

반도체 장비에 사용되는 고속 회복 다이오드를 활용한 전자식 가변 커패시터 개발

황청현, 김홍민, 최희원, 서용석, 임천용
 전북대학교 전기공학과

An Electrical Variable Capacitor Circuit Using Fast Recovery Diodes For Semi-Conductor Manufacturer System

CheongHyeon Hwang, Hongmin Kim, Heewon Choi, Yongsug Suh, Cheon-Yong Lim
 Department of Electrical Engineering, Jeonbuk National University, Korea

ABSTRACT

본 논문은 Fast recovery 다이오드를 사용한 새로운 전자식 가변 커패시터 (Electrical Variable Capacitor, EVC) 회로를 제안한다. 제안하는 EVC 회로는 기존 EVC 회로의 단점인 PiN 다이오드의 사용과 소자들의 높은 정격 전압 문제를 개선함으로써, 비용을 대폭 절감하는 새로운 EVC 회로를 제안한다. 제안하는 EVC 회로의 효율성은 RF 전원 주파수 13.56MHz, RF 전력 1.8kW 에서의 실험을 통해 검증하였다.

1. 서론

최근 AI, 빅데이터 분석등의 기술의 발전으로 반도체 소자가 대량의 데이터 처리를 필요로 함에 따라 고성능 반도체에 대한 수요가 증가하는 추세이다. 고성능 반도체를 제작하기 위해서는 반도체 제조 공정 중 식각과 증착공정에서 정밀함이 중요하기 때문에 RF 플라즈마가 사용된다.

그림 1 은 RF 플라즈마 시스템을 블록 다이어그램으로 나타낸 것이다. RF 플라즈마 시스템은 RF 전력발생기, 임피던스 조정 회로 그리고 플라즈마가 형성되는 플라즈마 챔버로 구성된다. 플라즈마 챔버 내에 생성되는 플라즈마의 임피던스는 사용되는 기체의 종류 및 상태에 변화하기 때문에 RF 전력 발생기에서 플라즈마 챔버를 바라보았을 때의 유효 임피던스 Z_{eff} 를 RF 전력 발생기 내부의 임피던스(=50Ω)와 동일하게 하여 RF 전력 발생기의 파워를 플라즈마 챔버에 효율적으로 전달해주는 임피던스 조정 회로가 필수적이다.^[1]

임피던스 조정 회로는 인덕턴스를 조절하는 가변 인덕터 방식과 커패시턴스를 조절하는 가변 커패시터 방식이 존재한다. 가변 인덕터 방식은 시스템 부피가 크다는 단점이 존재한다. 따라서 최근에는 커패시턴스를 조절하는 가변 커패시터 방식이 선호되는 추세이다. 가변 커패시터 방식은 기계적 가변 커패시터 (Vacuum variable capacitor, VVC) 방식과 전자식 가변 커패시터 (Electrical Variable Capacitor, EVC) 방식이 존재한다. VVC는 모터를 통해 기계적으로 전극 간의 거리를 조절하여 커패시턴스를 변화시키는 방식이다. 기계적으로 커패시턴스를 변화시키기 때문에 커패시턴스 가변 속도가 느려 임피던스 조정 속도가 느려진다. 이는, 반도체 제조 공정의 속도도 느려지고, 결과적으로, 반도체의 수율 감소로 이어진다. 따라서 최근에는 스위치의 스위칭 동작을 통해 커패시턴스를 전기적으로 조절하는 EVC 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

그림 2 는 EVC 회로의 기본적인 동작 원리를 보여준다. EVC 회로는 스위칭 소자의 스위칭 동작에 따라 회로에 보이는 유효 커패시턴스 C_{eff} 를 변화시키는 방식이다. 그림 2(a) 와 같이, 스위칭 소자가 켜지면, 병렬 커패시터 C_{org} 와 가변 커패시

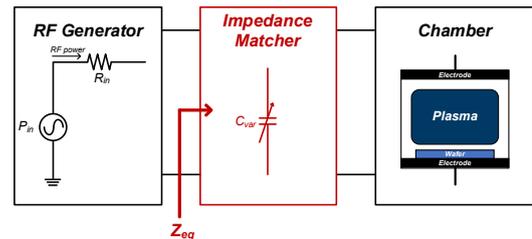


그림 1. RF 플라즈마 시스템의 블록 다이어그램.

