

특집 : 전력용 반도체 소자의 응용

스마트 파워 IC용 IGBT의 기술과 동향

강 이 구

(극동대 정보통신학부 교수)

1. 머리말

인텔리전트 파워 IC에 있어서 이상적인 특성에 접근된 소자로 1993년에 개발된 IGBT는 높은 전류 밀도, 낮은 순방향 전압 강하의 우수한 순방향 전도 특성을 갖는 바이폴라 구조와 입력임피던스가 높고, 스위칭 특성이 탁월한 MOS 구조를 결합한 3단자 전력용 소자이다^[1-3].

IGBT는 구조에 따라 VIGBT(Vertical IGBT), LIGBT(Lateral IGBT), TIGBT(Trench IGBT)로 분류되는데, VIGBT는 전력용 MOSFET과 동일한 공정에 의해 제조되며 높은 전류 용량을 얻을 수 있어 고내압, 대용량의 소자를 필요로 하는 응용 분야에서 개별소자로서 폭넓게 이용되고 있고, LIGBT는 활성화 영역이 감소하고 고내압화가 어려워 개별소자로서는 사용되지 않으나 평면상에 배치가 가능하고 격리가 용이하여 IPM이나 Smart Power IC와 같은 전력용 집적회로에 가장 적합한 소자로 주목받고 있다. TIGBT는 기존의 DMOS 게이트 구조를 트렌치 게이트 구조로 대체함으로써 JFET 저항과 축적층 저항이 제거되어 온 상태 전압강하를 감소시킬 수 있고, 단위 셀 피치가 줄어들게 되어 채널 밀도를 DMOS 구조에 비해 약 5배정도 증가시킬 수 있다. 또한 n+ 에미터 주변을 지나는 정공전류 경로가 개선되므로 래칭 전류 밀도도 증가하며, 또한 항복전압도 증가하게 되어 차세대 IGBT 소자의 대표적인 구조로 떠오르고 있으나 공정 상의 어려움이 단점으로 지적되고 있다^[4-7].

그림 1에서는 파워 IGBT의 대용량화의 변천을 나타내고 있다. 현재까지 4.5kV까지의 고내압화와 1,200A까지의 대전류화를 실현하고 있으며, 이들의 병렬접속으로 종래의 바이폴라 트랜지스터와 GTO의 정격범위를 포함할 수 있었기 때문에 공업용 인버터와 전철시장에까지 사용할 수 있게 되

었다. 하지만 이 그림은 개별소자로 사용되는 VIGBT의 변천을 나타내고 있으며, 아직까지 LIGBT는 1kV이상 사용되는 소자가 개발되지 않았기 때문에 이러한 변천사를 나타내기에는 무리가 따르고 있지만, LIGBT 역시 전류정격도 중요하지만 내압 정격 또한 중요하다는 것을 알 수 있다.

그림 2는 파워 IGBT의 저손실화에 따른 IGBT의 각 세대별 변화모습을 보이고 있다. 보통 IGBT의 손실특성의 우열은 인버터 동작을 전제로 하기 때문에 포화전압과 하강시간과의 트레이드 오프의 관계로 표시된다. IGBT의 저손실화의 기술은 VLSI 기술을 이용한 실리콘 표면의 미세 가공기술과 파워 소자 특유의 벌크내의 캐리어 밀도분포 제어기술과의 양면에서 개선이 이루어져 왔다. 이와 같이 제 1세대, 제 2세대 IGBT는 특성개량을 계속하고 있으며, 현재 제 3세대 IGBT가 시장에 가장 일반적으로 공급되고 있다. 제 1세대에서 2세대까지의 특성 개선은 주로 표면 셀 패턴의 개량, 라이프 타임 제어의 최적화 등에 의하는 것이었다. 제 2세대

