

전력반도체 기술 및 시장동향



김상철
(한국전기연구원 전력용 반도체 연구그룹 선임연구원)



김은동
(한국전기연구원 전략기술연구단장)

1. 전력반도체소자의 정의 및 분류

1.1 전력반도체소자의 정의

전력용 반도체(power semiconductors)는 그 정의의 모호성, 사용의 다양함 등으로 인하여 메모리 반도체나 마이크로프로세서 반도체 등과 같이 일반에 정확하게 알려져 있지는 못한 실정이다. 심지어 과학기술계 종사자에게조차도 정확히 알려져 있지 못한 것이 현실이다.

‘전력용 혹은 전력’ 반도체에 대한 국제표준정의는 없다. 다만 국제학술회의의 특별강연 등에서 제안되고 있는 정의들을 요약해 보면, “전력(용) 반도체란 내전압이 100V 이상이거나 정격(부하)전류가 1A 이상인 개별전력반도체소자(discrete power semiconductor devices)와 정격치 기준이 개별전력반도체소자의 1/2 이상인 전력집적회로소자(power integrated circuit devices)들의 총칭”으로 나타낼 수 있다. 그러나 최근 페이지, PCS-phone 등 배터리를 전원으로 사용하는 정보단말기 등에서 저손실화/고속화를 위해서 초저전압/저전류회로를 채용하는 추세여서 이러

한 기기에 사용되는 전원 IC 등은 위의 전력반도체소자 정의의 범주에 들지 않는 경우가 많아지고 있다. 따라서 최근에는 정격치의 크기보다는 용도에 의하여 분류하는 경향이 높아지고 있다. 즉, 전원장치나 전력변환/제어용 반도체는 용량에 관계없이 전력용 반도체로 분류하고 있다.

1.2 전력반도체소자의 분류

전력 소자는 단자 수, 접합 수에 따라 분류할 수 있으며, 대체로 정류기는 2단자, 1접합이고, 스위치는 3단자, 2-3접합을 가지고 있다. 반도체 소자의 동작원리에 따라, 즉 반송자(carrier)가 1개(전자 또는 정공) 또는 2개(전자와 정공)인가에 따라서 분류하기도 하며, 혼성 반송자(mixed carrier)인 경우는 주로 MOS gate 바이폴라 전력반도체소자를 가리킨다.

정류기, 사이리스터, 바이폴라 트랜지스터는 기술이 오래 되었으며, 상업적으로 정착되어 현재 가장 많이 사용되는 소자라 할 수 있다. 한편 전력 MOSFET, IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor), 등은 70년대 후반에 새로이 고안되어, 시장점유율이 점점 높아지고 있으며 현재 600V급 이하의 소

용량 시장에서는 바이폴라 트랜지스터의 많은 부분을 대체하였으며 1200V급 이상의 중대용량 분야에서도 고속스위칭의 장점을 앞세워 사이리스터 및 GTO 사이리스터 등의 시장을 대체하고 있다. MCT(MOS Controlled Thyristor) 및 IGCT(Intergrated Gate Commutated Thyristor)는 비교적 최근에 개발된 전력반도체 소자로 현재 소규모의 시장을 형성하고 있으나 시장 점유율이 높아지고 있는 미래의 전력소자라 할 수 있다. 또한 반도체 소자의 소재로는 개발 제품의 대부분은 실리콘을 사용하고 있으며, SiC(Silicon Carbide), GaAs를 사용한 전력소자에 대한 연구가 최근 활발히 이루어지고 있다. 표 1에 전력반도체소자의 종류 및 각각의 소자의 최대 전류, 전압정격을 나타내었다.

2. 전력반도체 기술

전력반도체 소자의 제조에 필요한 기술은 크게 칩제조기술, 실장기술, 그리고 시험평가기술로 나눌 수 있다. 그러나 최근의 기술경향은 칩제조에서는 설계기술, 웨이퍼기술 및 공정기술이 서로 종속적이기 때문에 각각을 따로 떼어서 생각할 수 없는 단계에 와 있다.

예를 들면 MOS소자에서의 특성향상은 웨이퍼의 표면특성의 개선이 없이는 불가능하다. 또한 게이트 채널의 길이를 줄

이는 노력은 웨이퍼 표면의 품질과 산화막 공정에 제한을 받는다. 물론 DMOS계에서 UMOS계로 넘어가는 것은 기존 구조에 대한 기본개념을 무너뜨린 결과이기도 하지만, 이의 실현은 웨이퍼기술과 공정기술의 혁신없이는 불가능하다. 또한 IGBT나 GTO 사이리스터소자에서도 전력손실과 스위칭속도의 trade-off 특성 개선에서의 고저항 웨이퍼기술의 역할은 매우 중요하다.

2.1 소재기술

현재 전력반도체소자의 기본 소재로 가장 보편적으로 사용되는 것은 실리콘(Si)이다. 대체로 900V 이하, 중·소용량(50A 이하)의 소자는 초크랄스키(CZ, Czokralski)웨이퍼를 주로 이용한다. 저전압 표준 IC용의 경우에는 한면의 표면 근방을 denuding한 것을 사용하지만, 수 백V의 중전압용의 경우에는 한면에 고저항 에피택셜층을 키운 소위 '에피택웨이퍼(epitaxial wafer)'가 주로 사용되고 있으며, 1,200V 이상의 소자에는 배면확산(BSD, backside-diffused, OSL, one-side lapped, 이라고도 함) 중성자변환도핑(NTD, neutron transmutation doped) FZ(floating zone) 웨이퍼를 사용하는 것이 일반적이다. 이와 같이 전력반도체에 응용되는 웨이퍼는 메모리반도체 등에 사용되는 표준웨이퍼와는 달리 종류가 다양하고 두께 등이 규격화 되어 있지 않은 것이 특징이

표 1. 전력반도체소자의 종류 및 최대정격.

