

전력용 반도체의 기술개발전망

김 인 호¹⁾

1. 머리말

현대를 살아가는 우리는 우리의 의지와 관계없이 정보화 시대를 살고 있다. 모든 정보는 데이터 베이스화로 공유되고 디지털 형태의 정보로 컴퓨터 통신망을 통해 모든 가입자가 접근할 수 있다. 이러한 환경을 실현할 수 있었던 것은 약 반세기 전, 즉 1947년에 발명된 트랜지스터와 1958년에 출현한 IC에 힘입은 바가 크다. 실리콘을 모체로 한 반도체 산업은 인체에 비교하면 두뇌 및 신경계통에 해당하는 정보처리를 위한 하드웨어 구현을 위해 일관되게 매진하여 왔다.

이와 같은 정보화 시스템을 구성하는 요소로 지능과 신경계통이외에 인체의 근육에 해당하는 전력과 에너지를 제어하기 위한 반도체가 필요하다. 전력용 반도체는 이러한 용도로 필수불가결한 요소이다. 전력용 반도체는 정보화 기기 이외에도 우리 주변 가까이에서 쉽게 찾을 수 있다. 전력용 반도체의 대표적인 응용분야인 전원공급장치와 전력변환시스템은 전력계통, 철도차량, 자동차, 통신, 우주항공, 의료기기, 가전제품과 같은 완성품 내에 자리잡고 있다.

Bell 연구소의 과학자들은 1945년에 트랜지스터를 발명하고 이어 1957년에는 pnp구조의 사이리스터 구조를 발표하였다. 1950년대에 확산법에 의해 p-n 접합을 형성하는 기술의 출현으로 p-i-n구조의 새로운 고압 다이오드와 pnp구조의 사이리스터를 1958년도에 제너럴 일렉트릭에서 제품화하여 전력전자의 새로운 장을 열게 되었다. 이후 수은증류기는 고전압 다이오드로 대체되었고 위상각 제어가 가능한 사이리스터는 SCR이라는 상품명으로 1970년대까지 전력 제어회로에 스위칭소자로 독보적으로 사용되었다. 트랜지스터 역시 에미터 형태를 변환하여 전력증폭기와 스위칭소자로 사용되는 전력용 트랜지스터가 1970년대부터 본격적으로 사용되면서 사이리스터의 사용주파수보다 높은 주파수 스위칭회로에 주요 소자로 자리잡았다.

MOS구조가 반도체소자 제조에 처음 소개된 것은 1959년이었고 다수의 MOSFET을 동일실리콘상에서 공정하여 회로를 구성한 직접회로 특허를 텍사스 인스트루먼트사가 취득한 것이 1960년대 말이었다. 집적회로, 즉 IC에서 표준소자가 된 MOS를 전력용 반도체에 최초로 도입한 것은 VMOS로 실리콘 표면에 V자 홈을 파고 홈 표면에 게이트 산화물을 형성시킨 것이었다. 원래 VMOS는 1973년에 포토작업시 정렬을 용이하게 하고 채널길이를 최소화하기 위한 IC용으로 개발되었던 것으로 전력용으로는 문제가 많아 DMOS구조를 갖는 MOSFET의 출현과 함께 사라졌다. 전력용 MOSFET은 바이폴라 트랜지스터와 비교하여 스위칭속도가 빠르고 게이트구동이 용이하며 2차 절연파괴현상이 없다는 점에서 저전압 고속스위칭회로의 대표적인 전력용 반도체소자로 자리잡았다. 1983년에 바이폴라 트랜지스터와 MOSFET을 결합한 IGBT를 제너럴 일렉트릭에서 개발하여 SCR이후에 가장 상업적으로 성공한 소자가 탄생하였다. IGBT는 바이폴라 트랜지스터와 MOSFET의 장점을 모두 취하여 만능의 소자로 인정받고 있고 개발 후 현재까지 미국 뿐 아니라 일본 업체에서도 꾸준히 제품성능향상에 힘 쓴 결과 사용전압과 동작주파수 범위가 넓어져서 바이폴라 트랜지스터와 MOSFET 등 타소자의 입지를 위협하고 있다.

