

1 고온 동작용 다이아몬드 전력 반도체 기술

글_하민우 교수 | 명지대학교 전기공학과

1. 서론

전력 반도체(power semiconductor)는 소량의 전기 신호로 대전력의 흐름을 조정하여 전력 변환, 모터 제어, 증폭 및 스위치에 기본적인 스위칭 기능을 제공하는 소자이다 [1]. 전력 변환은 전력의 형태를 바꾸는 것으로 대표적인 것으로 인버터와 컨버터가 있다. 인버터는 DC 전력을 AC 전력으로 변환하며, 컨버터는 DC 전력을 다른 전압을 가지는 DC 전력으로 변환한다. 인버터는 램프 안정기(ballast)나 모터 구동에 이용되고, 컨버터는 스위치 모드 전원 공급기(switched-mode power supply, SMPS)에 이용된다. 이러한 인버터와 컨버터를 구성하는 핵심 부품은 전력 반도체이다. 이상적인 전력 반도체는 그림 1처럼 온-상태 일 때는 0Ω , 저항을 가지는 도체로 동작하고, 오프 상태이면 무한대 저항 및 $0 A$, 누설전류를 가지는 절연체로 동작해야 한다.

전력 반도체는 높은 항복전압을 견뎌야 하고, 낮은 온-저항, 빠른 스위칭 속도 및 ruggedness를 가져야 한다. 전력 반도체는 오프 상태 일 때 전원 전압을 견뎌야 하고, 스위칭 중일 때 인덕터 에너지까지 버텨야 한다. 따라서 전력 반도체는 설계 구조상 항복전압을 견디는

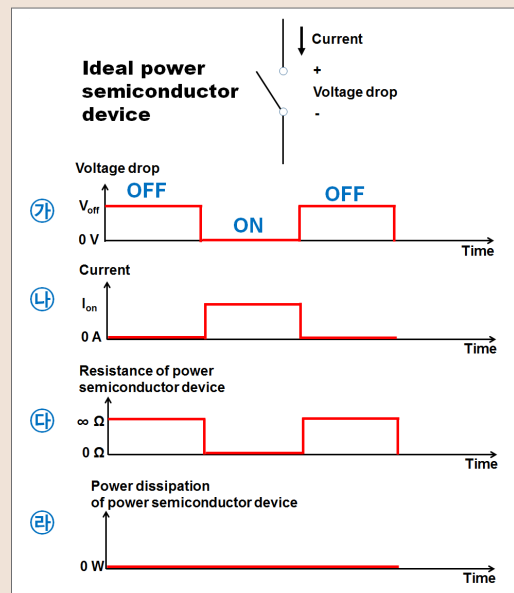


그림 1 ▶ 이상적인 전력 반도체의 특성.

반드시 저 농도 드리프트(drift) 층을 포함해야 한다. 하지만 저 농도 층은 저항이 높아 온-저항을 증가시키므로, 항복전압과 온-저항은 트레이드-오프(trade-off) 관계를 가진다. 이 둘을 동시에 개선하기에 어렵다.

전력 반도체가 소비하는 전력 손실(power loss)은 정적(static)과 동적(dynamic) 전력 손실로 구성된다. 온-저항(on-resistance)은 정적 전력 손실에 비례하며, 동적 전력 손실은 스위칭 주파수, 스위칭 주파수에서의 온-저항, 트래핑(trapping)과 같은 스위칭 상태의 반도체 소자에 발생하는 전기적 특성 열화에 의하여 결정된다. 전력 반도체는 응용분야가 원하는 정격 전류를 흘려줘야 하므로, 전력 반도체가 소비하는 전력은 전체 시스템이 소비하는 전력 중 그 비율이 높다. 에너지 절감의 요구가 높아진 현 시대에 맞추어 전력 반도체는 에너지와 전력을 적게 소비하는 설계가 필요하다. 전력 반도체의 전기적 특성을 개선하기 위해서 동작 원리를 포함한 설계 개선 및 반도체 물질 변형을 통하여 가능하다.

2. 전력 반도체 분류

전력 반도체를 분류하는 방법은 여러 가지가 있으며 각 응용분야에 적합한 전력 반도체 종류를 선택 및 설계해야 한다. 첫 번째로 구동 방법에 의한 분류할 수 있으며, 전력 반도체는 전압 및 전류 구동 소자로 구분할 수 있다. 전압 및 전류 구동 소자는 각각 전압 및 전류

