

반도체 opening switch를 이용한 nsec 펄스발생기에 관한 연구

손윤규*, 오종석
포항공과대학교 가속기연구소

Study on the nano-pulse generator by a semiconductor opening switch

Y. G. Son*, J. S. Oh
Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH

Abstract - 크로징 스위치인 아바란치 트랜지스터를 사용하여 수 나노~수십 나노초의 고전압 펄스를 만들 수 있다. 반도체소자의 발전으로 인하여 빠른 회복시간을 갖는 소자가 개발되어 다이오드를 이용한 오프닝 스위치로도 수 나노~수십 나노초의 고전압 펄스를 얻을 수 있게 되었다. 본 논문에서는 전자총 그리드 펄스를 개발하기 위하여 자기스위치를 사용한 펄스압축기술(MPC : magnetic pulse compression)과 SOS (semiconductor opening switch)다이오드를 이용한 펄스발생기에 관한 연구를 수행하였고 실험결과로 50Ω 부하에 대하여 3 kV, 26 nsec 펄스를 얻었다.

1. 서 론

나노초 대역의 고전압펄스를 이용한 장치들이 최근 들어 산업분야나 군용기술등에 응용되고 있다. 전자빔을 이용한 가속기의 전자총 그리드 펄서도 수 나노초의 고전압 펄스를 필요로 한다. 본 논문에서는 전자가속기의 전자발생을 위한 전자총 그리드 펄서로 요구되는 nsec 펄스발생장치에 사용하고자 펄스압축시스템과 반도체 오프닝 스위치(SOS)를 조합하여 최소 500V를 갖는 20ns급 펄스를 얻을 수 있는 실험을 수행하였다. 펄스압축시스템의 펄스압축원리와 SOS스위치인 다이오드의 특성을 조사하고 펄스발생기회로를 최적화 할 수 있는 방법을 실험과 전산모사를 통하여 보이고자 한다.

2. 본 론

2.1 펄스발생장치 사양

일반적으로 커패시터에 에너지를 충전하고 방전회로를 통하여 방전시킴으로써 수 나노~수십 나노초의 펄스를 만들어 낸다. 펄스형성회로는 크게 라인타입 펄스발생기회로와 하드튜브타입으로 나눌 수 있다. 라인타입

의 펄스발생회로는 부하임피던스와 사용전압에 맞추어 설계를 하여야 한다. 수 나노초의 펄스를 생성하기 위해서는 고속의 스위치가 필요하게 되는데 대개의 경우는 크로우징 스위치인 아바란치 트랜지스터나 MOSFET를 이용하고 있다.

그림1은 펄스압축 자기스위치 회로도를 나타낸 것이며 세 부분으로 나눌 수 있다. 시스템 기본구성은 펄스전원을 만드는 충전부와 펄스를 만드는 방전부, 펄스를 압축하는 펄스압축 자기스위치부로 나눌 수 있다. 펄스변압기 2차측은 3단의 자기스위치와 다이오드(SOS), 저항부하로 구성하였다. 표 1은 출력단에 필요로 하는 펄스발생기의 사양을 보여주고 있다.

표 1. 설계파라메타

Pulse width	20 ns ~ 40ns
Load voltage	500 V이상
Load impedance	50 Ω
DC voltage source	200VDC

2.2 충전부

그림1의 회로에서 반도체스위치 S₁, 펄스변압기 PT, 공진용리액터 L₀, 공진커패시터 C₀가 충전부를 구성한다. S₁ 스위치는 커패시터 C₀ 에 충전된 에너지를 C₁ 으로 넘겨주는 역할을 하며 이때 일정시간 (~100Hz, 4 μs)동안 C₀를 방전시키는 소자로 IGBT (IXYS 전기, IXSH 35N120A)를 사용하였고 이 소자는 트리거 발생기 (SRS, DG535)와 Driver IC(HCPL-3120)를 통해서 구동된다. 반도체스위치 S₁이 t=0에서 도통될 때 공진커패시터 C₁에 흐르는 전류는 식(1)과 같다.

$$i_p(t) = I_p \sin \omega_0 t \tag{1}$$

C₁의 전압은 식(2)와 같다.