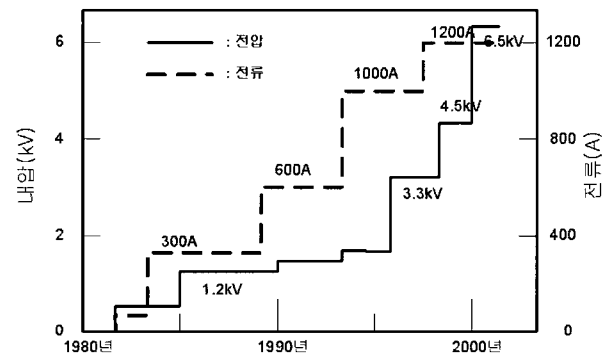


그림 1 연도별에 따른 파워 IGBT의 대용량화

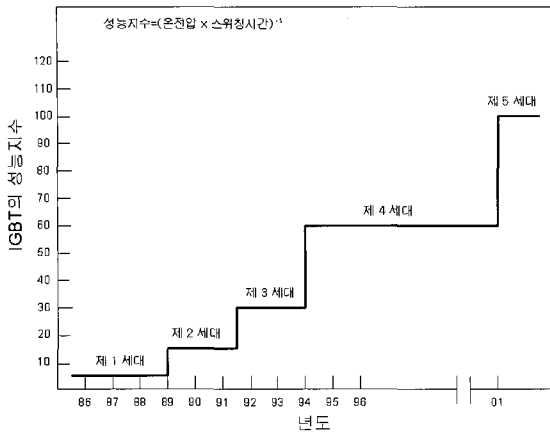


그림 2 파워 IGBT의 저손실화에 따른 각 세대별 변화

IGBT의 출현에 의해 온 저항에 의한 전력의 저손실화는 도 모되었지만 시장 요구를 충분히 충족시키지 못하였다. 따라서 제 3세대 IGBT에서는 이러한 단점들을 개선하였지만 아직은 가장 문제시되고 있는 순방향 전압강화와 턴 오프시간의 트레이드 오프 관계를 해결하지 못하고 있는 중이다. 그러나 현재 시장에서는 가장 특성이 좋은 3세대 IGBT가 주류를 이루고 있는 실정이다. 그리고 4세대 IGBT로 진행하면서 나타난 것은 트랜치 구조의 IGBT인데, 이 트랜치 구조의 IGBT는 게이트 전극만 트랜치 구조로 설계하였다. 이 트랜치 게이트 IGBT는 채널이 수직으로 형성하게 되어 전체 전류의 길이를 짧게 함으로써 온 전압강하가 낮아지게 된다. 따라서 소자가 턴-온시에 전력소모가 작게되며, 온 저항과 트레이드 오프관계인 턴 오프 특성도 그렇게 나빠지지 않아 트레이드 오프 관계를 적절하게 유지할 수 있었다. 그리고 항복전압에 있어서도 기존의 범용 IGBT보다는 높은 전압을 얻을 수가 있어 차세대 IGBT로 각광받고 있다^[9-12].

2. IGBT의 구조적인 개선에 따른 기술 발전

앞에서는 주로 일반적인 파워 IGBT의 기술과 동향에 대해서 언급하였으며, 서술된 바와 같이 IGBT는 주로 VIGBT에 의한 개별 소자로서 발전하였다. 개별소자는 IC용이 아니기 때문에 대용량화를 이루기 위하여 소자를 크게 설계하였다. 따라서 개별소자인 VIGBT에는 소형화 및 경량화 문제를 크게 문제 삼지 않았다. 하지만 IGBT의 경우에는 보호회로 및 제어회로 그리고 인터페이스 회로등과 IC화를 이룰 수 있기 때문에 소자의 소형화 및 경량화 문제를 무시할 수가 없었다. 일반적으로 소자의 내압을 크게 하기 위해서는 에피층의 길이를 크게 하거나 에피층의 농도 또는 버퍼층의 농도등을 변화시키는 방법을 이용하였으며, 순방향 영역에서 가장 문

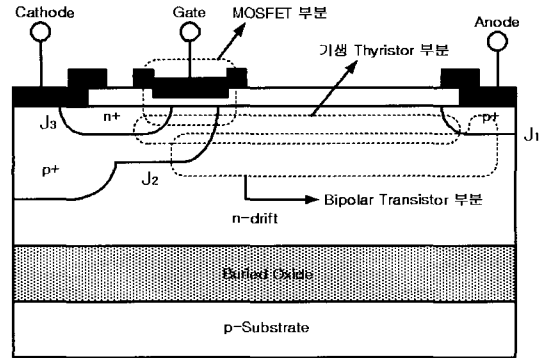


그림 3 범용 IGBT의 구조

제가 되는 래치 업 문제는 p 베이스 영역의 농도등을 변화시켜 문제를 해결하였다. 그러나 이러한 공정변수를 변화시켜 해결하는 방법은 한계에 이르렀으며, 현재에는 주로 IGBT의 구조를 변경시켜 대용량화 및 소형화를 달성하는 추세에 이르렀다. 따라서 본 절에서는 이러한 IGBT의 구조적인 개선에 초점을 맞추어 기술 발전을 서술하였다.

