

실리콘 웨이퍼 성장용 초전도 마그네트의 제작 및 성능평가

심기덕, 최석진*, 김경한*, 한호한*, 김형진*, 진홍범, 이봉근*, 권영길
한국전기연구원, *주)덕성

Fabrication and Test Results of Superconducting Magnet for Crystal Growing System

K.D. Sim, H.B. Jin, S.J. Choi, K.H. Kim, H.H. Han, H.J. Kim, B.K. Lee, Y.K. Kwon
Korea ElectroTechnology Research Institute, Duksung Co. Ltd.

Abstract - 12inch 이상의 웨이퍼 성장에는 실리콘 용탕의 대류를 억제하여 웨이퍼의 순도를 높이기 위해 자기장 특히, 웨이퍼의 성장방향에 수직인 '수평자기장'을 인가하는 방법이 사용된다. 현재 '자기장인가 방식', 특히 초전도를 사용한 자기장인가 방식이 직경 1600mm에 이르는 용탕의 용액을 제어하는 유일한 방법으로 받아들여지고 있다. 본 논문에서는 12inch 실리콘 웨이퍼 성장용 초전도 마그네트 개발의 전단계로 개발중인 8inch 웨이퍼 성장용 수평자기장형 초전도마그네트의 제작과정과 성능평가 결과에 대해 다루었다.

본 연구를 통해 액체헬륨의 증발을 최소화하기 위한 재응축형 극저온 용기에 대한 기술이 개발 되었으며, diode를 이용한 퀀치보호부, HTS 전류리드와 퀀치 protection부 등의 부속기술이 개발되었다. 초전도 마그네트는 내경 1400mm의 saddle type으로 이의 제작에 있어 많은 기술적 난제들을 경험해야 했다. 전체 시스템에 대한 성능평가 결과, 극저온용기 및 부속장치에 대한 결과는 만족스러웠으나, 코일부의 성능은 계획한 목표에 미치지 못했다.

1. 서 론

지금까지 반도체 제조 공정에는 주로 직경 8inch의 실리콘 웨이퍼가 사용되어 왔다. 그러나, 반도체 제조단가를 절감하여 가격 경쟁력을 확보하기 위한 방법으로 웨이퍼의 직경을 증가시키려는 노력이 계속되고 있다. 현재 12inch급의 웨이퍼 성장기에 대한 연구개발이 진행되고 있으며 Alpha Magnetics사, 스미토모, 미쯔비시등에서 초전도 마그네트의 시제품들이 제작되고 있다. [1] 여타의 초전도 마그네트 시스템과 마찬가지로 본 기기 또한 극저온용기, 초전도 코일, 그리고 각종 부속장치로 구성된다. 극저온용기에 있어서는 4K 헤드를 가진 GM 냉동기를 이용한 전도냉각 방식 초전도 마그네트 시스템이 최근 스미토모사에서 개발되었다. 이 방식은 운전방식이 간편하다는 장점이 있으나, 고가의 극저온 냉동기를 다수 사용해야 한다는 점과, 열적 내구성이 취약하여 퀀치시 초전도 마그네트를 소손시킬 수 있는 단점이 있다. 본 연구에서는 액체헬륨을 냉매로 사용하는 기존의 방식을 선택하여 열적안정성을 담보하되, 액체헬륨의 증발을 100% 차단하여, 운전경비 절감은 물론 운전방식도 간단화 시킨 헬륨 재응축형 극저온용기를 개발하였다. 초전도 코일에는 한 쌍의 saddle형 코일이 사용되었다. saddle형 코일은 비교적 작은 크기로도 원하는 전자기적 특성을 구현할 수 있는 장점이 있으나, 코일 권선 시 많은 기술적 난제를 내포하고 있다. 본 논문에서도 몇가지 문제점들에 대해 언급하였다.

그 외에 부속기술이라는 이유로 국내에서 등한시 되었던 HTS 전류리드 운전기술, 헬륨용기 내부압력 콘트롤 기술, 다이오드를 이용한 마그네트 보호기술 등이 본 연구를 통해 개발되었다.