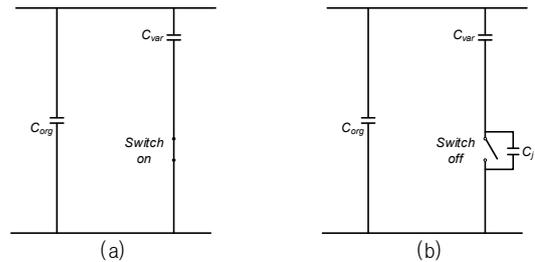


그림 2. EVC의 기본 동작. (a) EVC가 켜졌을 때. (b) EVC가 꺼졌을 때.

터 C_{var} 가 병렬로 보이게 되며, C_{eff} 는 $C_{org} + C_{var}$ 이 된다. 반면에, 그림 2(b) 와 같이, 스위칭 소자가 꺼지면, C_{org} 만 회로에 보이게 되며 C_{eff} 는 C_{org} 가 된다. 하지만 실제의 경우 스위칭 소자가 꺼지면, 스위칭 소자의 접합 커패시턴스 C_j 가 회로에 보이게 되어 C_{org} 뿐만 아니라 병렬로 C_{var} 과 C_j 의 직렬 커패시턴스가 보이게 된다. 따라서 C_{eff} 가 C_{org} 가 되기 위해서는, C_j 가 C_{var} 와 C_{org} 보다 매우 작은 값을 가져야한다. 따라서, 통상적으로 다이오드에 인가되는 역전압 V_D 의 크기에 상관없이 C_j 가 3~4pF 로 낮은 PiN 다이오드가 주로 사용되어 왔다. 하지만, PiN 다이오드는 소자의 특수성으로 인하여 가격이 비싸고 스위칭 특성이 좋지 않다는 한계가 존재한다. 반면에 Fast recovery 다이오드는 PiN 다이오드에 비해 훨씬 저렴하다는 장점이 있으나, V_D 에 따라 C_j 가 넓은 폭으로 변하며 그 값도 크다는 한계로 인해 기존 EVC 회로에서 스위칭 소자로 사용되기 어려웠다.

본 논문에서는 Fast recovery 다이오드를 사용하면서도 작은 접합 커패시턴스를 일정하게 갖는 회로를 제안한다. 이를 통해 기존 EVC 회로에 비해 비용을 대폭 절감할 수 있다.

2. 기존 EVC 회로 설명

2.1 기본 동작 설명

그림 3 은 PiN 다이오드를 사용하는 대표적인 기존 EVC 회로의 회로도이다. 이는 스위치 Q_L 이 켜지면 PiN 다이오드 D_{PiN} 이 켜져서 C_{eff} 는 $C_{org} + C_{var}$ 이 된다. 또한, 스위치 Q_H 이

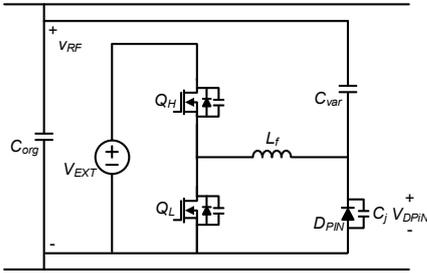


그림 3. 기존 EVC 회로의 회로도.(단일 셀)

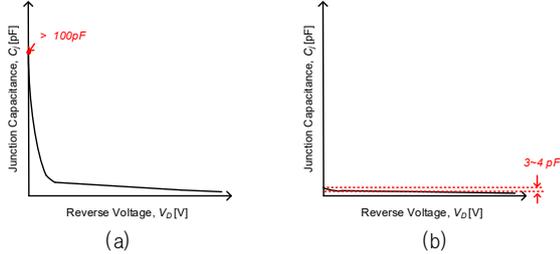


그림 4. 다이오드의 역전압에 따른 접합 커패시턴스. (a) Fast recovery 다이오드. (b) PiN 다이오드.

