

전력 반도체소자의 어제와 내일

최연익
(아주대 공대 전기전자공학부 교수)

1. 머리말

전력 반도체 소자는 1948년 바이폴라 트랜지스터의 발명 이래 전자 제품의 주요 부품으로 사용되고 있다. 주 역할은 전력 조정(power regulation), 출력단 제어(output control), 인터페이스 기능(interface function) 등 시스템의 기본이 되는 부문을 담당하고 있다. 전력 소자에는 정류기(rectifier), 트랜지스터, 다이리스터(thyristor) 등이 있으며 흔히 개별소자(discrete device)의 형태로 존재하고 있다. 또한 전력 집적회로(Power Integrated Circuit 줄여서 PIC)는 일반적인 디지털 또는 아날로그 IC의 전압 및 전류에 비해, 고전압이거나 고전류 신호를 처리하며, 최근에는 여러 가지 보호기능이 탑재된 smart(또는 intelligent) 개별소자 및 IC가 상품화 되고 있다.

전력 반도체소자는 흔히 소신호 반도체를 제외한 대부분의 반도체 부품을 가리키며, 개별소자인 경우 전력 소모가 1 W를 초과하면 전력 소자라고 분류하고, IC의 경우 내부 회로에 50 V 이상의 전압 또는 0.5 A 이상의 전류를 다루는 소자가 있으면 PIC 라고 칭하는 것이 일반적이다.

그림 1에 전력 반도체소자의 주요 응용분야를 나타냈다. 전력 소자는 컴퓨터, 사무기기, 통신기기, 가전제품, 휴대용기기 등의 보급 증가, 자동차, 전철, 로봇트 등의 증가에 따라 그 수요가 지속적으로 늘어나고 있다.

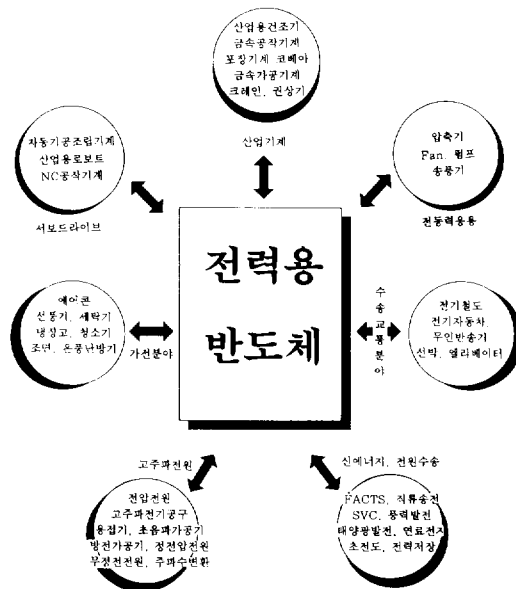


그림 1. 전력 반도체소자의 주요 응용분야

2. 전력 반도체 소자의 종류 및 특징

전력 소자는 단자 수, 집합 수에 따라 분류할 수 있으며, 이를 표 1에 나타냈다. 대체로 정류기는 2 단자, 1 집합이고, 스위치는 3 단자, 2-3 집합을 가지고 있다. 반도체 소자의 동작원리에 따라, 즉 반송자(carrier)가 1 개(전자 또는 정공) 또는 2 개(전자와 정공)인가에 따라서 분류하면 그림 2와 같으며, 혼성 반송자(mixed carrier)인 경우는 주로 MOS gate 바이폴라 전력소자를 가리킨다.

표 1. 전력 반도체소자의 종류

단자/집합수	소자	제어방식
2/1	PN 다이오드 쇼트키 다이오드	
3/2	트랜지스터 BJT/Darlington MOSFET JFET/SIT IGBT	전류 전압 전압 전압
3/3	다이리스터 광구동 역전도 GTO MCT	전류 전류 전류 전압

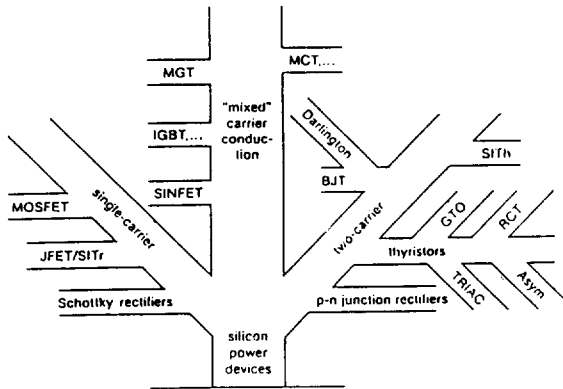


그림 2. 반송자 수에 따른 전력 반도체소자 분류도

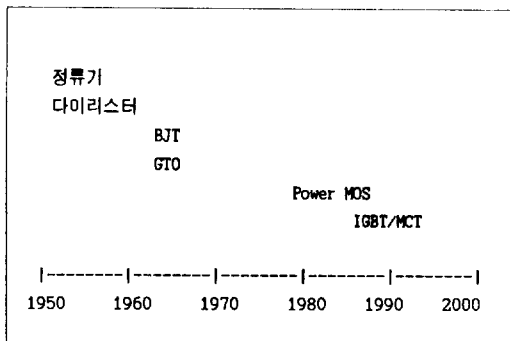
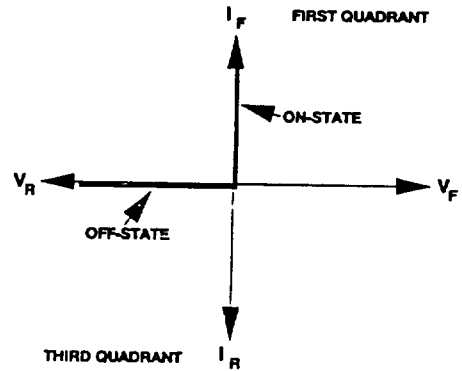


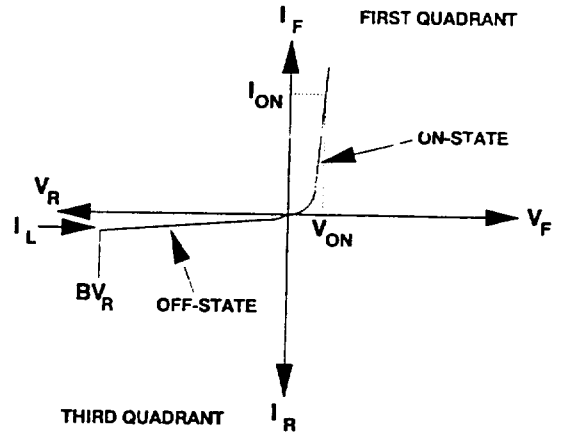
그림 3. 주요 전력 반도체소자 제품의 출현 연도

주요 전력 반도체소자 제품의 출현 연도를 그림 3에 나타냈다. 정류기, 다이리스터, 바이폴라 트랜지스터는 기술이 오래되었으며, 상업적으로 정착되어 현재 가장 많이 사용되는 소자라 할 수 있다. 한편 전력 MOSFET, IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor), MCT(MOS Controlled Thyristor)는 70년대 후반에 새로이 고안되어, 시장 점유율이 높아지고 있는 미래의 전력소자라 할 수 있다. 반도체 소자의 소재로는 개발 제품의 대부분은 실리콘을 사용하고 있으며, SiC(Silicon Carbide), GaAs를 사용한 전력소자에 대한 연구가 최근 활발히 이루어지고 있다.