1980년대 말 부터 전통적인 사이리스터구조에 MOS게이트를 추가하여 사이리스터 또는 GTO의 특성을 개선하고자 하는 연구가 성과를 얻게 되었다. 해리스 반도체사에서 개발한 MCT (MOS Controlled Thyristor)는 최초로 상용화된 MOS구동형 사이리스터로 600V/100A 이내의 정격으로 생산되며 사이리스터 기준으로 보면 소용량이지만 전압과 전류정격을 증대하는 연구가 업체를 중심으로 진행중이다. MCT는 아직 FBSOA와 같은 문제로 인해 본격적으로 인버터 회로에 사용되고 있지 않지만 일부 소프트 스위칭회로에 시험적으로 사용되고 있다. MOS구동형 사이리스터는 MCT 이외에도 Base Resistance controlled Thyristor(BRT), Emitter Switched Thyristor(EST)와 같은 상품화가 되지 않은 후보들이 있으며 이들 소자도 특성개선이나 시장여건에 의해서 상품화 가능성이 얼마든지 있다고 전망된다.

CMOS공정에 의한 VLSI 제조기술발전에 편승하여 MOSFET을 전력용으로 사용하게 되면서 현재의 전력용 반도체 시장에서 MOSFET과 IGBT가 주역으로 활약하고 있다. 이들 소자는 간편한 게이트 구동, 우수한 열특성, 과전압, 과전류에 대한 보호용이, 안정한 동작특성으로 대표되는 장점이 응용회로를 디자인하는 엔지니어들의 관심을 끌고 있다. 앞으

로도 이들 소자의 수요는 지속적으로 성장할 것으로 예상되고 있으며 이 소자를 기본으로 하는 지능형 전력용 반도체 모듈의 수요도 증폭할 것으로 예상된다

II. 주요 소자별 특성

전력용 반도체의 분류는 기술적으로 3가지 방법이 있다. 즉 V. Temple에 의한 접합수에 의한 분류, P.L. Hower에 의한 캐리어수에 의한 방법, 그리고 단자수에 의한 분류가 그것이다. 이러한 분류방법 중 접합수에 의한 분류방법에 의하면 p-n 다이오드는 1접합소자로, 바이폴라 트랜지스터는 2접합, 사이리스터는 3접합 소자로 각각 분류되며 MOS 구조에서 반도체표면에 형성되는 채널로 전류가 도통되는 MOSFET은 내부에 p-n접합이 존재하지만 이 접합이 전류통 전에는 관여하지 않기 때문에 영접합 소자로 분류된다. 반면 캐리어 수에 의한 분류방식에 의하면 p-n 다이오드와 바이폴라 트랜지스터, 사이리스터는 전자와 정공 두 캐리어가 모두 전류의 구성원이 되어 2캐리어 소자로 같은 분류로 취급되며 MOSFET, JFET과 같이 전자 또는 정공 한가지만이 전류구성원이 되는 소자는 1 캐리어소자로 분류된다. 마지막으로 단자수에 의한 분류방법에 의하면 다이오드와 같이 단자수가 2개인 경우는 2단자 소자로, 트랜지스터와 같이 단자수가 3개인 소자는 종류에 관계없이 모두 3단자 소자로 분류된다. 이와 같이 소자의 종류는 분류방법에 따라 달라진다. 여기서는 이러한 기술적인 분류방법이 아니고 기능적으로 연관성 있는 전력용 반도체를 묶어 그 종류를 소개하고자 한다. <표 1>은 전력용 반도체소자의 종류별 용도를 나타낸다.

1. 다이오드

전력용으로 사용되는 다이오드는 흔히 정류 다이오드라고 할 정도로 정류용으로 사용되는 경우가 많다. 통상 정류 다이오드의 경우 p-i-n구조를 가지며 상용주파수인 60Hz를 정류하기 때문에 다이오드의 주파수특성, 즉 스위칭시간 개선을 위한 life-time 제어를 하지 않고 제작한다. 그러나 DC-DC 또는 DC-AC 컨버터에 사용되는 다이오드는 보통 회복시간을 5 μ s 이내로 제어하기 위해 금이나 백금을 확산시켜 제작한다. Schottky 다이오드는 100V 이내의 전압에서 고속스위칭하는 용도로 사용되는데 금속과 반도체간의 전위장벽을 이용한 것으로 다이오드전류가 majority carrier로만 이루어져 있기 때문에 p-n접합 다이오드와 달리 소수캐리어 소멸시간에 의한 회복시간이 거의 제로여 가깝다. 그러나 고전압이 역방향으로 인가될 경우 누설전류가 p-n접합 다이오드에 비해 크고 순방향전류 통전시에는 전압강하가 크기 때문에 저압회로에만 사용된다. 최근에는 p-n접합 다이오드와 Schottky 다이오드를 결합하여 만든 MPS(Merged p-i-n and Schottky) 다이오드가 개발되어 600V급에서 스위칭속도와 회복전류를 최소화 하였다. 전력용 다이오드는 크래핑회로, 부스터회로 등에도 필수적으로 사용되며 역전압 방지용이나 정전압회로 등 그 사용빈도가 다른 어떠한 전력용 반도체소자보다 많다.