분류		최대정격전류(A)	최대정격전압(V)		
전력반도체	개발 전력 반도체소자 Discrete Power Semiconductor Devices	다이오드	일반용	8,000	12,000
			고속 스위칭	1,000	4,500
			쇼트키	3,000	350
		트랜지스터	바이폴라 Tr.	800	2,500
			MOSFET	75	1,500
			정전유도 Tr.	150	1,500
			IGBT	1,200	4,500
			사이리스터	6,000	12,000
		사이리스터	사이리스터(일반용)	1,500	2,500
			사이리스터(고속용)	3,500	8,000
			역도통 사이리스터	1,000	2,500
			정전유도 사이리스터	600	4,500
	GTO 사이리스터		6,000	6,000	
	Triac		300	1,200	
	MOS-Gate Thyristor		100	1,000	
	GCT	1,000	4,500		
	전력 모듈 Power Module	다이오드 모듈	250	2,000	
		사이리스터 모듈	400	1,600	
		바이폴라 트랜지스터 모듈	600	1,600	
		GTO 사이리스터 모듈	600	1,600	
MOSFET 모듈		100	1,000		
BiMOS 모듈		300	1,000		
IGBT 모듈		400	1,200		
지능형 소자	Smart Power ICs	30	1,200		
	Intelligent Power Modules(IPM) (BJT, MOSFET, IGBT, SCR 등)	1,200	4,500		

다. 표 2에 기존의 Si 웨이퍼의 장단점 및 용도를 나타내었다.

실리콘 웨이퍼는 현대의 반도체산업의 흔들리지 않는 중심에 서있다. 한편 대부분의 Mega 혹은 Gigabit 기술자들은 실리콘재료의 대량생산의 산과가 개별전력소자 기술이었다는 것을 간과하고 있다. 다이오드나 사이리스터와 같은 전력반도체 소자들이 실리콘 시장을 열고 그 시장규모를 늘려왔기 때문에 실험실로부터 대량생산의 전환이 가능하였다. 이와 같은 과정을 거쳐 품질의 개선과 가격이 계속적으로 안정되어질 수 있었다.

한편 SOI나 SiC와 같은 웨이퍼재료는 전력반도체의 새로운 장을 열어줄 것으로 기대되어 전세계적으로 활발히 연구되고 있으며 일부 실용화의 길에 들어서 있다. 그러나 웨이퍼 제조 공정 비용을 최소화 하는 것이 큰 문제점으로 아직까지는 일반화되지 못하고 있다.

화합물반도체 재료는 60년대와 70년대의 III-V족 화합물에 이르기까지 선진국에서 방대한 연구비와 인력을 투입하여 연

구를 해왔으나, 몇가지 탁월한 특성에도 불구하고 다음과 같은 제약요소에 의하여 현재 전력반도체 소자의 제작에는 거의 사용되지 못하고 있는 실정이다.

- 1) 비화학양론(Nonstoichiometric) 특성으로 특성제어가 힘들다.
- 2) 이론치에 접근하는 고저항화(고내전압화)가 힘들다.
- 3) 재현성이 부족하다.
- 4) 생산에서의 품질관리(QC)가 어렵다.

이러한 제약요소를 지배하는 가장 큰 요소는 비화학양론이다. 이러한 비화학양론성은 Si와 같은 원소반도체에 비하여 많은 종류의 결함을 만들기 때문이다. 이러한 문제점들이 해결되면 전력반도체소자에서도 화합물반도체의 시대가 열릴 수도 있을 것이다.

표 3에 새로운 웨이퍼 재료들의 특성 및 Baliga가 계산한 Figure of merit을 나타내었다. 표에서 다이아몬드의 경우 가장 이상적인 웨이퍼 재료이나 가격뿐만 아니라 결정성장과 화

표 2. 기존 Si-wafer의 장단점 및 용도.

종류	장점	단점	용도
표준 IC용(CZ-Si)	- 저가격 - 공업적으로 안정 - 고강도	- 게이트산화물 저품질 - 내전압 한계 - 표면상태 불량 - 소자 특성제어 한계 - 대전류용으로 부적격	- 일반 IC
에피 웨이퍼	- 표면상태 최고 - 고품질 게이트 산화물 - 공정중 Si 소모 최소화 (Green 웨이퍼) - 고강도	- 저항률 제한 (<100 Ωcm) - 두께 제한 (<100μm)(내전압<1,500V) - 에피층과 기판 계면 전위농도가 높다 - 큰 저항분포폭	- Bipolar Transistor - MOSFET - IGBT - Thyristor - MCT
NTD-배면확산 웨이퍼	- 공업적으로 안정 - 초고전압화 가능 - 저항분포폭 최소화 - 게이트 산화물 고품질	- 표면상태 불량 - 게이트산화물 불량 - 공정중 Si 과소모(비 green 웨이퍼) - 고가격, 저강도 - 비표준화 - 개발 및 생산 시간 - 특수설비 필요	- Bipolar Transistor - IGBT - Thyristor - MCT
SDB 웨이퍼	- 고내전압화 용이 - NTD 웨이퍼 이용가능 - 넓은 응용범위	- 접합면 결함 - 공정중 Si 과소모(비 green 웨이퍼) - 고가격 - 신뢰성 부족	- Thyristor - IGBT - Bipolar Transistor - GTO Thyristor
MCZ 웨이퍼	- 고강도 - 저산소농도 - NTD적용가능(고내전압화 가능)	- 공업적으로 불안정	- 전품종

표 3. 새로운 웨이퍼 재료의 Figure of merit.

재료	normalized MAX. Ec	normalized ε _r	normalized μ	Baliga's FOM	
Si	1.00	1.00	1.00	1.00	
GaAs	1.29	1.09	5.70	13.3	
SiC	8.10	0.85	0.20	106.0	
Dimond	n-type	18.90	0.47	1.27	8574.0
	p-type	18.90	0.47	1.00	6751.0

학적 가공의 어려움으로 실용화에는 상당한 시간이 소요될 것으로 전망된다.