표 1. 기존 EVC 회로에서 V_{RF}^{pk} 이 일정한 경우, $V_{D,Bias}$ 에 따른 Fast recovery 다이오드(DHG1011800PA)의 C_j 변화. ($V_{RF}^{pk}=80V$)

C_j [pF]	$V_{D,Bias} = 100V$	$V_{D,Bias} = 400V$	$V_{D,Bias} = 700V$
	11.7	9.0	6

표 2. 기존 EVC 회로에서 일정한 $V_{D,Bias}$ 이 인가되는 경우, V_{RF}^{pk} 에 따른 Fast recovery 다이오드(DHG1011800PA)의 C_j 변화. ($V_{D,Bias}=700V$)

C_j [pF]	$V_{RF}^{pk}=80V_{pk}$	$V_{RF}^{pk}=700V_{pk}$
	6	6.4

켜지면 D_{PIN} 이 꺼져서 C_j 가 보이게 된다. 이 때 L_f 의 임피던스 Z_{L_f} 가 C_j 의 임피던스 Z_{C_j} 보다 훨씬 크다고 가정하면, C_j 는 C_{var} 과 C_{org} 보다 매우 작기 때문에 C_{eff} 는 C_{org} 가 된다. 이 때, D_{PIN} 에 인가되는 전압 V_{DPIN} 은 외부전압원 V_{EXT} 으로부터 공급되는 바이어스 역전압 $V_{D,Bias}$ 과 RF 전압 V_{RF} 의 합이 된다.

2.2 기존 EVC 회로의 한계

2.2.1 PiN 다이오드의 사용

그림 4 는 다이오드에 인가되는 역전압 V_D 에 따른 C_j 의 변화를 보여준다. 그림 4(a) 에서 볼 수 있듯, Fast recovery 다이오드는 V_D 에 따라 C_j 가 크게 변화하는 특성을 가진다. 이를 확인하기 위해 기존 EVC 회로에서 Fast recovery 다이오드를 사용하여 $V_{D,Bias}$ 의 크기에 따른 C_j 의 변화를 측정하였다. 이 때, RF 전압의 변동폭 V_{RF}^{pk} 을 작게하여 C_j 가 $V_{D,Bias}$ 의 크기에만 영향을 받도록 하여 실험을 진행하였다.

표 1 은 기존 EVC 회로에서 Fast recovery 다이오드를 사용하는 경우, $V_{D,Bias}$ 의 크기에 따른 실제 C_j 값을 보여준다. 표 1 에서 볼 수 있듯, 기존 EVC 회로에서 Fast recovery 다이오드를 사용하면 $V_{D,Bias}$ 의 크기에 따라 C_j 가 달라지는 것을 확인하였다. 따라서 기존의 eVC 회로에서는 PiN 다이오드를 사용하였다. PiN 다이오드는, 그림 4(b)와 같이, V_D 와 상관없이 모든 전압 범위에서 낮고 일정한 C_j 를 갖는다. 하지만 서론에서 언급했듯, PiN 다이오드는 소자의 특수성으로 인하여 가격이 비싸고 스위칭 특성이 좋지 않다는 한계가 있다.

2.2.2 추가적인 외부 전압원의 사용

서론에서 언급했듯, 기존에는 Fast recovery 다이오드를 사용하면 $V_{D,Bias}$ 에 따라 다이오드의 C_j 가 변화하기 때문에 Fast recovery 다이오드를 사용할 수 없었다. 하지만 그림 4(a) 와

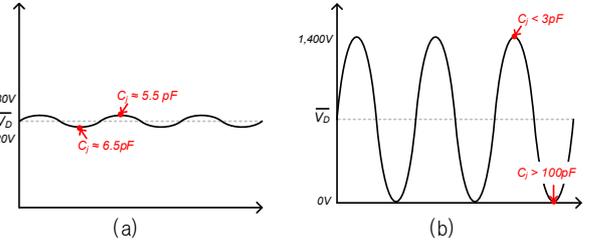


그림 5. 기존 EVC 회로에서 일정한 $V_{D,Bias}$ 이 인가되는 경우, V_{RF}^{pk} 에 따른 Fast recovery 다이오드(DHG1011800PA)의 V_D 와 C_j 변화. ($V_{D,Bias}=700V$) (a) $V_{RF}^{pk} = 80V_{pk}$. (b) $V_{RF}^{pk} = 700V_{pk}$.