<표 1> 다이오드의 종류와 특성

종 류	전압/전류정격	사용주파수(Hz)	스위칭 시간(μ s)	온-저항(Ω)
범용 다이오드	5000V/5000A	1k	100	0.16m
고속 다이오드	3000V/1000A	10k	2-5	1m
Schottky 다이오드	40V/60A	20k	0.23	10m
MPS 다이오드	600V/50A	20k	0.5	0.2m

2. 트랜지스터

트랜지스터의 어원은 Transfer Resistor로 이 두단어를 합성하여 만든 것이며 3극 진공관의 역할을 하는 반도체소자로서 그 의미가 있었다. 트랜지스터의 동작은 전기적으로 포화영역과 활성영역으로 구분되는데 3극진공관과 같이 증폭작용은 포화영역, 논리회로에서와 같이 스위칭 작용은 활성화 영역에서 동작시킴으로서 가능하였다. 초기의 트랜지스터는 바이폴라 트랜지스터를 지칭하는 용어였는데 전계효과형 트랜지스터의 등장으로 그 용어구사에 변화가 생겼다. 지금은 전계효과형 트랜지스터의 종류만도 JFET, MOSFET, SIT, IGBT를 비롯하여 수많은 종류의 트랜지스터가 있고 또 새로운 형태의 트랜지스터가 개발중에 있다. 전력용으로 사용되는 대부분의 트랜지스터는 증폭작용보다는 대부분의 경우 스위칭을 목적으로 사용된다.

바이폴라 트랜지스터는 전류이득을 높이기 위해 다링턴형태로 사용되기도 하며 이때 전류증폭율은 100-1000정도로 높으나 포화전압 역시 높고 turn-off 시간이 단일형에 비해 길어지는 단점이 있다. 즉 다링턴형의 바이폴라 트랜지스터는 고전압, 대전류형으로 제작이 용이하나 고속 스위칭에는 사용하지 않는다. 현재까지 단일형은 400V, 다링턴형은 1200V급의 전력용 바이폴라 트랜지스터가 실용화 되어 있으며 이들 바이폴라 트랜지스터는 트랜지스터 시장의 32%를 점유하여 27%의 MOSFET과 함께 트랜지스터 시장을 양분하고 있다. 그러나 게이트 구동, thermal runaway, 직렬운전 불가와 같은 바이폴라 트랜지스터의 고유한 문제점들 때문에 인버터회로에는 MOSFET과 IGBT와 같은 대체소자에 주도권을 넘겨주는 현실이 되었다.

전계효과형 트랜지스터, 소위 FET(Field Effect Transistor)는 JFET(Junction Field Effect Transistor)의 형태로 1924년에 최초로 미국과 캐나다에 특허출원이 기록되어 있다. 전력용으로는 SIT(Static Induction Transistor)라는 이름으로 일본에서 1970년대 후반부터 개발되었는데 JFET계열의 소자는 normally-on(Depletion mode), 즉 게이트 전압이 없는 경우에 turn-on, 게이트 전압을 인가하여 turn-off되기 때문에 전력용소자로는 특별한 경우가 아니면 사용되지 않는다. SIT의 경우 역시 주로 일본에서 사용되고 있으며 대표적인 사용처는 유도가열장치의 전원회로, 마이크로 웨이브증폭기, 오디오 등이다. 1200V, 300A용량이 실용화 되었고 100kHz 내외의 고주파 고전압 소전류용분기에 적합하다. SIT의 스위칭 특성과 온저항은 MOSFET과 대동소이하다.

개별소자 또는 지능형 전력용 모듈로 사용량이 가장 많은 전계효과 트랜지스터는 MOSFET이다. 전력용은 작은 단위설의 형태의 MOSFET을 수천개에서 수만개를 병렬로 연결하여 큰 전류를 통전할 수 있도록 만들어진다. 대다수의 MOSFET은 DMOS공정으로 불리는 이중확산방법에 의해 제작되고 있으며 온저항을 줄이기 위한 Trench 구조를 갖는 UMOSFET 형태가 있다.

MOSFET의 개발과정은 온저항을 줄이는 과정으로도 볼 수 있다. 1980년대에 50V정격의 MOSFET의 온-저항을 $7\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 에서 1990년대에는 $0.6\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 로 줄였다.