의 변화를 통하여 반도체의 온 및 오프 동작을 결정한다. 전압 구동 소자로 대표적인 것은 금속 산화물 반도체 전계-효과 트랜지스터(metal oxide semiconductor field-effect transistor; MOSFET)이며, 금속 반도체 전계-효과 트랜지스터(metal semiconductor field-effect transistor; MESFET) 및 접합 전계-효과 트랜지스터(junction field-effect transistor; JFET) 및 절연 게이트 바이폴라 트랜지스터(insulated gate bipolar transistor; IGBT)도 전압 구동 소자이다. 금속 반도체 전계-효과 트랜지스터의 게이트 전극에 전압을 가하면 채널이 형성되어 온-전류가 흐른다. 전류 구동 소자로 대표적인 것은 바이폴라 접합 트랜지스터(bipolar junction transistor; BJT)이다. 바이폴라 접합 트랜지스터는 베이스 전극에 전압이 아닌 전류를 흘려줘야지만 구동이 가능하다. 구동 회로 측면에서 바라보면 전압 구동 전력 반도체가 전류 구동 소자에 비하여 장점이 많다. 전류 구동 소자의 전력전자 회로가 복잡하고, 시스템 부피가 크다. 사이리스터(thyristor), 및 게이트 턴-오프 사이리스터(gate turn-off thyristor; GTO) 들도 전류 구동 소자이다.

두 번째 분류 방법은 동작 원리에 의한 것이다. 전력 반도체가 온 동작 시 흐르는 전류의 캐리어가 전자 혹은 정공 중 한 종류만 흐르는지 두 종류 모두 흐르는 여부로 구분할 수 있다. 온 동작 시 전자 혹은 정공이 한 종류만 흐르면 단극성(unipolar) 혹은 다수 캐리어(majority carrier) 소자이고, 전자 및 정공이 모두 흐르면 양극성(bipolar) 혹은 소수 캐리어(minority carrier) 소자이다. 금속 산화물 반도체

전계-효과 트랜지스터는 대표적인 다수 캐리어 소자이고, 바이폴라 접합 트랜지스터와 절연 게이트 바이폴라 트랜지스터는 소수 캐리어 소자이다. 소수 캐리어 소자의 장점은 전도도 변조(conductivity modulation)로 전자와 정공 전류가 모두 흘러 온-전류 밀도가 높다. 하지만 이런 측면은 소수 캐리어 소자의 단점으로도 적용되는데, 턴-오프 시간(turn-off time)이 길고 스위칭 속도가 낮고 동적 전력 손실이 높다. 따라서 높은 전류가 필요한 응용 분야는 바이폴라 계열의 전력 반도체(바이폴라 접합 트랜지스터, 절연 게이트 바이폴라 트랜지스터, 사이리스터)가 유리하고, 빠른 스위칭 속도가 필요한 응용 분야는 금속 산화물 반도체 전계-효과 트랜지스터가 적합하다.

세 번째 분류 방법은 전력 반도체 내 온-전류가 흐르는 방향으로 수평형(lateral) 및 수직형(vertical) 소자로 구분하는 것이다. 수평형 전력 반도체는 소자의 모든 전극이 표면에 있어서 집적에 유리하나, 일반적으로 표면 근처의 좁은 영역에만 온-전류가 흘러 표면에 발열이 집중되어 고온 동작에 취약한 단점을 가진다. 따라서 고온 동작용 전력용 반도체는 수직형 구조가 적합하다.

네 번째 방법으로 단자(terminal) 수로 의하여 분류가 가능하다. 2 및 3단자 소자들은 대부분 다이오드(diode)와 트랜지스터(transistor)이다. 다이오드는 정류기로 이용할 수 있고, 트랜지스터는 스위치로 쓸 수 있다. 다만 패키지의 lead가 3개이더라도 다이오드가 2개가 집적된 것일 수 있어서 반드시 단자와 lead 수가 일치하지 않을 수 있다.

다섯 번째 방법은 반도체 재료의 종류에 의하여 분류하는 것이다. 실리콘과 화합물 전력 반도체로 분류할 수 있다. 화합물 반도체의 물질은 GaN [2,3], 4H-SiC [4], 다이아몬드 [5-8]가 가능하다. 이 중 GaN와 4H-SiC 전력 반도체는 양산 중이고, 다이아몬드 기반 전력 반도체는 연구 중인 단계에 있다. 화합물 반도체는 반도체 웨이퍼의 구경이 실리콘보다 낮고, 재료 및 소자 공정 가격이 높은 문제점을 가지고 있다. GaN은 이종접합 구조를 이용하여 이차원 전자가스(two-dimensional electron gas)를 형성하여 채널로 이용 가능하며, 이것의 우수한 전자 이동도(mobility)로 인하여 RF 전력 소자에 적합한 화합물 반도체 재료이다 [2]. 4H-SiC는 GaN이 구현하기 어려운 수직형 전력 반도체 설계 및 제작이 가능하여 높은 정격 전류에 적합하고 실리콘보다 큰 에너지 밴드 갭(3.4 eV)을 가져 고전압 및 높은 동작 온도의 응용 분야에 적합하다. 또한 4H-SiC는 GaN과 달리 열산화법(thermal oxidation)으로 게이트 절연막 성장이 가능한 장점을 가진다.