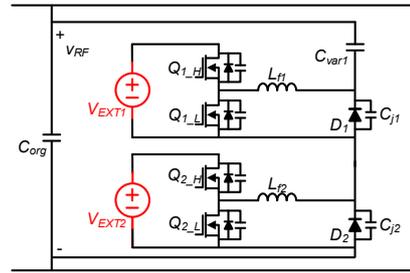


그림 6. 기존 EVC 회로가 직렬로 연결된 회로도.(듀얼 셀)

같이, Fast recovery 다이오드는 높은 V_D 가 인가될 때 낮은 C_j 를 갖는다. 따라서 실험을 통해, 높은 $V_{D,Bias}$ 가 인가될 때 V_{RF}^{pk} 가 C_j 에 미치는 영향력을 확인하였다.

그림 5 는 기존 EVC 회로에서 Fast recovery 다이오드를 사용할 때 일정한 $V_{D,Bias}$ 에서 V_{RF}^{pk} 에 따른 C_j 의 예상되는 변화를 보여준다. 그림 5(a) 에서 볼 수 있듯, V_{RF}^{pk} 가 작을 때 C_j 값의 변화량 ΔC_j 가 작기 때문에 $V_{D,Bias}$ 에 해당하는 C_j 가 보일 것으로 예상되었다. 또한 그림 5(b)에서 볼 수 있듯, V_{RF}^{pk} 가 클 때 ΔC_j 가 매우 크기 때문에 C_j 가 $V_{D,Bias}$ 일 때의 C_j 보다 훨씬 크게 보일 것으로 예상되었다.

표 2 는 기존 EVC 회로에서 일정한 $V_{D,Bias}$ 을 인가해주는 경우, V_{RF}^{pk} 에 따른 실제 C_j 의 변화를 보여준다. 표 2 에서 알 수 있듯, 예상과는 다르게 V_{RF}^{pk} 의 영향이 매우 적으며, $V_{D,Bias}$ 에 해당하는 C_j 값을 갖는 것을 발견하였다. 따라서 표 1 과 표 2 를 통해, 높은 $V_{D,Bias}$ 을 인가할수록 일정하면서도 낮은 C_j 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 사용된 소자의 정격전압이 1,800V인 점을 고려하여 700V의 $V_{D,Bias}$ 를 인가하였다. 이는 기존 eVC 에서 다이오드를 켜기 위해 V_{RF}^{pk} 만큼의 $V_{D,Bias}$ 를 인가하여 다이오드에는 최대 $2V_{RF}^{pk}$ 의 전압이 인가되기 때문이다. 따라서 700V의 $V_{D,Bias}$ 를 인가하면, 표 1 에서 $V_{D,Bias}$ 가 700V 일때의 값과 동일한 6 pF 의 C_j 를 갖게 된다. 이는 PiN 다이오드의 C_j 값의 두 배에 해당하는 값으로 C_j 값을 줄이기 위해, 기존 EVC 회로를 직렬로 연결한 구조를 생각해볼 수 있다.

그림 6 는 기존 EVC 회로가 직렬로 연결된 회로의 회로도이다. 이 회로는 다이오드 D_1 과 D_2 가 꺼졌을 때 각 다이오드의 접합 커패시턴스 C_{j1} 과 C_{j2} 가 직렬로 보이게 됨으로써 Fast recovery 다이오드를 사용하여도 합산 커패시턴스를 3pF으로 낮출 수 있다. 이러한 구조를 통해 Fast recovery 다이오드를 사용할 수 있게 된다. 하지만 이 구조는 두 개의 V_{EXT} 을 사용해야 하는 한계가 있다. RF 전력 1.8kW 조건에서 V_{EXT} 은 700V에 해당하는 큰 값을 가지기 때문에 이를 두 개 사용하는 것은 매우 큰 부담이 된다.