이상적인 정류기의 I-V 특성을 그림 4에 나타냈으며, ON 저항은 0 ohm, 항복전압(breakdown voltage)은 무한대(실제로는 10000 V 이상)인 특성을 지니고 있다. 그러나, 실제의 정류기 특성은 1 V 내외의 ON 전압(또는 forward voltage drop), 수 백에서 수천 V의 항복전압을 갖는다. 한편 제어단자(control terminal)가 있는 이상적인 전력 스위치(power switch)의 특성을 그림 5에 나타냈는 바, 대부분의 소자인 경우 1 상한의 전류-전압 특성을 사용하고 있다. 실제 소자의 ON 전압 및 항복전압은 정류소자의 경우와 같으며, 제어 방식에 따라 전류 또는 전압제어로 나뉘어 진다.



(a) 이상적인 정류기



(b) 실제의 정류기
그림 4. 정류기의 I-V 특성

2.1. 개별 소자

(1) 정류기

주요 정류기(rectifier)의 단면 구조를 그림 6에 나타냈다 [1]. 현재 까지 주종을 이루고 있는 소자는 PN 다이오드이며, 높은 항복전압을 유지하기 위하여 농도가 낮고 두꺼운 에피층(epitaxial layer)을 사용하기 때문에, 순방향 전압강하(forward voltage drop)가 크고, 소수반송자 저장효과(minority carrier storage effect)로 인해 스위칭 속도가 느린 편이다. 스위칭 속도를 빠르게 하기 위해 금(Au) 또는 백금(Pt)을 주입하거나, 전자, 양자, 중성자 또는 헬륨을 높은 에너지로 조사(irradiation)하여, 즉 에너지 밴드갭의 중간에 재결합 센터(recombination center)를 만들어 주는 기술이 개발되었다.

고속 스위칭소자인 쇼트키(Schottky) 다이오드는 70년 초에 개발되었으나 역방향 항복전압이 낮고, 누설 전류(leakage current)가 크기 때문에 주로 100 V 이하에서 사용되고 있다.

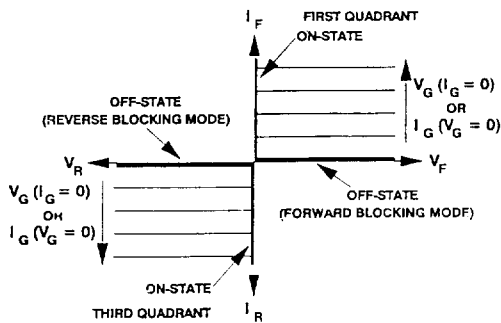


그림 5. 이상적인 전력 스위치의 I-V 특성

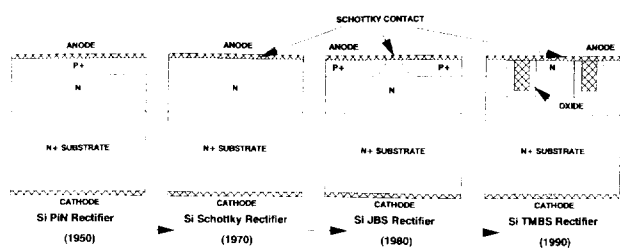


그림 6. 주요 정류기의 단면 구조

PN 다이오드와 쇼트키 다이오드의 장점을 취한 JBS(Junction Barrier-controlled Schottky), TMBS (Trench MOS Barrier Schottky) 정류기가 고안되었으며, 기존의 PN 다이오드에 비하여 전력손실이 매우 작다.

(2) 전력 스위치

1) 바이폴라 트랜지스터

BJT(Bipolar Junction Transistor)는 오랜 역사를 지닌 소자로서, 저전력에서 중간 전력에 이르기 까지 가장 광범위하게 사용되고 있으나, 전류 제어방식과 안전동작 영역(safe operating area)이 작기 때문에 전력 MOSFET, IGBT에서 서서히 그 역할을 넘겨 주고 있다.

2) 전력 MOSFET

BJT에 비해 전력 MOSFET의 장점은 소수반송자 저장 효과가 없어서 스위칭 속도가 빠르고, 전압제어 방식이며, 전류가 부정(negative)온도계수를 갖기 때문에 열적 안정성(thermal stability)이 매우 우수하다는 점이다. 초기의 전력 MOS는 그림 7과 같이 V-groove 게이트를 사용하였으나, 신뢰도에 문제가 있어서 VD(Vertical Double-diffused) MOS가 가장 보편적으로 사용되고 있다. 최근에는 DRAM에서 사용되는 트랜치 식각(trench etch) 기술을 이용하여 UMOS, EXTFET가 개발되어 상업화가 이루어지고 있다.

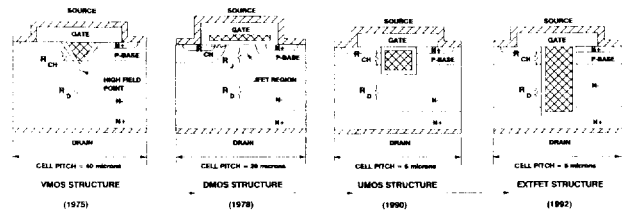


그림 7. 여러가지 전력 MOSFET의 단면도

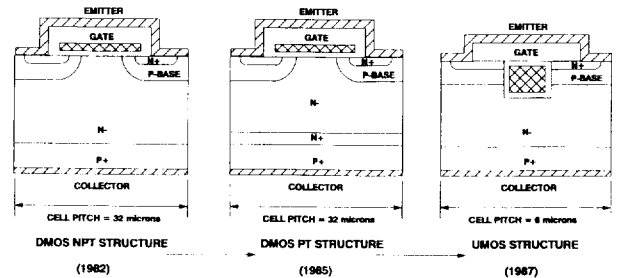


그림 8. 여러가지 IGBT의 단면도

3) IGBT

전력 MOSFET의 장점인 전압 제어방식을 갖고, 단점인 순방향 전압강하를 획기적으로 낮춘 소자가 1982년 General Electric과 RCA에 의해 개발되었다. IGBT는 그림 8에 나타난 바와 같이 기판이 P* 또는 N*/P*인 것만 제외하고는 기본적으로 전력 MOSFET과 구조가 같으나, 동작원리는 전혀 다르며, 바이폴라 트랜지스터에 가깝다. 600 V 급 이상에서는 전력 MOS에 비해 손실이 작기 때문에 주로 IGBT가 사용되고 있다. 에피층이 비교적 얇은 PT(Punch-Through)구조와 에피층이 매우 두껍거나 사용하지 않는 NPT(Non-Punch-Through) 구조로 나뉘어 지며, 대략 1200 V 이하에서는 PT가 유리하고 그 이상의 고전압에서는 NPT가 경제적이다. 전력 UMOS와 마찬가지로 최근 트랜치 식각을 이용한 IGBT가 개발되어 상용화를 추진 중이다.

