

# IGBT 진화, 스위치 모드 전력 변환 향상

IGBT 기술이 발전함에 따라, 디바이스 설계자는 손실을 감소시키고 더욱 높은 동작 주파수를 실현시키는 스위칭 성능을 향상시키는 데 우선을 두고 있다. 온 상태(on-state) 성능에서 추가적인 향상이 달성되고 있으며, 점점 다양해 지고 있는 애플리케이션에서 IGBT의 선택의 선호되고 있다.

글 | 셋아브라트 로드(Satyavrat Laud), 애플리케이션 엔지니어, 인터내셔널 렉티파이어

**IGBT** (Insulated Gate Bipolar Transistor)는 높은 브레이크다운 전압을 갖춘 디바이스를 위해 높은 온-저항처럼 MOSFET 한계를 발생시키지 않고, 파워MOSFET에서 편리한 전압 제어 스위칭을 가능하게 한다. 따라서, IGBT는 특히 500V 이상으로 정격된 디바이스를 요구하는 전력 스위칭 애플리케이션에서 MOSFET을 대체해왔다. IGBT 기술이 발전함에 따라, 디바이스 설계자는 손실을 감소시키고 더욱 높은 동작 주파수를 실현시키는 스위칭 성능을 향상시키는데 우선을 두고 있다. 온 상태(On-State) 성능에서 추가적인 향상이 달성되고 있으며, 점점 다양해 지고 있는 애플리케이션에서 IGBT의 선택의 선호되고 있다.

## IGBT 기술 및 동작

IGBT는 MOSFET과 동일한 방식으로 전압 신호를 사용해 켜거나 끌 수 있는 PNP 바이폴라 트랜지스터로 여겨질 수 있다. 이를 통해 설계자는 바이폴라 트랜지스터로 달성될 수 있는 뛰어난 온-상태 성능과 더욱 높은 정격 전류를 이용할 수 있으며 MOSFET의 간단한 게

이트-드라이브 정렬에서 장점을 얻을 수도 있다.

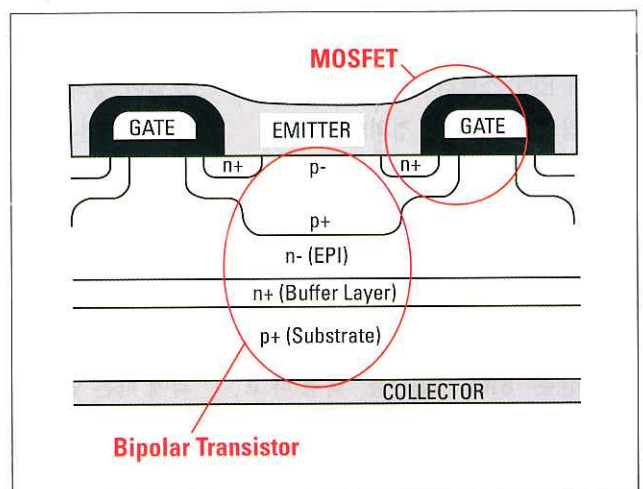
전기 램프 밸러스트(Electronic Lamp Ballast)와 같은 전력 변환 시스템에서, 낮은 전력에서 중간 전력 모터 드라이브, 용접 장비(Welding Equipment)를 위한 인버터, UPS(Uninterruptible Power Supply), SMPS(Switch Mode Power Supply), IGBT 등은 스위칭의 우수한 요소들로 자리잡고 있다.

그림 1은 IGBT의 실리콘 구조를 보여준다. 가장 간단한 조건에서, 이것은 N-채널 MOSFET으로 제어되는 PNP 바이폴라 트랜지스터로 나타날 수 있다. IR은 최근 특허 받은 디플리션-스톱(Depletion-Stop) 트랜지 게이트 기술을 이용한 IGBT의 범위로 제공하고 있다. 이러한 디바이스들은 스위칭 손실과 도통 손실 간의 최적의 트레이드 오프를 달성하며, PT(Punch Through) 및 NPT

(Non Punch Through) 디바이스와 비교해 더욱 높은 수준의 성능을 제공한다. 현재 시장에 출시된 대부분의 IGBT는 PT 디바이스들이다. 그러나, IGBT 기술 디바이스 3가지의 모든 유형들을 이용할 수 있으며, 설계자가 주어진 애플리케이션을 위해 최상의 디바이스를 선택할 수 있다.

