

특집 : 전력용 반도체 소자의 응용

1700V Trench IGBT 및 SPT IGBT용 고성능 CAL HD 다이오드

플커 데무스(Dr. Volker Demuth)
(SEMIKRON INTERNATIONAL Product Manager)

IGBT는 최상의 현대식 인버터이며 다목적 다이오드는 IGBT의 불가결한 동반자이다.

오늘 날, 더 높은 파워 밀도는 파워 변환 기술 및 파워 분배 기술에서 지속적으로 요구되는 기술이다. 이러한 경향의 대표 주자가 바로 트렌치 게이트 구성요소와 필드-스톱 설계에 사용되는 IGBT 컨셉이다. 두 컨셉 모두 종전의 NPT(non-punch-through) 디바이스에 비해 줄어든 on-상태 손실을 제공한다. 그러나 이같은 기술 발전의 혜택을 입으려면, IGBT 모듈은 최적의 다목적 다이오드를 포함해 IGBT를 보완하고 전체적인 디바이스 성능을 보장해야 한다.

다목적 다이오드의 주요 요구조건은 낮은 순방향 전압 강하(forward voltage drop), 작은 회복 전하 및 큰 범위의 온도 및 전류에 대한 소프트 스위칭 행태이다. 다른 결정적 요구조건은 높은 전류 인가를 커버하기 위해 다이오드를 병렬로 할 수 있는 능력과 단락 동안 디바이스 파괴를 예방하기 위한 높은 동적 평활도이다.

우리의 접근법은 on-상태의 전압 강하를 감소시키기 위해 효력이 입증된 CAL(controlled axial lifetime) 기술의 혁신적인 설계를 사용한다. CAL HD의 개발에는 칩 면적당 가용 전류의 증가와 동적 성능 개선이라는 2개의 핵심 대상이 중요한 역할을 했다.

CAL HD 다이오드는 깊은 n⁺ 캐소드 영역과 접합 단말로서 p⁺가 도핑된 가드 링을 가진 평면 디바이스이다. 접합 단말은 1700V 블로킹 전압으로 최적화되어 있다. 캐리어 수명은 전자 조사 및 He²⁺ 이온 임플란트에 의해 제어되어, 그림

1의 개략도에 보이는 이질 결합 프로파일을 초래한다. 양극 및 음극 확산 프로파일과 더불어, CAL HD 다이오드의 낮은 회복 피크 전류와 소프트 스위칭 행태가 얻어진다.

우리의 접근법의 결과는 61mm²의 칩 면적을 대표적인 1700V HD 제품 포트폴리오로 하는 75A CAL HD를 사용해 보여준다. 그림 2는 상온 및 125°C에서의 on-상태 특성을 보여준다. 첫번 째 특징은 정격 전류에서의 PTC(positive temperature coefficient) dU/dT으로, 병렬 오퍼레이션에서 공유되는 균형 전류로 이어진다. 이는 높은 전류 디바이스에서 CAL HD의 고성능 병렬을 허용한다. 두번 째 특징은 현격