2.1 범용 IGBT

현재 파워 IC 산업에 가장 많이 쓰이고 있는 소자로는 그림 3에 나타난 범용 IGBT이다. 그림 3은 범용 IGBT의 구조를 나타내고 있다. 내압을 높이기 위해서 많은 범용 IGBT는 SOI 구조를 이용하고 있는 중이다. IGBT의 제작은 n-드리프트 층에 p-베이스 영역과 n+캐소드 영역을 폴리실리콘 게이트 마스크를 사용해 이중 확산(Double Diffusion)으로 형성시키며 두 영역의 측면 확산차에 의해 채널이 형성된다. p+로 구성된 애노드는 n-드리프트 영역의 전기 전도도를 증가시키고 이로 인해 온 저항의 최소화가 가능하게 된다. IGBT의 입력단은 MOSFET으로, 출력단은 p-베이스 영역(컬렉터), n-드리프트층(베이스), p+애노드 영역(에미터)으로 형성되는 PNP 바이폴라 트랜지스터로 구성되어 있다. p+애노드와 n-드리프트 층의 접합사이에 n+ 버퍼층을 두는 비대칭(Asymmetric) 또는 NPT(Non-Punch Through) IGBT 구조는 전계를 n-드리프트 영역 전반에 균일하게 분포시키는 동시에 n+버퍼층으로 펀치 스루우를 방지할 수 있어 n+버퍼층이 없는 대칭(Symmetric) 또는 PT(Punch-Through) IGBT 구조에 비해 우수한 순방향 저지 능력과 턴 오프 특성, 높은 래치 업 전류 밀도를 얻을 수 있다는 장점을 가진 반면에 역방향 저지 능력이 크게 떨어지고 전류 구동 능력을 감소시키는 단점이 있다.

범용 IGBT의 전기적인 특성에 영향을 미치는 파라미터들 중에서 비대칭 IGBT 구조에서는 n+ 버퍼층의 불순물 농도와 두께가, 그리고 대칭 IGBT 구조에서는 n-드리프트 층의

불순물 농도와 두께가 특성에 중요한 영향을 미치는 요소로 작용하므로 n+ 비퍼층이나 n-드리프트 층의 두께는 그 층에서의 전하량 (불순물 농도두께)이 임계 항복전압에 의해 계산된 전하량보다 큰 범위 내에서 가능한 얇게 설계해야 한다.

MOSFET의 드레시홀드 전압 이상의 정전압이 인가되면 게이트 전극 밑의 p-베이스 표면에 반전층이 유지되어 n+캐소드 n-드리프트 영역사이에 채널이 형성되며 이때 애노드에 정전압이 인가되면 채널을 통해 n+캐소드 영역으로부터 n-드리프트 영역으로 전자가 공급되어 PNP 트랜지스터의 베이스 전류를 제공하게 되고 순방향 바이어스 되어 있는 접합 J1의 p+애노드 영역으로부터 n-드리프트 영역으로 정공이 주입되기 시작하여 '순방향 전도 모드'의 동작을 하게 된다. 주입된 정공의 농도는 n-드리프트 영역의 도핑 농도에 비해 보통 1001000배 정도의 값을 가지므로 n-드리프트 영역의 전도도를 증가시키게 되고 애노드 전압의 증가에 따라 주입되는 정공 전류의 양과 이를 보상하기 위한 전자 전류의 양도 증가하게 된다.

