

미래의 전력소자

崔 然 益

(正 會 員)

亞洲大學校 工科大学 電子工學科

I. 서 론

전력 반도체 소자는 전력 전자회로의 필수적인 부품으로서 사용되어 오고 있다. 주요 역할은 출력 제어(output control), 인터페이스 기능(interface function), 전력 조정(power regulation) 등으로서 시스템 설계의 기본이 되는 부분을 담당하고 있다. 전력소자에는 정류기(rectifier), 다이리스터(thyristor), 트랜지스터 등이 있으며, 흔히 개별 소자(discrete device)의 형태로 존재하고 있다. 전력소자는 많은 전류와 높은 전압이 요구되기 때문에 주변에서 쉽게 접할 수 있는 일상적인 반도체 소자나 집적회로에 비해 용량이나 칩면적(chip area)이 상당히 크다. 현재 연속 전류정격이 5,000A이고 역방향 전압이 3,000V인 직경 77mm의 실리콘 정류기가 제작되고 있다⁽¹⁾

그림 1은 전력소자와 포장 기술(packaging technology)의 개발 년도를 나타내고 있다. 전력소자는 트랜지스터의 발명 이래 꾸준히 발전하여, 소자의 기술적인 태동은 1980년대 초까지 모두 이루어진 것을 알 수 있다. 특히 전력 MOSFET의 출현 이후, 전력 소자의 제작에 VLSI 제조공정이 이용되고 있어, 발전 속도를 가속화시키고 있다.

전력소자는 컴퓨터, 로봇, 통신장비의 보급 증가에 따라 필연적으로 그 수요가 증가일로에 있다. 그 이유는 전자장비에 사용되는 IC 칩의 전원이거나 출력단에 전력소자가 반드시 필요하게 되기 때문이다. 전력 반도체 소자의 전세계 시장 규모는 86년도 통계 자료에^(2,3) 의하면 약 26억불 가량 된다. 표 1의 세계 시장 규모를 살펴보면, 미국과 일본 양대국이 전세계 전력 소자 물량의 3/4 이상을 점유하고 있고, 소자별로 보면 트랜지스터가 대종을 이루고 있다. 시장 규모에 있어 전력 MOSFET은 바이폴라 트랜지스터의 20%에도 못미치고 있지만 스위칭 속도가 빠른 외에 여러가지

장점을 지니고 있어 앞으로 빠른 성장을 하리라 기대를 모으고 있다. 또한 바이폴라 트랜지스터와 전력 MOSFET의 장점을 지니고 있는 IGBT(insulated gate bipolar transistor)⁽⁴⁾는 차세대 전력소자로서 가장 유망하다고 평가되고 있다.

본 논문에서는 미래의 전력소자로서 가장 가능성이 높은 전력 MOSFET과 IGBT의 구조, 특성 및 전망에 대하여 기술하고자 한다.

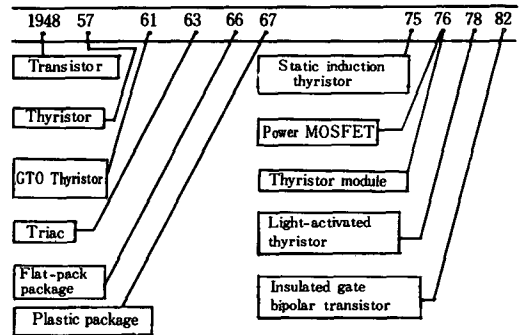


그림 1. 전력 스위칭 소자의 개발 년도

표 1. 1986년도 세계 전력반도체 시장규모

(단위 : 백만불)

전 력 소 자	미 국	일 본	유 럽	총 계
정 류 기	228	388	203	819
다 이 리 스 터	132	142	135	409
바 이 폴 라 트 랜 지 스 터	376	589	223	1,188
전 력 MOSFET	108	70	32	210
총 계	844	1,189	593	2,626