4) 다이리스터

다이리스터에는 광구동(light activated), 역전도(reverse conducting), GTO(Gate Turn-Off), MCT 등이 있으며, 가장 많이 사용되고 있는 GTO 구조는 그림 9에 나타난 바와 같이 초기의 pnpn 구조에서 양극 단락(anode short) 구조를 거쳐 매몰층(buried layer) 구조로 발전해왔다. 한편 MOS 게이트 구조를 갖는 MCT는 1984년에 소개된 후, EST(Emitter Switched Thyristor), DGBRT (Double Gate Base Resistance controlled Thyristor) 등의 다양한 구조로 발전하고 있다(그림 10 참조).

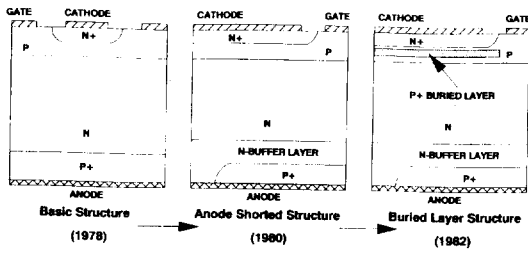
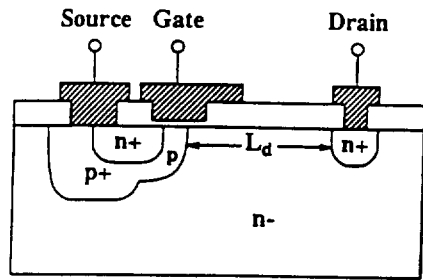


그림 9. 여러가지 GTO의 단면도



(b) LDMOS

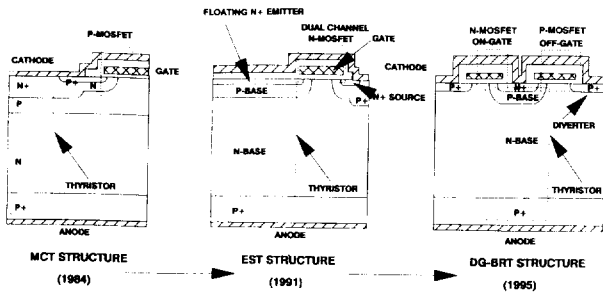
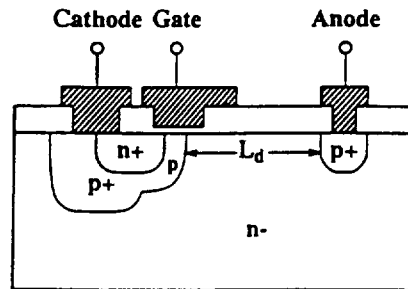


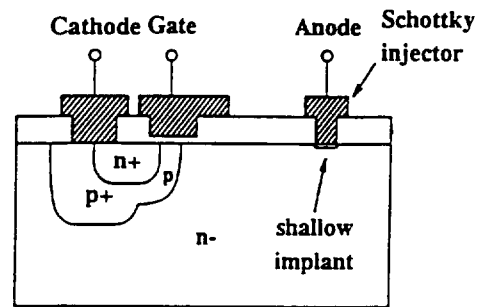
그림 10. 여러가지 MCT의 단면도



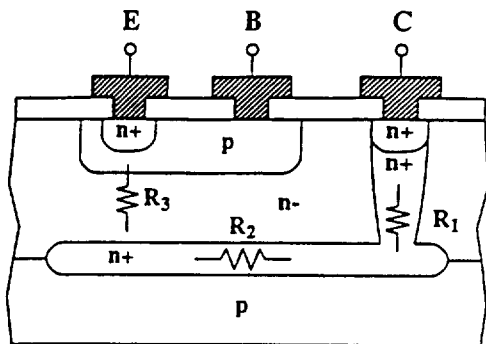
(c) LIGBT

2.2 전력 집적회로

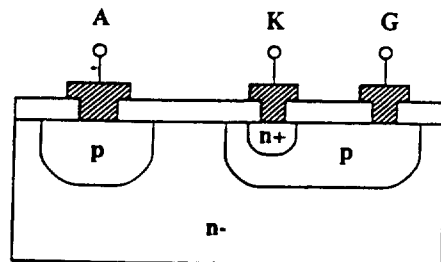
전력 IC는 응용 시스템에 따라, 고전압 저전류 또는 저전압 고전류 IC의 형태가 많다. PIC에 사용되는 전력소자는 다른 회로와의 배선(interconnection)이 용이하도록 개별소자의 수직형 구조를 수평형으로 개조하여 모든 단자가 기판 윗면에 위치하도록 한다. 대표적인 전력 IC 소자인 BJT, L(Lateral)DMOS, LIGBT, SINFET (Schottky INjection FET), LSCR(Silicon Controlled Rectifier)를 그림 11에 나타냈다.



(d) SINFET



(a) BJT

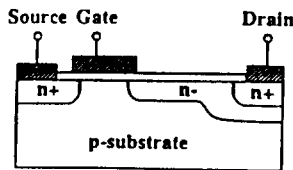


(e) LSCR

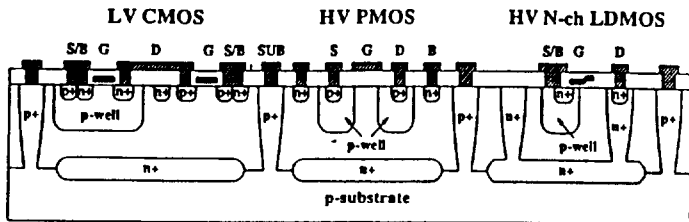
그림 11. 여러가지 전력 IC 소자의 단면도

PIC는 고전압 전력 소자와 저전압 제어회로와의 전기적, 열적인 격리가 매우 중요하다. PIC는 소자 격리 기술에 따라 접합 격리(Junction Isolation, 이하 약하여 JI)와 절연격리(Dielectric Isolation 이하 약하여 DI)로 구분된다. DI는 JI에 비해 기생(parasitic) 커패시턴스가 작고, 격리에 사용되는 면적이 작다는 장점을 지니고 있으나, 기판 웨이퍼(substrate wafer)의 제조비용이 비싸기 때문에 보통 동작 전압이 200 V 이하인 경우, JI를 사용하고, DI는 그 이상인 경우에 사용된다.