2.1 마그네트의 설계

2.1.1 Coil의 형상 결정

수평자기장을 인가하기 위하여 현재 2개 혹은 4개의 솔레노이드코일 혹은 마주보는 한 쌍의 saddle형 코일이 주로 사용된다. [1] 본 연구에서는 saddle 코일 형태를 채택하였으며, 코일의 크기는 8inch 단결정 성장에 사용되는 실제 도가나의 크기와 코일이 삽입될 극저온용기의 제작을 고려하여 그림1과 같이 결정하였다. 선재는 편각선을 사용할 것을 가정하였고, 한쪽에 총 1500turn을 정렬 권선하도록 하였으며 동작전류는 400A정도로 결정하였다. 코일 및 전체 시스템에 대한 사양을 표1에 정리하였다.

표 1 마그네트의 사양

장치	항목	사양	
마그네트	Coil	type	saddle
		size	내경 1420mm 높이 500mm
		Inductance	7H
		동작전류	최대 400A
		ramp rate	최대 3A/sec
		중심자기	최대 0.5T
	선재	종류	NbTi 초전도선 (Oxford社)
		size	1.28mm■0.8mm rectangular
	전류리드	소요량	12km
		type	HTS Tape 전류리드 (ASC社)+Brass, OFHC의 복합 사용
극저온용기	냉각방법	냉동기 직결 냉각	
	size	외경:1670mm, 내경:1270mm 높이 : 1200mm	
	Cryo-cooler	헬드 냉각용과 재응축용에 각각 하나의 GM냉동기	
	냉각부 연결	OFHC Thermal Capacitor	
	복사 차폐층	20K 차폐층 + 80K 차폐층	
	진공도	1.0■10 ⁻⁶ Torr	
	LHe 증발량	0.0 liter/hr	
부속장치	지지구조	G-10 수직 및 수평 support	
	헬륨조 압력	+0.05bar	
	Magnet의 퀀치검출 및 보호	HTS 전류리드 퀀치검출 및 보호장치	
	헬륨조 압력 조절 장치	헬륨용기 내부압력 콘트롤 장치	

2. 본 론

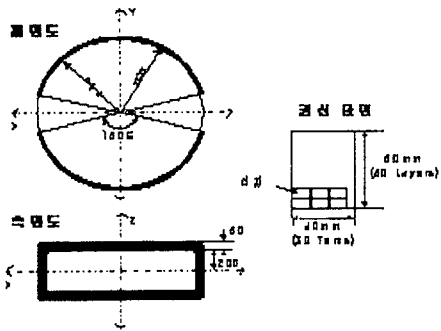


그림 1. 초전도 코일의 개략도



그림 3. 보빈



그림 4. 권선과정

2.1.2 Coil에 대한 전자기장 해석

전자장해석은 상용해석 tool인 OPERA-3d를 사용하였다. 다양한 경우에 대한 해석이 진행되었으며, 여기에서는 coil 주변에 20mm두께의 실린더형 마그네틱 shield와 30mm두께의 4분할 shield가 동시에 설치되었을 경우의 해석 예 만을 그림2에 소개한다. 동작전류는 400A이며, 중심자장은 5300 gauss, 최대자장은 3.08 Tesla이다.