II. 전력 MOSFET

전력 MOSFET의 처음 소개된 것은 1976년 경이며⁽⁴⁾ 초기에는 제작상의 여러가지 문제점으로 말미암아 별로 각광을 받지 못하다가 70년대 말 International Rectifier의 HEXFET이 발표된 이후부터 업계의 주목을 끌기 시작했다. 최근까지 전력 MOSFET의 미래에 관하여 부품과 시스템의 가격 측면에서 설계 기술자들 사이에 많은 논란이 있었으나, 앞으로의 추세는 500V 이하의 고속 스위칭 응용에서는 바이폴라 트랜지스터를 거의 대부분 대체하리라는 데 의견이 일치하고 있다. 그림 2는 총 전력 트랜지스터 소비량 중에서 MOSFET가 차지하고 있는 비율을 년도 별로 나타낸 것이다. 1986년에 MOSFET의 비율이 20%이던 것이 90년에는 40%로 증가하는 것을 보여 주고 있다.

전력 MOSFET의 제작상 문제점은 VLSI(very large scale integration) 급에 해당하는 칩의 크기(chip size)와 패턴의 조밀도를 가지고 대량 생산을 하는 데서 비롯되고 있으며,⁽⁷⁾ 이에 따른 낮은 수율과 상대적으로 높은 가격(동일한 정격의 바이폴라 트랜지스터와 비교했을 때)이 상당히 호전되고 있어 이미 100V 이하의 저전압 소자에서는 바이폴라 트랜지스터와 비슷한 가격에 도달하고 있다(그림 3 참조).

현재 전력 MOSFET의 가장 큰 응용 분야로는 스위칭 전원(switch-mode power supply)을 들 수 있다. 이 분야의 산업규모는 1985년 약 36억불에 달했으며, 90년에는 84억불이 되리라 전망하고 있다. 전원을 포함한 각종 스위칭 장치의 사용확대는 그림 4에 나타낸 바와 같이 매우 광범위하다. 특히 스위칭 기술은 전세계 전기의 약 60%를 소모하고 있는 모터의 효율을 개선하기 위한 모터 제어나 전자식 안정기 등 새로운 응용 분야를 창출하리라 기대되고 있다. 그림 5에 전력 MOSFET의 전압 전류에 따른 응용 분야를 나타

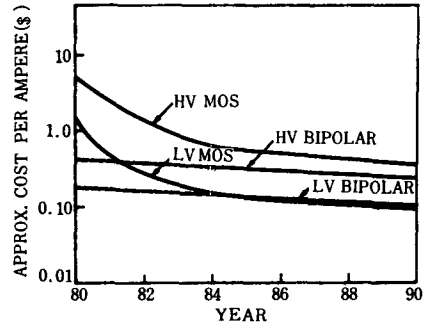


그림 3. 전력 바이폴라 및 MOS 트랜지스터의 가격 추이

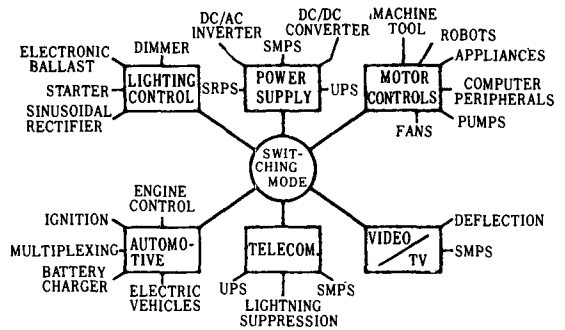


그림 4. 스위칭 기술의 응용 분야

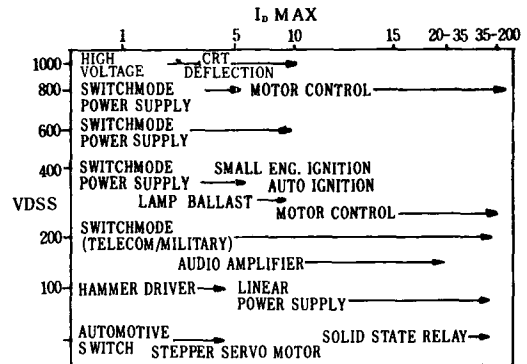


그림 5. 전력 MOS제품의 응용 매트릭스

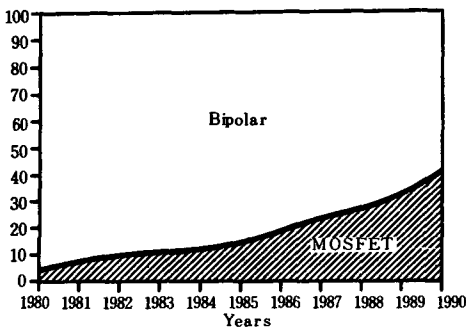


그림 2. 전력 트랜지스터의 기술분포 추세

냈다.