그림 12(a)는 자기 격리(self isolation)구조로서 기존의 CMOS 공정을 사용하기 때문에 동작전압이 낮고, JI 구조는 기존의 BJT IC 공정을 사용하며 가장 보편적이다. 그림 13에 나타낸 DI 공정은 SDB(Silicon Direct Bonding)기술을 사용하여 매몰 산화막(buried oxide) 위에 단결정 실리콘을 만들어, 전력 IC를 제작한다.



(a) 자기 격리



(b) 접합 격리

그림 12. PIC 격리 구조

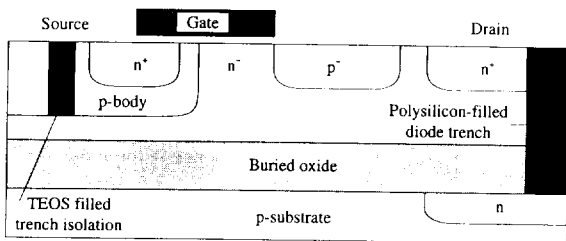


그림 13. SDB 기술을 사용한 DI 구조

부하전류 및 공급 전압에 따른 PIC의 주요 응용 분야를 그림 14에 나타냈다. 스위칭 전원, 전자식 형광등 안정기, 디스플레이 분야의 응용이 급증하고 있다.

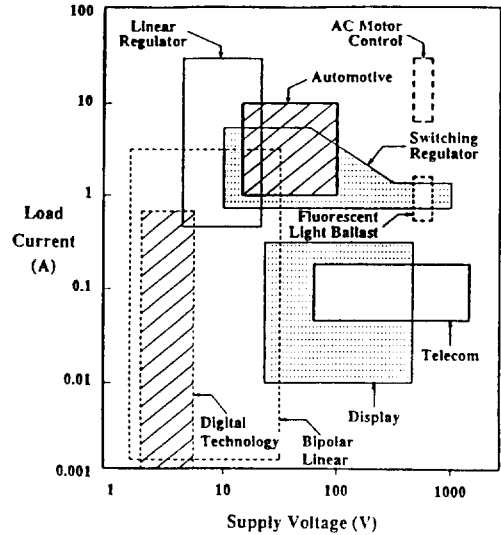


그림 14. 전류 전압에 따른 PIC의 응용분야

Smart PIC는 thermal shutdown, 단락회로(short-circuit), 과전압(over-voltage) 보호 기능과 같은 지능(intelligence)과 전력 능력을 포함한 IC를 가리킨다. 그림 15에 스마트 전력기술의 개괄도(block diagram)를 나타냈다.

3. 전력 반도체 소자 시장 규모

표 2에 의하면 전세계 반도체 시장규모[2]는 96년도에 약 1560억 불 인데 이 중에서 전력반도체 시장은 약 10%에 해당하는 158억 불에 달하며, 2000 년도에는 전력소자 시장 규모가 약 231억 불에 도달하리라 예상하고 있다. 개별소자가 전체의 약 86%를 점하고 있으며, 트랜지스터가 개별소자의 약 60%, 다이오드가 26%, 다이리스터가 7% 정도 된다. 트랜지스터에는 전력MOSFET/IGBT의 합이 기존의 전력 BJT와 시장 규모가 비슷하나, 연평균 성장률에 있어서 전력 MOSFET는 약 16%, IGBT는 약 33%로서 BJT의 5%에 비해 괄목할 만한 성장을 하고 있고, 2000 년대에는 MOS 게이트 전력소자의 시장점유율이 바이폴라를 능가하리라 추정된다. 전력 IC는 96년도 현재의 시장점유율은 전력소자 전체의 약 14%에 그치고 있으나, 앞으로 급격한 신장이 예상된다[3].

표 3은 주요 전력반도체 제품별로 미국과 일본/아시아의 상대적인 점유율을 나타낸다[4]. 일반의 예상과는 달리 정류소자의 시장 점유율이 가장 큰 사실에 주목할 필요가 있다.

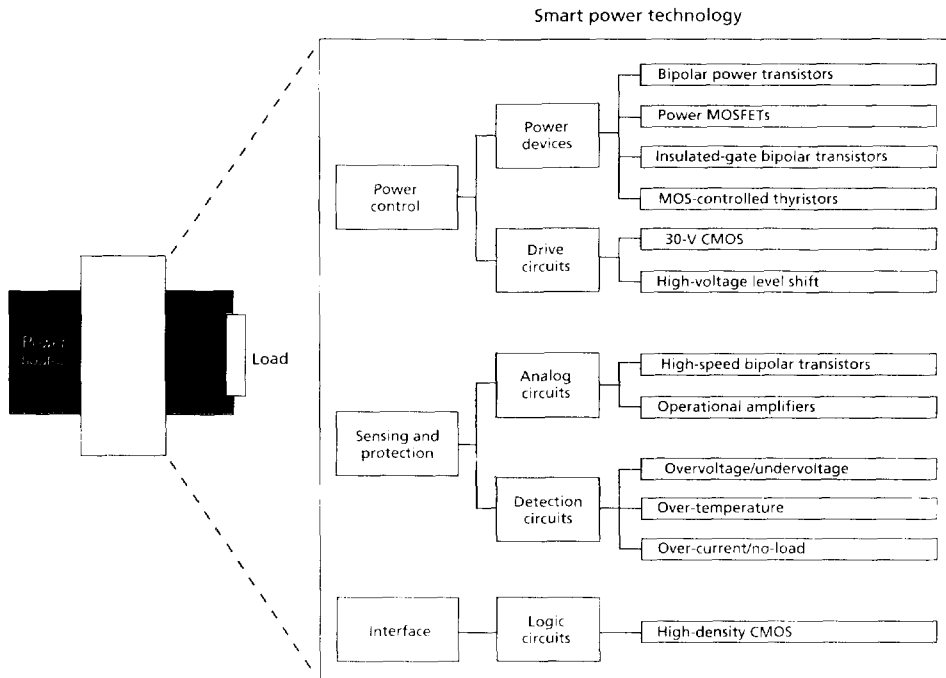


그림 15. Smart 전력기술의 개괄도

흥미로운 사실은 미국에서는 전력 MOSFET의 비율이 바 이폴라 트랜지스터를 앞지르고 있지만, 일본/아시아에서는 BJT가 MOSFET를 능가하고 있다. 600 V 이상에서는 IGBT가 전력 MOS에 비해 유리하므로 기존의 BJT를 대체 함으로써, IGBT의 응용분야가 확대되리라 예상된다. 또한 기존의 다이리스터는 GTO 또는 MCT에 의해 대체되어, 점유율이 상당히 하락하리라 예측된다.

