

중성자 핵변환을 이용한 차세대 반도체 대량 도핑 기술



김명섭, 박병건, 강기두
한국원자력연구원 책임연구원

- 서울대학교 원자핵공학과 학사·석사·박사
- 한국원자력연구원 책임연구원

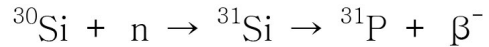
요약

중성자 도핑(NTD) 기술은 연구용원자로의 중요한 응용 분야이며, 30 MW 연구용원자로 하나로는 NTD 분야에서 세계를 선도하는 원자로이다. 하나로에서 미래의 반도체 소재로 주목받고 있는 SiC에 대한 대용량 중성자 도핑 기술이 개발되었다. 이러한 기술개발을 통해 원자력 또는 방사선 연구 인프라의 활용이 반도체/전자/첨단소재 분야로 크게 확대될 수 있을 것으로 기대된다.

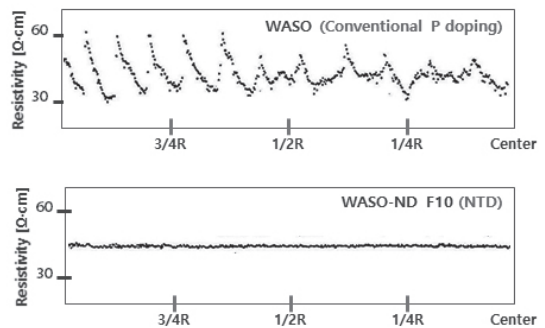
1. 중성자 도핑 개요

실리콘(Si)에 대한 중성자 핵변환 도핑(Neutron Transmutation Doping, NTD)은 실리콘(Si) 원자가 중성자를 흡수하여 인(P) 원자가 되는 아래와 같은 핵변환 과정을 통해 실리콘 단결정 내에 n-type 필수 불순물인 인을

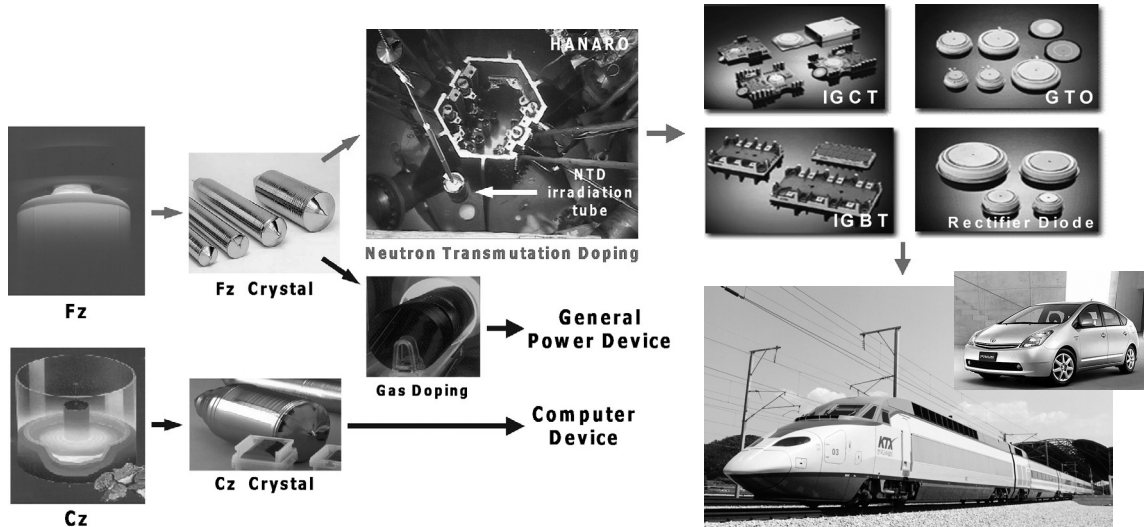
발생시키는 원리를 이용한다[1,2].



매우 균일한 중성자 장(field)내에서 이 방법을 이용하면 실리콘 잉곳내에 매우 균일한 불순물 분포 생성이 가능하다. 따라서 NTD는 아래 그림에서 알 수 있듯이 다른 상용 도핑 방법보다 매우 균일한 비저항 균일도를 얻을 수 있는 도핑 방법이다[3].