온-동작 시 전기 및 전자 시스템의 능동 및 수동 부품의 저항 성분에서 발열되어 반도체의 동작 온도를 증가시킨다. 특히 높은 온-전류 밀도가 흐르는 전력 반도체는 발열 현상이 심하다. 고온 환경은 반도체의 동작 특성, 예를 들어 누설전류, 문턱전압, 턴-온 전압 등을 변화시킨다. 대표적인 고온 반도체의 응용분야는 자동차 전장이고, 그 외 중장비, 중차량용 브레이크, 검층, 항공우주 및 레이더가 있다 [9]. 1.12 eV의 에너지 밴드 갭과 1.5 W/cmK의 낮은

열전도도를 가지는 실리콘 반도체는 최대 동작 온도는 150°C 이하로 제한된다.

다이아몬드는 아직 재료 성장의 기술 수준이 낮지만, 지구상 모든 물질 중 열전도도 (22 W/cmK)가 가장 높으므로 궁극적인 고온 동작용 전력 반도체가 될 수 있다. 본 원고에서는 차세대 고온 동작용 전력 반도체로 연구되고 있는 다이아몬드의 기술 수준, 소자 구성, 설계 요소 및 미래 가능성에 대하여 일반적인 수준에서 소개하고자 한다.

3. 고온 동작용 전력 반도체와 다이아몬드

고온에서도 신뢰적인 전기적 특성을 가져야 하는 고온 동작용 전력 반도체는 그림 2에 기술된 성능을 가져야 한다. 동작 온도가 높아짐에 따라 가전자대(valence band)에서 전도대(conduction band)로 이동하는 진성 캐리어

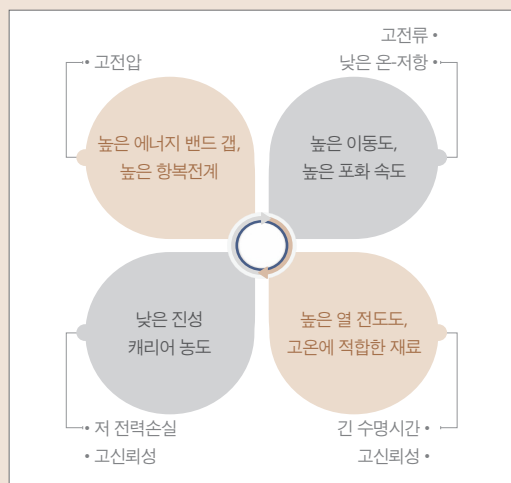


그림 2 ▶ 고온 전력 반도체가 가져야 할 성능.

생성이 높아지면 전력 반도체에 흐르는 온 및 오프 전류가 높아지고 동작이 불안정해지고 오프 전류 손실이 증가하는 문제점들을 가진다.

반도체의 에너지 밴드 갭은 전도대와 가전자대의 사이 간격으로 항복전압과 고온 동작에 영향을 미친다. 다이아몬드의 에너지 밴드 갭은 5.47 eV으로 실리콘 1.12 eV에 비하여 높아진성 캐리어 농도(intrinsic carrier concentration) 및 생성율이 낮아서 고온 동작에서 적합하다. 다이아몬드의 큰 에너지 밴드 갭은 10 MV/cm 이상의 높은 항복전계도 가능하게 한다. 다만 이것은 다이아몬드 전력 반도체의 제작 공정을 어렵게 하는 요인이 되기도 한다. 다이아몬드는 지구상 물질 중 가장 높은 열전도도인 22 W/cmK를 가진다. 이는 온상대 전력 반도체에서 발생하는 열을 효과적으로 방출할 수 있어 정격 온-전류 밀도를 증가시키고 냉각 부품을 줄일 수 있다.

반도체 물질의 파라미터를 이용하여 전력 반도체의 성능을 비교할 수 있다. 표 1은 실리콘, 천연 다이아몬드 및 화학 기상 증착법(chemical vapor deposition, CVD) 다이아몬드의 진성 물질 파라미터를 정리한 것이다 [10].

상온에서 CVD 다이아몬드의 최대 전자 이동도는 4,500 cm²/Vs이며, 최대 정공 이동도는 3,800 cm²/Vs이다 [11]. 이 값은 다른 와이드 밴드 갭 반도체들의 이동도보다 높다. 캐리어의 높은 이동도는 전력 반도체의 높은 전류 밀도 및 낮은 온-저항을 약속한다. 단극성 전력 반도체의 성능을 비교할 수 있는 Baliga 성능 지수(Baliga's figure of merit; BFOM) [12]를 비교해보면 다이아몬드는 실리콘보다 17,200배

표 1 ▶ 반도체들의 진성 물질 파라미터 [10].