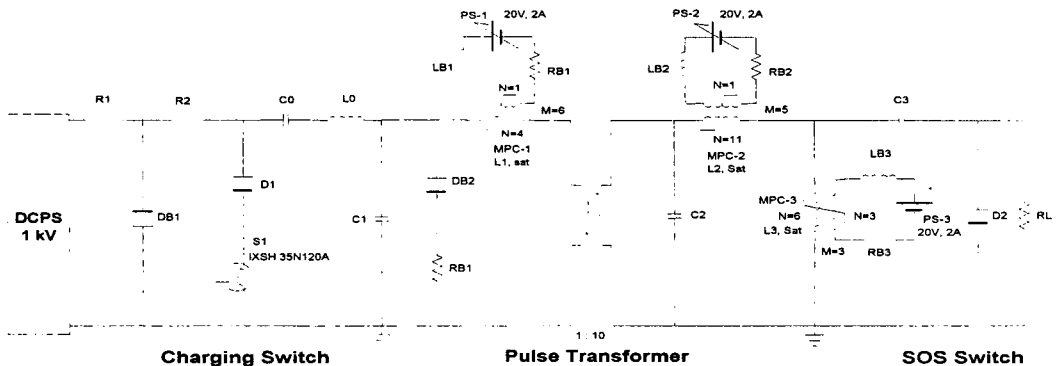


그림 1 펄스압축 자기스위치 회로도

$$v_{R(t)} = \frac{1}{C_1} \int i_P(t) dt = \frac{V_P}{2} [1 - \cos \omega_0 t] \quad (2)$$

$$I_P = \frac{V_{DCPS}}{\sqrt{\frac{L_0}{C_{eq}}}} \quad (3)$$

$$C_{eq} = \frac{C_0 C_1}{C_0 + C_1} = \frac{C_1}{2} \quad (4)$$

$$V_P = 2 V_{DCPS} \frac{C_{eq}}{C_1} = V_{DC} \quad (5)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_{eq}}}$$

$t_0 = 2\pi\sqrt{L_0 C_{eq}}$ 동안 스위치 S_1 을 온 시키면 전류는 영으로 떨어지며 커패시터 C_1 은 V_P 로 충전된다.

2.3 자기필스압축 시스템

2.3.1 자기스위치 동작원리

자기스위치의 기본적인 원리는 자성체 코어가 포화되면서 나타나는 투자율(permeability)의 변화에 의한 임피던스의 변화를 이용한 것이다. 여러 개의 단단을 사용하는 것이 단일단을 사용하는 것보다 임피던스의 변화를 효과적으로 이용할 수 있다. C_1 에 충전된 전압은 다음 단단 자기스위치를 거치면서 설계된 이득을 가지고 압축된다. 본 실험에서 사용된 자기스위치의 재질은 코발트 계의 비정질 합금인 AMS-21S-N((주)유유사)을 MPC-1에는 6개, MPC-2에는 5개, MPC-3에는 3개를 사용하였으며 이 코어의 사양은 표 2와 같다.

표 2 소형 비정질 자기코어 상세사양

Parameter	Units	Value
Type No.		AMS-21S-N
Outer diameter	mm	23
Inner diameter	mm	12
Height	mm	6.5
Mean flux path length	mm	5.5
Core sectional area	mm ²	11.81
Saturation flux density	Tesla	0.58
Squareness B_H/B_S	%	0.464
Coercive field strength	A/m	0.40

2.3.2 자기스위치부

MPC-1, MPC-2, MPC-3은 필스에너지를 압축시키는 3단 자기스위치이다.

C_1 충전이 완료된 시점인 $t=t_0$ 에서 첫 번째단 스위치가 포화되면서 t_0 보다 짧은 $t_1 = \pi\sqrt{L_{1,Sat} C_{eq}}$ 시간동안에 커패시터 C_1 에 축적된 에너지를 C_2 로 전송한다. 따라서 충전부에서 C_1 에 공급되는 긴 필스에너지를 자기스위치의 스위칭작용에 의해서 짧은 필스의 에너지로 다음 단으로 전송하며 이러한 작용은 부하단 까지 연속이다. 이와 같이 적절로 접속된 자기스위치는 아주 짧은 순간에 부하로 에너지를 전송시켜야 하므로 필스에너지가 마지막 단에 도달할 수 있도록 포화인덕터가 점차로 줄어들도록 설계되어야 한다. 이때 충전부에서 부하단 까지 피크전력을 전송하기 때문에 에너지의 펄스 폭을 압축시키는 작용을 한다. 이상적인 경우 각 단에서의 피크전압은 일정하며 피크전류는 단 수에 비례해서 증가한다.^{1),2)}