GaAs와 같은 III-V족 화합물 반도체를 제외하면, 현재 전력용이나 고주파용으로 가장 활발하게 연구되고 있는 화합물 반도체는 IV-IV족 SiC이다. SiC는 탁월한 기계적 강도와 고온특성 때문에 내마모성 기계부품이나 고온내화물, 연마제 등에 널리 이용되고 있다. 한편, 반도체성을 이용한 경우에는 과거 SiC 피뢰기소자로 이용되었고, 현재에는 고온발열체로 널리 이용되고 있다. 또한 최근에 와서는 고온서미스터나 발광소자로의 응용이 연구되고 있다. 미국에서는 SiC를 이용한 고주파 전력반도체 소자연구가 활발하게 진행되고 있다.

최근 SOI(silicon on insulator)웨이퍼가 실용화되어 반도체 메모리소자에서 뿐만 아니라 전력 ICs 등에도 응용되고 있으며 앞으로 그 중요성이 더욱 커질 전망이다. 이러한 SOI 웨이퍼의 장점은 다음과 같다.

- 1) 소자간 완전분리가 가능하여 고집적화, 고신뢰성화가 가능하다.
- 2) 소자와 기판간의 기생전전용량을 낮추어 소자의 동작특성 향상이 가능하다.
- 3) 3차원 소자구성이 가능하여 고집적화, 고기능화가 가능하다.

2.2 소자기술

전력반도체소자를 제작하기 위해서는 소자의 종류나 용도에 따라 각기 다른 여러 기술이 사용되고 있다. 그러나 본 기고에서는 공통적으로 사용되는 중요한 몇가지 기술만을 설명하기로 한다.

2.2.1 고내압 및 대전류 기술

소자의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 반도체 칩(chip) 표면의 특성을 안정화시킬 필요가 있다. 칩 표면의 안정화, 즉 고내압 구조의 기술발전 동향을 보면 1970년에 메사 에칭(mesa etching) 공정이 개발되어 고내압 소자에 많이 이용되어 왔으며, 그 뒤 1980년 positive bevel 구조가 개발되어 2000V 이상의 단일 웨이퍼(wafer) 형태의 GTO 등에 적용하게 되었다. 그러나 이러한 구조를 적용한 소자들은 고내압을 얻기 위해서는 아주 유용한 방법이었으나 대량생산에는 상당한 문제점을 갖고 있었다. 1982년에 들어 플래너 전계제한테(planar field limiting ring) 구조가 개발되면서 고내압 소자의 양산화 측면에서 상당한 진전을 이루게 되었고, 최근에 이러한 구조들을 혼합하여 양산성 있는 고내압 소자를 개발하고 있다.

일반적으로 동일한 공정일 때 positive bevel과 메사 에칭 구조는 전계제한테 구조에 비해 더 높은 내압을 얻을 수 있으므로, 전계제한테 구조에서 동일한 내압을 얻기 위해서는 콜

렉터의 불순물 농도가 낮아져야 한다. 따라서 동일한 내압에서는 전계제한테 구조가 역방향 안전동작영역(reverse breakdown safe operating area)은 넓어지지만 스위칭 시간이 길어지게 된다. 그러므로 전계제한테 구조에서 스위칭 시간을 향상시키기 위해서 소자의 구조를 미서패턴화 하고 있으며, 현재 이러한 구조로 4000V급까지의 트랜지스터가 상품화 되어 있고, 특히 우수한 양산성에 의한 원가절감으로 많은 회사에서 선호하고 있다.

수천볼트 이상의 고전압용 소자에는 전계제한테를 중첩하여 형성해야 하기 때문에 소요 면적이 커져 소자의 면적이 과대하게 넓어지는 단점이 있다. 따라서 수천볼트 이상의 소자에서는 bevel 구조가 주로 사용되며, mesa형 혹은 moat형 구조에 유리를 채워 passivation하는 경우도 있다. 유리를 이용한 passivation은 장기신뢰도 면에서는 매우 우수하나 기술적인 난이도 때문에 소수의 기업에서만 채택하고 있는 실정이며 앞으로 기술적인 보완이 많이 필요한 상황이다. 예를 들면 '93년 일본의 도시바에서 positive-beveling moat구조에 유리로 passivation한 바이폴라 트랜지스터를 개발하였는데, 이는 같은 정격의 전계제한테 구조에 비하여 칩 면적을 30% 정도 줄이는 획기적인 발전을 이룩한 것이다. 유리를 이용한 passivation 기술은 생산기술의 난이도가 매우 높기 때문에 생산성(수율)을 확보하기 어려워 다른 업체에서는 시도되지 못하고 있는 실정이다.

사이리스터의 대전류화는 칩의 면적을 넓힘으로써 쉽게 달성될 수 있다. 그러나 칩 면적의 확대에 비례하여 제조수율, 스위칭 특성, 신뢰도 등의 저하가 일어나므로 이를 보완하면서 대전류화하는 데에는 한계가 있다. 일반 위상제어 사이리스터의 경우에는 8,000V/6,000A급이 실용화 되어 있다. 고전압용으로는 10,000V 이상의 소자도 개발되었으며, 대전류용으로는 수백 볼트/10,000A 급이 실용화 가능한 수준에 와 있다. 이러한 대용량 사이리스터는 모두 양면 방열형인 디스크형 실장구조이다. 수백 암페어 내에서는 단소자로는 stud구조를 취하기도 한다. 다수의 칩을 내장하는 경우에는 모듈구조로 하는데, 이 경우에는 대부분 프리휠링(free wheel-ing) 다이오드를 내장하고 있다.

2.2.2 소자의 표면보호 기술

반도체의 표면은 반도체의 내부와는 달리 전기적으로 매우 불안정한데 이는 반도체 표면준위(surface state)나 계면트랩(interface trap) 때문이다. 계면트랩 전하는 Si-SiO₂ 계면성질에 기인하며 계면의 화학적 조성에 의존하는 양이다. 이 트랩은 Si-SiO₂의 계면에 존재하며 실리콘의 금지대 영역에 해당하는 에너지 준위를 갖는다. 에너지적으로 불안정한 표면상태는 소자의 제조공정을 제약하는 요인일 뿐만 아니라 소자의 기능을 저하시킨다. 따라서 반도체의 표면을 안정화시키

고 내적, 외적 유해인자로부터 보호하는 일이 필요한데 이를 표면보호(passivation) 기술이라 한다.