전세계 전력 MOSFET의 시장 규모는 1986년도의 2억 1천만불을 기준으로 할 때 향후 5년간 매년 평균 40%의 성장을 보이리라 추정하고 있다.⁽⁸⁾ 현재 전력 MOSFET 주요 생산 업체의 순위를 표 2에 나타냈다.

전력 MOSFET과 바이폴라 트랜지스터의 성능을 표 3에서 비교하였다. 전력 MOSFET은 다수 반송자 소자(majority carrier device)이기 때문에, 스위칭 속

표 2. 전력 MOSFET의 매출액 순위

(단위: 백만불)

순 위	회 사	매 출 액
1	International Rectifier	50
2	Motorola	35
3	Siliconix	30
4	Hitachi	24
5	Toshiba	21
6	Siemens	20
7	GE/RCA	18
8	Other	12
	총계	210

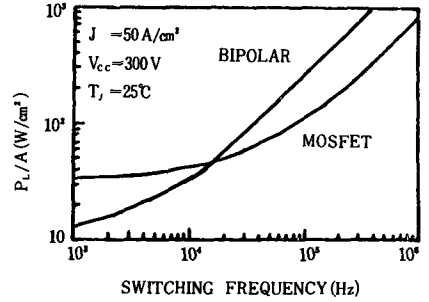


그림 6. 전력 MOS 및 바이폴라 트랜지스터의 전력 손실과 스위칭 주파수와의 관계

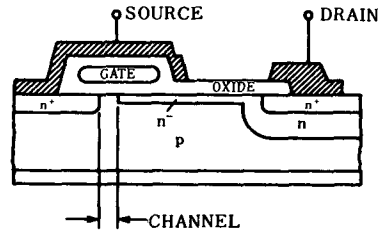
표 3. 바이폴라 전력 트랜지스터와 전력 MOSFET의 성능 비교표

	Bipolar	MOSFET
Switching Frequency	DC to 100kHz	DC to 1 MHz
Voltage Capability	High-1500V	High-1000V
On Resistance	Lowest	Higher
Ruggedness	Good	Best
Input Impedance	Low-Medium	Very High
Gain	Medium	High
Operating Temperature (max.)	200°C	150-200°C
Off Resistance	High	Highest

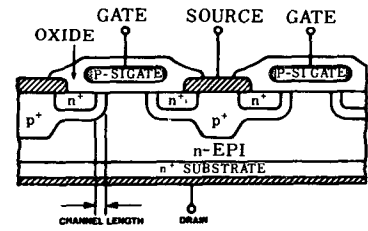
도가 빠르다. 또한 MOS 소자이기 때문에 입력 임피던스가 매우 크고, 이중 확산에 의한 short channel 구조이므로, 이득 (gain)도 크다. 반면에 바이폴라 트랜지스터에 비해 ON 저항이 큰 편이고, 최대 동작온도는 약간 낮은 편이다.

스위칭 주파수와 전력 손실의 관계를 그림 6에 나타냈다. 스위칭 주파수가 낮은 경우는 MOSFET의 전력 손실이 바이폴라에 비해 크지만, 15KHz 이상의 높은 주파수에서 스위칭시키는 경우는 MOSFET가 바이폴라에 비해 전력 손실이 작다. 근년에 바이폴라 트랜지스터도 계속 발전하고 있기 때문에, 그림 6의 cross-over 주파수 15KHz는 상당히 증가하고 있으리라 추정된다.