그림 5. Glass fiber 보강

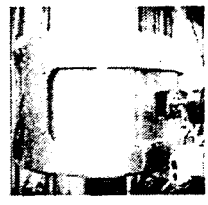


그림 6. 합침 용기

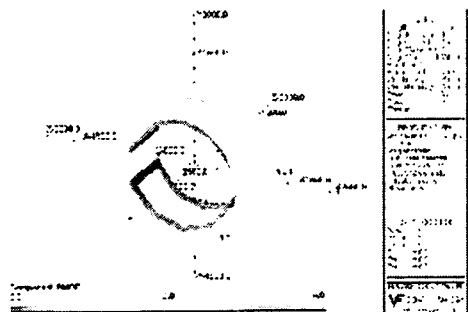


그림 2. 초전도 코일의 FEM 해석 결과

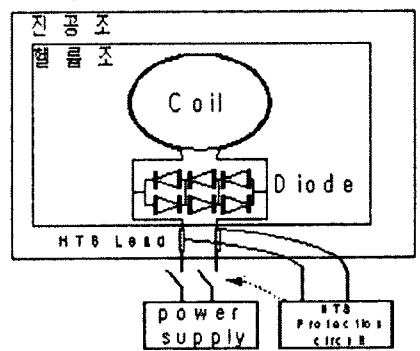


그림 7. 초전도 마그네트의 회로 구성도

마그네트 보호회로, 고온초전도 전류리드 및 이의 보호회로를 포함한 전체 초전도 마그네트 회로를 그림7과 같이 구성한다. 마그네트 보호회로는 직병렬 결합된 diode로 구성되어, 헬륨조 내부에서 마그네트에 병렬연결된다. 또 다른 보호회로는 고온초전도 전류리드를 위한 것으로서, 전류리드의 켄치시 작동하여, power supply로부터 공급되는 전류를 강제로 차단함으로써 전류리드의 손상을 방지한다.

2.2 Coil의 제작

2.2.1 Coil 권선

먼저, 코일의 권선을 위해 알루미늄 재질의 보빈이 제작되었으며, 보빈과 권선 간의 전기절연을 위해 에폭시 sheet가 보빈에 접착되었다. 그림3은 권선 과정을 보여주는 그림이다. 보빈에는 코일이 권선될 알루미늄 frame이 부착되며, 이 frame 위에 직접 권선을 하게 된다.(그림4) 권선 후 선재는 유리 섬유로 보강되며(그림5) 이후 frame은 에폭시 합침을 위해 알루미늄 덮개로 완전히 밀봉된다.(그림6)

권선을 시행한 결과 현재의 장비로는 정렬 권선이 불가능하다는 결론에 도달했다. 이는 saddle 코일의 형태상 물리적으로 불가한 부분이며, 이의 해결을 위해서는 권선 중에 즉각적으로 선재간 접착이 가능하도록 권선법을 개선해야 할 것으로 판단된다.

합침 frame으로 밀봉된 코일을 진공유지가 가능한 대형 합침조에 위치시켜 진공합침을 시도하였다. 그러나 합침 frame의 기밀 유지에 문제가 발생하였으며, 결과적으로 선재 사이에 에폭시가 완벽하게 주입되었다는 것을 보장할 수 없게 되었다. 합침에 사용된 에폭시는 CTD사의 극저온용 상온경화 에폭시이며, 섭씨 80도에서 3시간 동안 열처리 과정을 거쳤다.

2.2.3 Diode 특성 실험

마그네트의 보호에는 병렬로 연결된 diode 회로의 순방향 전압이 이용된다. 마그네트의 켄치시 순방향 전압 이상의 전압이 발생하고 이에 의해 diode가 도통되어 에너지를 소모하게 된다. 또한 전류여차 시 순방향전압을 넘지 않는 범위 내에서 비교적 고속의 충 방전을 가능케 한다. Diode의 순방향 전압의 온도 의존성과 자장의존성을 검사하여 사용가능 여부를 판정하기 위한 요소 실험을 진행하였다. 결과, 그림8에서 보는 바와 같이 온도가 낮을수록 그리고 diode에 수직으로 인가된 주변자장이 강할수록 순방향 전압이 상승함을 알 수 있다. 실제 시스템에는 2개씩 병렬로 연결된 diode쌍이 총 3쌍 직렬로 연결되어 사용되었다. 수많은 연속 운전을 통해 diode회로의 신뢰성을 검증하였다.