전류는 p+애노드 영역에서 n-드리프트 영역으로 주입되는 정공전류 성분과 캐소드 영역으로부터 MOSFET 채널과 n-드리프트 영역을 지나 애노드에 주입되는 전자전류 성분 (또는 애노드에서 전자와 재결합하는 정공전류 성분)으로 구성되며 드리프트 영역에서의 전류는 애노드에서 주입된 정공과 재결합하는 전자전류 성분과 애노드로 주입되는 전자전류 성분으로 구성되어 PNP 트랜지스터의 베이스 전류와 같은 역할을 하고 캐소드 전류는 애노드로부터 주입된 정공 중 전자와 재결합하지 않고 확산을 통해 n-드리프트층 영역을 지나 접합 J2에 포획되어 캐소드로 들어가는 정공전류 성분과 MOSFET 채널을 통해 n-드리프트 영역으로 주입되는 전자전류 성분으로 구성된다. 이때 애노드에서 주입된 정공은 p-베이스층을 수평방향으로 통과하는데 이 횡방향 전류의 흐름은 p-베이스 영역의 옴릭 (Ohmic) 저항에 의해 전압 강하를 야기한다. 이러한 전압 강하가 접합 J3를 순방향 바이어스 시킬 만큼 커지게 되면 이로 인해 캐소드로부터 p-베이스 영역을 통해 전자의 주입이 일어나 기생 NPN 바이폴라 트랜지스터가 턴온되고 PNP, NPN 트랜지스터가 맞물린 n+캐소드, p-베이스, n-드리프트, p+애노드로 구성된 기생 사이리스터의 래치 업이 발생하게 된다. LIGBT에서 일단 기생 사이리스터에 의한 래치 업이 발생하게 되면 LIGBT의 주입효율은 급격히 증가하게 되어 애노드에서 캐소드사이에 낮은 임피던스 경로가 형성되어 게이트에 의한 애노드 전류의 제어 능력을 상실하게 된다. 이러한 래치 업의 발생은 LIGBT의 SOA (Safe Operating Area)를 제한하고, 소자의 최고 동작 전류 밀도를 제한하는 등 소자의 여러 특성들을 저해하고 과도한 전류로 인해 소자에 손상을 주므로 설계상의 중요한 고려 사항이 되고 있다.

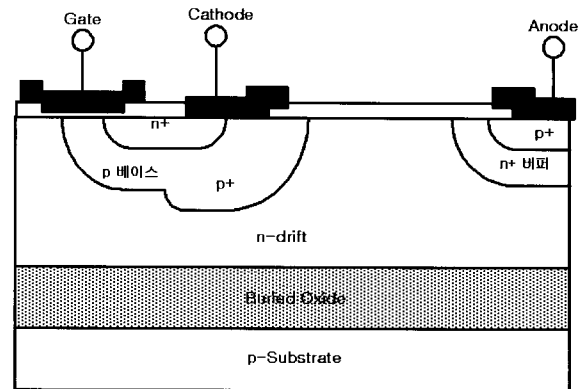


그림 4 역 채널 구조의 LIGBT의 구조

2.2 Reverse Channel LIGBT

범용 LIGBT가 나온 이후, LIGBT를 개선하기 위한 주 관심사는 LIGBT의 구조적으로 발생하게 되는 래치 업 효과에 의해 저하되는 낮은 전류밀도를 개선시키는 것이었다. 여러 가지 구조가 나왔지만 그 중에 대표적인 구조로서 역 채널 구조의 LIGBT가 가장 효과적인 것으로 학계에서 보고되었는데, 이 역채널 LIGBT는 이후 트랜치 게이트 구조가 나오게 되는 계기가 되기도 하였다.

그림 4는 역채널 구조의 LIGBT를 보여주고 있으며, 이 구조는 게이트 전극과 캐소드 전극이 자리를 바꿈으로서 주 전류인 홀 전류의 경로를 짧게 함으로써 전류밀도를 높이고, 또한 범용구조에서 래치 업을 발생시키는 주요한 원인으로 제기되었던 p 베이스 영역의 홀 전류가 급격히 줄게 되었다는 것이 장점이다. 그러나 시간이 흐름에 따라 p 베이스 영역으로 흘러 들어가는 홀 전류가 증가하여 결국 래치 업을 발생하게 된다. 하지만 기존의 범용 구조보다 늦게 발생하게 되어 래칭 전류밀도가 상당히 증가하게 된다.