IGBT는 소수의 캐리어 디바이스로 분류된다. IGBT는 다수의 캐리어 디바이스인 MOSFET과 다르다. N-채널 파워 MOSFET의 경우에서, 전류 흐름은 전자 때문이다. IGBT의 경우, 전자 캐리어, 전자 및 홀 모두는 디바이스를 통해 전류 흐

그림 1



름에서 중요한 역할을 한다. IGBT의 턴-온 및 턴-오프 매커니즘은 일반적인 N-채널, PT 디바이스와 관련해 다음과 같이 이해될 수 있다.

- 턴-온(Turn-On): 콜렉터(Collector)에서 포지티브 전압이 있을 때, 에미터의 관점으로, 임계값 미만의 에미터 바이어스 전압에 대한 게이트로, 디바이스는 콜렉터에서 에미터(소량의 누설 전류를 제외)까지 전류가 흐르지 않아 꺼진다. 포지티브 바이어스는 게이트에 적용되며, 에미터의 관점에서, 전자는 게이트 미만의 P+영역에 부착된다. 이 바이어스 전압은 디바이스를 위해 임계값 레벨을 초과할 때, 충분한 전자는 게이트 영역 아래에서 나타나며, N+ 영역(에미터 및 게이트 아래) 및 게이트 아래의 N-EPI 영역 사이에서 N-채널을 구축한다. 이것은 전자가 구축된 N-채널을 통해 에미터 아래의 N+영역에서 N-epi 영역으로 흐를 수 있게 한다. 이 전기 흐름은 PNP 바이폴라(P+ 기판, N-epi 영역, 에미터 이하의 P+ 영역) 기반에서 멀리 떨어진 기존의 전류 흐름을 암시한다. 이것은 PNP 바이폴라에서 커지며, 컬렉터 터미널에서 에미터 터미널에 이르는 전류 흐름을 구축시킨다. 또한, 이 때, P+기판과 N+버퍼 레이어 간의 정합 다이오드는 순방향 바이어스 되며, 이때 적어도 0.7V 될 때 혹은 정합에 걸쳐 있을 때이다. 전자가 N-epi 레이어(PNP 트랜지스터의 기반)에 흐르고 순방향 바이어스 다이오드(P+ 기판~N-epi 레이어)는 P+기판에서 N-epi 레이어에서 정공의 주입 현상을 발생시킨다. IGBT의 컬렉터에서 포지티브 전압이 증가할 때, 정공 주입 비율도 N-epi 레이어에서 정공의 농도가 백

그라운드 도핑 레벨을 초과할 때까지 증가한다. 실제로, N-epi 레이어는 고유의 음성을 잃어버리기 시작한다. 주입된 정공 밀도가 더욱 증가할 때, N-epi에서 전하 중성은 정공과 전자의 농도를 동일하게 할 것을 요구한다. 그러나, 이러한 농도가 동일하게 된다고 하더라도, 초기 백그라운드 레벨 보다 더욱 높다. 이것은 N-epi 레이어의 저항을 확실히 감소시켜 준다.

N-epi 레이어가 가장 큰 저항의 레이어이기 때문에, 이 과정은 디바이스의 전도성을 효과적으로 변조시킨다. 이 '전도성 변조(Conductivity Modulation)'는 MOSFET과 비교해 IGBT의 우수한 온-상태 성능의 핵심이다. 전도성 변조는 MOSFET의 비교 가능한 다이 크기와 비교해 IGBT의 온-상태 전압 강하를 급격히 감소시키며, 동작 온도에 대한 의존도와 정격 전압을 최소화시킨다(MOSFET의  $R_{ds(on)}$ 이 온도에 매우 의존적이기 때문이다).