종류	실리콘	천연 다이아몬드	CVD 다이아몬드
밴드 갭 (eV)	1.12	5.47	5.47
항복전계 (MV/cm)	0.3	10	10
전자 포화 속도 ($\times 10^7$ cm/s)	0.86	2	2
정공 포화 속도 ($\times 10^7$ cm/s)	n/a	0.8	0.8
전자 이동도 (cm^2/Vs)	1,450	200 ~ 2,800	4,500
정공 이동도 (cm^2/Vs)	480	1,800 ~ 2,100	3,800
열전도도 (W/cmK)	1.5	22	24
Baliga 성능 지수 (BFOM)	1	882	17,200

우수한 Baliga 성능지수를 가진다. 즉, 다이아몬드 소자는 실리콘 소자보다 17,200배 우수한 전력 반도체 성능을 가진다. ϵ, μ, E_G 및 E_C 은 각각 반도체의 유전율, 이동도 및 에너지 밴드 갭이다.

$$BFOM = \epsilon \cdot \mu \cdot E_G^3 \quad (1)$$

전력 반도체의 온-저항과 항복전압 트레이드-오프 관계 측면에서 다이아몬드는 실리콘, 4H-SiC보다 상온 및 고온 동작에서 우수한 전기적 특성이 예측되었다 [13]. 다이아몬드는 고온에 신뢰적으로 동작할 수 있는 전력 반도체 물질로 가장 높은 잠재력을 가지고 있다.

4. 다이아몬드 재료 기술

다이아몬드는 강한 sp^3 공유결합의 탄소 사면체로 다이아몬드 격자(lattice) 구조를 가지며, 이는 다이아몬드가 높은 열전도도(22 W/cmK)와 녹는점(3,500°C)을 가지게 한다 [14]. 다이아몬드의 합성(synthesis)은 17세기에서부터 시작되었다. 다이아몬드는 그래파이트 상에서 고압 고온(high-pressure high-temperature, HPHT) 공정에 의하여 합성될 수 있다 [15]. 다이아몬드 HPHT 합성은 니켈이나 코발트 촉매를 이용한다. 그러나 HPHT 다이아몬드는 높은 농도의 결정 결함과 금속 불순물을 가져 전자 소자용으로 적합하지 않다. 하지만 이것은 절단 및 드릴 목적의 산업용 다이아몬드로 사용하고 있다. 또한 HPHT 다이아몬드는 CVD를 이용한 고품질 다이아몬드 에피 성장의 기관으로 사용 가능하다. 다이아몬드 결정의 등급은 결정 내 질소 원자의 농도와 클러스터에 의하여 결정된다. HPHT 합성 다이아몬드의 등급은 주로 Ib로 이는 다이아몬드 내 질소 함유량이 5 ppm 이상을 의미하고 보통 100~3,000 ppm을 가진다 [16]. 참고로 IIa와 IIb 등급은 결정 내 질소 비율이 5 ppm보다 낮으며, 질소 함유량이 매우 낮다고 판단할 수 있다.

HPHT 이외의 방법으로 다이아몬드는 저압 및 중온에서 기체를 이용하여 화학적 합성(CVD)이 가능하다. CVD는 기체 소스를 이용하여 기관 위 고체를 증착하는 기술이다. 대부분 다이아몬드 전자 소자는 결정결합이 낮은 고품질 CVD 다이아몬드를 이용한다. 다이아

몬드 CVD 합성 과정 중 수소 원자역할이 중요하다. 합성 중 수소 원자는 다이아몬드가 아닌 그래파이트를 식각하고, 불포화 결합을 포화시켜 그래파이트 합성을 억제하여 고품질 다이아몬드 합성을 가능하게 한다 [17]. 또한 CVD 합성 중 수소 원자는 탄화수소 라디칼을 형성하고 기판 위에 흡착된 탄화수소에서 수소를 추출하여 성장하는 면의 빈자리(vacant site)를 만든다 [18]. 따라서 다이아몬드 CVD 합성 중 높은 수소 농도는 성장률과 결정성을 개선하는데 결정적인 역할을 한다. 일본 National Institute of Materials Sciences에 의하여 개발된 고온 필라멘트(hot filament) CVD와 극초단파(microwave) 플라즈마 CVD는 다이아몬드 CVD 성장에 적합한 고농도의 수소 원자를 형성하여 오늘날 CVD는 다이아몬드 성장의 주요 기술이 되었다 [19,20]. 최근 다이아몬드 CVD 합성은 CH_4 , H_2 기체와 극초단파 여기(excitation)를 이용한다. 또한 CVD 합성은 HPHT 합성보다 가격 경쟁력이 우수한 장점을 가진다.