고압, 대전류를 스위칭하는 전력용 반도체에서는 단순한 표면안정화를 위한 목적 이외에도 설계상의 역내압을 유지하고 장시간의 운전에도 신뢰성이 유지되도록 확장된 의미의 표면 보호를 행한다. 따라서 10A 및 100V 이상급의 전력용 반도체에서는 소신호(small signal) 소자와는 달리 독특한 표면보호 기술을 적용한다. 대전력용 반도체의 여러 특성 중에서 역바이어스(reverse bias)가 인가될 때의 내력 곧 역내전압 특성은 소자의 사용영역을 한정하므로 매우 중요한 특성이다. 이러한 역내전압은 소자의 설계시에 각 부위의 폭과 불순물 도핑농도 등에 의하여 결정된다. 그러나 역내전압을 설계된 대로 발현하기 위하여 유리를 이용하여 소자의 접합부(junction)를 반드시 표면보호한다.

실리콘의 표면을 덮는 표면보호 기술은 오염 물질이나 습기의 침입을 방지하는 일차적인 역할 이외에도 기계적인 마모에 의한 절선을 방지하는 역할도 한다. 또한 전력용 반도체의 표면보호는 가동 이온(mobile ions)의 침입을 차단하는 역할도 매우 중요하다. Na⁺ 등과 같은 알칼리 금속 이온들은 고온에서 높은 전계가 걸릴 경우 이동할 수 있으므로 가동 이온(mobile ion)이라고 불린다. 가동성 이온이 표면보호막 내에서 존재할 경우 높은 바이어스 온도 조건에서 전기적 불안정성이 커진다. 높은 바이어스 온도에서 가동 이온들은 바이어스 조건에 따라 산화막 내에서 이리 저리 움직이고 따라서 전압축을 따라 C-V 곡선이 변하게 된다. 따라서 완벽한 표면보호 기술을 통하여 영상전하(image charge)에 의한 이른바 콘덴서(condensator) 효과를 막을 수 있고 전위차에 의한 전기화학적 반응(electrochemical reaction)을 방지하는 효과도 거둘 수 있다.

2.2.3 스위칭시간 제어기술

전력용반도체 소자에서의 교류특성은 주파수 특성과 스위칭 특성 두 가지로 대변된다. 특히 대전력을 제어하는 전력용 반도체 소자에서는, 스위칭 특성에 의해서 소자의 전력손실이

지배되기 때문에 스위칭 특성을 개선시키는 것이 큰 과제로 대두되고 있다.

스위칭 시간을 결정하는 변수로는 1차적으로 소자가 가지고 있는 설계구조를 최적설계하는 것에 지배를 받게되며, 2차적으로는 사용 웨이퍼의 사양, 접합의 구조, 농도구배에 의하여 영향을 받으며, 3차적으로는 천이금속의 실리콘 bulk내 확산에 의한 deep level 형성이나 전자선조사에 의한 격자결함 유기 또는 proton, argon 등의 이온주입에 의한 격자결함 유기에 의해서 캐리어(carrier) life-time 등의 변수 제어를 통해서 스위칭 시간 개선이 가능하다. 따라서 소자의 설계구조와 사용 재료 사양의 최적화가 이루어져야 하는데, 삼차적인 방법은 일.이차 변수 이후의 문제이며, GTO, 사이리스터 등의 대용량 소자와 최근에 개발되고 있는 3세대 전력용 소자의 경우 삼차적 변수를 제어하지 않고는 원하는 스위칭 시간을 얻기가 어렵다.

위의 세가지 변수들은 통상적으로 소자의 타 특성과 상호 trade-off 관계를 수반하게 되는데, 스위칭 시간이 빠르게 제어되면 순방향 전압강하와 누설전류 증가를 초래한다. 순방향 전압강하의 원인은 전자 및 정공이 deep level에 의해 제거되어 농도가 감소하기 때문이며, 누설전류 증가는 deep level에 의한 생성전류의 증가에 기인된다. 따라서 동일한 소자설계 구조와 사용재료의 사양에서 trade-off 선상의 최적의 조건을 얻는 것이 핵심기술이다. 천이금속에 의한 캐리어 lifetime 제어기술은 이미 외국에서는 보편화된 기술이지만 국내에서는 완전한 기술자립 단계에는 도달하지 못한 상태이다. 또한 보다 정밀한 제어를 위해서 전자선조사 및 proton 주입 기술의 적용이 필수적이지만 가속기 사용 및 비용문제 등으로 인하여 학계나 연구소에서는 많이 연구되지 못하고 있는 실정이다. 표 4에는 여러가지 life-time 제어방법에 대하여 비교하였다.

2.3 조립 및 실장기술

산업적으로 판매되는 중용량 및 대용량 전력용 반도체 제품 원가의 65% 이상이 조립 및 실장분야에 집중되고 있다. 따라

표 4. life-time 제어방법 비교.

구분	금(Au)	백금(Pt)	전자선 조사	proton 조사
trade-off 특성	가장우수	우수	보통	우수
rH/rL 비	가장우수	우수	보통	우수
필요장치	spin coater, 확산로	좌동	van de graff type 전자가속기	입자가속기
제어변수	source 종류, 확산온도, 시간	좌동	가속에너지 주입조사량	좌동
재현성	보통	보통	우수	우수
균일성	보통	보통	우수	우수
온도증가에 따른 누설전류 증가	가장크다	크다	작다	작다
온도증가에 따른 life time 변화	작다	작다	크다	크다
life-time 회복성	회복안됨	회복안됨	150°C 이상에서 경시 변화 350°C 이상에서 완전회복	150°C 이상에서 경시 변화 350°C 이상에서 완전회복되지 않음

서 전력용 반도체 산업의 경쟁력을 갖추기 위해서는 소자의 설계 및 제조 기술개발에 기울이는 것 못지않은 노력을 조립과 실장기술 개발에 경주해야 한다.