표 2. 세계 전력 반도체소자의 시장 규모 (단위 : 100만\$)

	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
전력소자전체	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	1,801	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	2,500	2,707	2,951	3,052	3,141
MOS	680	903	1,094	1,470	1,812	2,168	2,503	2,982	3,385	3,917
IGBT	50	70	109	158	238	332	454	575	734	1,027
다이리스터	658	661	696	790	909	972	1,066	1,063	1,172	1,249
기타	530	589	501	632	720	822	896	1,052	1,160	1,306
PIC 합계	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

표 3. 1993 연도 미국과 일본/아시아 시장

제품 종류	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
다이리스터	13.3	8.4
GTO	1.7	2.4
Smart Power	2.3	1.3

4. 미래의 전력 반도체소자

전력반도체 소자는 초기의 게르마늄(germanium)을 사용한 전력 소자(일부 전력손실이 작은 정류소자는 아직도 생산이 되고 있음)로 부터 시작하여 현재는 실리콘을 기반으로 하여, 6인치 웨이퍼 전체가 1개의 다이리스터인 거대규모 전력소자, VLSI 수준의 생산기술을 사용하여 제작되는 전력 MOSFET, IGBT, MCT 등으로 발전하고 있다.

실리콘을 기반으로 한 반도체소자는 21세기 중반 까지 전력소자의 대중을 이룰 것으로 예상되며, 21세기 초에 SiC, GaAs, 다이아몬드 등을 사용한 소자가 상품화되리라

예견된다. 이러한 소재를 사용할 경우, 실리콘에 비해 속도가 빠르거나, 고온 동작이 가능하고, 전력손실이 획기적으로 개선될 수 있다. 현재까지 알려진 바로는 다이아몬드가 가장 우수하나 기초 연구 단계이며, 포괄적으로는 SiC가 실용화 가능성이 가장 높으리라 예상된다[5, 6].

에 SiC 기판 위에 제작한 쇼트키 다이오드, 전력 MOS, 다이리스터, SIT(Static Induction Transistor)의 단면도를 나타냈다. 제조공정 상 열확산(thermal diffusion) 보다는 에피성장(epitaxy)가 용이하기 때문에 트렌치 구조를 사용하였으며, CREE 등과 같은 상업적인 웨이퍼의 생산업체가 있으나, 결함 밀도가 높아서 양산시 수율이 낮고, 웨이퍼의 가격이 실리콘의 수십 배에 달하는 등 대량생산에 많은 문제가 남아 있다.

5. 국내의 기술 동향

5.1 국내의 연구동향

삼성전자 부천공장에서, 개별소자인 BJT, 전력 MOS의 양산을 하고 있고, 1000 V 급 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 구로 공장에서는 BJT, 오디오 IC 등을 생산하고 있고, 현대전자에서는 자동차용 PIC 개발에 관심을 갖고 있다.

전기연구소에서는 러시아 등과 기술협력을 통하여 GTO를 개발한 바 있고, 주로 소재, 부품, 시험 평가, 패키지에 관한 연구를 수행하고 있으며, 전자통신연구소에서는 디스플레이 구동 IC를 개발 중이다.

1980 년대에 한국과학기술원에서는 쇼트키 다이오드, 전력 MOS, IGBT, 고전압 다이오드의 설계기술에 관한 연구를 수행한 바 있고[8-17], 서울대에서는 전력소자 모델링, 전력 MOS, IGBT, 고전압 IC 용 LDMOS, LIGHT, LEST 등에 관한 연구를 수행하고 있다[18-38]. 단국대[39,40]에서는 과학기술원 및 아주대와 공동 연구를 한 바 있다. 고려대에서는 주로 IGBT[41-43], 한양대[44-46], 포항공대[47]에서는 LDMOS, LIGHT와 같은 고전압 IC 용 소자에 대한 연구를 수행하고 있다. 본인이 재직하고 있는 아주대에서는 VDMOS, LDMOS, LIGHT, SINFET 등을 제작한 바 있으며, 최근에는 RESURF LDMOS, LIGHT의 모델링에 관하여 연구하고 있다[48-72].

5.2 국외의 연구 동향

미국에서는 과거에는 General Electric, RCA, Westing House와 같은 대기업에서 전력소자를 연구 개발하였으나, 80 년대 후반에 반도체 부문의 합병, 매각 등을 거쳐, 현재는 Harris Semiconductor에서 전력MOS, IGBT, MCT 등을 생산하고 있고, Motorola에서는 BJT, 전력 MOS, IGBT를 양산하고 있다. IR(International Rectifier)에서는 정류기, 다이리스터를 생산하다가 70 년대 말부터 세계 최초로 전력 MOSFET를 HEXFET이라는 브랜드로 생산하기 시작하여 오늘날 수위 기업으로 성장하였다. 그밖에 Texas Instrument에서는 PDP 등 디스플레이 구동 IC, Siliconix, Unitrode 및 중소 벤처