5. 다이아몬드 소자 기술

반도체의 도핑 기술은 전자나 정공의 농도를 변화시키는 것으로 소자를 설계하기 위하여 필수적이다. 다이아몬드 p-type 도핑을 위한 불순물은 3족 붕소가 이용되고 있으며, 붕소의 이온화 에너지 레벨은 가전자대 위 380 meV에

위치하고 있다 [14]. 다이아몬드 n-type 도핑을 위한 불순물은 5족 인이며, 인의 이온화 에너지 레벨은 전도대 아래 570 meV에 위치하고 있다. 다이아몬드 반도체 성장 과정에 내재된 질소는 5족이고, 질소의 이온화 에너지 레벨은 전도대 아래 1.7 eV로 깊게 위치한다. 다이아몬드 반도체는 이온화 활성도가 유리한 낮은 이온화 에너지를 가지는 p-type이 주로 연구되고 있다. 또한 현 소자 기술 수준을 고려하면 다이아몬드 반도체 소자는 HPHT 합성된 다이아몬드 기판 위 CVD 합성된 p-type 다이아몬드 층을 주로 이용한다.

연구되고 있는 다이아몬드 소자의 종류는 쇼트키 장벽 다이오드(Schottky barrier diode; SBD), MOSFET 및 BJT이다. 본 원고에서는 트랜지스터를 구성할 수 있는 기본적인 구조인 다이오드에 대하여 소자 기술에 대하여 분석하였다. 쇼트키 장벽 다이오드는 단극성 및 다수 캐리어 소자이다. N-type 도핑기술의 어려움으로 인하여 연구되고 있는 다이아몬드 다이오드 종류는 pin 다이오드 및 n-type SBD보다는 p-type SBD이다. P-type SBD는 온 동작 시 흐르는 캐리어는 정공이고, 쇼트키 접촉은 캐소드 전극이며 오믹 접촉은 애노드 전극이다. 다이아몬드 SBD는 반도체의 높은 항복 전계로 인한 높은 항복전압과 전도 시 다수 캐리어로 인한 낮은 턴-온 전압과 빠른 역방향 회복 시간의 장점들을 가진다.

그림 3은 다이아몬드 p-type 수직형 SBD 및 pseudo-수직형 SBD의 단면도이다. 수직형 SBD는 free-standing 반도체 기판에 제작된

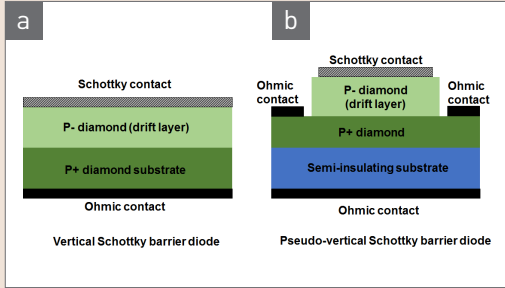


그림 3 ▶ (a) 다이아몬드 수직형 SBD 및 (b) pseudo-수직형 SBD의 단면도.

소자이며, pseudo-수직형 SBD는 반절연 HPHT 다이아몬드 기판 위에 CVD로 성장된 p-/p+ 다이아몬드 층에 제작된 소자이다.

다이아몬드 수직형 SBD는 기생성분이 적은 장점을 가지고, 높은 결함 밀도, p+ 다이아몬드 기판의 비저항과 제한된 면적의 단점을 가진다. 다이아몬드 pseudo-수직형 SBD의 장점은 CVD로 성장된 p- 드리프트 층으로 인한 낮은 결함 밀도이고, 단점은 복잡한 공정, 표면에 위치한 오믹 컨택으로 인한 면적 증가 및 p+ 다이아몬드 층의 기생 저항이다 [13].

다이아몬드 에피택시의 결합인 non epitaxial crystallite를 연구한 p-type 다이아몬드 수직형 SBD의 실험결과가 발표되었다 [21]. 소자의 에피택시 구조는 p- ($8.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 도핑농도 & $1 \mu\text{m}$ 두께) / p+ 다이아몬드 / HPHT Ib 다이아몬드 (001)이다. 쇼트키 컨택(Pt/Au)와 오믹 컨택(Ti/Pt/Au)는 모두 p- 층 위에 위치해있다. Non epitaxial crystallite의 그레인 경계는 누설전류의 주요경로이며, 결합이 없는 소자는 역방향 전계에 누설전류가 비례하였다. 1.6 MV/cm 의 전계에서 소자의 누설전류는 10^6 A/cm^2 에 도달하였다.