반면에 전자전류의 경우 기존의 범용 구조와는 달리 그 경로가 늘어나게 되어 드리프트 층에서 발생하는 온 저항이 증가하게 되며, 온 저항이 증가하게 되면 온 상태 특성에 좋지 않은 영향을 끼침과 동시에 소자를 턴 온 시키는데 들어가는 소모전력의 증가가 단점으로 지적되었다. 하지만 래칭 전류 밀도는 상당히 증가하게 되어 주어진 정격전압과 전류내에서 래치 업이 발생하지 않게 되었다는 것이 보다 큰 장점으로 부각되어 매우 효과적인 구조라고 할 수 있다.

2.3 Trench Gate LIGBT

전자전류와 정공전류의 흐름을 바꾸어 래칭 전류밀도를 증가시키긴 하였으나 대용량 고내압이라는 파워 IC의 목표에는 도달하지 못하였다. 역채널 구조가 나온 이후 래칭 전류밀도를 개선시키기 위하여 애노드와 캐소드 영역 사이에 존재하

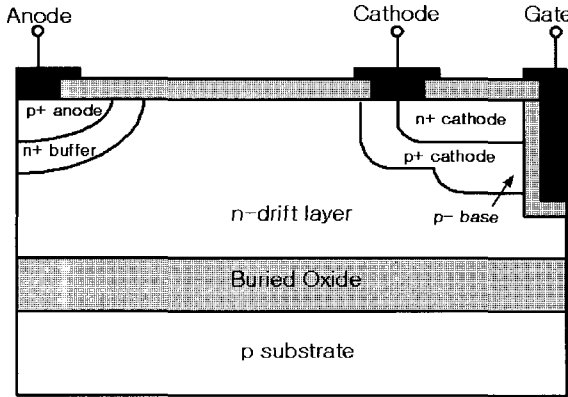
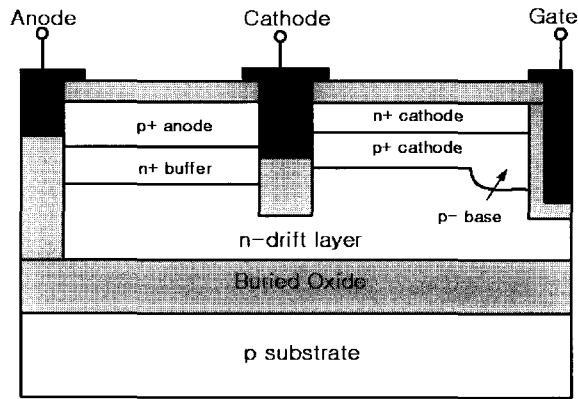


그림 5 트렌치 게이트 구조의 LIGBT



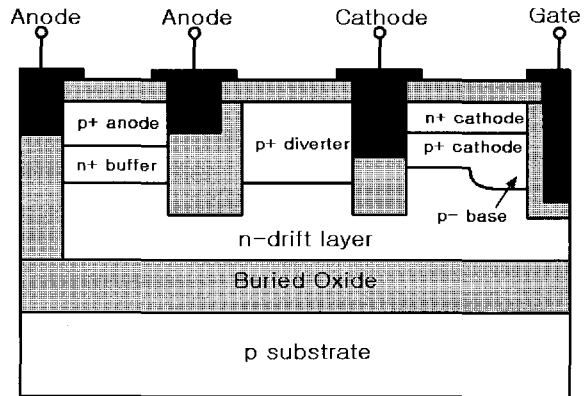
(a) 트렌치 전극 구조의 LIGBT

는 드리프트층 사이에 n+ 링을 두어 홀 전류의 흐름을 억제하는 구조, n+ 버퍼 층위에 또 다른 게이트를 설정하여 홀 전류의 흐름을 일원화시켜 래칭 전류밀도 특성과 스위칭 특성을 개선시킨 구조, p+ 애노드 접합 옆에 n+ 접합을 형성하여 스위칭 특성을 개선시킨 구조 등이 일본, 캐나다, 한국, 미국 등에서 계속해서 발표되었으나, 구조의 신선함이라는 것 외에 전기적인 특성에서 진일보한 구조가 나온 것은 아니었다.