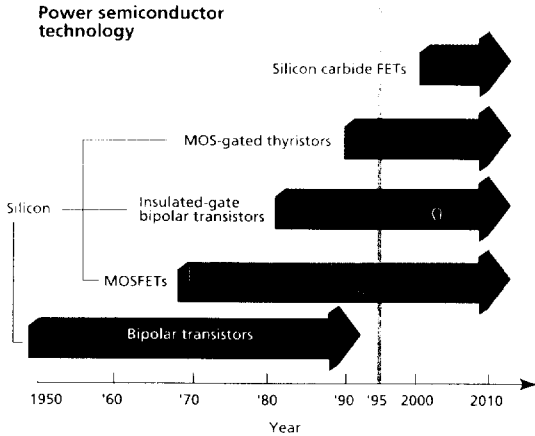


그림 16. 주요 전력 반도체소자의 연도별 추이

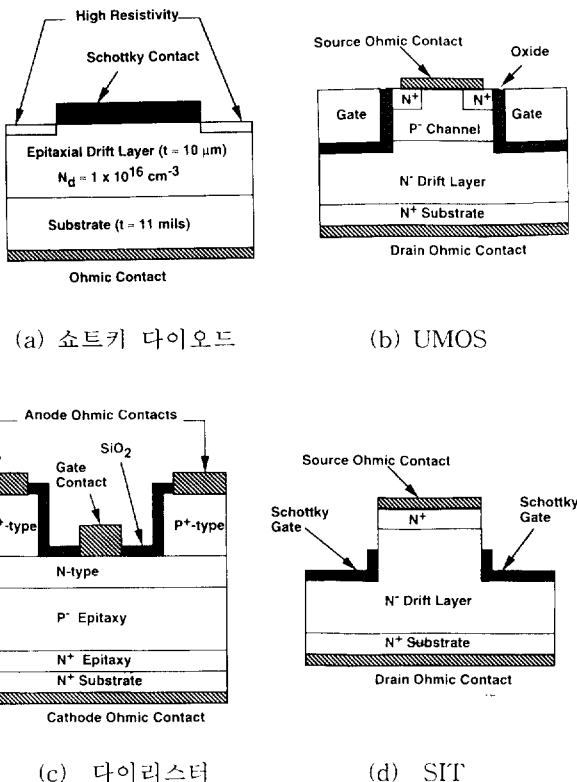


그림 17. 주요 SiC 전력 반도체소자의 단면도

그림 16은 초기의 BJT로 부터 MOSFET, IGBT, MCT를 거쳐 SiC FET의 연도별 추이를 나타낸다[7]. 그림 17

기업들이 개별소자, PIC, smart PIC 등을 생산하고 있다.

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

일본의 대표적인 기업인 Toshiba, Fuji Electric, Hitachi, Mitsubishi Electric, Shindenken 등에서는 다이리스트, GTO, IGBT, 전력 MOS, 전력 모듈(power module), smart PIC 등에 이르는 각종 전력 소자를 거의 망라하여 생산하고 있으며, 제품의 품질에 있어서 세계 최고를 유지하고 있다. 또한 NTT 연구소에서는 PCS 용 LDMOS를 연구하고 있다.

유럽에서는 독일의 Siemens, 이탈리아의 SGS-Thomson, 스위스의 ABB, 네델란드의 Philips등이 전력 MOS, IGBT, smart PIC를 생산하여 유럽의 자존심을 유지하고 있고, 프랑스의 LAAS-CNRS 연구소에서는 접합마감(junction termination)기술, 러시아의 Ioffe 연구소에서는 SiC 물성 및 소자를 연구하고 있다. 학계에서는 스위스 공대의 Fichtner 그룹에서 전력 반도체소자의 simulation software의 개발 및 고전압 IGBT, 영국 리버풀대의 Amaratunga 그룹의 LDMOS, LIGBT, 체코공대 Vobecky 그룹의 헬륨조사 기술에 관한 연구가 매우 활발하다.

6. 맺 음 말

최근 메모리 산업의 침체로 인하여 비메모리 분야의 관심이 높아지고 있다. 비메모리 분야 하면 주로 ASIC(Application Specific IC)이 떠오르지만, 대부분이 소량 다품종의 디지털 시스템이기 때문에 사업이 쉽지 않다.

새로이 개발되어 각광을 받고 있는 전력 MOS, IGBT, MCT 등은 작은 패턴의 셀이 칩 내부에서 병렬 연결되어 있기 때문에 메모리 제조공정과 유사하다. 전력반도체 기술을 선도하고 있는 일본, 미국, 유럽의 기업체도 국내의 메모리 생산기술이 세계적인 수준이라고 찬사를 보내고 있다. 따라서 메모리 기억용량이 증가하면 새로운 생산공정이 구축되고, 이때 밀려나게된 장비를 전력소자 제작에 사용할 수 있다면, 감가 상각된 장비의 재활용을 통한 원가절감 등 여러가지 면에서 도움이 될 수 있으리라 사료된다.

지면관계 상 많은 부분을 상세히 다루지 못했고, 국내외 기술동향을 쓰면서 혹시 누락된 부분이 있으면 너그럽게 양해를 구하며, 최신 정보를 제공하여 주신 서울대의 한민구 교수, 한양대의 권오경 교수, 고려대의 성만영 교수, 전기연구소의 김은동 박사께 사의를 표한다. 전력 반도체소자에 관한 단행본 목록을 참고문헌에 첨부하였다[73-86].

참 고 문 헌

[1] B.J. Baliga, "Trends in power semiconductor devices," *IEEE*

Trans. Electron Devices, Vol. 43, pp. 1717-1731, Oct. 1996.
 [2] 전력용 반도체 기술개발, 전기연구소, 1996. 3
 [3] Y. Hayashi and Y. Nagahiro, "Huge market opens for intelligent power semiconductor devices," *Nikkei Electronics Asia*, Vol. pp. 22-31, Nov. 1992.
 [4] S. Harris, "Power semiconductor reports," *PCIM*, Vol. p. 6, July 1995.
 [5] C.E. Weitzel et al., "Silicon carbide high power devices," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 43, pp. 1732-1741, Oct. 1996.
 [6] M.L. Locatelli et al., "Semiconductor materials for high temperature power devices," *EPE Journal*, Vol. 4, pp. 43-46, Mar. 1994.
 [7] B.J. Baliga, "Power ICs in the saddle," *IEEE Spectrum*, Vol. 32, pp. 34-49, July 1995.
 [8] 최연익, Graded Etching of Silicon Dioxide Layer and its Application to Schottky Diodes, 박사학위 논문, 한국과학기술원, 1981. 8.
 [9] 고요환, 실리콘사이드 접촉을 이용한 래치현상이 없는 자기정렬된 전력 MOSFET과 IGBT 구조, 박사학위 논문, 한국과학기술원, 1989. 8.
 [10] 서강덕, 반도체 전력소자에서의 최적 FLR 시스템의 해석적 설계 방법, 박사학위 논문, 한국과학기술원 1991. 2.
 [11] 박찬광, Power MOSFET의 설계 및 제작, 석사학위 논문, 한국과학기술원 1987. 2.
 [12] Yeam-Ik Choi, "Enhancement of breakdown voltages of Schottky diodes with a tapered window," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 28, pp. 601-602, May 1981.
 [13] Yeam-Ik Choi, Choong-Ki Kim and Young-Se Kwon, "On the thermal isolation applications of the V-groove technology," *IEEE J. Solid-St. Circuits*, Vol. 17, pp. 90-93, Jan. 1982.
 [14] Yeam-Ik Choi, Choong-Ki Kim and Young-Se Kwon, "Tapered sidewall Schottky diodes with very low taper angles," *Japanese J. Applied Physics*, Vol. 22-1, pp. 137-140, Jan. 1983.
 [15] Yo-Hwan Koh and Choong-Ki Kim, "Latch-back free self-aligned power MOSFET structure with silicided source and body contact," *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 9, pp. 408-410, Aug. 1988.
 [16] Yo-Hwan Koh and Choong-Ki Kim, "Two-dimensional analysis of latch-up phenomena in latch-up free self-aligned IGBT structure," *Solid-St. Electron*, Vol. 33, pp. 497-501, May 1990.
 [17] Kang-Deog Suh, Soon-Won Hong, Kwyro Lee and Choong-Ki Kim, "An analysis for the potential of floating guard rings," *Solid-St. Electron*, Vol. 33, pp. 1125-1129, Sept. 1990.
 [18] 김일중, 전력 MOSFET의 On-저항 및 항복전압 연구, 박사학위 논문, 서울대학교 1992. 8.
 [19] 김한수, 트랜치와 경사 산화막을 이용한 전력용 반도체 소자의 새로운 접합구조 설계 및 해석, 박사학위 논문, 서울대학교 1995. 2.
 [20] 김성동, A Lateral SOI Bipolar-Mode Field-Effect Transistor for Power ICs, 박사학위 논문, 서울대학교 1996. 2.
 [21] 윤종만, MOS 게이트형 전력반도체의 순방향 및 래치업 특성 개선에 관한 연구, 박사학위 논문, 서울대학교, 1996. 8.
 [22] 김성동, Quasi-Saturation 현상을 고려한 전력 MOSFET의 파