전력용 반도체의 실장기술에서 가장 우선적으로 고려해야 할 사항은 소자의 동작 중에 발생하는 많은 열을 외부로 방출하는 것이다. 대용량 소자에서는 허용 전력용량(W)을 증가시키면 발열량은 W²에 비례하며 이러한 현상은 스위칭 속도가 높아지면 더욱 심화된다. 따라서 소자의 방열을 위한 소재와 실장구조가 용량을 결정하는 중요한 요소가 된다.

이와같이 적절한 방열특성을 가진 전력용반도체를 제조하기 위해서는 기판재료(substrate material)의 선정이 가장 중요하다. 기판은 반도체 칩을 올려놓고 이를 기계적으로 지지하는 받침대로서 전기적으로 절연체이면서도 반도체 칩에서 발생하는 열을 외부로 확산시키는 열전도체 역할을 한다. 그와 동시에 다층의 실장구조에서 사용되는 다양한 소재들의 열팽창 계수가 각각 다르기 때문에 발생하는 균열이나 응력의 발생을 방지하고 우수한 신뢰성을 확보할 수 있도록 해야 한다.

지금까지 전력용 반도체의 기판으로 가장 많이 사용된 재료로 산화알루미늄(Al₂O₃) 등의 각종 세라믹을 들 수 있다. 그 중에서도 산화알루미늄이 가장 일반적인 기판 재료로 전력용 다이오드, 트랜지스터 등의 모듈에 사용되어 왔다. 최근에 이르러 단위 소자당 그리고 단위 패키지당 발열량이 높아짐에 따라 기존의 산화알루미늄보다 열전도성이 우수한 질화알루미늄으로 대체되고 있다. 그러나 현재로서는 질화알루미늄의 가격이 매우 비싸 고신뢰성이 요구되는 IGBT 모듈 등에 제한적으로 응용 영역이 한정되고 있으나 앞으로 수요가 늘어남에

따라 가격이 상당히 내릴 것이므로 채용 범위가 더욱 확산될 전망이다. 한편 BeO 기판의 경우 1980년대에 연구개발이 상당히 진척되었으나 재료 자체의 독성 때문에 응용에 제약이 있으며 SiC의 경우도 가격과 재료 자체의 반도체성 등의 제약 때문에 실험용으로 사용되고 있는 실정이다.

전력용 반도체의 패키지에서 기판재료의 선택 못지않게 재료의 접합기술의 선택 또한 매우 중요하다. 즉 패키지에서는 금속재료와 세라믹 재료가 번갈아 적용되는데 이 두 가지 재료의 접합방식의 선택에 따라 패키지의 구조와 방열 특성이 뚜렷이 구분된다. 지금까지 중·소용량의 전력용 반도체 모듈에 사용되는 접합방식으로 Mo(Mn)-금속화층을 세라믹과 구리판 사이에 끼우는 방식과 세라믹과 구리판을 직접 접합하는 이른바 DBC(Direct Bonded Copper)의 두 가지로 크게 대별된다. DBC 방식이 방열특성이 우수하고 조립이 용이한 장점이 있어 점차로 이 방법의 채용이 늘어나는 추세이다.

일반적으로 사이리스터, GTO와 같은 대용량 소자는 신뢰성이 우수하고, 방열특성이 좋은 디스크형 구조로 제작되고 있다. 디스크형 구조란 Mo(Mn)-금속화법이나 Cu-직접 접합법 혹은 활성 금속법을 이용하여 디스크 형 덮개와 자기질 부상(bushing)을 봉합한 구조를 말한다. 그러나 이 구조는 외부전극과의 연결을 위하여 실리콘 die의 한면은 외부 인출전극(봉합용 덮개 역할을 겸하고 있음)과 반드시 접합되어야 한다.

이와 같은 접합구조에서는 실리콘 소자와 전극물질 간의 열팽창계수의 차이에 기인하여 큰 응력이 발생하므로 접합면이 파괴될 수도 있다. 따라서 열응력을 최소화하기 위하여 열응력 완화용 금속을 샌드위치 구조로 접합한다. 그러나 완전한

표 5. 년도별 전력용 반도체 소자의 세계시장 규모.

(Unit : M\$, U.S.D.)

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	AGR (~95)	AGR (95~)
Power Total	9,182	9,359	10,559	12,508	14,283	15,761	16,988	18,840	20,915	23,092	11.7	10.0
Total Discrete	8,035	8,155	9,084	10,758	12,288	13,496	14,388	15,850	17,466	19,111	11.2	9.1
Transistor	4,417	4,462	5,202	6,286	7,307	8,132	8,747	9,720	10,710	11,815	13.4	9.8
S/S Tr	1,805	1,801	2,145	2,520	2,870	3,041	3,083	3,212	3,539	3,729	12.3	5.2
Bip. Power	1,882	1,688	1,854	2,319	2,388	2,590	2,707	2,951	3,052	3,141	6.1	4.9
MOSFET	680	903	1,094	1,470	1,812	2,168	2,503	2,982	3,385	3,917	27.8	15.9
IGBT	50	70	109	158	238	332	454	575	734	1,027	47.7	32.6
Diode	2,430	2,443	2,685	3,050	3,352	3,570	3,739	4,015	4,424	4,741	8.4	7.3
Thyristor	658	661	696	790	909	972	1,006	1,063	1,172	1,249	8.4	6.5
Others	530	589	501	632	720	822	896	1,052	1,160	1,306	8.0	12.3
Total Power IC	1,147	1,204	1,475	1,750	1,995	2,265	2,600	2,990	3,449	3,981	14.8	15.1
G/P Power	661	653	776	900	1,015	1,125	1,250	1,390	1,561	1,753	11.3	11.7
Smart Power	486	551	699	850	980	1,140	1,350	1,600	1,888	2,228	19.2	18.2

Total Semiconductor (100M\$)	596	652	85.5	1,109	1,358	1,560	1,761	2,028	2,342	2,674	22.8	14.4
Power Ratio(%)	15.4	14.3	12.3	11.3	10.5	10.1	9.6	9.3	8.9	8.6	-9.1	-3.9

열응력 완화가 불가능하기 때문에, 이와 같은 구조에 가열과 냉각의 열 사이클이 반복되면 소자의 특성 뿐 만 아니라 열피로 현상으로 결국에는 접합면이 파괴된다. 열응력 발생에 따른 실리콘과 외부인출 전극간 접합면의 파괴는 근본적으로 열팽창 계수가 실리콘과 동일한 접합재료를 사용하지 않는 한 피할 수 없으므로 결과적으로 소자의 수명은 이러한 실장 기술에 의해 제한된다고 할 수 있다. Mo(W), Kovar 등이 열응력을 완화시키는 중간전극으로 이용되고 있으며 최근에는 일본의 한 업체에서 금속간 접합 대신에 압착에 의한 이른바 디알로이(de-alloy) 구조를 시도하여 on-state에서의 순방향 특성의 열화를 개선한 구조도 보고되고 있다.