코어재료가 동일하다면 최적효율은 모든 코어체적이 같을 때 얻을 수 있으며 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$\textcircled{1} L_{n-1} \gg L_n^{\text{unsaturated}}$$

$$\textcircled{2} L_{n+1}^{\text{unsaturated}} \gg L_n^{\text{unsaturated}}$$

③ 인덕터 L의 포화는 C_N 에 대한 충전전압에서 약 π/ω 에서 발생되어야 한다.

④ 최종단의 L_n 의 포화임피던스는 부하임피던스보다 작아야 한다.

⑤ 모든 N에 대해서 $C_N = C_1$

자기스위치에 적용되는 volt-second정격 VT는 식(6)과 같다.

$$VT = \int_0^{\tau_c} V_C(t) dt = N A_C \Delta B \times 10^{-8} \quad (6)$$

V_C : 자기스위치 첨두전압

τ_c : 포화시간

N : 권수

A_C : 자기스위치 코어 단면적

커패시터 C_N 을 충전시키는데 요구되는 시간은 대략 인덕터 L_N 에서 B_{sat} 에 도달하는 시간과 비슷해야 한다.³⁾ 이상적인 경우

$$VT = \frac{1}{2} V_{cn} \tau_{cn} \quad (7)$$

이므로

$$\tau_{L_n, sat} = \tau_{C_n} = \frac{2 \Delta B_s}{V_C} N_n A_n \quad (8)$$

가 된다.

자기스위치의 설계파라미터는 3단 각각 단면적(cross sectional area)이 214.5(mm²), 178.75(mm²), 107.25(mm²) 평균자로(mean magnetic path length)는 54.95(mm²)이며 각 단 코어의 권회수는 4회, 11회, 6회이다. 여기서 사용한 코어의 최대 포화자속밀도는 0.58(T)이다.

2.3.3 SOS스위치부

SOS스위치로는 Z50FG(voltage multipliers사)를 사용하였다. SOS로 요구되는 다이오드는 빠른 회복시간을 갖는 step recovery diode나 fast recovery diode라야 한다. 이들 다이오드는 순방향 전압강하가 크고 recovery time이 빠를수록 좋다. SOS 스위치로 사용된 Z50FG의 규격은 표 3과 같다.

표 3. Z50FG Diode의 상세사양

Parameter	Unit	Value
Max. working reverse voltage	V	5000
Forward voltage @1.0A	A	9.5
Average rectified current	A	1.0
Max. reverse current	μA	25
Peak surge current (tp=8.3ms)	A	40
Peak repetitive surge current	A	8
Max. reverse recovery time	nsec	200
Max. thermal impedance	$^{\circ}C/W$	3
Junction capacitance	pF	16
Storage temperature	$^{\circ}C$	-65 to +200

2.4 전산모사 및 출력특성

그림 2는 인덕터에 저장된 에너지를 이용하여 펄스를 만드는 기본회로이다.

초기에는 스위치 sc와 so가 단락되었고 순방향이 되어 인덕터에 전류가 흐르게 되고 so스위치를 개방하게 되면 인덕터 L에 축적된 전류가 부하저항 RL에 흐르게 되고

저항양단에 펄스전압의 형태로 나타나게 된다. (식(8)참조)

$$I_L = \frac{1}{L} \int_0^T V_L dt + I_L(0) \quad (8)$$

출력단에 나타나는 펄스 폭은 인덕터값과 부하 저항값에 의해 결정된다.⁽⁴⁾

PSPICE 전산모사 프로그램에 의한 비선형특성을 갖는 포화인덕터의 등가모델을 사용하여 자기펄스 압축시스템과 SOS스위치의 기본설계를 효율적으로 수행하였다. 그림3은 컴퓨터 전산모사에 의한 출력전압과 전류파형을 나타내고 있다. 그림4와 그림5는 실험회로(그림1)의 실험에 의해 관측된 전압 전류파형을 보여주고 있다.