UMOS 셀구조로 JFET성분저항을 제거하여 온저항을 줄이는 노력이 계속되었는데 실리코닉스는 온-저항이 $0.5\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 인 제품을 생산하고 있으며 Trench 공정의 도입으로 온저항을 실리콘의 이론적인 저항치에 가까운 $0.1\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 로까지 줄일 수 있는 보고가 있다. 온저항을 줄이는 것과 병행하여 사용전압과 전류용량을 지속적으로 증대하여 1000V/50A용량의 MOSFET가 개발되기에 이르렀다.

MOSFET은 알려진 대로 입력 임피던스가 크고 누설전류가 nA 오더로 낮으며 전압구동이기 때문에 구동회로가 간단하고 구동회로 손실이 적다. 100kHz이내의 고주파, 저전력회로가 주 사용처이며 냉장고 VTR 등의 가전제품, 스위칭전원장치, 자동차, 모터제어회로등에 다양하게 사용된다.

서두에서 언급한 것과 같이 IGBT는 최근 상업적으로 성공한 전력용 반도체이다. MOSFET과 동일한 방식의 게이트 구동, 바이폴라 트랜지스터의 낮은 온저항을 실현한 이상적인 특성을 지닌 소자로 MOSFET과 바이폴라 트랜지스터를 결합한 모양을 하고 있다. 아직은 세계 트랜지스터시장에서 약 4%정도의 점유율을 보이고 있는 형편이지만 향후 시장 증가를 확산하는 구미, 일본의 모든 반도체 제조업체에서 기술개발에 심혈을 기울이고 있다. IGBT의 공정은 MOSFET의 그것과 유사하지만 life-time 제어공정이 추가되고 래치업이 일어나지 않도록 설계해야 하는 등 MOSFET과는 또 다른 기술이 요구된다. 접합수로 분류하면 무접합 소자에 해당하는 MOSFET은 바이폴라 트랜지스터의 2차 항복이나 IGBT의 래치업 현상이 없다. IGBT는 정상적인 동작에서는 p-n접합을 통해 전류가 흐르지만 전류밀도 및 온도의 상승에 의해 n+ 에미터와 p- 베이스, n- 층과 p+ 콜렉터로 연결되는 npnp구조의 기생사이리스터가 래치업 될 수 있다. 이 경우 정상전류의 수십배에 해당하는 전류가 IGBT를 통해 흐르고 게이트에 의한 전류제어가 불가능하여 IGBT와는 별도의 외부 회로에 의해 전류 차단이 되지 않는 한 소자의 파괴를 피할 수 없다. 대부분의 IGBT 제작은 DMOS 공정에 의해 이루어지고 있으나 소자의 유효면적당 통전가능한 전류밀도를 늘리고 래치업을 방지하기 위해 Trench구조의 UMOS 게이트를 연구 중이다. IGBT 모듈의 경우 600V/400A.

<표 2> 트랜지스터의 종류와 특성

구분		전압/ 전류정격	사용주파수 (Hz)	스위칭시간 (μ s)	온저항 (Ω)
바이폴라	단일형 다림본형	400V/250A 1200V/400A	20k 10k	9 30	4m 10m
MOSFET	D MOSFET U MOSFET	1200V/4.7A 500V/50A	100k 100k	0.9 0.6	2 0.4m
IGBT	IGBT(3세대) Trench IGBT	1200V/400A -	20k -	2.3 -	60m -
JFET	SIT	1200V/300A	100k	0.55	1.2

1200V/300A 용량이 상품화 되어 나오고 최근 미쓰비시에서 3300V/200A 모듈을 샘플로 제작한 바 있다. IGBT는 단일 패키지와 모듈 패키지로 실장되며 MOSFET이 소비재에 사용빈도가 높은 반면 IGBT는 산업용 기기와 자동차, 전동차 대형 무정전전원 등에 주로 사용된다. 한편, <표 2>는 트랜지스터의 종류와 특성을 소개한다.