다이아몬드 수직형 SBD의 항복전압을 개선하기 위하여 역방향 전계를 분산시키는 에지 마감(edge termination)인 필드 플레이트(field plate)의 시뮬레이션 설계결과가 발표되었다 [22]. 필드 플레이트는 절연막과 금속 층으로 구성되며, 쇼트키 컨택에 걸리는 역방향 전계를 분산시켜 항복전압을 증가시키는 역할을 한다. 필드 플레이트용 절연막으로 각각 낮고 높은 유전율을 가지는 SiO_2 와 Al_2O_3 이 연구되었다. 절연막의 두께에 따라서 SiO_2 와 Al_2O_3 기반 필드 플레이트의 항복전압 비교 순위가 달라지지만, 다이아몬드의 낮은 유전율(E_{diamond})을 고려하면 반도체의 항복보다는 절연막의 항복에 의한 문제가 심각하다. 이것을 고려하면 Al_2O_3 이 다이아몬드 필드 플레이트의 절연막으로 적합하다. 역방향 시 절연막에 걸리는 전계($E_{\text{dielectric}}$)와 다이아몬드 반도체(E_{diamond})에 걸리는 전계는 Gauss 법칙과 같다.

$$E_{\text{dielectric}} \approx \frac{E_{\text{diamond}}}{E_{\text{dielectric}}} E_{\text{diamond}} \quad (2)$$

P- (10^{15} cm^{-3} 도핑농도 & $4.6 \mu\text{m}$ 두께) / p+ 다이아몬드 / 다이아몬드 Ib (001) 구조를 이용한 Al_2O_3 필드 플레이트는 다이아몬드 pseudo-수직형 SBD 항복전압을 실험적으로 200~220 V에서 700 V로 개선하였다 [23]. Pseudo-수직형 소자는 반절연 다이아몬드 기판 위 p-/p+ 다이아몬드 구조를 건식식각 공정을 통하여 메사 구조를 만든 후 표면 p- 층 위 쇼트키 컨택을 설계하고, 식각공정으로 통하여 노출된 p+ 층에 오믹 컨택을 설계하는 순서로 제작될 수 있다.

P- (14 μm 두께) / p+ 다이아몬드 (10 μm 두께) / 다이아몬드 Ib (001) 기판 (300 μm 두께)을 이용하여 1.6 kV의 항복전압과 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 의 낮은 누설전류를 가지는 다이아몬드 pseudo-vertical SBD 실험결과가 발표되었다 [24].

0.5 인치 급 단결정 CVD 다이아몬드 웨이퍼를 이용한 다이아몬드 수직형 SBD 실험결과도 보고되었다 [25]. 소자의 예피 구조는 p- (5.6 - 10 $\times 10^{16}$ cm^{-3} 도핑농도 & 1.2 μm 두께) / p+ 다이아몬드 / self-standing CVD 다이아몬드 (001) (350 μm 두께)이다. 쇼트키와 오믹 컨택은 각각 Mo와 Ti/Pt/Au이다. 항복전계는 소자 면적이 증가함에 따라 3 MV/cm에서 1 MV/cm로 감소하였고, 이는 다이아몬드 결정의 품질에 의하여 소자의 누설전류 특성이 결정됨을 의미한다. 또한 다이아몬드의 붕소 도핑과 쇼트키 컨택의 재료에 따른 1 kV급 다이아몬드 SBD 실험결과가 연구되었다 [26].

Mo/다이아몬드 수직형 SBD의 전기적 파라미터를 추출한 연구결과가 보고되었다 [27]. 다이오드에서 추출된 이상 지수(ideality factor), 쇼트키 장벽 높이와 온-저항은 각각 1.3, 1.872 eV 및 32.63 $\text{m}\Omega\text{-cm}^2$ 이다. Mo의 금속 일함수와 다이아몬드의 전자 친화도를 이용한 이상적인 쇼트키 장벽 높이는 2.24 eV이며, 이것과 측정값과의 차이는 Fermi-level pinning 효과 때문이다. 금속-인터페이스 층-반도체 모델링을 통한 추출된 인터페이스 층 두께와 인터페이스 트랩 밀도는 각각 0.248 nm와 10^{13} $\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ 이다.

결함 시각화 기술을 이용하여 다이아몬드 pseudo-수직형 SBD의 누설전류가 분석되었다

[28]. 높은 누설전류와 제한된 항복전압의 원인은 높은 밀도의 dislocation으로 지목되었다. Al_2O_3 을 이용한 planar meas termination을 이용한 수직형 다이아몬드 SBD의 시뮬레이션 설계결과가 보고되었다 [29]. X-ray topography를 이용하여 다이아몬드 SBD의 누설전류 편차 원인인 결함을 연구한 논문도 출간되었다 [30].

