

# GaN 소자의 전류 검출을 위한 높은 상호 인덕턴스를 가지는 PCB 내장형 Pick-up Coil

김경모, 차화랑, 양시석, 김래영<sup>†</sup>  
한양대학교

## PCB Integrated Pick-up Coil Structure with High Mutual Inductance for Current Measurement of GaN Devices

Kyeong-Mo Kim, Hwa-Rang Cha, Si-Seok Yang, Rae-Young Kim<sup>†</sup>  
Hanyang University

### ABSTRACT

본 논문은 GaN 디바이스를 사용하는 전력변환장치에서 Pick-up coil을 PCB 패턴으로 구현하여 전류를 측정하는 기법에 관하여 제안한다. 기존에 사용되는 PCB 패턴 코일 구조의 경우 PCB 이중층만 구성하여 관통 홀이나 추가공정이 필요함에 비해 본 논문에서 제안한 PCB 패턴 코일 구조의 경우 다층 기판을 사용하여 코일을 구성함으로써 기존의 패턴에 비해 높은 상호 인덕턴스 값을 가지게 되고, 코일의 출력 전압값이 높아져 더 높은 감도를 가지게 된다. 또한 PCB 외부의 추가적인 공정 작업이 없이 구성이 되었다. 전류 측정은 코일 뒷단에 적분기를 통합하여 구성하였으며, 시뮬레이션을 통해 전류 측정 성능을 검증한다.

### 1. 서 론

실리콘 카바이드(SiC), 질화 갈륨(GaN)과 같은 Wide Band Gap(WBG) 전력 반도체 소자는 기존 Si 소자에 비해 같은 Power rate에서 작은 패키징 크기와 고속 스위칭이 가능하기 때문에 고밀도 전력변환장치에 사용하기 적합하다. 현재 가장 빠른 스위칭 소자인 GaN의 경우 SiC 대비 스위칭 주파수가 높고 낮은 게이트 전압을 가지기 때문에 고주파 동작 시 기생 인덕턴스에 더 민감하다. 또한 고속 스위칭 동작 시 정확한 스위칭 전류 측정의 결과를 얻으려면 일반적으로 측정하는 rising 및 falling 구간의 측정 대역폭 값 보다 2~3배 더 높은 전류 측정 대역폭을 가지는 전류 측정 장치가 요구된다.

전력 반도체 소자의 스위칭 전류 측정을 위해 일반적으로 널리 사용되는 방법으로 Rogowski Coil, Active Current Transformer, Coaxial Shunt Resister 등이 있다. 하지만 회로에 직접 삽입하거나 대역폭 및 기생의 영향으로 인해 정확한 측정이 어렵다.

한편 회로 상에 물리적 삽입 및 포화 문제가 없는 PCB 패턴을 이용한 Pick-up coil이 제안되었다. 전력 스위치 소자를 통해 PCB 상에 전류가 흐르고, 전류가 흐르는 통로 내부에 PCB 패턴으로 구성된 Pick-up coil이 존재하며, 측정하는 도체에서 생성된 자속이 쇄교되어 유도전압이 형성 되는 원리이다. 기존 Pick-up coil에 관한 참고문헌<sup>[1~2]</sup>에서 PCB 상의 작은 면적에 구성하며, 자속이 쇄교 되는 코일의 폐면적이 작고 측정하는 도체와 코일 간의 상호 인덕턴스 값이 낮게 형성되어

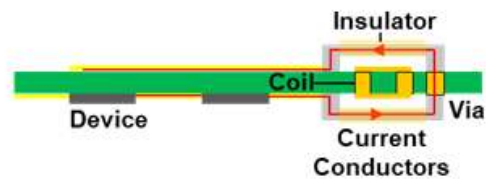


그림 1 PCB 패턴 픽업 코일 물리적 모델  
Fig. 1 PCB pattern pick-up coil physical model

작은 유도 전압이 나타난다. 이로 인해 측정하는 도체를 코일 주변에 둘러싼 형태로 구성하고 쇄교 자속량을 늘리기 위해 외부에 copper, bus bar 등과 같은 도체를 연결하여 추가 공정 작업이 진행되어야 한다. 코일을 구성하는 방법은 수직 및 측면 구성으로 2가지가 존재한다. 수직 이중층으로 구성된 PCB 패턴 Pick-up coil을 사용하면 외부로 코일이 노출 되어 추가 공정 작업이 필요하다. 다른 기법으로 코일을 PCB 측면상에 구성하는 것이 제안되었으나, 코일의 턴 수를 늘리기 어려워 상호 인덕턴스 값이 낮게 형성된다. 결과적으로 소형화 시킨 코일에 비해 상호인덕턴스 값이 낮고, 외부 도체의 크기가 커져 전체적인 크기는 소형화, 고밀도화 및 양산이 어렵다.