3. 제안하는 EVC 회로의 구조 및 특징

기존 EVC 회로를 직렬로 연결하는 구조는 추가적인 V_{EXT}

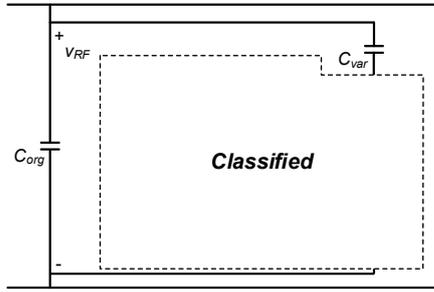


그림 7. 제안하는 EVC 회로의 회로도.

표 3. 제안하는 EVC 회로에서 일정한 $V_{D,Bias}$ 이 인가되는 경우 V_{RF}^{pk} 에 따른 합산 커패시턴스 변화. ($V_{D,Bias}=700V$)

C_j [pF]	$V_{RF}^{pk}=80V_{pk}$	$V_{RF}^{pk}=700V_{pk}$
	3	3.1

을 필요로 하는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 그림 7 과 같이 기존 EVC 회로를 역방향으로 직렬 연결한 구조를 제안한다.

3.1 기본 동작 설명

제안하는 EVC 회로는 Q_{1L} 와 Q_{2L} 이 켜지면 D_1 과 D_2 가 켜져서 C_{eff} 는 $C_{org}+C_{var}$ 이 된다. 또한, Q_{1H} 와 Q_{2H} 이 켜지면 D_1 과 D_2 가 꺼져서 C_{j1} 과 C_{j2} 가 직렬로 보이게 된다. 이 때 L_{f1} 과 L_{f2} 의 임피던스 $Z_{L_{f1}}$ 과 $Z_{L_{f2}}$ 가 C_{j1} 과 C_{j2} 의 임피던스 $Z_{C_{j1}}$ 과 $Z_{C_{j2}}$ 보다 훨씬 크다고 가정하면, C_{j1} 과 C_{j2} 의 합산 커패시턴스는 C_{var} 과 C_{org} 보다 매우 작기 때문에 C_{eff} 는 C_{org} 가 된다.

3.2 제안하는 EVC 회로의 장점

3.2.1 Fast recovery 다이오드의 사용

3.1 절에서 언급했듯, 제안하는 EVC 회로는 다이오드가 꺼지게 되면 C_{j1} 과 C_{j2} 가 직렬로 보이게 된다. 따라서 높은 $V_{D,Bias}$ 을 인가하면 합산 커패시턴스를 PiN 다이오드와 유사한 C_j 를 유지할 수 있다. 또한 표3에서 알 수 있듯, 큰 $V_{D,Bias}$ 가 인가되면 V_{RF}^{pk} 에 따른 합산 커패시턴스 변화가 없는 것을 확인하였다. 따라서, 제안하는 EVC 회로는 비싼 PiN 다이오드를 대신하여 저렴한 Fast recovery 다이오드를 사용하여 비용을 대폭 절감할 수 있으며, 스위칭 특성이 좋다는 장점이 있다.

3.2.2 사용되는 V_{EXT} 의 개수 감소

기존 EVC 회로에서는 Fast recovery 다이오드를 사용하기 위해서 두 개의 V_{EXT} 을 사용해야 한다. 반면 제안하는 EVC 회로는 다이오드를 역방향으로 직렬 연결되어 있기 때문에 하나의 V_{EXT} 으로 두 개의 다이오드를 꺼줄 수 있게 된다. 이는 높은 출력을 요구하는 시스템에서 더욱 효과적이다.

4. 실험 결과

제안하는 EVC 회로의 유효성을 확인하기 위해 입력전력 1.8kW, 입력주파수 13.56MHz, 부하 임피던스 $2+5j\Omega$ 에서 실험을 진행하였다. 실험에 사용한 주요 소자와 사양은 표 4 에 나열되어 있다. 병렬 커패시터 C_{org} 는 VVC를 사용하였으며, EVC 회로와 병렬로 연결되어 있다. 이 때, C_{org} 와 EVC 회로의 동작에 따른 유효 커패시턴스 C_{EVC} 의 합이 375pF이 되었을 때 정합이 되도록 설정하였다. 따라서 EVC 회로의 스위칭 동작에 따라 C_{org} 를 조절하여 정합을 맞추었으며, 375pF 과 C_{org} 의 차이를 통해 C_{EVC} 값을 도출할 수 있다.