- 턴 오프(Turn Off): 디바이스를 턴-오프시키기 위해, 게이트 터미널은 에미터 터미널에 단락된다. 에미터 전압에 대한 게이트  $V_{ge}$ 는 제로 볼트(최대 제한 내에서 혹은 네거티브)이다. N-채널(역전층(Inversion Layer)으로 불림)은 더 이상 유지될 수 없으며, N-epi 레이어에 대한 전자 공급은 중단된다. 이것은 디바이스가 공정을 턴-오프 하는 것을 시작시킨다. 그러나, 턴 오프는 N-epi 영역에 주입된 하이 레벨 소수 캐리어(정공)가 재결합으로 중성화되면 완성될 수 있다. 이것은 상대적으로 MOSFET을 위한 더욱 느린 턴 오프 시간의 결과를 제공한다(이것은 재결합되는 소수 캐리어를 갖지 않는다).

## IGBT의 다른 주요 기능

- IGBT는 고전류에서 더욱 더 낮은 도통 손실을 제공한다. IGBT의 사용 가능한 전류 밀도는 파워 MOSFET보다 2배에서 3배 더 높다. 이것은 파워 MOSFET과 비교해 동일한 전류를 위한 소형 다이를 사용할 수 있게 한다. 따라서 비용 절감을 이룰 수 있다.
- 단일 IGBT는 병렬 모드에서 사용되는 다중 MOSFET을 대체할 수 있으며 혹은 오늘날 사용 중인 대형급 단일 파워 MOSFET을 대체할 수 있어, BOM(Bill Of Materials)에서 추가적인 절감을 이룰 수 있다.
- IGBT와 파워 MOSFET 간의 중요한 차이점은 IGBT 구조는 기생 역 다이오드를 포함하고 있지 않다는 점이다. 인버터 애플리케이션에서, 외부 고속 역 다이오드는 컬렉터와 에미터(에미터에서 양극, 컬렉터에서 음극)에 걸쳐 제공된다. 일반적으로 선택된 다이오드는 MOSFET 바디 다이오드보다 훨씬 더 빠르며, 스위칭 손실의 상당한 감소의 결과를 초래할 수 있다(다이오드 역 복구 때문). 또한, 이러한 인버터 애플리케이션에서, 설계자는 파워 MOSFET에서 필수적인 다이오드와 비교해 가장 가능한 역 복구 특성을 제공하는 외부 다이오드를 선택할 수 있는 유연성을 갖는다. IGBT와 Ultra Fast Soft Recovery 다이오드로 구성된 Co-Packaged 디바이스를 사용할 수 있는 옵션이 있다.
- 온도 의존성은 IGBT에서 최소이지만, 파워 MOSFET에서 매우 크다.



## MOSFET 슬롯에서 성능 향상

조명 밸러스트 애플리케이션에서, 600V IGBT는 점점 보편화되고 있으며, 복구 다이오드와 함께 Co-패키지 되고 있다. 조명 애플리케이션 공간에서 25kHz ~ 35kHz의 일반적인 스위칭 주파수는 최근 IGBT 기술을 사용해 달성될 수 있는 최대 스위칭 주파수 내에서 잘 맞다. **그림 2**는 IGBT가 하프-브리지 구동형 오실레이터에서 편리한 MOSFET 대체 제품을 어떻게 제공하고 있는가를 보여준다. 이것은 현대의 전기 램프 밸러스트 회로를 위해 공통적으로 사용되는 토폴로지이다.

외부 고속 역 다이오드로 사용될 때 IGBT는 보통의 MOSFET의 바디 다이오드에서 발생하는 스위칭 손실을 제거하는 덕분에 저전력 모터 드라이브 애플리케이션에서 더욱 낮은 스위칭 손실을 보여준다(MOSFET이 사용될 경우). 3상 인버터 드라이브에서, 바디 다이오드의 효과는 MOSFET으로 발생하는 전체 손실의 2배가 될 수 있다. 따라서, 요구되는 히트싱크 양이 증가되고 더 높은 비용이 고객에게 제시된다. 스위칭 손실 이외에, 바디 다이오드는 EMI 문제를 발생시키기도 한다. 이 문제를 취소할 수 있는

스너버(Snubber) 네트워크는 BOM과 어셈블리 비용을 더욱 증가시킨다. 외장형 다이오드와 함께 IGBT는 이러한 문제를 성공적으로 제거시킨다.