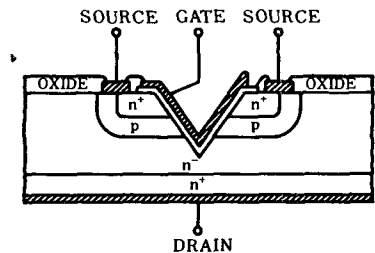
전력 MOSFET의 기본구조는 크게 두가지로 분류된다. 그림 7 (a)와 같은 수평형 DMOS (lateral double-diffused MOS)와 (b), (c)와 같은 수직형 DMOS (vertical DMOS)가 있으며 V-groove 구조인 (c)는 VMOS로 부르기도 한다. 전력 MOSFET은 전류용량과 항복 전압을 증가시키기 위하여 일반적인 MOSFET과는 다른 구조를 가지고 있다. 첫째, 바이폴라 트랜지스터의



(a) LDMOS



(b) VDMOS



(c) VMOS

그림 7. 전력 MOSFET의 단면구조

공정과 유사하게 p와 n형을 이중 확산시켜 short channel을 형성시킴으로써 전류용량을 증가시키고 있다. 이 공정은 소자의 문턱전압 (threshold voltage)이 p 영역의 표면 불순물 농도에 의하여 결정되므로 초기

에는 이를 조절하는게 어려운 과제였지만, 현재에는 이온주입(ion implantation)에 의해 해결되었다. 둘째, 채널과 n⁺ 드레인 전극사이에 불순물 농도가 낮은 n drift 영역을 형성하여 큰 드레인 전압을 인가할 수 있다는 점이다.

LDMOS^[10]는 드레인 단자가 윗면에 존재하여 VDMOS나 VMOS에 비해 집적도가 나쁘다. 따라서 개별소자로는 거의 사용되지 않고, 전력 집적회로(power IC)의 소자로서 이용되고 있다.^[11] VDMOS와 VMOS는 윗면에 소오스와 게이트 단자가 있어 집적도가 좋다. VMOS^[12]는 V-groove 지점의 전계가 신뢰도에 나쁜 영향을 줄 수 있고 채널이 (111)면에 존재하므로 Q_f(fixed oxide charge)가 큰 단점이 있다. 현재 전력 MOSFET의 대중을 이루고 있는 구조는 VDMOS^[13,14]이다.

MOSFET은 전도상태에서 어느 정도의 저항을 가지고 있는데 이 값은 주로 n⁻ 에피층의 불순물 농도와 두께에 의존한다. 높은 항복 전압을 얻으려면 n⁻ 에피층의 농도가 낮고 두께가 두꺼워야 한다. 이는 한편으로는 ON 저항을 증가시키게 되므로 ON 저항과 항복 전압 사이에 설계상의 trade-off가 존재하게 된다. MOSFET의 항복전압이 설계사양(design specification)으로 주어졌을 때, ON 저항을 최소로 하는 최적의 에피층의 비저항 ρ와 두께 W_e는 그림 8로부터 구할 수 있다.^[15] 항복 전압이 400V인 경우 에피층의 비저항은 8Ω·cm 두께는 25μm 정도됨을 알 수 있다. 한편 VDMOS 표면의 소오스 셀의 종류에 따라라도 ON 저항이 달라진다. 그림 9에 여러가지 소오스 구조와 이에 따른 칩면적의 이용 효율을 가리키는 g값을 나타냈다. 대부분의 기업

	Square on square grid	Circle on square grid	Hexagon on square grid	Square on hexagonal grid	Circle on hexagonal grid	Hexagon on hexagonal grid
Source geometry and grid						
Unit cell						
Coefficient of cellular geometries	1.0	0.8862	0.9306	1.0746	0.9523	1.0

$$* g = \lim_{a \rightarrow 0} \sqrt{\frac{\text{p-well area}}{\text{unit cell area}}}$$

그림 9. 전력 MOSFET의 여러가지 표면구조

체에서 채택하고 있는 구조는 첫번째의 “square on square grid”와 맨 마지막의 “Hexagon on hexagonal grid”로서 g값이 모두 1이다.

전력 MOSFET의 전류전압 특성을 그림 10에 나타냈다. MOSFET의 동작 영역으로는 선형 영역과 포화 영역으로 나뉘어지며, 선형 영역에서는 V_{GS}가 작아서 반송자가 최대 드리프트 속도에 도달하지 못한 영역이다.