이러한 가운데, 한국과 미국에서 거의 동시에 트렌치 게이트 구조의 LIGBT가 발표되었다. 그림 5는 트렌치 게이트 구조의 LIGBT를 나타내고 있다. 역 채널 구조에서 단점으로 지적되었던 것이 온 특성이었는데, 이러한 부분의 문제점을 해결한 것이 트렌치 게이트 형태의 LIGBT 구조이다. 우선 순방향 동작시 전류의 흐름은 역 채널 LIGBT의 그것과 같은 메커니즘을 갖기 때문에 높은 래칭 전류밀도를 유지하는 동시에 채널을 수직으로 형성하여기 때문에 경로가 매우 짧아져서 온 전압이 상당히 낮아지고 오히려 기존의 범용 LIGBT보다 우수한 1~1.5V 정도의 온 전압을 갖는다. 그리고 온 특성과 트레이드 오프 상태에 있는 턴 오프 특성도 기존의 특성을 유지하고, 내압은 오히려 증가하는 아주 우수한 구조의 LIGBT로 보고 되고 있다. 현재 4세대 LIGBT로서 그 주류를 이루고 있는 중이다.

2.4 Trench Electrode LIGBT

트렌치 게이트 구조의 LIGBT가 래칭 전류밀도를 크게 향상시켰다면, 소형화와 고내압을 위해 트렌치 전극 구조의 LIGBT가 최근에 보고되었다. 트렌치 구조의 LIGBT와 제안한 트렌치 전극형 LIGBT의 주요 차이점은 애노드와 캐소드 전극구조이다. 제안한 트렌치 전극형 LIGBT는 온 상태에서 흐르는 홀 전류가 p 베이스 층을 지나지 않고 바로 캐소드 전극으로 흐른다는 트렌치 게이트 구조의 LIGBT의 장점을 포



(b) p+ 다이버터 구조를 갖는 트렌치 전극 구조의 LIGBT

그림 6 트렌치 전극 구조의 LIGBT

함하면서, 애노드와 캐소드 전극을 모두 트렌치 형의 구조로 설계한 소자이다. 일반적으로 소자의 정격을 규정짓는 대표적인 전기적인 특성으로는 순방향 전류와 순방향 항복 전압이다. 그런데 소자를 작게 만들기 위해서는 n 드리프트 층의 너비를 줄이는 것이 불가피한데, n 드리프트 층의 길이를 작게 만들면 소자의 항복전압이 급격히 줄어들게 된다. 이것이 파워 소자에서 소자를 작게 만들지 못하는 가장 큰 이유다. 그러나 제안한 구조에서는 모든 전극을 트렌치 산화막을 형성하여 만들었기 때문에 소자 내부에 걸리는 전계가 모두 이 산화막에 집중하게 되어 소자를 작게 만들더라도 항복전압은 그대로 유지할 수 있는 효율적인 구조라 할 수 있다. 그림 6의 (a)는 트렌치 전극구조의 LIGBT를 보여주고 있으며, 이러한 트렌치 전극 구조의 효율성을 증명하기 위하여 그림 6의 (b)는 p+ 다이버터가 있는 트렌치 전극 구조의 LIGBT를 보여주고 있다. 래칭 특성을 향상시키기 위해 범용 LIGBT나 트렌치 게이트 구조에 p+ 다이버터를 삽입하게 되면 래칭 전류

밀도는 증가하게 되나 순방향 저지 영역에서 공핍층이 증가하여 발생하게 되는 펀치스루현상이 작은 전압에서 발생하게 되어 항복내압이 크게 낮아지게 된다. 따라서 이러한 범용구조에서는 다이버티가 효과적이지 못하지만 최근에 발표된 트랜치 전극구조의 LIGBT와 같은 경우는 앞서 서술한 바와 같이 소자에 걸리는 전압이 트랜치 산화막에 집중하게 되어 p+ 다이버티를 추가한다해도 항복내압이 줄어들지 않고 오히려 캐소드로 흘러 들어가는 홀들이 p 베이스 영역을 거치지 않고 다이버티 영역을 통해 직접 들어가기 때문에 래칭 전류밀도가 크게 향상이 되는 우수한 구조라 할 수 있다. 이와 같이 트랜치 전극형 LIGBT는 트랜치 게이트 구조를 대체할 만한 구조라 할 수 있는데, 트랜치 공정자체가 복잡하고 어렵기 때문에 공정상의 단점이 제기되고 있는 중이다.