상용의 BJT, MOSFET, IGBT 소자는 보통 모듈형으로 된 것이 많이 이용되고 있다. 이러한 구조에서 조립공정은 크게 다이 본딩(die bonding), 와이어 본딩(wire bonding), 패키징(packaging) 순으로 이루어진다. 다이 본딩 공정에서는 외부와 전기적으로 절연시키기 위해서 중간에 삽입하는 알루미늄이나 기판을 Mo(Mn)금속화층을 이용한 금속화 방법으로 Cu판에 붙이는 공정과, 알루미늄 기판과 Cu 판을 DBC (Direct Bonded Copper) 방법으로 직접 부착하는 공정이 있는데, 보통 DBC 방법이 제조공정이 단순하고 열적인 특성이 양호하며 제조비용 및 신뢰성 측면에서 Mo(Mn) 금속화층을 이용한 방법보다 우수하다고 알려져 있다.

3. 전력반도체 분야의 시장동향

전력용 반도체 소자는 반도체 전체시장의 8-9%(99년 반도체 전체는 2,342억불이고, 전력용 반도체는 209억불로 8.9%)를 차지하고 있으며, 이중 개별소자가 174억불로 전력용 반도체 전체의 83%를, 전력집적회로가 35억불로 17%를 구성하고 있다. 전력용 반도체 시장은 산업용, 민생용, 정보통신용, 자동차 전장품 등 각종 전자기기 분야의 응용범위 확대로 연평균 8% 이상의 높은 성장률을 보여왔다.

UPS, SMPS, 전자식 안정기, 모터제어, 자동차용 전장품 등에는 상대적으로 고속 스위칭이 가능한 MOSFET 와 IGBT의 수요가 확대 되면서 바이폴라 시장은 성장이 둔화되

고 MOSFET 와 IGBT는 큰 폭으로 성장하고 있다. 그러나 바이폴라 트랜지스터는 주파수 5kHz이내의 응용에서는 경쟁력을 갖추고 있으므로 기존의 수요를 꾸준히 유지할 것으로 예상되며, 특히 엘리베이터용 전원장치 등과 같은 고신뢰가 요구되는 부분에서도 지속적으로 사용될 것으로 예상된다. 특히 자동차 전장부품용 전력용 반도체 소자의 수요는 크게 증가하여 2000년에는 전기자동차용 전력용 반도체 소자의 수요가 10억달러에 이르는 것으로 예측된다.

대용량 GTO, 사이리스터는 현재 전체 전력용 반도체 시장에서 큰 부분을 차지하지는 않지만 국가 기간산업의 핵심부품으로 중요하며, 중전기 시장이 유럽 및 구미지역에서 아시아로 확대되는 추세에 있고, 철도차량 및 고속전철 건설, 전력계통에서 HVDC 송전 및 FACTS의 도입 등의 결과에 따라 수요가 커질 것으로 예상된다. 한편 스마트 전력소자는 연간 20% 이상의 높은 성장률을 나타내고 있는 데, 이는 전력용 반도체 시장의 60% 이상을 점유하고 있는 디스플레이 구동용 IC, 모터제어, 자동차 전장부품 및 컴퓨터 전원장치 등의 고급화(소형, 경량화, 고기능 및 고효율화, 조립의 간편) 추세에 따라 종래의 개별소자 보다는 스마트 전력소자의 사용이 더 적합하기 때문으로 분석된다.

3.1 전력반도체소자의 응용분야

산업이 발전하고 삶의 패턴이 편리성, 쾌적함, 간편화의 추세로 변함에 따라 우리 주변의 환경이 급속히 변하고 있다. 따라서 이러한 환경에 맞추어 가정, 사무실, 공장 및 교통·수송 등의 분야에서 전력용반도체가 폭넓게 사용되고 있다.

표 6.에 연대별 전력전자기술의 발전배경을 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 개발수요는 공장 및 항공분야에서 민생 및 환경분야로 그 요구가 다양해 지고 있으며 다가오는 2000년대에는 환경문제의 해결을 위한 에너지 소비효율 향상을 통한 자원절약, 고도의 정밀한 제어, 생활의 쾌적성 및 환경개선의 방향으로 발전할 것으로 예측된다.

수송분야에서 철도차량의 구동 시스템은 특히 대용량 GTO-사이리스터의 개발에 의해 눈부신 발전을 수행, 1980년대 중순부터는 내압 4,500V의 GTO 사이리스터를 사용한

표 6. 전력전자기술의 발전배경.

년 대	개 발 수 요	응 용 예
1960	산업플랜트, 우주항공	정류기, 사이리스터 레오나드
1970	전철제어, 전력계통연계, 석유파동대용 산업설비, 에너지절약 기술필요	사이리스터 초퍼, 사이클로콘버터
1980	전철 고도제어, 산업설비 자동화, 산업전원 고정밀화, 통신발전, HA, FA	GTO 인버터, 트랜지스터 인버터, 사이리스터 전열제어기, UPS, 범용인버터
1990	삶의 질 개선(주거, 가전, 여가활동, 자동차등), 환경	지능소자를 이용한 고도의 자동제어, 오존발생기 발딩 고정밀제어
2000	삶의 질 개선, 환경	

GTO 인버터가 주류를 이루고 있다. 최근에는 4.500V/4.000A급의 GTO 사이리스터를 사용하여 8대의 유도전동기를 일괄 제어하는 대용량 인버터도 등장하였다.