2.2.2 마그네트 시스템의 회로 구성

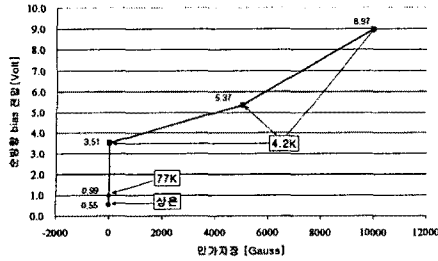


그림 8. diode 순방향 전압의 온도 및 자장의존성

2.2.4 HTS 전류리드 및 전류리드 보호부 제작

코일에 전류를 인가하기 위해 사용되는 전류리드는 외부로부터의 열침입과 저항발열을 최소화할 수 있는 구조여야 한다. 본 시스템에서는 고온초전도 테이프전체를 사용한 전류리드를 기본으로 하고 여기에 brass와 무산소동(OFHC) 박판을 적층하여 연결하는 구조를 택하였다. 극저온 냉동기에 OFHC 박판으로 HTS 전류리드를 직접 연결하여 전류리드를 40K이하로 냉각하였다. 그림9는 전류리드와 냉동기의 연결에 사용된 thermal capacitor의 모습이다. 그림10은 HTS 전류리드와 마그네트 상단에 접촉될 NbTi 선체가 결합된 모습이다.

그림11은 냉동기와 전류리드가 장착된 극저온용기의 상단 모습이다. 전류리드는 극저온 용기의 진공조 내에 위치하며, 여기에서 4K 헤드를 가진 극저온 냉동기와 Thermal capacitor를 사용하여 열적으로 결합된다. 또한, 자장에 취약한 HTS 전류리드의 특성을 감안하여, 전류리드는 강철로 된 자기절드에 둘러싸인다. HTS 전류리드부를 진공조에 두는 이유는 전류리드 교체시 시스템의 분해 정도를 최소화하기 위한 고려이다.

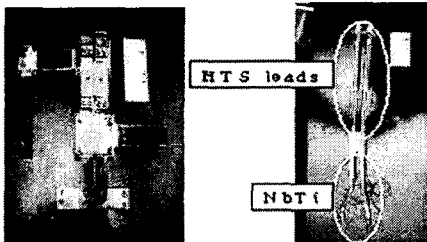


그림 9. 전류리드 연결부분 그림 10. HTS 전류리드

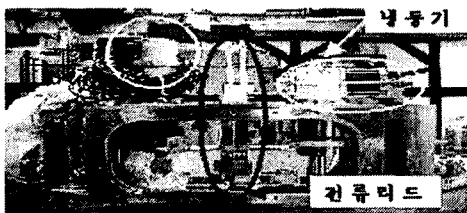


그림 11. 전류리드와 냉동기의 연결부

코일의 여자중 전류리드의 냉각상태에 문제가 발생하게 되면, HTS는 고전류를 견디지 못하고 켄치를 발생시킬 것이며 결국엔 소손되고 만다. 이를 방지하기 위하여 전류리드의 켄치를 검출한 후 외부에서의 전류유입을 차단하는 장치가 필요하다. 본 연구를 통해 HTS 전류리드 보호 장치를 개발하였다. HTS 전류리드 양단 전압을 측정하여 특정의 thresh-hold 값을 초과할 경우 외부의 circuit breaker를 작동하도록 하였다. 실제 마그네트 시스템에 적용될 HTS 전류리드부를 그대로 재현하고 각 부분에 전압탭 및 온도센서를 설치하여 보호

장치의 성능을 평가하였다. 그림12는 성능평가를 위해 제작된 model의 개략도이다.

켄치신호의 처리를 위한 기관은 몇 개의 비교기 및 증폭기를 사용하여 구성하였다.

Thresh-hold 전압을 4.25mV로 설정한 후 400A의 전류를 통전하였다. 전류리드의 온도상승을 유도하기 위해 모든 냉동기의 작동을 정지 시켰다. 켄치 시점의 각 부분의 온도는 표2와 같다. 켄치를 검출 후 약 18msec의 시간지연 후에 전류가 차단되었다. 이 시간 동안 전류리드에 주어진 열량은 약 30mJ 정도로 HTS 전류리드가 충분히 견딜 수 있는 열량이다. 수차례의 테스트를 거쳐 본 장치의 신뢰성을 검증하였다.