본 논문에서는 높은 상호인덕턴스 값을 갖는 coil 구조 및 외부 추가 공정 작업이 없는 PCB 패턴 pick-up coil 구성 방법을 제안한다. 제안된 구성 방법은 자속이 쇄교 되는 폐면적 내부를 활용하여 높은 상호 인덕턴스 값을 가지고, 출력 전압 값이 커짐으로 코일의 전류 측정 정확도를 높인다. 또한 PCB 외부 추가 공정 작업이 없이 PCB 내부 패턴 coil 구성 및 전류가 균형 있게 분포된 전류 패스 구성으로 cost 및 크기 또한 감소한다. 제안된 coil 구성 방법은 Double Pulse Test(DPT)에 적용하여 시뮬레이션을 통해 전류 측정 성능을 검증한다.

### 2. PCB 내장형 Pick-up Coil 고찰

#### 2.1 Pick-up coil 및 전류 측정

Pick-up coil을 위한 전류측정 원리 설명을 위해 DPT회로에 등가화 된 그림 2와 같은 PCB 상의 패턴으로 구성된 coil을 이용하며 중심 코어에 패턴으로 형성된 코일을 감은 형태이며, Q2 스위치 source단에 배치된다. 그림 상의  $\phi_1$ 는 코일에 쇄교 되는 자기 자속,  $S_1$ 는 코일의 폐면적,  $i_s$ 는 PCB 상에 흐르는 전류,  $V_{coil}$ 은 코일의 출력전압이다. 스위치 on, off를 통해

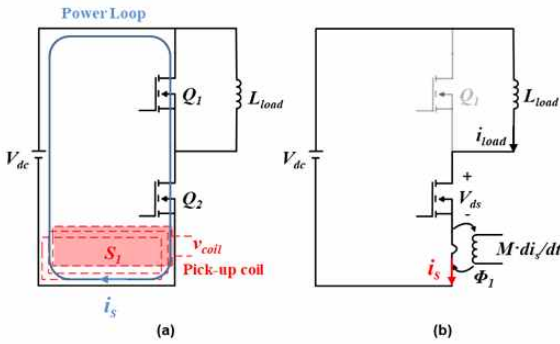


그림 2 더블 펄스 테스트 회로에 배치된 픽업 코일  
Fig. 2 Pick-up coil placed in double pulse test circuit

전류 변화가 형성되어 암페르 법칙으로 메인 PCB 상에 흐르는 전류는 자기 자속  $\Phi_1$ 를 생성하고, 코일의 폐면적  $S_1$ 에 쇄교되며 식(1)과 같다.

$$\Phi_1 = \oint_S B_1 \cdot dS_1 \quad (1)$$

이때 발생한 자속이 코일의 폐면적을 쇄교하여 유도기전압  $v_{coil}$ 이 발생하며 코일의 출력전압 값은 코일의 턴 수  $N$ 에 비례하여 식(2)와 같이 나타낼 수 있고, 적분된 식 (3)을 통해 Pick-up coil 상에 나타나는 상호인덕턴스  $M$ 과 미분형식의 전류 변화를  $di_s/dt$  곱한 유도기전압을 코일 뒷단에 적분기를 통합하여 실제 전류로 복원 가능하다.

$$v_{coil}(t) = M \frac{di_s(t)}{dt} = N \frac{d\Phi_1(t)}{dt} \quad (2)$$

$$i_s(t) = \frac{1}{M} \int v_{coil}(t) dt \quad (3)$$

### 3. 구조에 따른 상호 인덕턴스 해석

#### 3.1 Pick-up coil PCB 층 비교

코일에 나타나는 상호 인덕턴스 값 비교를 위해 먼저 PCB 각층별 구성을 통한 비교를 한다. MAXWELL을 사용해 그림 3(a)와 같이 기준에 사용되는 톱니 패턴의 Pick-up coil이 구성하여 PCB 상에 흐르는 전류는 bottom에서 via를 통해 top 면으로 흐르고 그림 3(b)에 Pick-up coil을 포함한 6층 기판 PCB 구조를 형성한다. 코일의 layer 사용은 6층중 내부의 layer 1, 2, 3, 4를 사용하며, 2 layer, 3 layer 및 4 layer 모두를 사용하여 상호 인덕턴스 값을 비교한다. 그림 4에서 2 layer로 구성된 코일의 폐면적에 쇄교되는 자속 밀도 분포를 알 수 있고, bottom에서는 균일하게 분포된 전류가 흐르고 top 면에서는 측면에 치우친 전류 분포를 나타내기 때문에 layer2, 3이 가장 큰 상호 인덕턴스 값을 형성한다.