3. LIGBT의 미래와 전망

기존의 범용 LIGBT와 이것을 개선하기 위하여 나왔던 다양한 구조들이 제 3세대 LIGBT로 포함되고 또한 현재 전력 전자산업에 사용하고 있는 LIGBT는 모두 3세대 LIGBT가 주류를 이루고 있다. 이러한 제 3세대 LIGBT에서 4세대 LIGBT로 진행하면서 나타난 것은 앞서 서술한 바와 같이 트랜치 구조의 LIGBT는 전체 전류의 길이를 짧게 함으로써 온 전압강하가 낮아지게 된다. 따라서 소자가 턴-온시에 전력소모가 작게되며, 온 저항과 트레이드 오프관계인 턴 오프 특성도 그렇게 나빠지지 않아 트레이드 오프 특성도 개선되어진다. 그리고 항복전압에 있어서도 기존의 범용 LIGBT보다는 높은 전압을 얻을 수가 있어 차세대 LIGBT로 각광을 받을 것으로 예상되며, 트랜치 공정의 어려움이 조만간 극복되면 제 4세대 LIGBT인 트랜치 구조의 LIGBT 즉 트랜치 게이트 구조의 LIGBT 그리고 트랜치 전극형 LIGBT가 그 주류를 이룰 것으로 판단된다. ■

참 고 문 헌

[1] Baligar, B. J., Power Semiconductor Devices (PWS, 1996), p. 452.
 [2] 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", in Jpn. J. Appl. Phys. 3, pp. 854-859, 1994.
 [3] T. P. Chow, "A reverse-channel, high voltage lateral IGBT", in Proc. ISPSD, pp. 57-61, 1994.
 [4] N. Thapar and B. J. Baliga, "An experimental evaluation of the on-state performance of trench IGBT designs", in Solid State Electronics, Vol. 42,

No. 5, pp. 771-776, 1998.

[5] Jun Cai, K. O. Sin Johnny, K. T. Mok Philip, "A new lateral trench-gate conductivity modulated power transistor", in IEEE Trans., Electron Devices, Vol. 46. No. 8, pp. 1778-1793, 1999.
 [6] I. Y. Park and Y. I. Choi, "Trench cathode TIGBT with improved latch-up characteristics", in Physica Scripta. Vol. T79, pp. 337-340, 1999.
 [7] T. Trajkovic, F. Udrea, G. A. J. Amaratunga, W. I. Milne, S. S. M. Chan, P. R. Waind, J. Thomson and D. E. Crees, "Silicon MOS controlled bipolar power switching devices using trench technology", in Int. J. Electronics, Vol. 86, No. 10, pp. 1153-1168, 1999.
 [8] F. Udrea and G. Amaratunga, "The trench insulated gate bipolar transistor a high power switching device", in Proc. 20th Int. Conference on Microelectronics, pp. 369-374, 1995.
 [9] O. Spulber, E. M. S. Narayanan, S. Hardikar, M. M. De Souza, M. Sweet, and Subhas Chandra Bose J. V., "A Novel Gate Geometry for the IGBT: The Trench Planner Insulated Gate Bipolar Transistor", in IEEE Electron Device Letters, Vol. 20, No. 11, pp. 580-582, 1999.
 [10] F. Udrea, S. S. M. Chan, J. Thomson, T. Trajkovic, P. R. Waind, G. A. J. Amaratunga, and D. E. Crees, "1.2kV trench insulated gate bipolar transistors with ultra low on-resistance", in IEEE Electron Device Letters, Vol. 20, No. 8, pp. 428-430, 1999.
 [11] B. J. Baliga, "Trench-IGBTs with integrated diverter structures", in Proc. ISPSD, pp. 201-206, 1995.
 [12] K. Sheng, S. J. Finney and B. W. Williams, "Improved understanding of IGBT forward conduction", in Proc., IPEMC, pp. 48-55, 1997.

〈 저 자 소 개 〉



강이구(姜二求)

1987년~1993년 고려대 전기공학과 졸업. 1993년~1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년~2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2003년~현재 극동대 정보통신학부 교수.