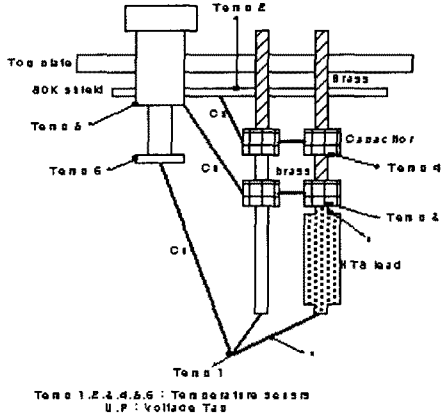


그림 12. HTS lead 보호장치 실험을 위한 모델

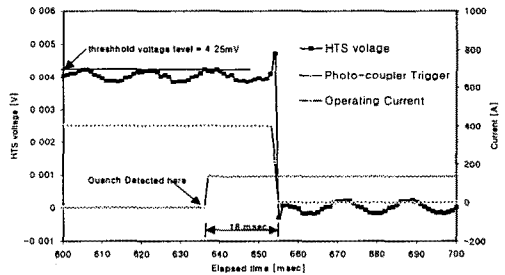


그림 13. HTS 보호장치의 전류차단 실험 결과

표 2. HTS 전류리드 켄치시 온도 변화

Sensor	Temp1	Temp2	Temp3	Temp5	Temp6
초기온도(K)	22.8	82.5	53.0	69.0	4.6
켄치시 온도(K)	71.6	106.6	99.3	111.2	62.0

2.2.5 액체 헬륨용기 압력 콘트롤

본 시스템에 적용된 극저온 용기는 내부로부터 증발하는 액체 헬륨을 4K 헤드를 가진 극저온 냉동기를 사용하여 다시 액화시키는 재응축 방식이다. 헬륨 액화 시 헬륨조의 내부 압력은 음압력으로 강하한다. 이 때 외부로부터 공기 특히, 수증기가 시스템 내부로 유입될 수 있다. 이를 방지하기 위해 헬륨조 내부의 압력은 항상 양의 압력으로 유지되어야 한다.

본 시스템에서는 헬륨조 내부에 히터를 설치하여 액체 헬륨을 강제로 증발시키고, 동시에 냉동기용 compressure의 가동 여부를 콘트롤하여 내부 압력을 일정범위에서 유지하였다. 그림14는 히터와 compressure를 구동을 위한 콘트롤부의 개략도이다. 그림15는 히터와 compressure의 압력에 따른 구동 sequence이다.

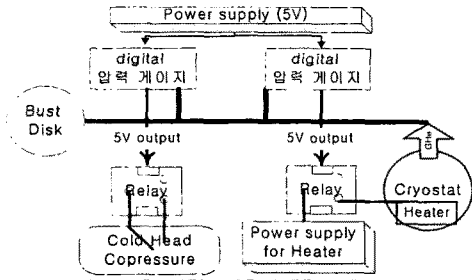


그림 14. 히터/compressor 콘트롤부 개략도

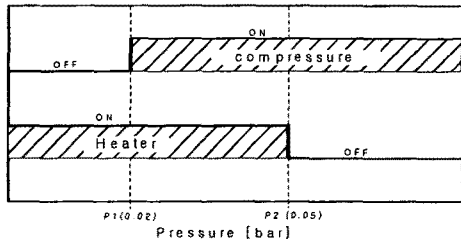


그림 15. 히터/compressor 구동 sequence

2.2.6 시스템의 조립

코일을 극저온 용기에 삽입하고 각종 부속장치를 결합하여 시스템을 완성한다. 극저온 용기는 20K 및 80K thermal shield와 진공조 및 저온용기의 각 부분을 지지할 수평 및 수직 support로 구성된다. 그림16은 실리더형 외통이 씌워지긴 전의 극저온 용기의 상부 모습이며, 그림17은 조립이 완료된 실리더웨이퍼 성장용 초전도 마그네트의 모습이다.