3. 사이리스터

1957년 사이리스터가 개발되면서 본격적인 전력용 반도체의 새로운 장이 펼쳐지게 되었다. 사이리스터는 60Hz의 교류전류를 한 주기내에서 원하는 시간에 스위칭하는 방법으로 기계적인 스위치로는 불가능했던 유연한 전력제어가 가능해졌다. 3단자 소자로는 현재까지 나와있는 어떠한 전력용 반도체 소자보다 큰 용량으로 제작이 가능하며 최근 8000V/6000A 정격의 사이리스터가 등장했다. 기본구조는 pnpn으로 p-n접합이 3개가 직렬로 결합한 형태이다. 다른 2단자 소자와는 달리 일단 turn-on되면 지속적인 게이트 전류의 공급 없이도 통전상태를 유지하며 주회로에 역전류가 인가되면서 자연 소호된다. 사이리스터를 turn-off하기 위해서 소위 Commutation 회로가 필요하였고 이 회로로 LC 공진을 이용하여 강제로 사이리스터 전압 또는 전류가 어떤 순간에 영점이 되도록 하여 사이리스터를 turn-off 시켰다. Commutation 회로는 사이리스터의 단점이라고도 할 수 있는 고유한 스위칭 특성때문에 필요한 부가적인 회로였지만 이 회로에 대한 연구개발활동의 결과로 여러 형태의 LC회로에서 발생하는 과전압과 전류파형에 대한 분석이 가능해졌고 이것은 스위칭 조건에서의 DC 과도 현상을 이해하는데 도움을 주었다. 이후 사이리스터는 HVDC용으로 광구동 사이리스터와 TRIAC 등의 개량형이 선보였다. 사이리스터가 단독으로 직류전류를 스위칭할 수 없는 이유로 응용 상의 불편함을 해소하기 위해 외부 게이트전류를 주입하여 직류전류를 turn-off할 수 있는 GTO(Gate Turn Off) 사이리스터가 1966년에 발표되었다. GTO를 사용하면 당장 복잡한 Commutation회로가 생략되고 회로의 초크에서 발생하던 전기전자파와 잡음이 없어졌으며 빠르게 스위칭할 수 있기 때문에 컨버터의 효율을 높일 수 있게 되었다. MOS공정이 보편화되면서 1987년에는 사이리스터를 MOSFET 게이트로 구동하는 MCT(MOS Controlled Thyristor)가 개발되었다. MCT는 GTO와 같이 turn-off와 turn-on이 가능하며 고주파동작이 가능할 뿐 아니라 전압으로 게이트구동을 하기 때문에 구동회로가 MOSFET이나 IGBT구동회로와 같이 간편해 지는 혁신적인 신소자로 인식되었다. 사이리스터와 MOSFET을 조합한 MOS 구동형 사이리스터는 MCT 개발 이후에도 BRT(Base Resistance Controlled Thyristor), ES⁺(Emitter Switched Thyristor)와 같은 형태로 속속 개발되었지만 현 단계에서는 용량에 있어서 IGBT 정도에 머물고 있으며 종래의 GTO에 버금가는 용량의 소자는 아직까지 상품화되어 나오지는 않는다.

MCT의 경우 4500V급이 제작된 바 있다. SITH(Static Induction Thyristor)는 사이리스터로 분류는 되지만 npn과 같은 사이리스터 구조를 취하지 않고 SIT와 p-i-n 다이오드를 합쳐놓은 구조를 갖고 있다. 일본에서 유일하게 제작되며 일본 이외에서 사용되는 경우가 거의 없다. <표 3>과 같이 GTO에 비교하여 동작주파수는 약 2배, 온저항도 약 2배 정도이며 전압구동이라는 점에서는 MCT와 비교된다.

<표 3> 사이리스터 종류와 특성

구분			전압/전류정격	사용주파수 (Hz)	스위칭 시간 (μs)	온저항 (Ω)
사이리스터	전류구동형	역정지형	8000V/6000A	1k	200	0.25m
		고속스위칭형	1200V/1500A	10k	20	0.47m
		역도통형	2500V/100A	5k	40	2.1m
		TRIAC	1200V/300A	400	200-400	3.57m
	광구동형	LTT	6000V/1500A	400	200-400	0.53m
게이트소호	전류구동형	GTO	4500V/3000A	10k	15	2.5m
사이리스터	전압구동형	MCT	600V/60	20k	2.2	18m
		BRT	-	-	-	-
		EST	-	-	-	-
		SIITH	4000V/2200A	20k	6.5	5.75m

4. 지능형 반도체 소자

전술한 전력용 반도체소자들은 개별소자로 분류되는 단순한 스위칭기능만을 갖고 있다. 실제로 이러한 개별전력용 반도체가 응용회로에 사용되기 위해서는 게이트구동회로, 센서를 포함한 과전류보호회로, 과열보호회로 등과 같은 보조회로의 도움이 필요하다. 이러한 종합적이고 지능적인 요소를 개별전력소자와 더불어 한 패키지 또는 동일한 실리콘 웨이퍼상에서 결합시킨 형태의 소자를 지능형 전력용 반도체 소자라고 하며 크게 IPM(Integrated Power Module)과 Smart Power IC 또는 HVIC로 구별된다. IPM은 MOSFET, IGBT, 바이폴라 트랜지스터, 다이오드와 같은 개별 소자를 구동회로, 제어회로, 보호회로와 함께 하나의 패키지내에서 조립한 하이브리드형식의 모듈이다.