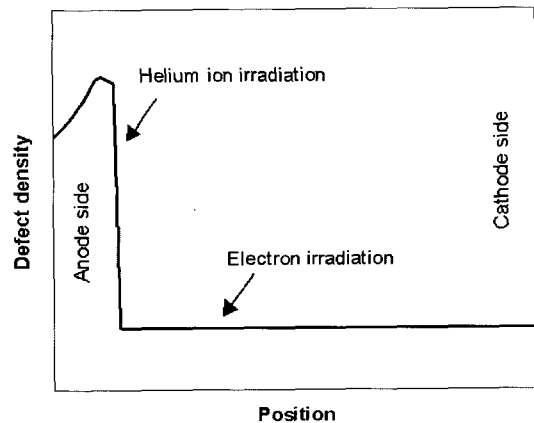


그림 1 전자 조사와 He²⁺ 이온 임플란트에 의해 만들어진 CAL HD 다이오드의 수직 결합 밀도 프로파일

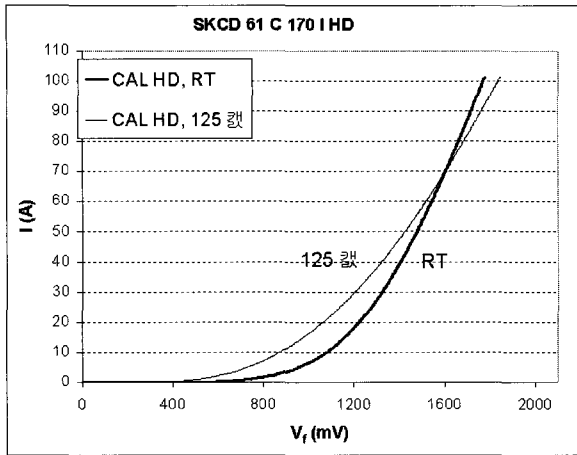


그림 2 상온 및 125 °C에서의 75암페어 CAL HD 다이오드(면적 = 61 mm²)의 on- 상태 특성

히 증가한 전류 밀도이다. 50A로 정해진 표준 61mm² 1700V CAL 다이오드에 비해, CAL HD는 50% 높은 전류를 보여준다. 증가된 전류 밀도에 힘입어, 서지(surge) 순방향 전류 I_{FSM}은 표준 CAL 다이오드 값을 14% 증가할 수 있다.

그림 3은 Trench IGBT에 대한 CAL HD의 성공적인 적용을 증명한다. 그 방법은 동일한 조건 하에서 Trench(3a)와 NPT IGBT(3b)를 사용해 스위칭하여 다이오드의 회복 행태를 비교하는 것이다. Trench IGBT를 사용해 스위칭하는 경우, 초기 전류는 I_{RRM} = 55A의 피크 역 회복 전류로 떨어진다. 초기 스위칭 행태는 회복 전류가 꼬리형상으로 점점 작아지는 것으로 반영된다. 이에 반해, 재래식 NPT-IGBT를 사용한 CAL HD 스위칭은 보다 높은 동적 손실로 이어진다. 다시 말해, 유사한 di/dt에서, NPT-IGBT(dU/dt=2450V/μs)를 사용했을 때의 전압은 Trench-IGBT(dU/dt=800V/μs)를 사용했을 때의 전압보다 3배나 빨리 상승한다. 다이오드의 부드러움 역시 Trench IGBT를 사용했을 때 개선된다. Trench IGBT를 사용해 정류했을 때, 원활한 꼬리 전류는 NPT-IGBT를 사용해 스위칭했을 때와 비교해 60% 더 큰 소프트 요소(soft factor) $S = (t_2 - t_1) / (t_1 - t_0)$ 로 이어지는 것으로 목격되었다.

그림 4는 폭 넓은 교환율 di/dt에 걸쳐 낮은 동적 손실을 제공할 수 있는 CAL HD의 능력을 보여준다. 그래프는 역 회복 전하 Q_{rr}, I_{rrm} 및 에너지 소산 E_{rec}을 보여준다. 굵은 선은 Trench IGBT의 결과를 나타내고 대시 선은 NPT-IGBT의 결과를 나타낸다. ~1000A/μs의 전형적 Trench-IGBT 오퍼레이션 범위에서, Trench IGBT / CAL HD 결합은 NPT-IGBT / CAL HD 결합에 비해 27% 작은 스위칭 손실을 보여준다. 보다 높은 주파수에서는 IGBT / CAL HD 결합의

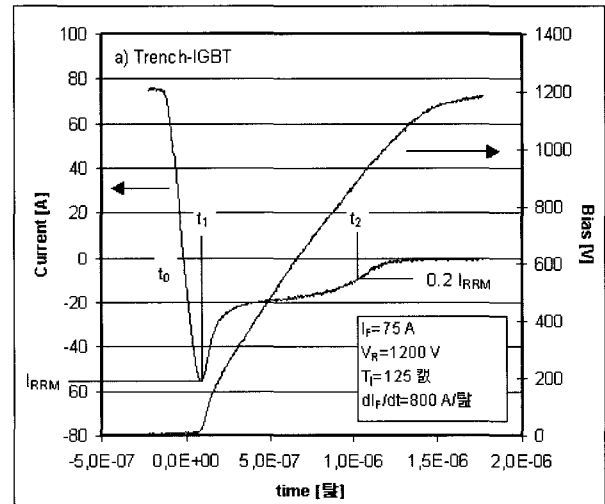
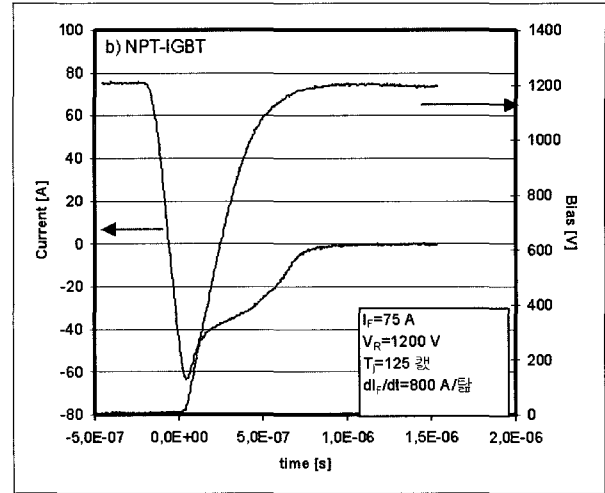