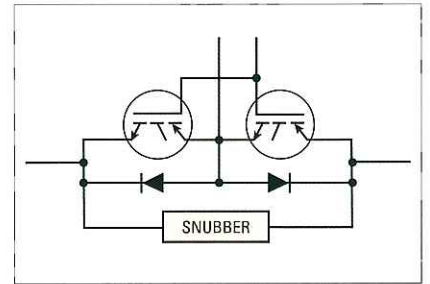
IGBT는 희망하는 출력을 달성하는 인버터 회로를 구현하는 '인버터 웰더(Inverter Welder)'에서 MOSFET을 대체한다. IGBT 제품들은 소프트 혹은 공진형 스위칭을 이용하는 풀-브리지 인버터가 사용되는 애플리케이션에서 특히 귀중하다. 소프트 스위칭은 발생하는 스위칭 손실을 더욱 낮춰주며, 높은 스위칭 주파수에서 동작하는 고속 IGBT 이용을 가능하게 해 전체 인버터 효율성을 향상시킨다.

다른 애플리케이션 공간에서, IGBT는 모든 크기의 사무실 컴퓨터 시스템을 보호할 수 있는 저가형 UPS(Uninterruptible Power Supplies)에 대한 요구를 만족시킬 수 있다. 모든 UPS 토폴로지는 필수적인 AC 라인 출력에 DC 배터리 전원으로 변환될 수 있는 인버터 단을 필요로 하며 MOSFET 혹은 IGBT 모두가 사용될 수 있다. IGBT는 브리지 타입의 UPS 인버터 토폴로지에서 사용할 수 있도록 스위칭 디바이스에 대해 선호되고 있는 선택이다. 이 때 설계자는 스위치로 안티-병렬로 사용되는 최적의 역 복구 다

이오드를 선택할 수 있기 때문이다. 역 복구 다이오드의 역 비율은 인버터가 동작할 수 있는 속도를 결정한다. 따라서, MOSFET으로 설계할 때 이용할 수 없는 다이오드를 최적화하는 자유는 UPS의 성능에 대해 더욱 우수한 제어를 가능하게 한다.

UPS는 부하를 위해 전원을 결정할 수 있도록 AC 스위치가 통합되었다. 일반적으로 IGBT 혹은 사이리스터(Thyristors) 모두는 이러한 스위치에서 사용된다. 두 가지 중, IGBT는 스위치를 끄라고 명령이 내려질 때 순간적으로 반응한다. 사이리스터의 경우, 스위치 오픈은 명령보다 느리다. **그림 3**은 IGBT를 이용해 구축된 AC 스위치의 회로도를 보여준다.

그림 3

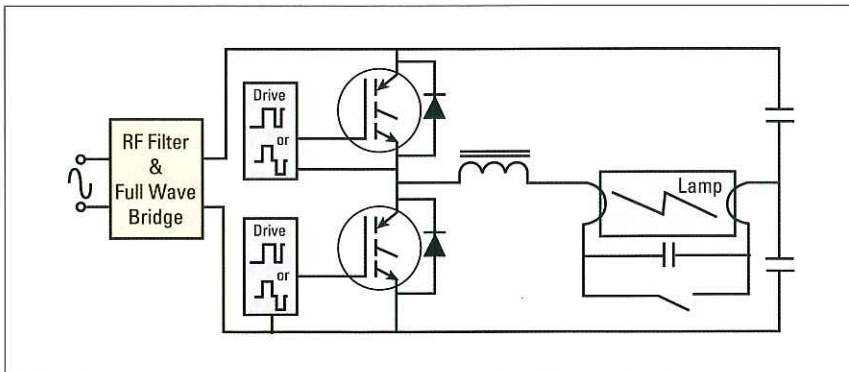


IGBT는 스위치-모드 전원 공급장치 애플리케이션에서 저가형 디바이스를 규정할 수 있는 기회를 설계자에게 제공해, 오프라인 스위치처럼 비용에 민감한 애플리케이션을 만족시킨다. IGBT 제품들은 PDP(Plasma Display Panel)와 같은 홈 엔터테인먼트 시스템을 비롯해, 세탁기, 냉장고, 에어컨, 인덕션 가열 쿡탑과 같은 현대식 기기에서 사용될 수 있다.