<표 4> IPM과 스마트 파워 IC의 정격 및 용도

IPM		Smart Power IC		
		저압. 대전류	고압. 저전류	고압. 대전류
최대정격	1700V, 1000A	50V, 20A	50~500V, 100mA	1200V, 1A
사용분야	•공작, 조립기계, 자동차 철도차량 •고주파전류제어	•ECS시스템 •ABS제어 •프린터구동용	•디스플레이 •전자교반기	•가전제품 •형광등, 조명
용도	•인버터회로 •AC서보제어 •초퍼회로	•전장용 IC •릴레이 •시스템모터구동 IC	•LCD •FED •SLIC IC	•인버터, 모터제어 •발라스트

단일 칩상에 DMOS의 전력용 반도체소자와 제어회로를 동시에 공정하여 제작하는 스마트 파워 IC는 초기에 평판 디스플레이 구동용으로 개발되었고 전력용량이 증가하여 통신용 IC인 SLIC과 형광등용 발라스트용이 그후 개발되었다. 현재의 스마트 파워 IC공정기술에 의하면 전력용량이 500V, 1A이상 이 되면 단일 칩에 스마트 회로를 구성하는 것이 제조단가에 있어서 IPM에 비해 비효율적이다. 따라서 <표 4>와 같이 IPM은 주로 전력용량이 큰 산업용 회로에 사용되고 스마트 파워 IC는 소용량의 가전, 컴퓨터, 조명, 자동차 릴레이 등에 사용된다.

III. 전력용 반도체 소자의 시장 현황

<표 5>에 의하면 전세계 반도체 시장규모는 '96년도에 약 1560억불인데 이 중에서 전력반도체 시장은 약 10%에 해당하는 158억불에 달하며, 2000년도에는 전력소자 시장규모가 약231억불에 도달하리라 예상하고 있다. 개별소자 전체의 약 86%를 점하고 있으며, 트랜지스터가 개별소자의 약 60%, 다이오드가26%, 사이리스터가 7%정도 된다. 트랜

지스터에는 전력 MOSFET/IGBT의 합이 기존의 전력 BJT와 시장 규모가 비슷하나, 연평균 성장률에 있어서 전력 MOSFET는 약 16%, IGBT는

〈표 5〉 세계 전력용 반도체소자의 시장 규모

		(단위: 100만\$)									
연도 소자	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	
반도체전체	59,600	65,200	85,500	110,900	135,800	156,000	176,100	202,800	234,200	267,400	
전력 소자전체	9,182	9,359	10,559	12,508	14,283	15,761	16,988	18,840	20,915	23,092	
개별소자합계	8,035	8,155	9,084	10,758	12,288	13,496	14,388	15,850	17,466	19,111	
다이오드	2,430	2,443	2,685	3,050	3,352	3,570	3,739	4,015	4,424	4,741	
트랜지스터	4,417	4,462	5,202	6,286	7,307	8,132	8,747	9,720	10,710	11,815	
소신호	1,805	1,901	2,145	2,520	2,870	3,041	3,083	3,212	3,539	3,729	
BJT	1,882	1,688	1,854	2,319	2,388	2,590	2,707	2,951	3,052	3,141	
MOS	680	903	1,094	1,470	1,812	2,168	2,508	2,982	3,385	3,917	
IGBT	50	70	109	158	238	332	454	575	734	1,027	
사이리스터	658	661	686	790	909	972	1,006	1,063	1,172	1,349	
기타	530	589	501	632	720	822	896	1,052	1,160	1,306	
PIC합계	1,147	1,204	1,475	1,750	1,995	2,265	2,600	2,990	3,449	3,981	
일반	661	653	776	900	1,015	1,125	1,250	1,390	1,561	1,753	
Smart IC	486	551	699	850	980	1,140	1,350	1,600	1,888	2,228	

약 33%로서 BJT의 5%에 비해 괄목할 만한 성장을 하고 있고, 2000년대에는 MOS 게이트 전력소자의 시장점유율이 바이폴라를 능가하리라 추정된다. 전력 IC는 '96년도 현재의 시장 점유율은 전력소자 전체의 약 14%에 그치고 있으나, 앞으로 급격한 신장이 예상된다.

