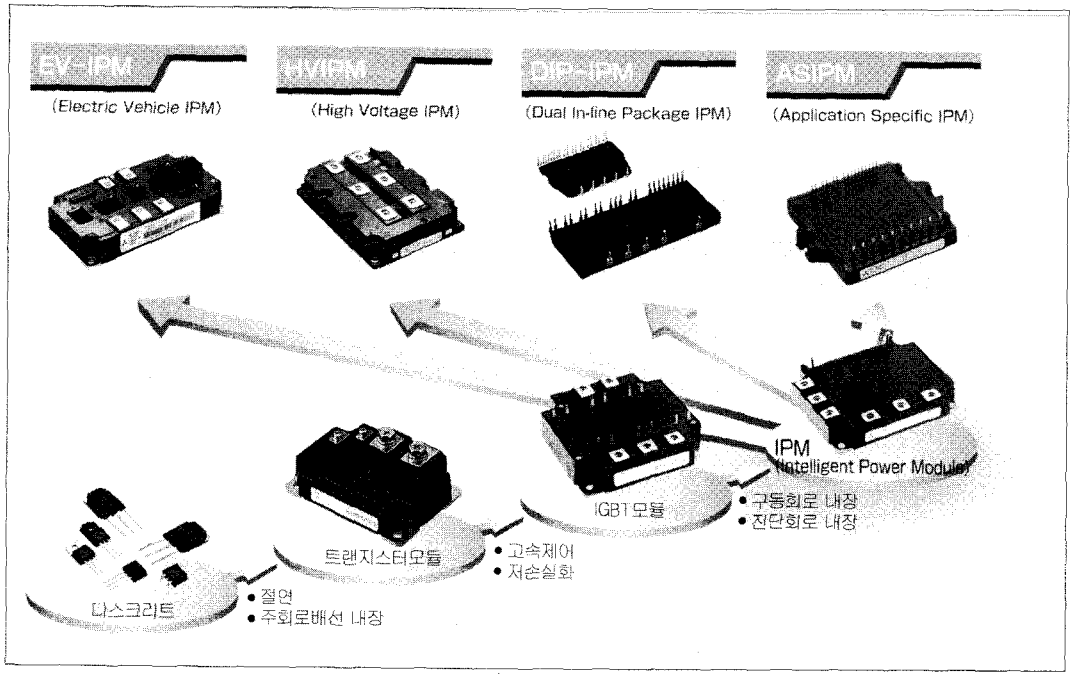
21세기를 맞이한 파워디바이스의 전개

1957년에 사이리스터가 발표된 이래 파워반도체디바이스(이하 "파워디바이스"라 한다)의 발전과 더불어 이것을 사용하여 전력변환·제어와 이를 응용한 파워일렉트로닉스 산업도 현저한 발전을 이루어 왔다. 21세기를 맞이하여 지구의 유한성을 강하게 인식하여 자원과 에너지를 고도이용하는 순환형사회에로의 전환을 도모하는 기술혁신과 IT(정보기술)를 구사한 기술보급의 움직임이 활발해지고, 파워일렉트로닉스와 그 키파트인 파워디바이스가 수행하여야 할 역할은 점점 더 중요해지고 있다. 이와 같은 배경하에서 파워디바이스는 인버터제어를 주목적으로 사이리스터, GTO(Gate Turn-off Thyristor), 바이폴라트랜지스터, MOSFET(Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor)에서 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)에로 진전되고, 그 응용분야도 가전제품에서 OA, 산업, 의료, 전기자동차, 전철, 전력에 이르는 폭넓은 분야로 확대되었다. 현재 파워디바이스를 취급하는 전력의 범위는 수W의 스위칭 전원에서 GW급의 직류송전까지 9단위까지에 이르러 광범위한 전력 제어가 가능하게 되었다. 한편 응용의 중심이 되는 IGBT는, 고속화와 저손실화 및 파괴내량의 향상을 지향한 개량을 거듭하여 제5세대제품이 나타나기 시작하였다. 또한 IGBT에 구동·보호·진단 회로 등을 넣어 모듈화한 IPM(Intelligent Power Module)이 그 편리성과 소형화를 특징으로 파워디바이스의 주역의 자리에 정착하였다. 가전·산업·자동차·전철의 각 분야에서는 시장니즈에 최적 설계된 IPM이 개발되게 되어 보다 더한 시장확대가 기대되고 있다. 또한 종래의 Si(실리콘)에 대신하는 반도체 재료로서 SiC(실리콘 카바이드 : 탄화규소)에 대한 기대가 크고 MOSFET나 SBD 등의 파워디바이스의 조기실용화에의 대처노력도 주목할 만하다.