그림 3 Trench-(a) 및 NPT-IGBT(b)를 스위치로 사용했을 때의 다이오드 전류와 전압 파형

동적 손실이 증가하고, di/dt > 3000A/μs에서는 두 IGBT의 스위칭 손실이 거의 일치한다. 통합된 게이트 저항 때문에, Trench-IGBT의 스위칭 속도는 is limited to about 약 3200A/μs로 제한된다.

단락 안정을 위해서는 극단적인 교환 속도에서 동적 아발란치(avalanche)의 부재가 필수적이다. 이러한 극단적인 조건에서도, CAL HD는 소프트 회복 행태를 보이며, 이는 그림 5에서와 같이 재래식 CAL 다이오드에서와 같은 높은 동적 평활도를 입증한다.

새 CAL HD가 성취한 파워 모듈의 성능 개선을 증명하기 위해, DC/DC 컨버터 회로(예: SKM 400GB 176 D)의 시뮬레이션이 행해졌다. 4개의 다이오드를 병렬로 연결하여, 접합 온도를 정적 손실 및 동적 손실의 함수로 계산했다. 최대

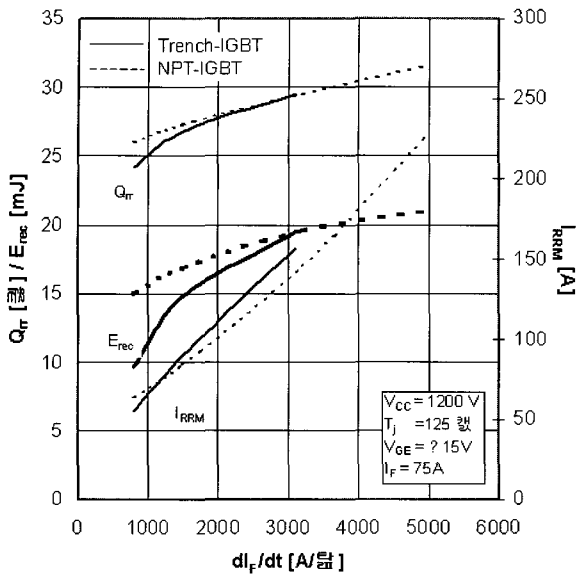


그림 4 교환 속도의 함수로 CAL HD 다이오드의 동적 데이터. Trench-IGBT(굵은 선) 및 NPT-IGBT(대시 선) 스위칭

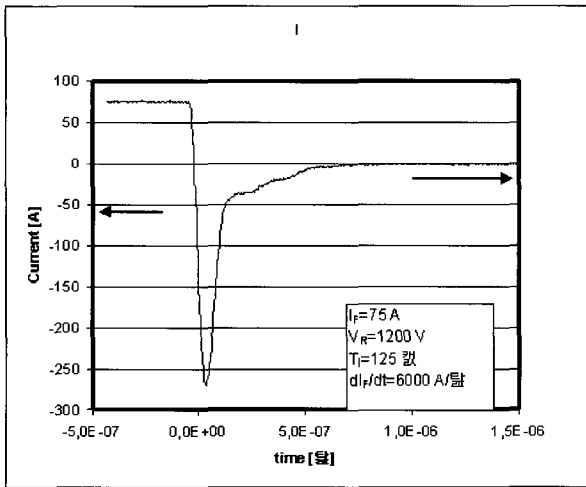


그림 5 매우 높은 di/dt=6000A/μs에서 CAL HD 다이오드의 동적 평활도

부하 전류는 다이오드 혹은 IGBT의 시뮬레이트된 접합 온도가 125 °C인 곳에서 정의된다. 계산을 위해서는 $T_c=90^{\circ}\text{C}$ 의 케이스 온도를 사용해 표 1의 열 및 전기 데이터가 적용된다. 입력 전압은 $V_{in}=1200\text{V}$ 에 설정되고 출력 전압은 $V_{out}=600\text{V}$ 에 설정된다.