[그림 1] NTD-Si과 상용 도핑 Si의 반경방향 비저항 분포 비교



[그림 2] 반도체 생산 공정과 이용 분야

NTD는 1950년대에 가능성이 확인된 이후, 1970년대 중반부터 실리콘에 대해 본격적으로 상용화되었으며, Ge, GaAs 등 다른 반도체 물질에 대해서도 그 가능성이 확인되었으나, 오늘날 연구용원자료를 이용한 대규모 도핑은 실리콘에 대해서만 시행되고 있다[4].

실리콘 반도체 생산은 크게 CZ(Czochralski) 방법과 FZ(Floating zone) 방법으로 구분되며, 결정의 순도와 품질이 CZ-Si 보다 매우 높은 FZ-Si은 가스도핑법이나 NTD를 적용하면, 고전력을 인가해도 소자의 건전성이 유지되므로, thyristor, GTO, IGBT 등의 고전력 소자에 이용된다. NTD를 적용한 FZ-Si은 고전력 소자 가운데에서도 고급 제품에 사용되며, 이러한 소자들은 현재 고속 철도의 전기 모터 속도 제어, 송배전 계통, 전기자동차 등에 널리 사용되고 있

다.

전 세계적으로 NTD에 사용되는 실리콘 웨이퍼 생산은 일본, 유럽 회사들이 시장을 주도하고 있으며, 이를 이용한 고전력반도체 시장은 꾸준히 성장하는 안정 시장이었다. 최근 전기자동차 등 전력반도체의 수요가 급증하여, NTD 반도체의 수요는 크게 상승하였으나, 연구용원자로 용량의 한계로 공급은 제한적이다.

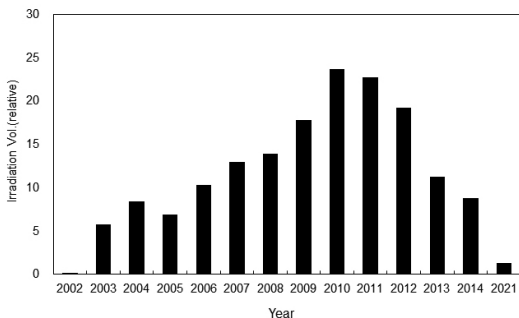
2. 하나로에서의 NTD 현황

30 MW 연구용원자로인 하나로에는 NTD를 위한 두개의 수직 조사공이 있으며, 중성자의 성질(열중성자속, 열/고속중성자속 비 등)과 조사공의 크기(직경, 높이) 등이 NTD에 매우 적합함이 확인되었다. 2002년 5인치 실리콘 잉곳을 조사할 수 있는 조사 시설을 구축하였으며,

〈표 1〉 하나로 NTD 조사공의 특징

Item	NTD1	NTD2
Inner diameter [mm]	220	180
Acceptable ingot diameter [inch]	6, 8	5, 6
Acceptable ingot length [mm]	600	600
Thermal neutron flux [$n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$]	2.5×10^{13}	3.4×10^{13}
Cadmium ratio for gold		16-22
Thermal-to-fast ratio	> 140	> 180
Typical irradiation hr. for 50 $\Omega \cdot cm$	6.2	4.5

2008년에는 8인치 잉곳을 조사할 수 있는 시설을 갖추었다. 현재 하나로는 두 조사공에서 5, 6, 8 인치 실리콘 잉곳을 연간 약 20톤 조사할 수 있는 능력을 확보하고 있다. 하나로의 NTD 조사장치에는 극정밀 중성자 조사장치 설계 및 제작 기술이 도입되었으며, NTD 분야의 최대 경쟁자인 호주 OPAL 원자로와 비교하여 조사장치 중성자속이 2배 이상, 잉곳 전체 중성자속 균일도 $\pm 3\%$ 이내, 표적 비저항 정확도 $\pm 3\%$ 이내로, 하나로 NTD 기술은 세계 최고 수준으로 평가받고 있다.



〔그림 3〕 '하나로' 중성자 도핑 연도별 현황

전 세계의 여러 연구로에서 NTD를 수행하고 있으나, 대부분 5인치 이하의 조사 능력을 가지

고 있으며, 한국의 하나로(HANARO)를 비롯하여 호주 OPAL, 벨기에 BR2, 독일 FRM-II 원자로 등이 전 세계 NTD 실리콘 공급의 대부분을 차지하고 있다.