〈표 6〉은 주요 전력용 반도체 제품별로 미국과 일본/아시아의 상대적인 점유율을 나타낸다. 일반의 예상과는 달리 정류소자의 시장 점유율이 가장 큰 사실에 주목할 필요가 있다. 흥미로운 사실은 미국에서는 전력 MOSFET의 비율이 바이폴라 트랜지스터를 앞지르고 있지만, 일본/아시아에서는 BJT가 MOSFET를 능가하고 있다. 600V 이상에서는 IGBT가 전력 MOS에 비해 유리하므로 기존의 BJT를 대체함으로써, IGBT의 응용분야가 확대되리라 예상된다. 또한 기존의 사이리스터는 GTO 또는 MCT에 의해 대체되어, 점유율이 상당히 하락하리라 예측된다.

IV. 국내 외 기술개발 동향

1. 국외의 연구 동향

미국에서는 '80년대에 General Electric, RCA, Westing House 와 같은 대기업에서 전력소자를 연구개발하였으나 '80년대 후반에 반도체 부문의 합병, 매각 등을 거쳐, 현재는 Harris Semiconductor에서 전력 MOS, IGBT, MCT 등을 생산하고 있고, Motorola에서는 BJT, 전력 MOS, IGBT를 양산하고 있다. IR(International Rectifier)에서는 정류기 사이리스터를 생산하다가 '70년대 말부터 세계 최초로 전력 MOSFET를 HEXFET이라는 브랜드로 생산하기 시작하여 오늘날 수위 기업으로 성장하였다. 그밖에 Texas Instrument에서는 PDP 등 디스플레이 구동 IC, Siliconix, Unitrode 및 중소벤처기업들이 개별소자, PIC, smart PIC등을 생산하고 있다.

학계에서는 Toronto대의 Salama 그룹이 '70년대 중반부터 VMOS, SINFET 등을 개발하였으며, North Carolina대의 Baliga, RPI대의 Chow 그룹에서 BRT, EST, SOI소자. SIC소자에 대하여 연구를 하고 있으며, 스탠포드대의 Plummer Wang 그룹에서 SOI(Silicon-On-Insulator)소자에 대한 연구를 하고 있다.

일본의 대표적인 기업인 Toshiba, Fuji Electric, Hitachi, Mitsubishi Electric, Shindenken 등에서는 사이리스터 GTO, IGBT, 전력 MOS, 전력 모듈(power

〈표 6〉 미국과 일본/아시아 전력소자 시장(1993년도)

제품종류	미국(%)	일본/아시아(%)
정류기	24.8	25.5
BJT	18.0	23.5
MOSFET	22.7	17.7
IGBT	3.3	2.4
Module	13.9	18.8
사이리스터	13.3	8.4

module), smart PIC 등에 이르는 각종 전력소자를 거의 망라하여 생산하고 있으며, 제품의 품질에 있어서 세계 최고를 유지하고 있다. 또한 NTT연구소에서는 PCS 용 LDMOS를 연구하고 있다.

유럽에서는 독일의 Siemens, 이탈리아의 SGS-Thomson, 스위스의 ABB, 네델란드의 Philips 등이 전력용 반도체 소자의 연구 및 개발을 주도하고 있으며, 프랑스의 LAASCNRS 연구소에서는 접합마감(junction termination)기술, 러시아의 Ioffe 연구소에서는 SiC 물성 및 소자를 연구하고 있다. 학계에서는 스위스 공대의 Fichtner 그룹에서 전력 반도체 소자의 simulation software의 개발 및 고전압 IGBT, 영국 리버풀대의 Amaratunga 그룹의 LDMOS, LIGBT, 체코공대 Vobecky 그룹의 스위칭 시간 제어기술에 관한 연구가 매우 활발하다.

2. 국내의 연구동향

기업에서는 삼성전자 부천공장에서, 개별소자인 BJT, 전력 MOS의 양산을 하고 있고, 1000V급 이하의 IGBT의 개발이 완료되었으며, power factor 교정용 IC 등의 PIC를 양산하고 있다. 구미에 소재한 한국전자에서는 일본 도시바의 기술을 기본으로 한 BJT, 선형 IC를 생산하고 있다. 대우전자 구로공장에서 BJT, 오디오 IC 등을 생산하고 있고, 현대전자에서는 자동차용 PIC개발에 관심을 갖고 있다. 전기연구소에서는 러시아 등과 기술협력을 통하여 GTO를 개발한 바 있고, 주로 소재, 부품, 시험평가, 패키지에 관한 연구를 수행하고 있으며, 전자통신연구소에서는 디스플레이 구동 IC를 개발 중이다.