그림 6에서, CAL HD 다이오드는 6kHz 미만의 스위칭 속도에 대한 출력 전류와 관련해 중요한 이점을 보여준다. 이 다이오드는 2 - 3kHz의 1700V Trench IGBT 모듈을 위해

표 1 컨버터 시뮬레이션에 사용된 Trench-IGBT 및 다이오드의 열저항 R_{thjc} , 순방향 전압 V_f 및 스위칭 손실 E_{sw}

	Trench-IGBT	FWD 4 x CAL	FWD 4 x CAL HD
R_{thjc} (K/W)	0,065	0,125	0,125
V_f @ 300 A (V)	2,2	2,2	1,75
E_{sw} (mJ)	300	38	55

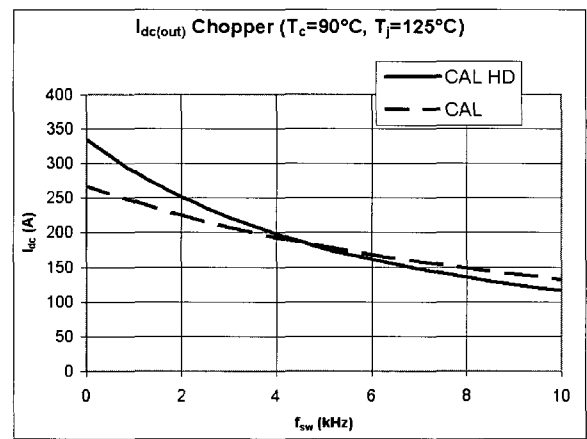


그림 6 Trench IGBT / CAL(대시 선) 및 Trench-IGBT/CAL HD 다이오드(굵은 선) 결합을 사용하는 DC/DC 컨버터의 최대 출력 전류

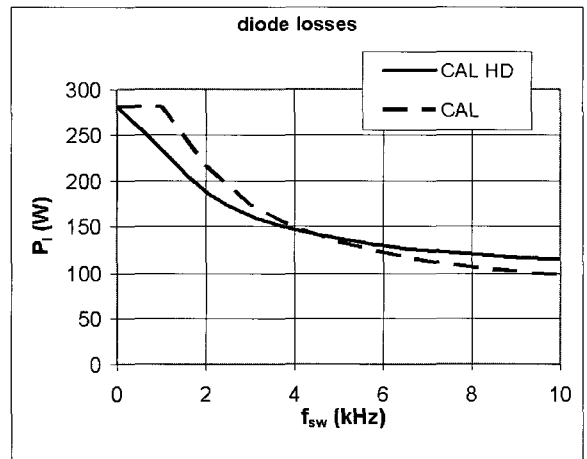



그림 7 DC/DC에서의 다목적 다이오드 손실 파워. CAL(대시 선) 및 CAL HD(굵은 선)

전형적인 오퍼레이션 범위에서 최적의 디바이스 성능을 제공한다.

Trench IGBT / CAL HD 결합의 개선된 전류 레이팅은

6kHz 미만의 CAL HD 다이오드에서 산생된 낮은 총 손실의 결과이다. 보다 높은 스위칭 주파수에서는 동적 손실이 증가하여 낮은 정적 손실을 보상하고 표준 CAL에 비해 보다 높은 전체 손실을 야기한다.

결론적으로, 새 CAL HD 1700V는 현대식 Trench IGBT에 적응하여 다목적 다이오드 및 IGBT의 뛰어난 성능으로 이어진다. 특히 최대 전류 밀도는 IGBT와 부합되고, 순방향 특성의 온도 계수는 양의 값으로 인양되었다. 이는 CAL HD를 열의 과부하 없이 병렬 오퍼레이션의 이상적 솔루션으로 만든다. 추가로, CAL HD 다이오드의 소프트 스위칭 행태는 높은 동적 평활도와 더불어 이 다목적 다이오드를 현대식 IGBT 파워 모듈의 이상적 선택으로 만든다. 이 다이오드는 SEMIKRON의 새 SEMITRANS™ 모듈 176시리즈, 제2세대 SKiiP 3 및 SEMiX™에 사용된다. 

〈 저 자 소 개 〉



Volker Demuth

독일 Erlangen - Nuremberg에서 재료과학과 금속 반도체 분야의 PhD 취득. SEMIKRON에서 Engineering 과 production management의 재구성과 파워 반도체의 개발에 기여. 현 SEMIKRON INTERNATIONAL에서 Power DIODES와 thyristors의 PRODUCT MANAGER로 근무.