## MOSFET 대체 기준

일반적으로, IGBT의 최신 제품군 중 스위칭 특성들은 비용 효율적인 솔루션

그림 2



을 제공해 설계자들이 최대 150kHz 및 그 이상에서 전력 MOSFET의 동일한 기능들을 수행할 수 있다. 이에 대한 가이드로써, 표 1은 인터내셔널 레กติ파이어의 현재 IGBT 제품군의 동작 주파수 범위를 보여준다.

표 1. IGBT 속도 및 스위칭 성능 범위

IGBT Speed	Switching Frequency Range
Standard	0~1kHz
Fast	1~8kHz
UltraFast	8~60kHz
WARP Speed	60~150kHz

IGBT와 MOSFET의 패키지 비용이 동일하기 때문에 MOSFET을 IGBT로 대체하는 것은 더욱 높은 정격 전력에서 더욱 효과적이다. 실질적인 관점에서, 이러한 정격 전압은 500/600V이며 250W 이상의 우수한 MOSFET 동작이기 때문에, 이것은 디바이스의 다이 Size 5 혹은 더 크게 요구하는 경향이 있다. 더욱 작은 MOSFET 다이 크기의 경우, 비용 절감은 더 작아지며 변경할 경우 우수한 조건은 덜하다. 그러나, 다이 크기가 너무 크게 증가할 때 MOSFET을 IGBT로 대체하는 것은 장점이 있다. 장점은 대규모 병렬 다이에 대해 최대화된다는 IGBT가 애벌런치 가능하지 않다고 하는 것은 전혀 가치가 없다. 따라서, 전력 MOSFET이 애벌런치 모드에서 사용되는 경우, 적절하게 대체된 IGBT는 약간 더 높은 정격 전압을 가져야 한다. 예를 들면, 600V IGBT는 애벌런치 모드에서 동작되는 500V MOSFET으로 대체되기 위해 선택되어야 한다. 애벌런치 동작이 놀라울 정도로 높은 전력량을 소비할 수 있다는 것을 명심하면, 비-애벌런치 모드에서 더욱 높은 전압을 사용하는 것은 전력 소비를 감소시키므로써 시스템 효율성 향상을 제공할

수 있다. MOSFET이 애벌런치 모드(Avalanche Mode)에서 동작하지 않을 경우, 정격 전압처럼 IGBT로 안전하게 대체될 수 있다.

### 신제품 개발

엔지니어에게 광범위한 설계 윈도우를 제공하고, 애플리케이션의 범위를 최대화하기 위해, 공급업체들은 IGBT의 강도를 향상시킬 뿐만 아니라 전통적인 약점을 해결하고 있다. 모든 전력 반도체들의 경우, 주요 관심은 폭넓은 동작 조건 전체에 걸쳐 손실을 최소화하는 것이다. IGBT는 턴-오프에서 가장 큰 손실을 보여준다. 이 때 이것은 처음 논의된 것처럼 MOSFET에서처럼 즉각적이지 않다. 이처럼 처음 콜렉터-에미터 전류가 갑자기 하강하고 그 다음, 제로까지 하강하기 전에 '전류 테일(Current Tail)'은 점진적으로 재결합 전류가 감소되기 때문에 발생한다. 콜렉터-에미터 전류는 모든 정공이 전자와 재결합될 때 중지된다. 그림 4는 일반적인 IGBT 스위칭 파형을 보여주며, 전류 테일의 존재가 스위칭 손실을 얼마나 증가시키고 비교급의 MOSFET 대비 최대 스위칭 주파수에 대한 낮은 제한을 얼마나 부과하는지를 보여준다. 전류 테일은 하프-브리지에서 전도의 2가지 디바이스 사이에서 데드-타임 증가를 요구한다. 따라서, IGBT 기술의 현재 개발은 손실을 감소시키고 더욱 높은 스

위칭 주파수 구현을 위해 전류 테일을 감소시키므로써 IGBT의 성능과 애플리케이션을 확장하는 것에 초점을 둔다. 트랜치 IGBT는 이 같은 개발 노력의 부산물이다. 디바이스 설계자는 온-저항을 감소시키고 전류 밀도를 증가시키기 위해 측정을 구현할 수도 있다. 다른 개발 목표로는 게이트 드라이브 요건을 더욱 간단하게 하는 것이다.