그러나 철도차량에 사용하는 것과 같은 대용량 GTO 사이리스터로는 고주파 스위칭이 어렵고 드라이브 파워나 손실이 크기 때문에 저소음화나 장치의 소형·경량화에는 한계가 있다.

한편 철도차량의 공조기, 컴프레서, 조명 등에 전력을 공급하는 보조전원장치는 부하의 증대나 다양화에 대응하기 위해 GTO 사이리스터, 파워 트랜지스터, IGBT 등의 소자를 교묘히 이용한 여러 가지 회로방식이 시도되고 있다.

IGBT는 고내압·고성능화의 가능성 때문에 전기철도 분야에서 최근 특히 주목을 받고 있다. 일본의 히다치제작소에서는 철도차량용으로 종래비 약 60%의 내압 향상을 달성시킨 내압 2,000V의 대용량 IGBT를 세계 최초로 개발, 전차구동 시스템에 응용하였다.

이 2,000V IGBT의 출현이 전차구동용 인버터만이 아니고 전기철도의 기타 용도 등의 새로운 응용을 전개하는 가능성도 높고 있다.

IPM(Intelligent Power Modules)은 IGBT, BJT, MOS-FET, FRD, 사이리스터, 트라이악 등의 전력용 반도체 소자와 제어회로, 구동회로, 보호회로, 제어전원을 단일 패키지 내에 구성한 것으로서, 시스템의 소형, 경량화 경향, 조립 및 유지보수의 간편성 등으로 산업 및 가전분야 등 전분야에 걸쳐서 수요가 급격히 증가할 것으로 예상된다. 표 7에 주요 전력반도체소자의 응용분야를 표시했다. 현재 IPM에 적용되는 소자는 IGBT, DMOS가 주류를 이루고 있다. 표에 나타난 것처럼 IPM의 응용분야는 개별소자 및 모듈형 IGBT 또는 MOS-FET의 응용분야와 경쟁할 것으로 예상된다. 그러므로 시스템

의 사양, 조립의 간편성, 시스템 제조회사의 특성 및 기술, 가격요인 등에 의해서 IPM의 사용여부가 결정될 것이다.

3.2 성장잠재력과 시장규모

전력반도체 소자의 주된 시장규모를 살펴보면 소비재분야와 자본재분야로 나눌 수 있고 소비재의 경우 대부분 110V나 220V의 전원에 사용하기 위한 600V급 이하의 소자가 주종을 이루고 있다. 이 분야에서는 가전제품의 최근 추세가 대형화 및 고기능화로 진행됨에 따라 응용분야가 점차 확대되고 있으며 통신 및 컴퓨터 산업의 급격한 발전으로 고신뢰성의 전력 IC 및 IPM의 사용이 계속적으로 증가하고 있는 추세이다. 또한 자본재시장에서 사용되는 전력반도체 소자는 용도 및 특성이 한정되며 신뢰성 및 기술의 난이도가 높아 제품의 수명주기가 긴편이다. 그러나 최근에는 전력분야에서의 수요가 크게 증가될 것으로 예상되어 각국의 기술경쟁이 표 9에 북미에서의 잠재적인 전력반도체 시장을 나타내었다. 전체적으로 20%대의 높은 증가율을 보이고 있으며 특히 IGBT 소자의 시장이 매우 커 질 것으로 예측되고 있다. 또한 표 8에 전력반도체 소자의 응용확대 예상분야를 나타내었다. 전력분야에서는 FACTS 및 HVDC 등의 송전분야에서의 수요가 증가될 것으로 예측되며 전기자동차에 필요한 전력 IC 및 IPM의 증가와 고속전철, 경전철 등의 수송시스템에서의 대용량 소자의 수요가 계속적으로 증가될 것으로 전망된다. 또한 환경분야에서는 펄스파워 기술을 이용한 오존발생장치 등의 분야에서 큰 폭의 성장이 예상된다.

즉 최근의 전력반도체 소자의 기술 및 시장동향은 고전압화, 대전류화, 고기능화 및 고신뢰성화라는 것을 알 수 있으며 이러한 요구조건에 맞는 지능화 및 모듈화로 사용자의 편리를

표 7. 주요 전력반도체소자의 응용분야.

소 자	응 용 분 야
Bipolar Transistor	모타구동, 전원장치(UPS, SMPS), HDTV, Induction Heater, 지하철 차량, 칼라TV, 고/초고정세 모니터, 전자식 안정기
MOSFET	전자식 안정기, 모타구동, RF신호발생기, Car-Booster, 컨버터, 전자식 안정기, 전원장치(SMPS), Automotive, OA, HA
IGBT	전원장치(UPS, SMPS), 컨버터, 인버터, 모타구동, Automotive, 전기자동차
Diode	전원장치, TV 및 고정세도 모니터, 고속전철 및 지하철 전력변환 장치, Automotive, 전자식 안정기, Car-Booster, SMPS
Thyristor	DC모타구동, 대용량 전원장치, HVDC 송전, 전력계통(SVC 등), 모타제어, 냉장고, 세탁기, 믹서기, 전자레인지, 무접점 스위치, SMPS, High Voltage DC Transmission, Strobo Flash, 초퍼
GTO Thyristor	SMPS, UPS, Fan Controller, 인버터, 컨버터, 초퍼, 모타제어, 에어컨, 고속전철 및 지하철 전력변환장치, 대용량 전원장치, 전력계통(FACTS 등)
Intelligent Power Module (IPM) 및 Smart Power ICs	- 산업용 : Relay/Solenoid 구동, 램프안정기, 모타구동, 전원장치, 용접기, 선반, 로봇, 공장자동화 시스템 등 - 자동차전장용 : 엔진제어, 모타구동(Window, Antenna, Sun Roof), Solenoid 구동(도어록, trunk Release), Display 구동, 스마트 스위치, 유도제어, 자동변속 - 가전용 : VCR, CDP, LDP, TV, Audio, 에어컨, 냉장고, 세탁기, 전자레인지 - 통신용 : 무선전화기 스위치, Cross Point 스위치, 전화기 등 - 데이터 처리 : 컴퓨터 및 관련 주변기기(Hard Disk, 프린터, 복사기, 팩시밀리 등)

표 8. 전력용 반도체 응용확대 예상분야.