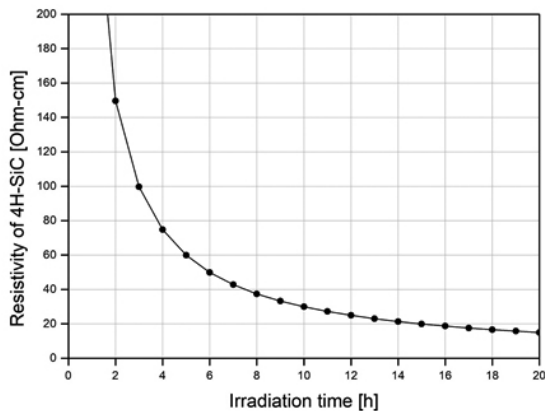
3. 차세대 반도체 SiC 도핑 기술 개발

SiC는 소결체로 많이 사용된 화합물이며, 순수한 SiC 파우더와 단결정 제조 방법이 발견됨에 따라 Si를 대체할 차세대 반도체 소재로 각광 받게 되었다. SiC 반도체는 광대역(wide band-gap) 반도체로 지표상 Si보다 400~1000배의 성능을 나타내며, 열전도성, 고내전압, 동작시 작은 저항, 고속스위칭이 가능한 점 등 다양한 장점이 있다. 그러나, micropipe, 결정 성장, 소자 구현, Si와의 이종접합 등 다양한 기술적 난제를 해결해야 하며, 이 때문에 생산 단가도 매우 높다. 특히 반도체로 사용하기 위해 필수적인 불순물 도핑도 SiC의 중요한 난제 중 하나이다.

SiC는 확산에 의한 도핑이 불가능하며, 이온주입 또는 에피 성장 중 in situ doping만 가능하다. 이온주입 도핑의 경우, 300 keV 이

상, 1 mA 이상의 고성능 이온주입기를 이용하며, 불순물 활성화를 위한 Platen의 가열 성능 (1200~1700 °C)이 필요하고, 도핑 균일도를 위해 multi-shot 주입이 필요한 경우도 있어 도핑 공정이 상당히 복잡하다. SiC내의 실리콘(Si) 원자는 중성자 핵변환을 통해 인(P) 원자로 변환이 가능하므로 Si과 마찬가지로 SiC n-형 도핑을 위해 중성자 도핑 방법을 이용할 가능성이 존재한다. 이에 따라 하나로를 이용하여 SiC에 대한 NTD 도핑 방안을 도출하고 도핑 기술을 개발하였다.

SiC에 대한 중성자 도핑시, HPSI 4H-SiC 물질을 기준으로 불순물 도핑 농도는 $1 \times 10^{13} \sim 5 \times 10^{14} / \text{cm}^3$ 이며, 이에 따른 SiC 반도체 물질의 비저항은 약 20 ~ 1000 Ω-cm이다. 하나로에서 중성자에 조사되는 시간에 따른 비저항은 아래 그림과 같다.



[그림 4] 하나로 중성자 조사시간에 따른 SiC 반도체의 비저항

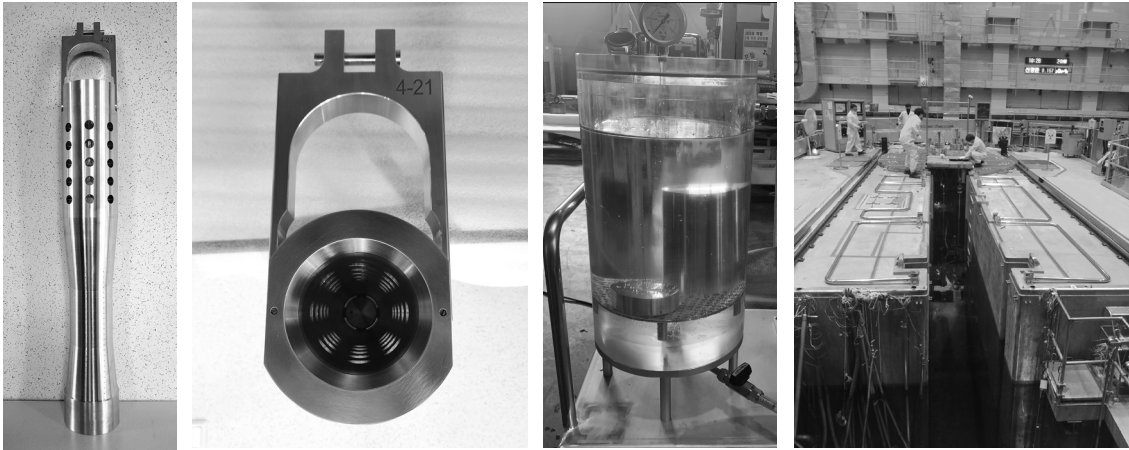
중성자 도핑법의 가장 중요한 장점은 SiC 전도핑 영역에 걸쳐 매우 균일한 불순물 분포가