또 다른 새로운 개발은 콜렉터 영역에서 썬-웨이퍼 기술, 더욱 미세한 마스크 구조, 더욱 가벼운 도핑 레벨이다. 이러한 특징들은 저장된 전하를 감소시키고, 턴-오프 에너지 손실을 줄이고, 실질적으로 테일 전류(Tail Current)를 감소시킨다. 게이트 턴-온 전하  $Q_g$ 도 감소된다. 전통적인 수명 킬링 기법들뿐 만 아니라 턴-오프에서 소수의 전하를 수집하기 위한 N+버퍼 레이어의 추가는 재결합 시간을 가속화시키기 위해 사용될 수 있다. 이 같은 향상을 통해 IGBT는 WARP™ 및 WARP2™ 디바이스처럼 최대 150kHz의 스위칭 주파수에서 동작될 수 있다.

IGBT 전도 성능에 관해, 이것은 MOSFET의 온-저항을 감소시키고 PNP 바이폴라 트랜지스터에서 전압 강하를 감소시키므로써 향상된다. 그러나,

그림 4

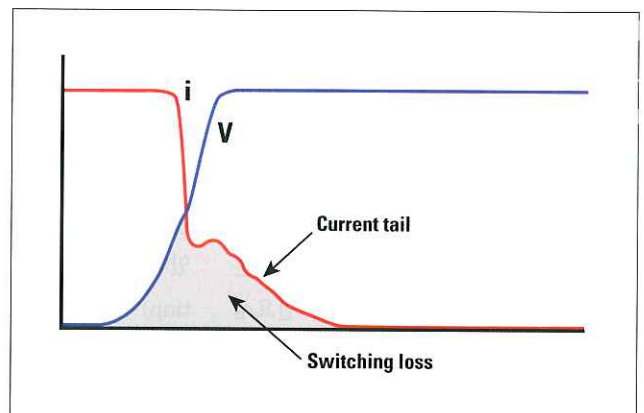




그림 5a

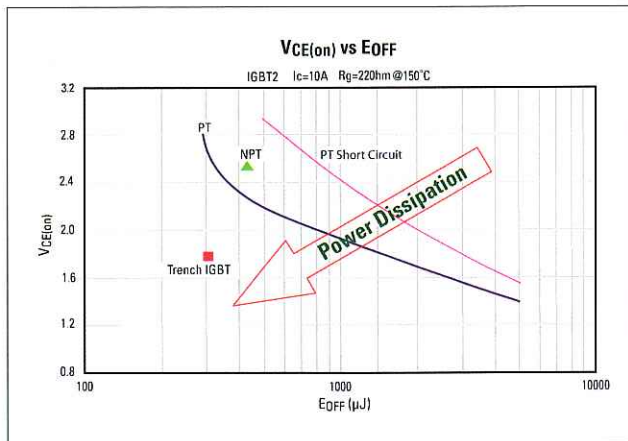
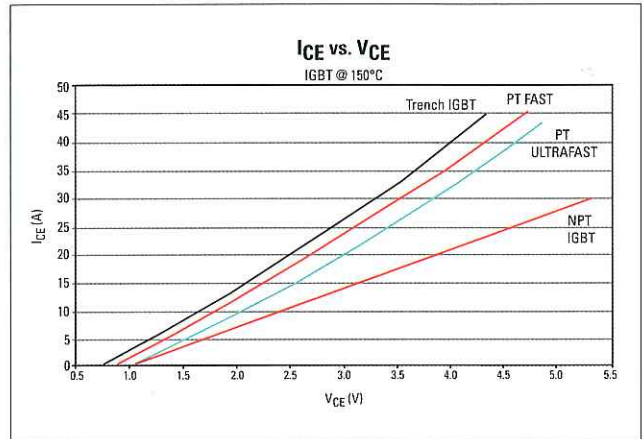