1. 머리말

21세기는 IT(Information Technology)와 Ecology(환경)의 시대로 막을 올렸다. 물론 이들의 기술을 지탱하는 것이 SI를 중심으로 한 반도체기술임은 두말할 필요도 없으나, 파워디바이스도 이들 산업의 견인차로서 큰 몫을 차지하고 있다. IT산업은 각종 통신장치의 전원과 무정전전원(UPS), 또 멀티미디어, 휴대단말 등 IT관련 장치의 제조장치와 관련이 깊다. 한편 환경부문에서 CO_2 삭감대책으로서의 에너지절약기기, 태양광·풍력발전 등의 신에너지관련기기, 그리고 전기자동차관련기기에서 파워디바이스는 없어서는 안되는 중요한 역할을 하고 있다. 또한 EMC (Electro-Magnetic Compatibility)와 고조파전류를 억제한다는 면에서 환경문제에도 크게 관련을 맺고 있다. 이와 같이 사회의 번영을 지탱하는 기본요소인 에너지 유효이용의 결정적인 수단인 파워디바이스는 전력변환·제어기기의 고효율화를 도모하는 반도체 전력용 스위치로서의 이상(理想)을 추구하여 이론한계



〈파워모듈의 진전〉

디스크리트에서 스타트한 파워디바이스는 사용의 편리성을 중시한 파워모듈과 나아가서는 구동회로, 보호회로, 자기진단회로를 내장한 인텔리전트파워모듈(IPM)로 진화하였다. 최근에는 산업·가전·자동차·전철의 각종 용도로 최적한 특성·기능·패키지를 제공할 수 있는 각종 IPM이 실용화되어 에너지절약과 파워일렉트로닉스제품의 소형화, 고신뢰도화에의 공헌도는 크다.

에까지 육박하면서 발전을 이루어 오고 있다.

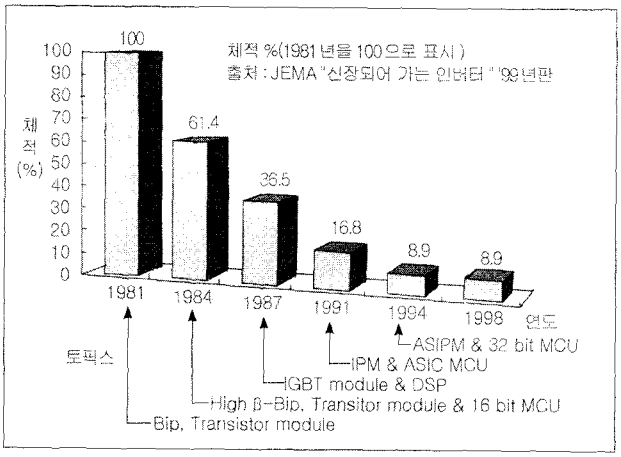
본고에서는 눈부신 진보를 보이고 있는 파워디바이스의 지금까지의 발자취를 더듬으면서 최근의 기술동향과 장래의 동향에 대하여 전망한다.