가능한 점과 목표 비저항에 매우 근접하게 도핑할 수 있다는 것이다. 2021년, 하나로에서는 이러한 장점을 극대화한 SiC 반도체 웨이퍼의 대량 도핑 기술을 세계 최초로 개발하였다. 기존 외국 연구들은 실험실 단위에서 소형 반도체 chip에 대해 불순물 도핑이 가능함을 확인한 수준인 반면, 본 연구에서는 SiC 반도체의 대용량 중성자 균일 도핑이 가능한 장치도 개발하였다.

[그림 5]와 같이 개발된 SiC NTD 장치를 이용하여 하나로의 수직 조사공에서 약 50 Ω-cm의 비저항을 갖는 4인치 SiC 반도체 웨이퍼의 도핑에 성공하였다. SiC 웨이퍼 1장의 예상 중성자 도핑 균일도는 0.35%로 기존 상용도핑 웨이퍼 균일도인 6%에 비해 매우 우수함이 확인되었다. 또한 조사장치를 이용하여 많은 양의 SiC 웨이퍼 또는 SiC 잉곳을 도핑하는 기술도 함께 개발됨에 따라 SiC 웨이퍼 단위로 도핑하는 기존 도핑 방법에 비해 도핑 공정의 효율성도 크게 개선될 것으로 기대된다.

4. 결론

미래의 반도체 소재로 주목받고 있는 SiC에 대한 대용량 중성자 도핑 기술이 세계 최초로 개발되었다. 연구용원자로의 중요한 응용분야 중 하나인 중성자 도핑의 영역을 확대하여 SiC에 응용할 수 있는 기술과 장치가 개발됨으로써 하나로의 활용성도 크게 증대될 것으로 기대된다. 특히 국내 SiC 전력반도체 밸류체인(value chain)의 미싱링크인 소재분야의 기술 제약을



[그림 5] SiC 반도체 중성자 균일 도핑 장치와 연구로 이용 도핑시험

해소할 수 있는 기술이라는 점에서 큰 의의가 있음을 확인하였다. 이러한 기술개발을 통해 원자력 또는 방사선 연구 인프라 활용을 반도체/전자/첨단소재 분야로 크게 확대시킬 수 있을 것으로 예상된다. 향후, 초균질 NTD-SiC 반도체

이용 다이오드, 트랜지스터 소자 설계, 초고전압 반도체 소자 개발 연구 및 전기차 보급 확대에 따른 차세대 고부가가치 차량용 반도체 개발 등과 같은 후속 연구를 통해 NTD-SiC의 활용성이 더욱 커질 것을 기대한다. **KMIF**

〈참고문헌〉

- [1] K. Lark-Horovitz, "Nuclear-bombarded semiconductors in semiconductor materials", Proceedings of the Conference on Semiconductor Materials, University Reading, Butterworth, London, 1951, p.47.
- [2] M. Tanenbaum, A.D. Mills, J. Electrochemical Society, 108 (1961) 171.
- [3] H. Herzer, "Neutron-doped silicon - a market review", Neutron-Transmutation-Doped Silicon, J. Guldberg, ed., Proceedings of the Third International Conference on Neutron Transmutation Doping of Silicon held on August 27-29, 1980, in Copenhagen, Denmark, Plenum Press, New York, 1981.
- [4] International Atomic Energy Agency, Neutron Transmutation Doping of Silicon at Research Reactors, IAEA-TECDOC-456, IAEA in Austria, 2012.