드레인 소오스 저항 R_{DS(ON)}은 그림 11에 나타낸 바와 같이 ΔV_{GS}/ΔI_B이다. MOSFET의 ON 저항은 그림 12에 나타낸 바와 같이 채널저항, R_{ch}, 축적 저항, R_{inj} JFET 저항, R_J, 에피저항, R_{epi}의 합으로 표시된다. 100V 이하의 저전압 소자에서는 ON 저항은 주로 R_{ch}의 영향을 받고, 고전압 소자에서는 R_{epi}에 의해서 좌우된다. 그림 13은 접합온도에 따른 ON 저항의 변화를 보여주고 있다. R_{DS(ON)}의 온도계수는 양이므로 접합온도가 높아질수록 증가하게 된다. 따라서 국부적인 열점이 존재하더라도 자동적으로 전류의 양이 감소되기 때문에, 이차항복이 발생하지 않고, 병렬 연결하여 사용할 경우

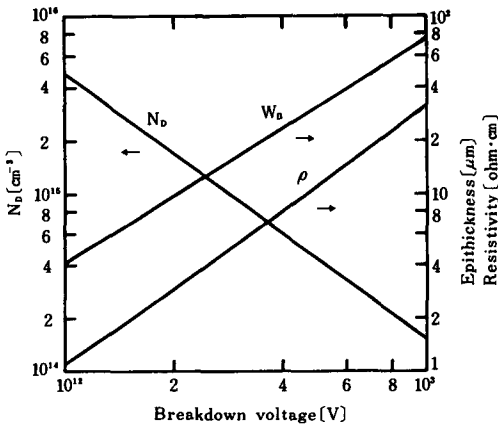


그림 8. 항복전압에 따른 최적의 에피층 농도 및 두께

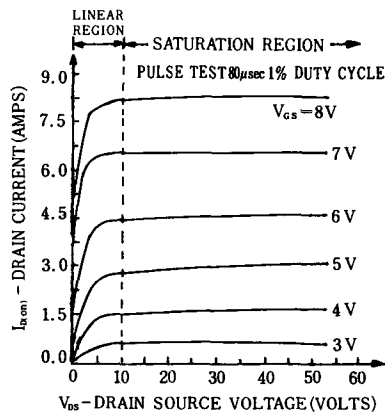


그림 10. 전력 MOSFET의 출력 I - V 특성

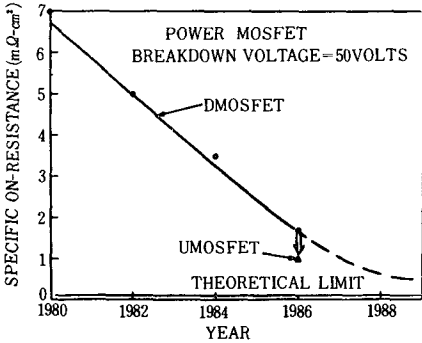


그림15. 전력 MOSFET의 ON저항의 감소추세

을 초래하게 되어 전력 MOSFET의 단점이 되고 있다. 특히 고전압 소자에서는 바이폴라 트랜지스터에 비해 상당히 높은 값(약 5 배 정도)을 갖게 되어, 500V 이상의 응용에 제한을 받고 있다.

전력 MOSFET의 출현 이후 바이폴라 트랜지스터의 낮은 ON 저항과 MOSFET의 높은 입력저항을 혼합한 이상적인 소자를 개발하고자 하는 시도가 이루어졌다. 초기에는 MOS 게이트 다이리스터 구조가^{[17],[18]} 사용되었으나, 이 소자는 latchup 현상을 보여주었고, 게이트 turn-off 능력이 없었다. 다른 시도로는 전력 MOSFET와 바이폴라 트랜지스터를 같은 칩상에 집적화시키는 것이었다. 이러한 소자는 전력 MOSFET와 바이폴라 트랜지스터를 병렬로 연결하거나, 또는 전력 MOSFET가 바이폴라 소자를 구동시키는 Darlington 구조^[19]이었다. 두가지 경우 공히 ON 저항이 전력 MOSFET와 바이폴라 트랜지스터의 중간치를 갖고 있어 고무적인 결과는 못 되었다.

IGBT(insulated gate bipolar transistor)는 1982년 12월 General Electric사^[20]와 RCA^[21]에 의해 같은 시기에 개발, 공표되었다. 이 소자는 MOS 게이트 구조의 높은 입력 임피던스를 유지하면서도 바이폴라 트랜지스터 보다 낮은 ON 저항을 보여주었다.