2. 파워디바이스의 눈부신 진보

가. 파워디바이스의 역사

1957년에 발표된 사이리스터는, 종래의 진공관에 대신하여 반도체가 갖는 편리성과 고내압, 대전류, 고속스위칭의 특징을 발휘하여, '70년 초두에는 정류(整流) 다이오드와 함께 파워일렉트로닉스의 주역이 되었다. '70년대에는 두 번에 걸친 오일쇼크의 영향으로 에너지절약 및 효율적 이용에 대한 니즈가 높아져, '80년대 초에는 각종 인버터장치가 파워일렉트로닉스의 견인역으로 성장하였다. 이것을 계기로 파워디바이스도 종래의 사이리스터 대신 자기소호(自己消弧)기능을 갖는 바이폴라 트랜지스터로 특히 배선의 간소화와 절연을 도모할 수 있는 파워트랜지스터 모듈로 이행하며 급속하게 보급되었다.

나아가 '90년대에 들어서면서, 인버터장치의 소형화·고성능화·고기능화를 지향하게 되고 그 주역의 자리는 IGBT모듈 등의 MOS계 파워모듈과 IGBT모듈에 구동회로·보호회로 및 자기진단 회로를 내장한 IPM으로 옮겨졌다. 이들의 파워디바이스를 이용하여 '90년대 후반이 되면서 인버터의 응용이 더욱 확대되어 종래의 범용인버터, 서버, UPS 등의 산업용도에 멈추지 않고 에어컨·냉장고·세탁기 등의 가정전기제품, 전기자동차, 고속전철 전기기관차 등의 전철시장에까지 넓혀졌다. 이와 같은 시



〈그림 1〉 인버터의 변천

장확대와 더불어 시장마다의 니즈에 세세하게 대응하는 전용 IPM이 등장하여 파워디바이스 제품의 다양화가 점점 더 진보하였다. 그림 1에 범용 인버터의 소형화니즈의 역사와 그에 공헌한 파워디바이스의 역사를 나타내었다.

나. 파워모듈 技術

최근의 파워디바이스를 논함에 앞서 먼저 파워모듈에 대하여 알아본다. 파워모듈이란 복수 개(여러 개)의 파워반도체 칩을 용도와 목적에 따라 결선하여 하나의 패키지에 넣은 복합반도체를 말한다. 내장하는 주요 칩에 따라 사이리스터 모듈, 다이오드 모듈, 트랜지스터 모듈, IGBT 모듈 등이 있다. 또한 IGBT 모듈에 구동회로·보호회로·자기진단회로를 내장한 IPM도 파워모듈로 분류된다. 파워모듈은 '78년경부터 실용화가 시작되어 현재 3A에서 1,800A까지 광범위하게 제품화되어 있다. 이와 같이 파워모듈은 파워디바이스를 칩상태로 용도에 맞는 회로에 배선하였으며 절연구조 채용에 의한 장치 조립에서의 성력화(省力化)와 소형화에 공헌하게 됨으로써 파워디바이스의 대명사라고 불리울 단계로까지 성장하였다.

다. MOS계 파워디바이스 技術

(1) MOSFET

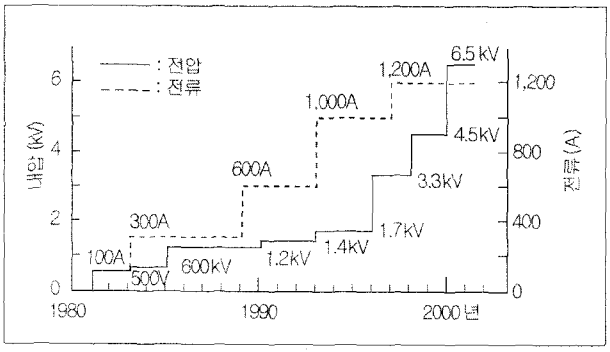
파워 MOSFET는 스위칭소자에 필요한 고내압, 대전류, 저손실, 고속의 각 기능을 겸비한 소자로 개발되었다. 파워MOSFET는 기존의 바이폴라 트랜지스터에 비하여 구동회로의 간소화를 기할 수 있는 전압구동형이며 수 100kHz에서의 고속 스위칭동작에서도 손실이 적어 세트의 소형화·고효율화에 우수하다는 점에서 최근 바이폴라 트랜지스터 대신 그 응용분야를 확대하고 있다. 특히 퍼스컴이나 휴대전화의 보급에 따라 저내압·저On저항의 파워MOSFET의 공헌이 크다. 파워MOSFET의 저손실화기술로서는 LSI의 미세화(微細化)기술의 응용과 트렌치케이트구조의 채용을 들 수 있다. 또 '리서프' 기술을 활용한 Cool MOS과 '수퍼정크션' MOSFET 등도 개발되게 되어 종래의 디바이스구조의 특성한계를 깨는 대폭적인 개선이 실현되고 있다.