1980년대에 한국과학기술원에서는 쇼트키다이오드, 전력 MOS, IGBT, 고전압 다이오드의 설계기술에 관한 연구를 수행한 바 있고 서울대에서는 전력소자 모델링, 전력 MOS, IGBT, 고전압 IC용 LDMOS, LIGBT, LEST등에 관한 연구를 수행하고 있다. 단국대에서는 과학기술원 및 아주대와 공동연구를 한 바 있다 고려대에서는 주로 IGBT, 한양대, 포항공대에서는 LDMOS, LIGBT와 같은 고전압 IC용 소자에 대한 연구를 수행하고 있다. 아주대에서는 VDMOS, LDMOS, LIGBT, SINFET 등을 제작한 바 있으며, 최근에는 RESURF LDMOS, LIGBT의 모델링에 관하여 연구하고 있다.

V. 맺음말

정보화는 물론 자동화 사회를 열어가기 위해서, 또한 대체에너지 공급비율이 점차 높아가고 환경문제가 삶의 질을 결정하는 요소로 대두되면서 전력용 반도체의 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 국내의 사정도 마찬가지로 전력용 반도체의 이용이 늘어나는 것은 당연하다고 할 수 있다. 반면 엄연한 국내시장이 존재하고 다양한 종류의 전력용소자의 수요가 있음에도 불구하고 전력용 반도체에 대한 국내 산업과 대학에서의 연구활동은 미진하다고 할 수 있다.

삼성전자(주)에서 전력용 MOSFET 만큼은 그 가운데서도 나름대로 생산량이나 품질에서 정상궤도에 올라와 있고 IGBT에 있어서는 품질에 대한 소비자의 검증은 받는 단계이지만 제품개발 및 성능향상에 열심이기 때문에 MOSFET와 같

대량생산이 가능할 것으로 전망된다. 한국전자(주)는 바이폴라 트랜지스터를 생산중에 있으며 2500V급 고속스위칭 사이리스터의 개발에 성공한 것으로 보도된 바 있다. 대학의 경우 서울대학, 아주대학, 인하대학, 한양대학에서 개별소자 및 지능형 소자에 대하여 부분적인 연구가 이루어지고 있다. 국책 연구소의 경우 ETRI와 KERI에서 각각 스마트 파워 IC와 개별소자에 대한 연구가 진행 중이지만 연구장비와 전문연구인력 모두가 부족한 상황이다. MOSFET과 IGBT와 같이 CMOS 공정과 유사한 전력소자와 스마트 파워 IC는 반도체 메모리를 생산하는 국내기업에서 점차 관심을 갖고 투자를 계획하고 있다.

기술선진국 대부분의 경우 전력용 반도체소자의 발전은 아날로그 또는 디지털 IC의 제조기술진보에 힘입은 바 크다 국내에도 세계적인 반도체 메모리 생산업체가 탄생하였고 CMOS 반도체제작에 관해서는 기술축적이 이루어져 있기 때문에 전력용 반도체 산업을 일으키기에 여건이 충분히 조성되어 있다고 볼 수 있다. 이익을 많이 낼 수 있는 품목에 대해서는 기업체가 자발적으로 앞장서겠지만 시장성 보다는 국가기반시설로 사용되는 초대용량소자와 미래지향적인 차세대 전력용 소자와 같은 민간부문에서 쉽게 투자하기 어려운 부문에 대해서는 국가적인 지원이 절실한 시점이다.

[참고문헌]

- 1) B.E. Taylor. Power MOSFET
_design. John Wiley & Sons. 1993.

- 2) A. A. Jaecklin ed., Power semiconductor devices and circuits, Plenum Press, 1992.
- 3) D.A. Grant and J. Gowar, Power MOSFET, John Wiley & Sons, 1989.
- 4) B.J. Baliga ed., High voltage integrated circuits, IEEE Press, 1988.
- 5) B.J. Baliga, Modern power devices, John Wiley & Sons, 1987.
- 6) P.D. Taylor, Thyristor design and realization, John Wiley & Sons, 1987.
- 7) P. Antognetti, Power integrated circuits : physics, design and application, McGraw-Hill 1986.
- 8) B.J. Baliga and D.Y. Chen ed., Power transistors : device design and applications, IEEE Press, 1984.
- 9) M. Kubat, Power semiconductors, Springer-Verlag, 1984.
- 10) A. Blicher, Field-effect and bipolar power transistor physics, Academic Press 1981.
- 11) S.K. Ghandhi, Semiconductor power devices, Wiley, New York, 1977
- 12) A. Blicher, Thyristor physics, Springer-Verlag, 1976.
- 13) 한국전기연구소, 전력용 반도체 해외기술동향 및 공동연구망 구축사업, 1997

주석1) 연구기획관리단 기술기획실, 실장(Tel: 02-250-3124)