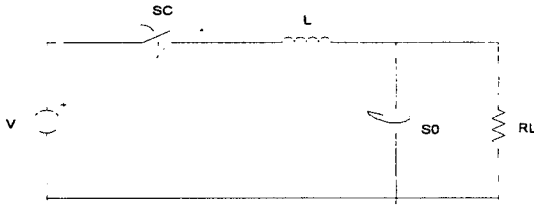


그림 2 인덕터 에너지 저장형 펄스발생기

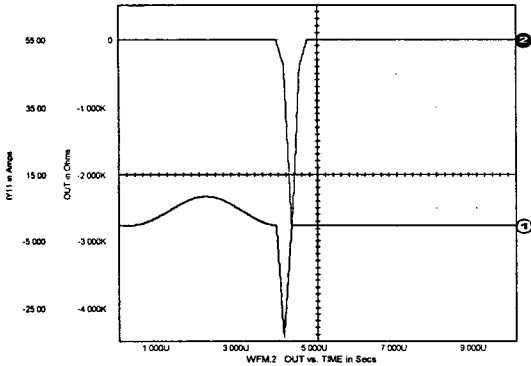


그림 3 컴퓨터 전산모사 출력전압과 전류파형

- ① SOS 다이오드 전류파형
- ② 출력전압파형

3. 결 론

SOS스위치 출력특성과 코어의 단면적에 따른 스위칭 시간 특성을 고찰함으로써 다음의 결과를 얻을 수 있었다. 자기 펄스 압축회로와 SOS 스위치를 사용한 펄스 회로를 설계제작하여 실험한 결과 3 kV, 26ns의 펄스를 얻었다. 컴퓨터 전산모사시 SOS다이오드에 흐르는 전류의 모양은 실험회로 파형과 잘 일치하였다. 또한, SOS다이오드가 스위치로서 갖추어야 할 조건으로 reverse recovery time이 짧고 순방향 전압강하가 큰 다이오드일수록 펄스 특성이 뛰어남을 알 수 있었다.

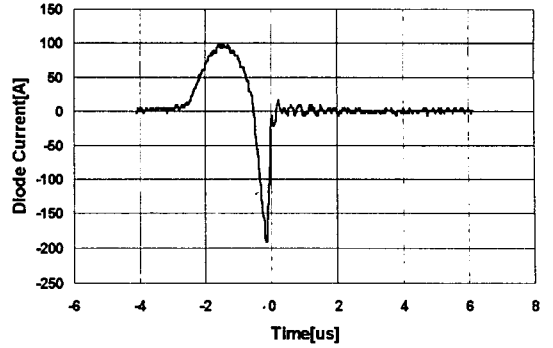


그림 4 SOS 다이오드 전류파형

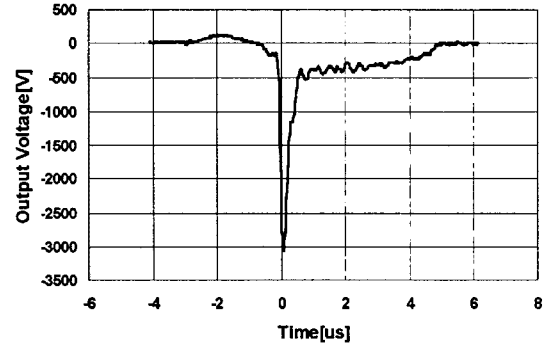


그림 5 펄스 출력파형(50Ω 저항양단)

(참 고 문 헌)

- [1] 오종석 외11명. *Pulse modulator development for plasma DeNOx/DeSOx system*. KIMM 과제보고서, 1996
- [2] 오종석 외 6명. *Development of high power pulse generator for the treatment of sinter plant flue gas*. RIST 과제보고서, 1999
- [3] Godfrey T. Coate, Laurence R. Swain, JR. *High-Power Semiconductor Magnetic Pulse Generators*. M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1966
- [4] James C. Dickens, John Bridges and M. Kristiansen. "Compact Modulator Using Inductive Energy Storage and a Solid State Opening Switch". *Proceedings of the 26th IEEE International Power Modulator Symposium*. pp55-58. 1996