(2) IGBT

IGBT는 그 이름이 나타내듯이 파워MOSFET가 갖는 고속스위칭성능과 전압구동성능, 그리고 바이폴라 트랜지스터가 갖는 대전력성능을 겸비한 파워디바이스이다. 따라서 IGBT에 대한 시장의 요구는 대전력(고내압, 대전류)과 저손실 성능이다.

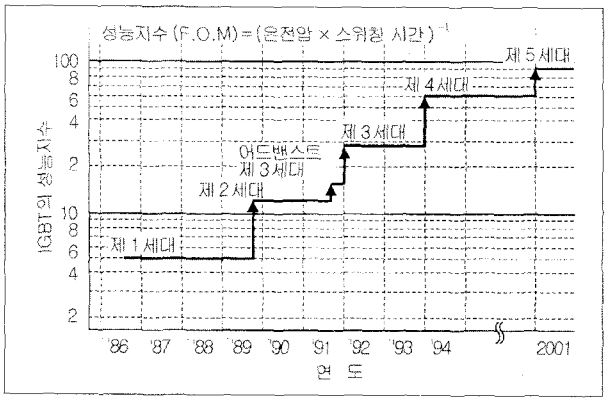
그림 2에 IGBT모듈의 대용량화의 변천을 나타낸다. 현재까지 4.5kV까지의 고내압화와 1,200A까지의 대전류화를 실현하고 있으며, 이들의 병렬접속으로 종래의 바이폴라 트랜지스터와 GTO의 정격범위를 포함할 수 있게 되었기 때문에 공업용인버터와 전철시장에까지 채용되게 되었다.

한편 그림 3에 IGBT의 저손실화의 변천을 나타낸다. 보통 IGBT의 손실특성의 우열은 인버터 동작을 전제로 하기 때문에 포화전압과 턴오프 하강시간과의 트레이드



〈그림 2〉 IGBT 모듈의 대용량화 변천

오프의 관계로 표시된다. IGBT의 저손실화기술은 LSI 기술을 유용(流用)한 실리콘 표면의 미세가공(微細加工)기술과 파워디바이스 특유의 벌크 내의 캐리어밀도분포 제어기술과의 양면에서 개선이 이루어져 왔다. 지금까지 세대교체가 거듭되어 제4세대 제품이 실용화되어 있다. 또 현재의 IGBT에서는 저손실·저코스트를 실현하기 위하여 1㎛의 디자인룰에 기초한 미세가공과 트렌치 구조가 채용되고 있다. 또한 저소음 인버터구동에 필요한 15kHz 이상의 고속스위칭 특성이 요구되는 한편 EMC 대책으로서 고속스위칭특성과 상반되는 저 di/dt, dv/dt 특성이 요구되고 있어, 이것들의 최적화도 중요한 기술요소가 되고 있다.