IGBT의 구조와 출력 I-V 특성을 그림18에 나타냈다. 소자의 제작은 p⁺ 기판을 갖는 초기 웨이퍼 위에 n⁻ 에피층을 성장시킨 후, 전력 MOSFET의 경우와 같은 DMOS 구조를 형성시킴으로써 완성된다. 그림18의 출력 특성에서 보는 바와 같이 IGBT는 순방향과 역방향으로 전류 흐름을 차단할 수 있다. MOSFET의 경우, 게이트에 양전압을 인가함으로써 turn-on이 되면, 에미터 n⁻영역은 p 베이스에 형성된 반전 채널(inversion channel)에 의해 드리프트 영역에 연결이 된다. 반면에 IGBT에서는 콜렉터 접합 J₂는 순방향이면 드리프트 영역으로 높은 농도의 정공을 주입한다. 이로 인하여 에피층의 저항이 상당히 감소한다.

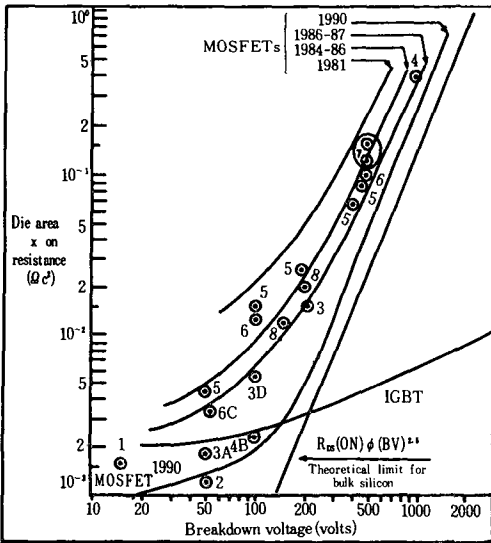


그림16. 전력 MOSFET의 ON저항 및 항복전압의 관계(점은 실제 소자의 값을 가리킨다)

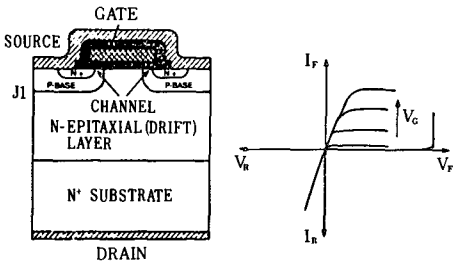


그림17. 전력 MOSFET의 구조 및 출력특성

AC 회로에 직접 사용될 수 없다. 또한 순방향으로 항복 전압을 높게 유지하기 위하여 비저항이 크고, 두께가 두꺼운 에피층을 사용하게 된다. 이것은 높은 ON 저항

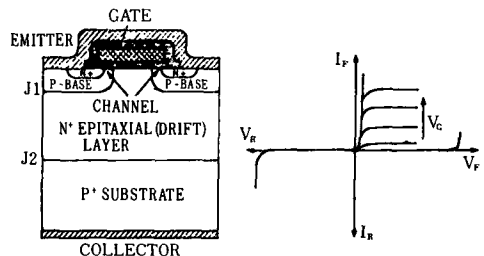


그림18. IGBT의 구조 및 출력특성

IGBT, 바이폴라 트랜지스터, 전력 MOSFET 사이의 ON 상태의 전도를 순방향 전류밀도와 순방향 전압 간의 관계로써 비교한 것을 그림19에 나타냈다. IGBT (A) 곡선을 보면 동작시 대표적인 순방향 접압 강하인 2.5V인 경우, IGBT의 전류밀도는 MOSFET의 약 20배, 바이폴라 트랜지스터의 5 배 정도가 됨을 알 수 있다. 이러한 전류밀도가 증가함에 비례하여 전력 스위칭 능력도 증가하게 된다. 그러나 IGBT의 바이폴라 전류 전도의 결과는 turn-off 속도의 감소를 야기시킨다. IGBT(A)는 turn-off시간이 15 μ sec여서 낮은 주파수 응용에서는 적당하다고 할 수 있겠으나 더 높은 주파수 응용을 위해서는 빠른 게이트 turn-off 속도를 갖는 IGBT를 제작하여야 한다. IGBT(B) 및 IGBT(C)에서는 turn-off 시간이 각각 1, 0.25 μ sec를 갖는데, turn-off 시간의 감소는 전류 밀도를 희생시켜 얻어진 것임을 알 수 있다. Turn-off 시간이 0.25 μ sec 인 경우도 IGBT의 적류 밀도는 전력 MOSFET와 바이폴라 트랜지스터에 비해 아직 우수하다. 최근에는 중성자나 전자를 조사하거나,^[23] 또는 구조를 변경함으로써^[23,24] IGBT의 스위칭 속도가 상당히 개선되었다.