- 라미터 추출에 관한 연구, 석사학위 논문, 서울대학교, 1992. 2.
- [23] 이병훈, IGBT의 latch-up 억제를 위한 새로운 소자 설계, 석사학위 논문, 서울대학교, 1993. 2.
- [24] 양 경, An Accurate Formula for Breakdown Voltage of Cylindrical Junctions including the Interface Charge, 석사학위 논문, 서울대학교, 1993. 8.
- [25] 김수성, 캐소드가 추가된 구조를 갖는 수평형 IGBT 소자의 특성 분석, 석사학위 논문, 서울대학교, 1994. 2.
- [26] 변대석, SOI 수평형 집합의 항복전압 향상을 위한 Negative Curvature 효과, 석사학위 논문, 서울대학교, 1994. 2.
- [27] 김부영, Punchthrough 다이오드의 항복전압 및 래치업 특성 향상을 위한 IGBT 구조에 대한 연구, 석사학위 논문, 서울대학교, 1995. 2.
- [28] 김재형, Quasi-SOI 기판을 이용한 새로운 구조의 수평형 EST 소자, 석사학위 논문, 서울대학교, 1996. 2.
- [29] Byeong-Hoon Lee, Chong-Man Yun, Han-Soo Kim, Yearn-Ik Choi and Min-Koo Han, "Latch-up suppressed IGBT by the deep p⁺ ion implantation under the n⁺ source," Japanese J. Applied Physics, Vol. 33, No.1B, pp. 563-566, 1994.
- [30] Il-Jung Kim, Seong-Dong Kim, Yearn-Ik Choi and Min-Koo Han, "Analytical expressions for the three-dimensional effect on the breakdown voltages of planar junctions in non-punchthrough and punchthrough cases," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 41, pp. 1661-1665, Sept. 1994.
- [31] B.H Lee, C.M. Yun, D.S. Byeon, M.K. Han and Y.I. Choi, "A trench-gate silicon-on-insulator lateral insulated gate bipolar transistor with the p⁺ cathode well," Japanese J. Applied Physics, Vol. 34, No. 2B, pp. 854-859, 1995.
- [32] H.S. Kim, S.D. Kim, Y.I. Choi and M.K. Han, "A low loss Schottky rectifier utilizing the trenched sidewall as junction barrier controlled Schottky contact," Japanese J. Applied Physics, Vol. 34, No. 2B, pp. 913-916, 1995.
- [33] Seong-Dong Kim, Il-Jung Kim, Min-Koo Han and Yearn-Ik Choi, "An accurate on-resistance model for low voltage VDMOS devices," Solid-St. Electron., Vol. 38, pp. 345-350, Feb. 1995.
- [34] Kyoung Yang, Il-Jung Kim, Yearn-Ik Choi and Min-Koo Han, "An analytic solution for breakdown voltage of cylindrical junctions including the interface charge," Solid-St. Electron., Vol. 38, pp. 1107-1108, May 1995.
- [35] Han-Soo Kim, Seong-Dong Kim, Min-Koo Han, Seok-Nam Yoon and Yearn-Ik Choi, "Breakdown voltage enhancement of the PN junction by self-aligned double diffusion process through a tapered SiO₂ implant mask," IEEE Electron. Devices, Vol. 16, pp. 405-407, Sept. 1995.
- [36] C.M. Yun, Y.I. Choi and M.K. Han, "A monolithic current limiting power MOSFET," Int. J. of Electronics, Vol. 80, pp. 131-142, Feb. 1996.
- [37] Dae-Seok Byeon, Min-Koo Han and Yearn-Ik Choi, "Analytical solution of the breakdown voltage for 6H-silicon carbide p-n junction," Journal of Applied Physics, Vol. 79, No. 5, pp. 2796-2797, 1996.
- [38] Chong-Man Yun, Yearn-Ik Choi and Min-Koo Han, "Numerical analysis of a new vertical IGBT structure with reduced JFET effect," Solid-St. Electron., Vol. 39, pp. 1179-1183, Aug. 1996.
- [39] 손호태, 전력용 MOSFET의 설계조건에 따른 특성변화의 연구, 석사학위 논문, 단국대학교, 1987. 2.
- [40] 이철환, VD Power MOSFET Termination에 있어서 Fixed Oxide Charge가 항복현상에 미치는 영향에 관한 고찰, 석사학위 논문, 단국대학교, 1989. 2.
- [41] 정세진, Power IGBT의 설계 제작과 Modeling에 관한 연구, 석사학위 논문, 고려대학교, 1992. 2.
- [42] 강이구, IGBT 소자의 래치업 특성 개선을 위한 구조적 설계 방안과 전기적 특성에 관한 고찰, 석사학위 논문, 고려대학교, 1995. 8.
- [43] 최재욱, IGBT의 새로운 구조적 설계에 따른 래치업 특성의 개선책 수립에 관한 연구, 석사학위 논문, 고려대학교, 1997. 2.
- [44] 현창호, VLSI에 적용할 수 있는 SOI LDMOSFETs에 관한 연구, 석사학위 논문, 한양대학교, 1995. 2.
- [45] 정훈호, Smart Power IC용 RESURF EDMOSFET의 최적설계 및 분석적 회로모델에 관한 연구, 석사학위 논문, 한양대학교, 1996. 2.
- [46] 나영선, 전계 방출 디스플레이의 구동회로에 관한 연구, 석사학위 논문, 한양대학교, 1997. 2.
- [47] 김종오, New Modelings, Device Structure Extraction and Optimization for Power LDMOS Transistor, 포항공대 박사학위 논문, 1996. 2.
- [48] 박치선, 70 V BiCMOS 소자의 최적공정에 관한 실험적 고찰, 박사학위 논문, 아주대학교, 1992. 2.
- [49] 김종오, 전력 MOSFET의 설계 및 제작과 실리콘의 비등방성 부식에 관한 연구, 석사학위 논문, 아주대학교, 1987. 2.
- [50] 김진형, Insulated Gate Transistor 및 전력 MOSFET의 설계 및 제작, 석사학위 논문, 아주대학교, 1988. 2.
- [51] 황성규, Insulated Gate Bipolar Transistor에 관한 연구, 석사학위 논문, 아주대학교, 1989. 2.
- [52] 문일호, 고전압 IC를 위한 전력 반도체 소자, 석사학위 논문, 아주대학교, 1990. 8.
- [53] 조영호, 반송자 주입구조가 수평형 전력소자의 특성에 미치는 영향, 석사학위 논문, 아주대학교, 1993. 2.
- [54] 유동철, Field Plate 구조를 갖는 PN 접합 다이오드의 항복 전압에 관한 고찰, 석사학위 논문, 아주대학교, 1993. 2.
- [55] 문태훈, SOI RESURF 다이오드의 항복전압에 관한 고찰, 석사학위 논문, 아주대학교, 1993. 8.
- [56] 나경만, Field Limiting Ring 구조의 해석적 모델, 석사학위 논문, 아주대학교, 1994. 2.
- [57] 신진철, RESURF 다이오드의 항복전압 및 최적 수평길이에 대한 연구, 석사학위 논문, 아주대학교, 1994. 2.
- [58] 강병로, SOI 쇼트키 다이오드의 항복전압에 관한 연구, 석사학위 논문, 아주대학교, 1994. 2.
- [59] 윤석남, 경사각을 이용한 JTE PN 다이오드의 항복전압에 관한 연구, 석사학위 논문, 아주대학교, 1994. 2.
- [60] 나종민, 경사진 Field Plate를 갖는 SOI LDMOS의 항복전압에 관한 연구, 석사학위 논문, 아주대학교, 1996. 2.
- [61] 정진영, 계단형 및 선형농도를 갖는 PN 다이오드의 해석적인 모델링, 석사학위 논문, 아주대학교, 1997. 2.
- [62] 황규환, 전력 MOSFET의 최적설계 및 새로운 구조에 관한 연구, 석사학위 논문, 아주대학교, 1997. 2.
- [63] 박일용, 항복 특성 및 래치업 특성을 개선시킨 LIGBT, 석사학위 논문, 아주대학교, 1997. 2.
- [64] Yearn-Ik Choi and Wilson Kwan, "On the Surface electric field of junction diodes with a tapered window," Solid-St.