〈그림 3〉 IGBT의 저손실화 변천

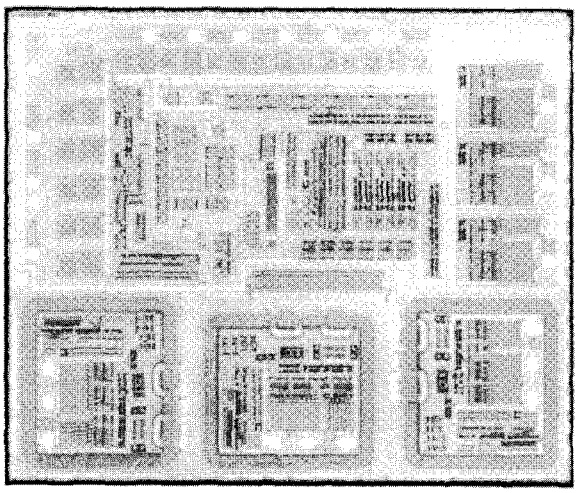
라. 인텔리전트化 技術

(1) IPM

IPM은 전술한 바와 같이 IGBT 모듈에 구동회로·보호회로·자기진단회로를 내장한 파워모듈로, 인버터장치와 서보앰프, UPS 등의 장치의 소형화 조립에 의한 성력화(省力化), 구매의 간소화에도 유효하고, 또한 파워칩과 제어용 IC 및 패키지의 최적화로 파워디바이스의 신뢰성을 향상시켜, 마이크로컴퓨터 등의 제어측에서 소프트웨어와의 정합(整合)을 취함으로써 파손이 아주 어려운 파워디바이스가 되었다. 현재 에어컨·냉장고·세탁기 등의 가전인버터용으로는 3A~25A/600V의 트랜스퍼몰드의 DIP-IPM(Dual Inline Package)이 다수 사용되고 있으며 산업용으로는 600V/1200V 내압으로 4~800A의 IPM이 채용되고 있다. 50A 이하의 영역에서는 제어용IC에 후술하는 고내압IC(High Voltage Integrated Circuit: HVIC)를 채용하여 마이크로컴퓨터와의 인터페이스회로의 절연용포토커플러의 생략과 인버터회로의 제어용전원의 단전원화(單電源化)를 도모한 ASIPM(Application Specific Intelligent Power Module)도 실용화되어 있다. 또한 IPM의 고신뢰성을 활용하여 하이브리드 전기자동차와 고속전철의 인버터장치에도 IPM이 채용되게 되었다.

(2) HVIC

3상 인버터회로의 제어회로에서는 상(上)암과 하(下)암과의 절연이 필요하며, IC 내부에 고압의 절연분리기능이 있는 IC를 HVIC라 한다. 이 절연분리에는 AC 200V계의 인버터회로인 경우 600V, AC 400V계에서는 1200V라는 고내압이 필요하다. 절연분리 방법으로서는 Pn접합분리와 유전체분리의 2종류가 있다. Pn접합분리는 통상의 IC와 LSI를 제작하는 것과 같은 방식으로, 분리용의 P^+층으로 형성하는 섬(島)속에 소자나 회로를 구성한다. 여기서는 고내압으로 한 경우에 공핍층(空乏



〈그림 4〉 1,200V 접합분리 HVIC

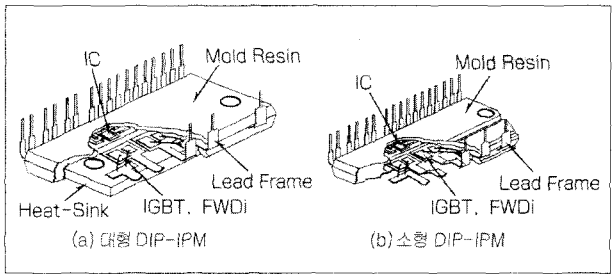
層. Depletion Layer)의 넓이를 억제하기 위하여 리서프(Resurf) 구조의 채용 등의 연구가 필요하거나 기생(寄生)사이리스터에 의한 래치업(Latch up)을 경감하는 설계에도 연구가 필요하게 된다.