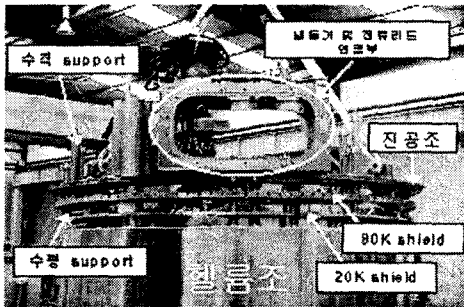


그림 16. 극저온 용기의 조립

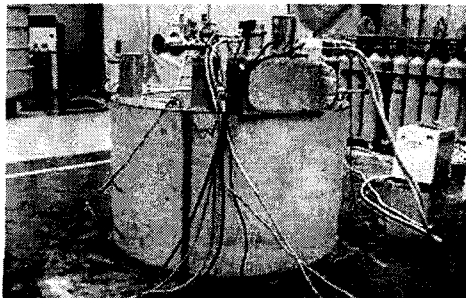


그림 17. 완성된 초전도 마그네트 시스템

2.3 성능평가 실험

코일을 여자한 결과 목표 전류인 400A에 도달하지 못한 상태에서 켄치가 발생하였다. 켄치 전류는 초기 여자 시 150A에서 시작하여 여자를 반복 할수록 증가하여 235A 근처에서 증가를 멈추었다. (첫번째 여자)

마그네트의 온도를 상온까지 상승시킨 후 재 냉각하여 다시 여자 실험을 수행하였다. 이 결과 초기 켄치는 180A에서 발생하였으며 “첫번째 여자”에 비해 적은 반복 횟수 만에 235A 근방의 켄치전류에 도달했다. 그림 18은 이에 대한 결과를 나타낸 그래프이다.

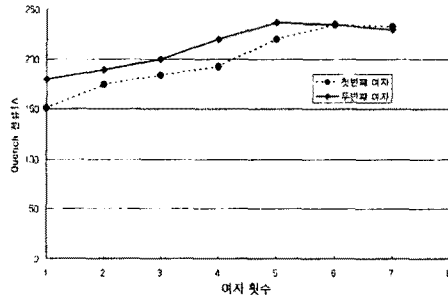


그림 18. 코일의 켄치 전류

극저온 용기는 실제 과정에서 예측한 바와 유사한 성능을 보여주었다. 특히 헬륨 재충속부가 제대로 작동하여 증발하는 헬륨가스를 100% 재충속할 수 있었다. 기타 켄치 보호장치등의 부속장치들도 기대한 성능을 보여주었다.

3. 결 론

여자 실험 결과 목표 전류에 도달하지 못했으며, training effect 또한 관찰되었다. 이는 예측시 함침이 완벽하지 못했다는 증거로 보인다.

코일의 설계과정에서 전자기력 및 열응력등의 기계적 구조에 대한 고려가 미진했으며, 따라서 코일의 지지구조에 문제가 있을 것이라는 의심을 하게 된다. 향후에는 설계 초기단계에서부터 보빈의 지지구조에 대한 고려가 있어야 할 것이다.

헬륨 재충속형 극저온 용기의 설계 및 제작에 성공하여, 고가의 액체헬륨소비를 극소화함으로써 저온초전도 마그네트 시스템 국산화를 앞당기게 되었다.

또한, 본 연구를 통해 HTS 전류리드에 대한 운용 경험을 쌓았으며 HTS 전류리드의 보호회로 제작기술을 획득하였다. 또한, 외국에서는 일반화 되어 있는 diode를 이용한 마그네트 보호방법에대한 기술을 획득하였으며, 이는 향후 저온 초전도 마그네트의 응용분야에 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 부품소재기술개발사업에서 지원하였습니다. 이에 감사드립니다.

{참 고 문 헌}

- [1] "Misubish Electric's Activities on Superconducting Magnet Technology", section 2-3 페이지, 출판년도
- [2] Martin N. Wilson, "Superconducting Magnets", p85~88