그림 5b



IGBT의 에미터는 다이의 전체 면적을 다루기 때문에, 주입 효율성과 전도 강하는 동일한 크기의 바이폴라 트랜지스터보다 훨씬 더 크다. 전압 강하는 PNP 트랜지스터의 이득이 증가함으로써 향상된다. 그러나, 이것은 래치-업(Latch-Up) 고려사항과 전압 내성 성능에 대해 규제에 의해 제한된다. 한편, 다이 크기나 셀 밀도를 증가시키는 것은 모두 효과적인 기법으로 통합형 MOSFET의 온-저항을 감소시킨다.

가장 최근까지, IGBT는 하프-브리지 토폴로지에서 높은  $dV/dt$  조건하에서 적당한 턴 오프를 보장하기 위해 네거티브 드라이브 바이어스를 필요로 했다. 드라이브 회로를 복잡하게 하는 것 이외에, 이것은 이러한 디바이스를 구동하기 위해 표준 게이트 드라이버 IC를 이용하는 것을 설계자로부터 힘들게 한다. IR의 IGBT는 적절한 턴-오프 기간 동안 네거티브 바이어스를 필요로 하지 않으며, '포지티브 온니(Positive Only)' 게이트 드라이버와 동작하게 될 것이다. 이것은 보조적인 전원 공급장치에 대한 필요성을 없애 주어 더욱 단순한 제어 회로를 가능하게 한다. IR의 부트스트랩 기법을

이용한 600V 및 1200V 게이트 드라이버 집적 회로는 이러한 IGBT를 이전보다 더욱 간단하고 더욱 강력하게 만든다.

트렌치 기술의 채택은 기존 세대의 IGBT보다 더욱 낮은 콜렉터-투-에미터 포화 전압( $V_{CE(ON)}$ )과 총 스위칭 에너지( $E_{TS}$ )를 이용해 IGBT를 구현시킨다. 이러한 특성들은 전력 소비를 감소시키고 전력 밀도를 증가시켜, 동일한 패키지에서 최대 60% 더 높은 RMS 전류를 가능하게 한다. 또 다른 장점들은 50% 히트싱크 크기를 감소시킨다. 트렌치 IGBT는 가전 기기, 에어컨, 통풍 팬, 산업용 드라이브, 순환 펌프와 같은 폭넓은 스위칭 주파수 조건으로 모터 제어 애플리케이션에 특히 적합하다. 3가지 유형의 IGBT와 비교되는 스위칭 에너지와 포화 전압은 그림 5a와 그림 5b에서 각각 나타나 있다.

디바이스 구조를 재설계하는 것 이외에, 웨이퍼 가공 마스크 단계에 대한 정제는 더욱 우수한 구조 실현을 담당해 오고 있다. 예를 들면, IR은 주입(Implantation) 및 확산(Diffusion) 단계를 병합함으로써 2개의 통합형 마스크 단계를 제거시킨다. 마스크 단계에서 감소는 디바이

스의 자가 조정의 정합을 향상시키고, 디바이스 가공의 더욱 높은 반복성을 주도한다. 이를 통해 설계자는 디바이스 성능을 더욱 신뢰성 높게 예측할 수 있으며 따라서 과도한 설계 마진에 대한 필요성을 없애준다. 그 결과, 설계자는 더욱 소형의 저가형 디바이스를 규정할 수 있다.

## 결론

IGBT를 이용해 설계자는 높은 DC 링크 전압에서, 전압 제어의 편리함을 희생하지 않고 효율적인 스위치 모드 전력 변환을 달성할 수 있다. 최근의 성능 향상은 특히 스위칭 성능과 온-저항과 관련해 IGBT 효율성을 더욱 향상시켰다.

이 기고문에서 기술된 대부분의 성능 향상은 포함된 MOSFET의 성능 최적화하는데 중점을 두고 있다. 따라서, IGBT는 '전도성 변조 MOSFET'으로 발전하고 있으며, 더욱 빠른 동작 속도, 감소된 전압 강하, 효과적인 실리콘 활용을 포함한 장점을 제공한다. **SN**