한편 유전체 분리는 각 소자와 회로를 구성하는 단결정(單結晶)의 섬(島)을 유전체(실리콘 酸化膜)로 둘러싸는 방식으로서 IC의 고집적화와 고성능화에 우수하다. HVIC는 IPM의 제어용뿐만 아니라 소형모터제어와 인버터 형광등, PDP(Plasma Display Panel) 등에도 응용분야를 넓혀가고 있다. 그림 4에 최고 내압인 1,200V 접합분리 HVIC의 예를 나타낸다.

마. 패키지 技術

최근의 파워모듈의 패키지는 실리콘칩을 외부환경으로부터 보호한다는 종래의 생각에서 크게 바뀌었다. 즉 패키지가 갖는 특성을 적극적으로 활용하려고 하는 움직임으로 특히 파워모듈 자신과 응용장치의 생산성향상과 파워모듈의 소형화가 요구되고 있다. 이러한 동향속에서 패키지의 개발항목으로서, 열저항과 절연의 양립·신뢰성·구조 및 코스트의 각 관점에서 용도에 따른 개발이 추진되고 있다.

산업용의 범용 IGBT모듈에서는 고속의 IGBT 동작에 대응하고 턴오프시의 서지전압을 억제하는 저(低)인덕턴스 내부배선의 모듈이 정착되었다. 또 저열저항 절연기판으로 종래의 알루미나(Al_2O_3)에 대신하여 질화(窒化) 알루미늄(AlN)이 대용량모듈에 사용되고 있다. 절연기판의 접합방법도 DBC(Direct Bond Copper) 기술이 채용되거나 50A 이하의 모듈은 저열저항 수지를 절연재료로 사용한 금속기판도 채용되고 있다. 민생용시장에서의 저가격 요구에 응하여 IC의 조립기술을 사용한 트랜스퍼몰드구조의 모듈(DIP-IPM)이 보급되었다. 그림 5에 DIP-IPM의 구조를 나타낸다. 자동차나 전철 등 고신뢰성이 요구되는 용도에는 실리콘과 팽창계수가 근사한 SiCAl과 CuMo 등의 기판재료가 사용된다. 환경보호의 관점에서 연(鉛)프리납땜의 검토도 추진되고 있다.



〈그림 5〉 DIP-IPM의 구조도

바. 大電力化 技術

파워디바이스의 대전력화는 지금까지 사이리스터와 GTO 등의 고내압화·대전력화에의 도전이었다. 이미 직류송전용 사이리스터밸브에는 6인치 실리콘웨이퍼로서 8kV/3.5kA의 광(光)트리거 사이리스터가 채용되고 있다. 같은 지름의 GTO에서는 6kV/6kA의 정격을 얻을 수 있어 철강용 등의 공업용 인버터에 사용되고 있었

는데, 최근에는 GTO의 약점을 해결하여 고속으로 스너버레스화를 실현할 수 있는 새로운 대전력디바이스로서 GCT(Gate Commutated Turn-off Thyristor)가 등장하였다. 한편 IGBT의 대전력화도 진전되어 4.5kV/900A와 3.3kV/1200A급의 고내압 IGBT(High Voltage IGBT : HVIGBT) 모듈과 고내압IPM (High Voltage IPM: HVIPM) 및 압접형 IGBT도 실용화되어 있다. 또한 6.5kV의 IGBT 개발도 발표되어 이들의 병렬접속으로 GTO와 GCT가 자랑하는 고전력 영역에도 적용단계에 있으며 이 분야에서도 각종 디바이스기술이 주역의 자리를 다투고 있다.