다이아몬드 수직형 및 pseudo-수직형 SBD의 고온 동작에 관한 연구결과가 보고되었다 [31, 32]. 금속-세라믹 패키지 내 금 와이어에 연결된 다이아몬드 수직형 SBD는 250°C에서 1 A의 온-전류와 300 V의 항복전압을 확보하였다 [31]. 다이아몬드 pseudo-수직형 SBD는 상온에서 역방향 전계, 1.5 MV/cm에서 10^{-7} A/cm^2 의 낮은 누설전류를 가졌다 [32]. 소자는 415 K에서도 낮은 누설전류를 유지하였고, 이는 4H-SiC SBD보다 $10^2\sim 10^4$ 배 낮은 누설전류 수준이다.

최근 다이아몬드 pseudo-수직형 SBD의 p-층의 도핑농도와 두께 및 쇼트키 컨택의 금속 일함수에 따른 소자의 시뮬레이션 전기적 특성이 발표되었다 [33]. 평행한 쇼트키 컨택/p-다이아몬드의 이상적인 일차원 항복전계가 10 MV/cm가 만족시키도록 수치해석 시뮬레이션 파라미터가 제안되었고, p-층의 도핑농도와 두께가 각각 10^{16} cm^{-3} 과 4 μm 일 때의 소자의 항복전압은 961 V이다. 그림 4와 5는 제안된 다이아몬드 pseudo-수직형 SBD의 시뮬레이션 순방향 전류-전압 특성 및 항복전압 특성이다. 또한 필드 플레이트가 설계된 다이아몬드 pseudo-수직형 SBD의 항복전압은 다이아몬드 항복이 아닌 절연막 항복에 의하여 제한되는 결과도 발표되었다 [34].

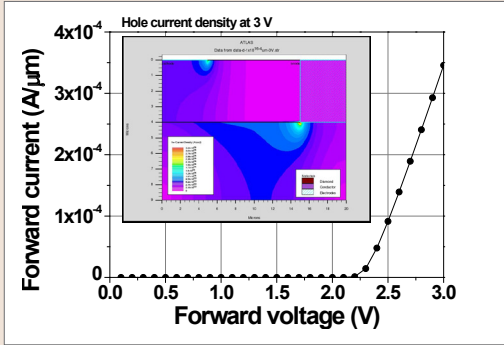


그림 4 ▶ 제안된 p-type 다이아몬드 pseudo-수직형 SBD의 순방향 전류-전압 특성 및 3V에서의 정공 전류 밀도.

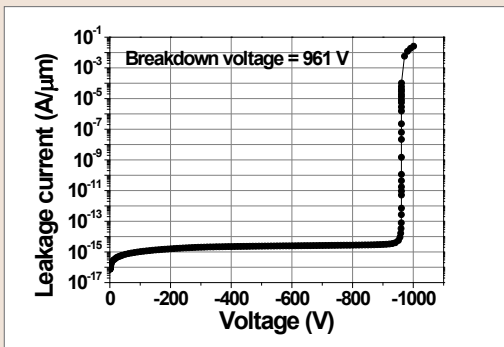


그림 5 ▶ 제안된 p-type 다이아몬드 pseudo-수직형 SBD의 항복전압 특성.

6. 결론

자동차 전장으로 대표되는 고온 동작용 전력 반도체는 현재 4H-SiC MOSFET이 실리콘 전력용 트랜지스터를 대체하는 단계에 있다. 하지만 열전도도와 우수한 전기 물성을 고려하면 다이아몬드는 궁극적인 고온 동작용 전력 반도체로 높은 잠재력을 가지고 있다. 현재 재료 성장과 소자 기술의 수준을 고려하면 다이아몬드 전력 반도체 소자 기술로 p-type pseudo-수직형 SBD가 연구되고 있다. 고품질 다이아몬드 성장과 이온주입 및 도펀트 활성화 기술을 비롯한 소자 기술, 다이아몬드보다 취약한 절연막 항복을 극복할 수 있는 기술이 개발되면 다이아몬드는 고온 동작용 전력반도체로 유망하게 이용될 것으로 예상된다. 🌟