이상에서 언급한 바와 같이 IGBT는 MOSFET과 바이폴라 트랜지스터의 장점을 취하고 있어 궁극적인 전

력소자(ultimate power device)^[25] 또는 꿈의 전력소자라고 불리워지고 있다. IGBT는 회사에 따라 GE에서는 IGT(insulated gate transistor),^[26] RCA에서는 COMFET(conductivity modulated FET),^[27] Motorola에서는 GEMFET(gain enhanced FET),^[28] Toshiba에서는 Bipolar-Mode FET(BMFET)^[29] 등의 여러가지 명칭이 혼용되고 있다.

IGBT는 아직 개발단계에 있는 소자이며 전력 MOSFET의 다음 세대로서 극히 중요하게 평가되고 있다. 현재 IGBT를 생산하고 있는 업체로는 GE,^[30] RCA,^[31] Motorola^[4] 등이 알려져 있다.

IV. 결 론

현재의 전력소자가 정류기, 다이리스터, 바이폴라 전력 트랜지스터라고 할 때, 미래의 전력소자로서 전력 MOSFET과 IGBT에 관하여 특징과 구조, 전기적인 특성, 시장전망 등을 간단히 살펴 보았다.

전력 MOSFET는 500V 이하의 고속 응용에서는 바이폴라 트랜지스터를 거의 대부분 대체하리라 예상되며, 500V 이상에서는 IGBT가 가장 유리하리라 생각된다. 특히 전력 MOSFET에서 ON 저항이 커져 제작을 기피해 왔던 p채널 IGBT가 좋은 특성을 갖게 됨으로 해서 n채널과 조합하여 사용하는 전력회로에도 IGBT의 활용이 확대되리라 기대된다.

나아가서는 이러한 전력 MOSFET이나 IGBT를 개별 소자로서 뿐만 아니라, 논리회로 등과 결합한 BICMOS, 전력IC, 고전압 IC, 스마트 전력 IC 등에 사용함으로써, 전력 전자제품의 소형화, 지능화, 고급화에 기여하게 될 것이다.

參 考 文 獻

- [1] M.S. Adler, et al., "The evolution of power device technology," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-31, pp.1570-1591, Nov. 1984.
- [2] "1987 U.S. market report," *Electronics*, pp.51-74, Jan. 8, 1987.
- [3] "Overseas market report," *Electronics*, pp. 65-88, Jan. 22, 1987.
- [4] F. Goodenough, "Power semiconductors; 1987 technology forecast," *Electronic Design*, pp.146-156, Jan. 8, 1987.
- [5] M.J. Declereq and J.D. Plummer, "Avalanche breakdown in high voltage D-MOS devices," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-23, pp.1-4, Jan. 1976.