3. 파워디바이스의 과제와 장래전망

앞으로 사회환경의 변화에 따라 파워일렉트로닉스기기는 더욱더 장치의 코스트저감, 저손실화의 방향으로 나아가면서 응용분야가 확대되어 갈 것으로 생각된다. 또한 정현파의 파형에 보다 가까워진 멀티레벨 인버터와 부하측과 전원측의 쌍방향으로 전력을 변환할 수 있는 매트릭스 컨버터, 기존의 하드스위칭에 대신하여 소프트스위칭에 의한 고주파화 등의 신기술에의 도전이 기대된다. 따라서 파워디바이스도 이들의 움직임에 대한 대응이 차후의 필수과제가 된다.

가. 低로스化 技術革新

MOS계 파워디바이스의 사명 중의 하나는 저손실화(低損失化)에의 끊임없는 도전이다. 이에 대하여 유닛셀의 고집적화기술과 종(縱)방향의 캐리어분포 제어기술 및 실리콘의 박형화(薄型化)기술의 어프로치가 진전되고 있다. 유닛셀의 고집적화에서는 LSI의 미세화 가공기술과 함께 진전되어 저압MOSFET에서 0.35~0.25μm의 디자인룰에의 도전이 시작되고 있다. 또 트렌치형 셀구조와 리서프(Resurf)기술을 응용한 수퍼정크션구조의 채용에 의한 저손실화도 기대된다. 종방향의 캐리어분포 제어기술을 응용한 CSTBT(Carrier Stored Trench-Gate Bipolar Transistor)와 IEGT(Injection Enhanced Insulated Gate Bipolar Transistor)는 저손실화를 겨냥한 새로운 소자구조로서 주목된다. 동사에서는 특히 저손실화에서 유리한 CSTBT를 차세대 IGBT로서 자리매김하여 개발을 추진하고 있다. 실리콘의 박형화기술은 1200V 이상의 NPT(Non Punch Through) IGBT에서 채용된 것을 시작으로 개선이 이루어지고 있다. 1200V의 IGBT에서는 신NPT기술과 전술한 CSTBT를 융합하여 1200V의 PT트렌치 IGBT와 마찬가지의 포화(飽和)전압을 얻을 수 있게 되었다. 또 환류(還流)다이오드에 대해서도 EMC노이즈 저감을 위해 리커버리특성 개선이 과제가 된다. 이 대책으로서 헬륨(He)에 의한 라이프타임 제어기술 등이 기대된다.

나. 패키지 技術革新

파워칩의 혁신에 따라 파워디바이스 패키지도 파워칩의 특성을 충분히 낼 수 있는 기술혁신이 요구되고 있다. 우선 파워칩의 저On저항화에 따른 과제로서 패키지의 배선임피던스의 저감이 있다. 현재 알미늄선의 증가와 선을 굵게 하는 등의 대응이 취해지고 있으나 앞으로는 와이어레스접합 등의 기술혁신이 요망된다. 또 IGBT와 MOSFET 등 칩의 고속화에 따른 스위칭시의 서지전압 억제와 이리 저리 끌고 다닌 배선에 기인하는 과형진동대책으로서의 기술진보가 요구되어 전자계(電磁界)해석 시뮬레이션을 활용한 패키지 개발이 적극적으로 추진되고 있다. 파워모듈의 패키지에서 가장 중요한 기술과제로서 열저항의 저감과 절연성능의 트레이드오프의 개선이 있다. 지금까지 질화(窒化)알미늄 DBC기판, 금속기판의 열저항 개선이 이루어지고 있는데, 절연기판의 보다 더한 성능 향상이 기대되고 있다. 소용량영역의 모듈로서 트랜스퍼몰드의 DIP-IPM이 가전(家電)인버터에 보급

되고 있으나 생산성 향상을 위해 현재의 3~25A의 전류 영역을 더욱 확대한 기종 전개가 요망되고 있다.