- Electron. Vol. 30, pp. 353-354, Mar. 1987.
- [65] S.I. Cha, Y.H. Cho, Y.I. Choi and S.K. Chung, "Novel Schottky diode with self-aligned guard ring," Electron. Lett., Vol. 28, No. 13, pp. 1221-1222, 1992.
- [66] B.R. Kang, S.N. Yoon, Y.H. Cho, S.I. Cha and Y.I. Choi, "Increased breakdown voltage of silicon-on-insulator Schottky diodes," Electron. Lett., Vol. 29, No. 15, pp. 1381-1382, 1993.
- [67] Seong-Kyu Hwang, Yeam-Ik Choi, Sang-Koo Chung, Kwyro Lee and Choong-Ki Kim, "A power MOSFET design methodology considering epi parameter variations," IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, Vol. SM6, No. 4, pp. 377-380, 1993.
- [68] Tae-Hun Moon, Yeam-Ik Choi and Sang-Koo Chung, "Calculation of avalanche breakdown voltage of the InP P-N junction," Solid-St. Electron., Vol. 37, pp. 187-188, Jan. 1994.
- [69] Sang-Koo Chung, Dong-Chul Yoo, Kyeong-Man Ra and Yeam-Ik Choi, "An analytical method for two-dimensional field distribution of a MOS structure with a finite field plate," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 42, pp. 192-194, Jan. 1995.
- [70] Sang-Koo Chung, Seung-Youp Han, Jin-Cheol Shin, Yeam-Ik Choi and Sang-Bae Kim, "An analytical model for minimum drift region length of SOI RESURF diodes," IEEE Electron Device Letters, Vol. 17, pp. 22-24, Jan. 1996.
71. Seung-Youp Han, Jong-Min Na, Jin-Cheol Shin, Yeam-Ik Choi and Sang-Koo Chung, "An analytical model of the breakdown voltage and minimum epi layer length for RESURF pn diodes," Solid-St. Electron., Vol. 39, pp. 1247-1248, Aug. 1996.
- [72] Yong-Sung Chung, Seung-Youp Han, Yeam-Ik Choi and Sang-Koo Chung, "Closed-form analytical expressions for the breakdown voltage of GaAs parallel-plane p-n junction in <100>, <110> and <111> orientations," Solid-St. Electron., Vol. 39, pp. 1678-1680, Nov. 1996.
- [73] B. Murari ed., *Smart power IC's, technology and applications*, Springer-Verlag, 1996.
- [74] B.J. Baliga, *Power semiconductor devices*, PWS Publishing Co., 1996.
- [75] B.E. Taylor, *Power MOSFET design*, John Wiley & Sons, 1993.
- [76] A. A. Jaecklin ed., *Power semiconductor devices and circuits*, Plenum Press, 1992.
- [77] D.A. Grant and J. Gowar, *Power MOSFET*, John Wiley & Sons, 1989.
- [78] B.J. Baliga ed., *High voltage integrated circuits*, IEEE Press, 1988.
- [79] B.J. Baliga, *Modern power devices*, John Wiley & Sons, 1987.
- [80] P.D. Taylor, *Thyristor design and realization*, John Wiley & Sons, 1987.
- [81] P. Antognetti, *Power integrated circuits : physics, design and application*, McGraw-Hill 1986.
- [82] B.J. Baliga and D.Y. Chen ed., *Power transistors : device design and applications*, IEEE Press, 1984.
- [83] M. Kubat, *Power semiconductors*, Springer-Verlag, 1984.
84. A. Blicher, *Field-effect and bipolar power transistor physics*, Academic Press 1981.
- [85] S.K. Ghandhi, *Semiconductor power devices*, Wiley, New York, 1977
- [86] A. Blicher, *Thyristor physics*, Springer-Verlag, 1976.

저 자 소 개



최연익(崔然益)

1953년 11월 23일생. 1976년 서울대 공대 전자공학과 졸업. 1981년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학). 1982년~1984년 UC Berkeley 전기 및 전산공학과 Research Associate. 현재 아주대 공대 전기전자공학부 교수 및 당학회 편집위원. ISPSD(Int. Symp. on Power Semicon. Devices) 학술위원. IEEE Electron Dev. Lett. 및 Trans. Electron Dev 논문심사위원. 주관심분야 : 전력 반도체소자 및 제조공정.