참/고/문/헌

- [1] B. J. Baliga, *Power Semiconductor Devices* (PWS Publishing Company, Boston, 1996), p. 3.
- [2] U. K. Mishra, L. Shen, T. E. Kazior, and Y. F. Wu, *Proc. IEEE*, 96, 287 (2008).
- [3] N. Ikeeda, Y. Miiyama, H. Kambayashi, Y. Sato, T. Nomura, S. Kato, and S. Yoshida, *Proc. IEEE*, 98, 1151 (2008).
- [4] J. A. Cooper and A. Agarwal, *Proc. IEEE*, 90, 956 (2002).
- [5] A. Aleksov, M. Kubovic, N. Kaeb, U. Spitzberg, A. Berfmaier, G. Dollinger, Th. Bauer, M. Schreck, B. Stritzker, and E. Kohn, *Diamond Relat. Mat.*, 12, 391 (2003).
- [6] A. Aleksov, M. Kubovic, M. Kasu, P. Schmid, D. Grobe, S. Ertl, M. Schreck, B. Stritzker, and E. Kohn, *Diamond Relat. Mat.*, 13, 233 (2004).
- [7] A. Denisenko and E. Kohn, *Diamond Relat. Mat.*, 14, 491 (2005).
- [8] G. Chicot, D. Eon, and N. Rouger, *Diamond Relat. Mat.*, 69, 68 (2016).
- [9] P. L. Dreike, D. M. Fleetwood, D. B. King, D. C. Sprauer, and T. E. Zipperian, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, 17, 594 (1994).
- [10] C. J. H. Wort and R. S. Balmer, *Mater. Today*, 17, 22 (2008).
- [11] J. Isberg, J. Hammersberg, E. Johansson, T. Wikstrom, D. J. Twitchen, A. J. Whitehead, S. E. Coe, and G. A. Scarsbrook, *Science*, 297, 1670 (2002).
- [12] B. J. Baliga, *J. Appl. Phys.*, 53, 1759 (1982).

- [13] H. Umezawa, M. Nagase, Y. Kato, and S. I. Shikata, *Diamond Relat. Mat.*, 24, 201 (2012).
- [14] A. Traore, *Thesis of High power diamond Schottky diode*, University of Grenoble, France (2014).
- [15] R. J. Hemley, *Single-Crystal Diamonds: new developments and applications*, https://legacy.gl.ciw.edu/static/users/rhemley/Hemley_AI-RAPT_2011.pdf
- [16] Element six, *The element six CVD diamond handbook*, p. 5, https://e6cvd.com/media/wysiwyg/pdf/E6_CVD_Diamond_Handbook_A5_v10X.pdf
- [17] D. G. Goodwin and J. E. Butler, *Handbook of industrial diamonds and diamond films* (Marcel Dekker, Inc., New York, 1997) p. 527.
- [18] T. R. Anthony, *Handbook of industrial diamonds and diamond films*, *Vacuum*, 41, 1356 (1990).
- [19] T. Teraji, *Physics and applications of CVD diamond* (Wiley-VCH, Weinheim, 2008) p. 29.
- [20] M. Kamo, Y. Sato, S. Matsumoto, and N. Setaka, *J. Cryst. Growth*, 62, 642 (1983).
- [21] H. Umezawa, N. Tokuda, M. Ogura, S. G. Ri, and S. I. Shikata, *Diamond Relat. Mat.*, 15, 1949 (2006).
- [22] K. Ikeda, H. Umezawa, S. Shikata, *Diamond Relat. Mat.*, 17, 809 (2008).
- [23] K. Ikeda, H. Umezawa, N. Tatsumi, K. Ramanujam, and S. I. Shikata, *Diamond Relat. Mat.*, 18, 292 (2009).
- [24] R. Kumaresan, H. Umezawa, N. Tatsumi, K. Ikeda, and S. I. Shikata, *Diamond Relat. Mat.*, 18, 299 (2009).
- [25] H. Umezawa, Y. Mokuno, H. Yamada, A. Chayahara, and S. I. Shikata, *Diamond Relat. Mat.*, 19, 208 (2010).
- [26] P. Muret, P. N. Volpe, T. N. Tran-Thi, J. Pemot, C. Hoarau, F. Omnes, and T. Teraji, *Diamond Relat. Mat.*, 20, 285 (2011).
- [27] A. Nawawi, K. J. Tseng, Rusli, G. A. J. Amaratunga, H. Umezawa, and S. Shikata, *Diamond Relat. Mat.*, 35, 1 (2013).
- [28] H. Umezawa, N. Tatsumi, Y. Kato, and S. I. Shikata, *Diamond Relat. Mat.*, 40, 56 (2013).
- [29] H. Umezawa, N. Tatsumi, Y. Kato, and S. I. Shikata, *Diamond Relat. Mat.*, 36, 51 (2013).
- [30] Y. Kato, H. Umezawa, and S. I. Shikata, *Diamond Relat. Mat.*, 57, 22 (2015).
- [31] H. Umezawa, S. I. Shikata, and T. Funaki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 53, 05FP06 (2014).
- [32] H. Umezawa and S. I. Shikata, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 53, 04EP04 (2014).
- [33] D. W. Kang, H. N. Chang, and M. W. Ha, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 56, 06GE09 (2017).
- [34] H. N. Chang, D. W. Kang, and M. W. Ha, *Trans. Korean Instist. Electr. Eng.*, 66, 659 (2017).

저/자/약/력



성명 하민우

학력 2001년
2007년

한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학사
서울대학교 전기공학과 공학박사

경력 2007년 - 2009년
2009년 - 2013년
2013년
2014년 - 현재

삼성전자
전자부품연구원
The University of Texas at Dallas 박사 후 연구원
명지대학교 전기공학과 조교수