다. 시스템의 潮流

파워디바이스는 종래의 디스크리드에서 파워모듈, IPM으로 이행되고, 나아가서는 HVIC를 탑재한 ASIPM과 DIP-IPM에로 시스템화로의 지향을 강화하고 있다. 이에 대한 배경으로는 ① 파워칩을 효율적으로 사용하는 것, ② 콤팩트하게 장치를 만드는 것, ③ 고전압·대전류의 환경하에서도 파손되지 않는 등의 시장니즈에 따른 것으로, 보다 더 이 조류를 추진하기 위해서는 LSI의 기술을 활용한 시스템화를 추진할 필요가 있다. 그 대응으로서 파워칩측에서는 각종 검출·보호회로의 내장이 과제가 된다. 현재로서는 IPM에 과전류나 단락전류를 검출하기 위한 전류센서와 파워디바이스의 칩온도를 검출하기 위한 온도센서를 내장할 수 있도록 되어 있으나, 장래를 위해서는 과전압·과전류·온도에 대한 보호회로와 통신기능이 있는 파워칩의 개발을 들 수 있다. 한편 제어측에서는 LSI의 집적화기술을 결집하여 CPU와 MCU 등을 포함하는 보다 고도의 제어시스템 전원 및 센서의 내장 등 니즈의 다양화에 대응하는 기술적인 과제가 있다.

라. 새로운 半導體材料 디바이스에의 기대

이미 기술한 바와 같이 기존의 Si(실리콘)를 사용한 파워디바이스에서는 저손실·고속동작·고온동작에서 물리적 한계에 육박하고 있어 파워디바이스의 보다 더한 비약을 위해서는 반도체재료의 큰 발전이 필요하다. 최근, Si에 대신하는 반도체재료로서 SiC나 GaN 등 와이드밴드 갭 반도체에 대한 뜨거운 기대가 모아지고 있다. 특히 SiC는 Si에 비하여 절연파괴강도 약 10배, 포화전자(飽和電子)속도 약 2배, 열전도도 약 3배의 우수한 물성치(物性値)를 가지고 있어, 옛부터 주목되고 있었음에도 불구하고 고품질의 단결정을 얻을 수 없었으므로 파워디바이스에의 응용이 크게 늦어지게 되었다. 최근 결정성장(結晶成長)기술과 반도체프로세스기술의 현저한 진전으로 6H-SiC, 4H-SiC로 2인치의 웨이퍼가 시판되어, 3C-SiC의 6인치 웨이퍼가 개발되게 되었다. SiC는 빌드인전압이 약 2.5V로 높기 때문에 바이폴라디바이스에는 적합하지 않아 MOSFET 등의 유니폴라디바이스부터 개발이 시작되고 있다. 동사도 NEDO 프로젝트에 참가하여 SiC-MOSFET의 개발을 추진하고 있다. SiC를 사용한 파워디바이스에의 기대로서는 고내압으로 저손실이 요구되어, 일반적으로는 Si와의 비교를 Baliga's Figure of Merit(BFOM: $\varepsilon\mu E_b^3$)로 표시되며 약 620배의 성능을 얻을 수가 있다. 이밖에 SiC는 고온에서의 동작범위가 Si에 비하여 대폭으로 확대되기 때문에 예를 들면 자동차에의 응용에서는 엔진룸에서의 냉각계가 현저하게 간소화되어 스페이스효율이 비약적으로 향상되는 등 큰 꿈이 부풀어오른다.

4. 맺음말

21세기에 들어 지구환경보호에 파워일렉트로닉스가 더욱더 중요한 역할을 수행한다. 파워디바이스는 이것을 리드함으로써 대전력화·고속화·저손실화·시스템화가 한층더 진전되고 있다. 또한 시장니즈의 다양화에 따라 응용제품에 최적한 성능, 시스템, 패키지를 갖춘 파워디바이스가 요구되게 된다. 이들의 요구에 응하기 위하여 파워디바이스도 다방면에서의 연구개발이 진전되고 있어 보다 더한 발전이 기대된다. ㅈ

이 원고는 일본 三菱電機技報에서 번역, 전재한 것입니다. 본고의 저작권은 三菱電機(株)에 있고 번역책임은 대한전기협회에 있습니다.