앞에서 구성한 2 layer 패턴 코일과 같이 3 layer 및 4 layer 코일을 구성하여 전체 값을 비교 하였을 때 4 layer를 사용한 구성이 가장 큰 상호 인덕턴스 값을 나타내었고, 자속이 쇄교되는 면적이 가장 큰 코일 layer 구조가 높은 상호 인덕턴스 값을 형성한다.

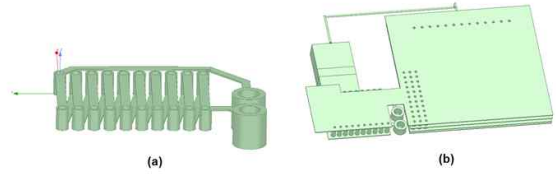


그림 3 MAXWELL 시뮬레이션을 통한 코일 구조  
Fig. 3 Coil structure with MAXWELL simulation

MAXWELL flux density simulation	Pickup coil candidate	Mutual inductance
	Layer1,2	0.36 (nH)
	Layer2,3	0.50 (nH)
	Layer3,4	0.39 (nH)

그림 4 PCB 위치에 따른 2층 픽업 코일 상호 인덕턴스  
Fig. 4 2-layer pick-up coil mutual inductance according to PCB location

#### 3.2 Coil 패턴 적용 및 비교

넓은 폐면적을 갖는 PCB 패턴 Pick-up coil 구조는 그림 5와 같이 Layer1, 4를 사용한 구조와 layer 1~4를 모두 사용한 구조가 존재한다. 적용하는 패턴은 Fishbone, Sawtooth, Triangle이다. 하지만 layer 1~4를 모두 사용한 Fishbone 패턴 코일은 구성이 어렵고 낮은 상호인덕턴스 값이 형성되 제외하고, 제안한 Spiral 구조를 적용한다. Pick-up coil을 구성하는 6층 기판 PCB 상의 copper 및 PCB 전체 두께에 대한 패턴과 via 사이의 공간이 제한되어 있기 때문에 권선 폭은 0.3mm이며, 코일 설계 면적은 3.03mm x 6.95mm이다.

같은 면적상에 패턴 적용을 통한 코일 구성 시 코일의 폐면적이 가장 큰 패턴은 layer1, 4를 사용한 Sawtooth와 내부 모두를 사용한 Spiral 구조로 좁혀지며, PCB 내부 모두를 사용한 구조의 경우 코일의 내부 턴 수가 증가해 상호 인덕턴스 값은 제안한 Spiral 구조가 가장 높게 나온다.

Pattern candidate	Sawtooth	Triangle	Fishbone
Layer 1,4 Pattern			
Mutual Inductance	2.75 nH	1.05 nH	2.21 nH
Turn Number	10	5	9
Pattern candidate	Sawtooth	Triangle	Spiral
Layer 1,4 Pattern			
Mutual Inductance	1.19 nH	1.01 nH	3.10 nH
Turn Number	6	10	10

그림 5 패턴을 적용한 코일의 상호인덕턴스 및 턴 수 비교  
Fig. 5 Comparison of mutual inductance and number of turns of coiled pattern

#### 4. Pick-up coil 등가 모델 및 적분회로

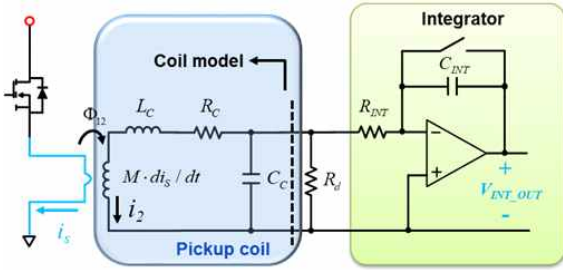


그림 6 픽업 코일 등가회로 및 적분기  
Fig. 6 Pick-up coil equivalent circuit and integrator

그림 5의 제안한 Spiral 구조 코일의 self 파라미터 값 추출을 위해 ANSYS Q3D가 사용되며, 시뮬레이션을 통한 각 파라미터는  $R_c = 0.26\Omega$ ,  $C_c = 8.42\text{pF}$ ,  $L_c = 66.29\text{nH}$  이고, 그림 6은 Pick-up coil의 등가화 된 회로 모델을 보여준다. 코일의 등가화 된 회로는 코일의 self 인덕턴스  $L_c$ , 커패시턴스  $C_c$ , 저항  $R_c$ 로 구성되고  $R_d$ 는 댄핑 저항을 나타낸다. 1차측 전류  $i_s$ 에 대한 코일의 출력전압 비인 전달함수 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 코일에 낮은 출력 전압 값이 출력 될 경우 노이즈 및 ripple의 영향이 크게 나타나기 때문에 댄핑 저항  $R_d$ 를 추가하여 공진 피크 없이 감쇠비가 1인 critical damp로 맞춰서 Q3D 및 MAXWELL 프로그램을 통해 추출된 파라미터 값을 대입하면  $R_d$ 의 값은  $45\Omega$ 으로 선정된다.