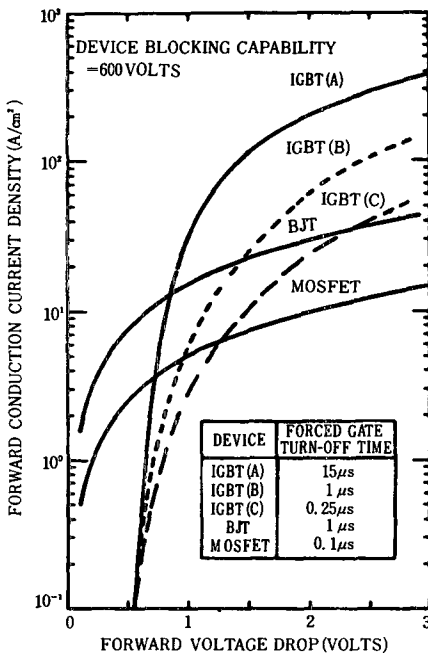


그림19. 바이폴라, MOS, IGBT의 순방향 전류밀도의 비교

- [6] R. Severns and J. Armijos, *MOSPOWER application handbook*, Siliconix Inc., 1984.
- [7] "VLSI density comes to power MOSFETS," *Electronics*, pp.81-84, July 24, 1986.
- [8] L. Waller, "The competition explodes in power MOSFETs," *Electronics*, pp.97-98, Dec. 18, 1986.
- [9] S. Colak, "Effects of drift region parameters on the static properties of power LDMOST," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-28, pp.1455-1466, 1982.
- [10] S. D. Habib, "The ALDMOST: a new power MOS transistor," *IEEE Electron Dev. Lett.*, vol. EDL-8, pp.257-259, June 1987.
- [11] B.J. Baliga, "Power integrated circuits-a brief overview," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-33, pp.1936-1939, Dec. 1986.
- [12] B. Farzan and C.A.T. Salama, "Depletion V-groove MOS(VMOS) power transistors," *Solid St. Electron.*, vol. 19, pp.297-306, 1976.
- [13] R.P. Love, et al., "A large-area power MOSFET designed for low conduction losses," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-31, pp.817-820, June 1984.
- [14] C. Hu, et al., "Optimum design of power MOSFET's," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-31, pp.1693-1700, Dec. 1984.
- [15] 김진형등, "컴퓨터를 사용한 전력 VDMOS의 설계," 전기재료, 반도체 및 CAD 학술대회 논문집, 1987년 5월.
- [16] B.J. Baliga, "Revolutionary innovations in power discrete devices," in Proc. IEDM, pp.102-104, 1986.
- [17] B.J. Baliga, "Enhancement and depletion mode vertical channel MOS gated thyristors," *Electron. Lett.*, vol. 15, pp.645-647, Sept. 1979.
- [18] J. Tihanyi, "Functional integrations of power MOS and bipolar devices," in Proc. IEDM, pp.75-78, 1980.
- [19] M.S. Adler, "A comparison between BIMOS device types," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-33, pp.286-293, Feb. 1986.
- [20] B.J. Baliga, et al., "The insulated gate rectifier (KGR): a new power switching device," in Proc. IEDM, pp. 264-265, 1982.
- [21] H.W. Becke and C.F. Wheatley, Jr., "Power MOSFET with an anode region," U.S. Patent No. 4, 364, 073, issued Dec. 14, 1982.
- [22] W.A. Strifler and B.J. Baliga, "Comparison of neutron and electron irradiation for controlling IGT switching speed," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-32, pp. 1629-1632, Sept. 1985.
- [23] P.A. Gough, et al., "Fast switching lateral insulated gate transistor," in Proc. IEDM, pp.218-221, 1986.
- [24] J.K.O. Sin, et al., "The SINFET-a Schottky injection MOS-gated power transistor," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-33, pp.1940-1947, Dec. 1986.
- [25] C.F. Wheatley and G.M. Dolny, "COMFET-the ultimate power device; a general study of power devices," *Solid State Technology*, pp.121-128, Nov. 1985.
- [26] B.J. Baliga, et al., "The insulated gate transistor: a new three-terminal MOS-controlled bipolar power devices," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-31, pp. 821-828, June 1984.
- [27] J.P. Russell, et al., "The COMFET-a new high conductance MOS-gated device," *IEEE Electron Dev. Lett.*, pp.63-65, Mar. 1983.
- [28] K. Gauen, "Power MOSFET variant excels at high load," *Electronic Design*, pp.103-110, Apr. 15, 1984.
- [29] A. Nakagawa, et al., "Safe operating area for 1200-V nonlatchup bipolar-mode MOSFET's," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-34, pp.351-355, Feb. 1987.
- [30] "Power MOS," General Electric data book
- [31] "Power MOSFETs," RCA data book *

♣ 用語解説 ♣

핀홀(Pinhole)

금속 증착막이나 절연막과 같은 막을 관통한 작은 결함 또는 작은 구멍을 말한다