확대되는 응용분야	(사회적 요구) * 에너지, 자원절약화 * 고도제어기술화 * 우수한 환경성 * 생활의 쾌적성	전력	교류, 직류 변환장치 전력저장 변환장치 FACTS HVDC 송전
		산업	AC 및 DC 모터제어 전원장치(UPS, SMPS) 펄스 파워기술
		교통	고속전철, 지하철 경전철, 전기자동차
		가전 민생분야	TV, HDTV, 전자렌지 Audio, 에어컨, 냉장고 홈 오토메이션 휴먼 일렉트로닉스

표 9. Potential semiconductor consumption in North America, 1999-2004, by device(Darnell Group, 1999).

	1999	2000	2001	2002	2003	2004	CAGR
Thyristor	18.4	21.7	25.9	31.2	36.5	42.9	18%
GTO	161.0	193.0	234.0	284.0	346.0	422.0	21%
IGBT	52.0	63.0	77.0	93.0	114.0	138.0	22%
XSTR	13.0	15.0	17.0	20.0	23.0	26.0	15%
TUBE	51.0	62.0	75.0	90.0	109.0	132.0	21%
FRED	3.0	3.3	3.7	4.0	4.4	4.8	10%
TOTAL	298.4	358.0	432.6	522.2	632.9	765.7	21%

도모하고 시스템의 경박단소화를 위한 소자가 요구되고 있다.

4. 결론

전력용 반도체는 주로 전력의 크기를 제어하거나 형태를 변화시키는 전력전자회로의 스위치 소자로 이용되고 있는데, 대용량의 경우에는 전력계통에서부터 소용량의 경우에는 핸드폰 전원공급회로장치에 이르기까지 다양한 용량의 것들이 다양한 분야에 사용되고 있다. 응용을 크게 나누어 보면 전원장치와 제어장치이다.

전 세계적으로 시장유통 전력의 약 85% 정도가 적어도 한 개 이상의 전력용 반도체를 통하여 소비된다. 통계에 의하면 시장유통전력의 약 60-65%가 모터용으로 이용되고 있고 나머지 조명, 전열 등으로 소비되고 있다. 여기에는 각종기기의 소모전력이 포함된다. 따라서 전력반도체들은 3가지 주요 전력 소비처인 모터제어, 온도제어 및 조명전원의 핵심부품으로 사용되고 있기 때문에, 21세기 지구인에게 주어질 임무인 지구환경보전과 직접적으로 연관된 에너지 절약기술개발을 선도할 전략적으로도 매우 중요한 반도체임을 알 수 있다.

그러나 국내의 전력반도체 관련 연구는 학교 및 연구소의 산발적인 연구개발에 의하여 주도되어 왔고 외국의 선진 기술을

도입하여 일부 전력반도체 소자의 국산화가 진행되고 있는 중이다.

따라서 앞선 메모리 반도체 기술을 이용한 적극적인 전력반도체 분야의 기술개발을 통하여 원천기술개발 및 응용기술개발을 통한 차기 시장에서의 기술적 우위를 확보할 필요가 있다.

참고 문헌

- [1] F. Harashima, Power Electronics and Motion Control - A Future Prospective, Proc. of IEEE, Vol. 82, No. 8, p. 1107, Aug. 1994.
- [2] K. Heumann, Die Intelligenz halt Einzug, Funkschu, Vol. 1, p. 83, 1995.
- [3] R. Winkler and B. Behnke, "Gate Oxide Quality Correlated to Bulk Properties and Its Influence on DRAM Device Performance", in Semiconductor Silicon, ed. by H. Huff, W. Bergholz and K. Sumino, p. 973, The Electrochem. Soc., 1994.
- [4] K. Yamabe, Y. Ozawa, S. Nadahara and K. Imai, "Thermally Grown Silicon Dioxide with High Reliability", in Semiconductor Silicon, ed.

- by H. Huff, W. Bergholz and K. Sumino, p. 349. The Electrochem. Soc., 1994.
- [5] S. Blacstone, Private Communication, BCO Technology Ltd., 339 Glonroad, Belfast BT11 88K, UK, Northern Ireland.
- [6] E. Herr, "Gate Oxide integrity of BiMOS power devices", Dissertation ETH No. 10678, Published by the Phy. Elec. Lab., Swiss Federal Inst. of Tech. ETH, Zurich.
- [7] M. Dannemann, "Defects in silicon induced by high temperature treatment and their influence on MOS devices", Dissertation ETH No. 10694, Published by the Phy. Elec. Lab., Swiss Federal Inst. of Tech. ETH, Zurich.
- [8] J. G. Kassakian, M. F. Schlecht, G. C. Verghese, Principles of Power Electronics, Addison-Wesley Publishing Company, 1991.
- [9] Ed. by A. A. Jaecklin, Power Semiconductor Devices and Circuits, Plunum Press, 1993.

※ 본 원고는 한국전기연구원 "전력용반도체 기술개발 기획" 보고서를 기반으로 작성하였습니다.

저 자 약 력

성명 : 김상철

❖ **학 력**

- 1987년 한양대 물리학과 공학사
- 1990년 한양대 대학원 물리학과 공학석사
- 2001년 부산대 대학원 물리학과 공학박사

❖ **경 력**

- 1992년 5월 - 현재 한국전기연구원 전력용 반도체 연구그룹 선임연구원

성명 : 김은동

❖ **학 력**

- 1980년 부산대 재료공학과 공학사
- 1982년 부산대 대학원 재료공학과 공학석사
- 1985년 KAIST 대학원 재료공학과 공학박사

❖ **경 력**

- 1985년 9월 - 1986년 4월
KAIST 전기전자공학과 연수연구원
- 1989년 2월 - 1990년 1월
LGET, CNRS, France 연수연구원
- 1986년 5월 - 현재
한국전기연구원 책임연구원
전략기술연구단장
전력용 반도체기술개발 단장