$$G_{coil}(s) = \frac{v_{coil}(s)}{I_s(s)} = \frac{-\frac{M}{L_c C_c} s}{s^2 + \left(\frac{L_c + R_c R_d C_c}{L_c C_c R_d}\right) s + \frac{R_c + R_d}{L_c C_c R_d}} \quad (4)$$

실제 전류 복원을 위해 코일 뒷단에 적분기가 통합된다. 능동 적분기 구성을 위해 저항  $R_{INT}$ 와 커패시턴스  $C_{INT}$  구성을 통한 수식을 나타내면 식(5)와 같이 LPF형태로 나타나고, 저항  $R_{INT}$ 와 커패시턴스  $C_{INT}$ 를 코일과 통합하면 전체 전류 센서는 식(6)과 같이 표현이 된다.

$$G_{INT}(s) = -\frac{1}{R_{INT} C_{INT} s} \quad (5)$$

$$G_{sen}(s) = \frac{v_{INT}(s)}{I_s(s)} = \frac{\frac{M}{L_c C_c R_{INT} C_{INT}}}{s^2 + \left(\frac{L_c + R_c R_d C_c}{L_c C_c R_d}\right) s + \frac{R_c + R_d}{L_c C_c R_d}} \quad (6)$$

#### 5. 시뮬레이션

제안한 코일의 구조를 통해 전류 측정 성능을 시뮬레이션으로 검증한다. 그림 6과 같은 회로 구성일 때 표 1은 실험 파라미터를 나타낸다. 그림 7은 1차측 source 전류, Pick-up coil의 전압, 적분기 출력 전압을 나타낸다. 1차측 전류의 상승시간이  $3.7\text{ns}$ 이며, 확보해야하는 대역폭은 대략  $94\text{MHz}$ 로 정해진다. 코일 및 적분기의 대역폭이

표 1 시뮬레이션 매개 변수  
Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
$M$	$3.1(\text{nH})$
$L_c$	$66.29(\text{nH})$
$C_c$	$8.42(\text{pF})$
$R_c$	$0.29(\Omega)$
$R_d$	$45(\Omega)$
$R_{INT}$	$15(\Omega)$
$C_{INT}$	$200(\text{pF})$

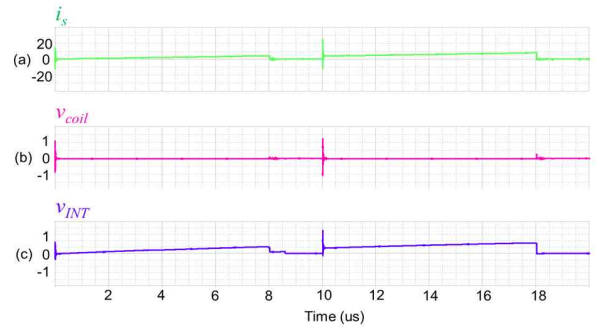


그림 7 시뮬레이션 파형; (a)1차측 source 전류  
(b)Pick-up coil 출력 전압 (c)적분기 출력 전압  
Fig. 7 Simulation waveform; (a)Primary source current  
(b)Pick-up coil output voltage (c)Integrator output voltage

$141\text{MHz}$ 로 형성되어 복원된 전류의 값이 1차측 전류의 값을 잘 추종한다.

#### 6. 결론

본 논문에서는 PCB 층 구조 비교 및 패턴 적용 시 높은 상호 인덕턴스 값을 나타내는 Spiral 구조의 PCB 패턴 Pick-up coil을 통해 전류를 측정하였다. PCB 패턴 Pick-up coil 사용 시 전체 전류 측정 센서의 사이즈가 감소되고, 높은 상호 인덕턴스 값을 갖게 되어 전류 측정 정확도가 높아진다. 이러한 Pick-up coil을 사용한 전류 측정은 다양한 어플리케이션 회로에 적용하여 전류 측정을 하는 높은 활용도가 기대된다.

본 연구는 2019년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 201900000001457)

#### 참고 문헌

- [1] Wang, Kangping, et al. "A High-Bandwidth Integrated Current Measurement for Detecting Switching Current of Fast GaN Devices", IEEE Transactions on Power Electronics 33.7, Vol. 33, No. 7, 2018, pp. 6199-6210.
- [2] Xue, Yang, et al. "A Compact Planar Rogowski Coil Current Sensor for Active Current Balancing of Parallel-Connected Silicon Carbide MOSFETs", 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, PA, USA, 2014, pp. 4685-4690.