표 5 는 제안하는 EVC 회로에서 V_{RF}^{pk} 이 작을 때 스위칭 동작에 따른 C_{EVC} 의 변화를 보여준다. 제안하는 EVC 회로는 Q_{1L} 와 Q_{2L} 이 켜지면, C_{EVC} 는 C_{var} 값인 100 pF 이 보이는

표 4. 실험 조건 및 시제품의 주요 소자와 비용

Parameters	PiN 다이오드를 사용하는 기존 eVC	제안하는 eVC
가변 커패시터, C_{var}		100 pF
외부전압원, V_{EXT}	1,400 V	700V
다이오드 (D_{FN}, D_1, D_2)	MA4PK3003 * 1EA (PiN : 3,000V)	DHG10I1800PA * 2EA (Fast recovery : 1,800V)
스위치 (Q_H, Q_L)	G3R45MT17D * 2EA (MOSFET : 1,700V)	STW40N95K5 * 4EA (MOSFET : 900V)
Cost	\$376.92 * 1EA + \$32.73 * 2EA = \$442.38	\$3.18 * 2EA + \$16.96 * 4EA = \$74.2

표 5. 제안하는 EVC 회로의 스위칭 동작에 따른 커패시턴스 변화($V_{RF}^{pk}=80V_{pk}$)

	Q_{1L} & Q_{2L} ON	Q_{1H} & Q_{2H} ON
C_{eff} [pF]	375	375
C_{org} [pF]	275	372
C_{EVC} [pF]	100	3

표 6. 제안하는 EVC 회로의 스위칭 동작에 따른 커패시턴스 변화($V_{RF}^{pk}=700V_{pk}$)

	Q_{1L} & Q_{2L} ON	Q_{1H} & Q_{2H} ON
C_{eff} [pF]	375	375
C_{org} [pF]	275	371.9
C_{EVC} [pF]	100	3.1

것을 확인하였다. 또한, Q_{1H} 와 Q_{2H} 이 켜지면 C_{EVC} 는 C_{j1} 과 C_{j2} 의 합산 커패시턴스인 3 pF 이 보이는 것을 확인하였다.

표 6 은 제안하는 EVC 회로에서 V_{RF}^{pk} 이 클 때의 스위칭 동작에 따른 C_{EVC} 의 변화를 보여준다. 이는 전압 변동이 작을 때와 동일한 C_{EVC} 값을 갖는 것을 확인하였다. 이를 통해, 제안하는 EVC 회로가 높은 $V_{D,Bias}$ 를 인가해주는 경우, 전압 변동에 따른 C_j 가 변하지 않음을 확인하였다. 따라서, 제안하는 EVC 회로는 Fast recovery 다이오드를 사용 가능하며, 동일한 출력에서 기존의 EVC 대비 비용을 약 1/6 배 이상 감소시킬 수 있다. 또한, 기존 EVC 회로를 직렬로 사용하는 경우, 2 개의 외부전압원을 사용하는 반면 제안하는 EVC 회로는 1개의 외부전압원을 사용한다는 장점을 가진다.

5. 결론

본 논문에서는 Fast recovery 다이오드를 사용하는 새로운 EVC 회로를 제안한다. 제안하는 EVC 회로는 Fast recovery 다이오드를 사용할 수 있으며, 하나의 외부전압원을 사용할 수 있기 때문에 비용을 대폭 줄일 수 있으며, 이는 높은 출력을 요구하는 시스템에서 더욱 효과적인 것으로 기대된다.

본 과제(결과물)는 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다. (2024RIS-008)

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20224000000440, 섹터커플링 에너지산업 고도화 인력양성사업).

참고 문헌

- [1] Mohan, A. and Mondal, S. An impedance matching strategy for microscale RF energy harvesting systems. IEEE Trans. Circuit Syst. II, Exp.Briefs. vol. 68. 1458–1462