영향이 적은 것으로 확인되었다. 나아가 이 영역에서의 이송자농도는 이송자 농도구배에 따른 확산전류 때문에 보충되어져 매우 완만한 구배를 가진다는 것이 확인되었다. 결론적으로 사이리스터의 경우 우수한 $V_{TM} - t_q$ trade-off 특성을 얻기 위해서는 N-베이스 중간에 좁은 폭으로 고 농도의 재결합중심 층을 만들어줄 필요가 있다는 것을 알 수 있었다.

감사의 말

본 연구는 과학기술부 "전력용반도체 기술개발사업"의 일환으로 지원이 이루어진 것으로 과학기술부의 지원에 감사드린다.

References

[1] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd Ed., John Wiley & Sons,

New York, 1981, pp. 35-38.

- [2] B. J. Baliga, *Power Semiconductor Devices*, PWS Publishing Co., Boston, 1996, pp. 55-59.
- [3] H. Akiyama, H. Kondoh, K. Satoh, T. Nakagawa, T. Fujimoto, Y. Iwashita, and M. Inoue, "Lifetime Control in Thyristors by Proton Irradiation", *Bull. Inst. Chem. Res.*, Kyoto Univ., No. 1, Vol. 1, pp. 55, 1992.
- [4] C. Zhang, J. Waldmeyer, P. Roggwiler, and Y. Lu, "Soft Recovery Characteristics of Punch-through Power Diodes by Proton Irradiation", *Proc. 3rd International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC'2000)*, China, Aug. 15-18, 2000, pp. 229-234.
- [5] China Institute of Atomic Energy, Beijing, China
- [6] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, and U. Littmark, *The Stopping and Range of Ions in Solids, Vol. 1*, Pergamon Press, New York, 1985.
- [7] ISE-TCAD Manuals, Integrated Systems Engineering Co., Switzerland.
- [8] M. W. Huppi, "Proton Irradiation of Silicon: Complete Electrical Characterization of Induced Recombination Centers", *J. Appl. Phys.*, Vol. 68, No. 6, pp. 2702-2707, 1990.