

다양한 펄스 반복률에서의 NPN BJT (Bipolar Junction Transistor)의 파괴 특성에 관한 연구

방정주^{1,a}, 허창수¹, 이종원²

¹ 인하대학교 전기공학과

² 국방과학연구소

A Study on Destruction Characteristics of BJT (Bipolar Junction Transistor) at Different Pulse Repetition Rate

Jeong-Ju Bang^{1,a}, Chang-Su Huh¹, and Jong-Won Lee²

¹ Department of Electrical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

² Agency for Defence Development, Daejeon 305-152, Korea

(Received February 10, 2014; Accepted February 19, 2014)

Abstract: This paper examines the destruction behavior of NPN BJT (bipolar junction transistor) by repetition pulse. The injected pulse has a rise time of 1 ns and the maximum peak voltage of 2 kV. Pulse was injected into the base of transistor. Transistor was destroyed, current flows even when the base power is turned off. Cause the destruction of the transistor is damaged by heat. Breakdown voltage of the transistor is 975 V at single pulse, and repetition pulse is 525~575 V. Pulse repetition rate increases, the DT (destruction threshold) is reduced. Pulse Repetition rate is high, level of transistor destruction is more serious.

Keywords: Pulse injection, Repetition pulse, Transistor, NPN BJT

1. 서론

오늘날 현대사회는 과학기술의 발전으로 전기전자 시스템들은 첨단화, 소형화되어 가고 있으며 산업 및 군사 등 사회 전반적인 분야에서 사용되고 있다. 그러나 이러한 전기전자시스템들은 고출력 전자기파에 의해 심각한 고장 및 파손이 발생할 수 있다. 따라서 고출력 전자기파 기술에 대한 관심이 더욱 높아지고

있으며 미국, 러시아, 유럽 등 여러 나라에서 고출력 전자파 발생 장치들이 주로 군사적인 목적으로 연구되고 있다. 현재 연구 개발하고 있는 고출력 전자기파 발생장치들은 짧은 상승 시간의 펄스 (~100 nsec)를 Giga Watts 수준의 전자파를 발생시킬 수 있다. 이러한 고출력 전자기파 발생장치에 의해 발생된 고출력 전자기파는 전기전자시스템들의 안테나나 장비를 구성하는 전선 등에 커플링되고 시스템 전자회로의 부품들에 영향을 주어 오동작이나 파괴가 발생한다. 현대 전기전자시스템들의 전자회로는 저항, 트랜지스터, 다이오드, IC 등 수많은 부품으로 구성되며 그중 반도체 기술 기반의 부품들은 고출력 전자기파에 특히 민감하다. 고출력 전자파로 인하여 발생되

a. Corresponding author; camgnm@naver.com

는 소자의 열적 손상은 전기전자 시스템의 오동작이나 파괴를 발생시킬 수 있다. 반도체의 PN 접합에 항복전압이상의 역 전압이 인가될 경우 PN 접합 부분으로 과도한 전류가 흐르며 이 전류로 인한 발열이 반도체소자의 파손을 발생시킨다 [1-6].

기존에는 단일 전자기 펄스에 의한 전기전자 시스템들의 파괴 특성에 대해 연구가 수행되었다. 하지만 최근에는 다양한 펄스 반복률을 갖는 전자기 펄스 발생장치들이 개발되고 있으며, 따라서 이에 따른 위험도 증가하고 있다 [7].

본 연구는 전자파 방사에 의한 영향 실험을 모의할 수 있는 펄스주입 실험 방법으로 1 ns 상승 시간의 펄스에 대한 NPN BJT의 파괴 특성과 반복률이 파괴 특성에 미치는 영향을 알아보았다.

2. 실험 방법

그림 1은 트랜지스터에 펄스를 주입하기 위한 실험 구성이다. 펄스 발생장치로부터 펄스를 트랜지스터의 베이스에 주입하기 위해 펄스 발생장치에서 발생된 펄스를 RG 402 동축 케이블과 microstrip 기판을 사용하여 트랜지스터의 베이스로 주입되도록 구성하였다. 주입 펄스의 상승 시간은 1 ns이며 전압은 펄스 발생장치를 통해 조절하였다. 펄스 발생장치는 1 ns의 상승 시간과 2 ns의 펄스 폭 최대 출력전압 2 kV를 발생시킬 수 있으며 펄스 파형은 그림 2와 같다. 펄스는 단일 펄스, 그리고 반복률 60 Hz, 120 Hz의 펄스를 2초 동안 주입하여 실험을 진행하였다.

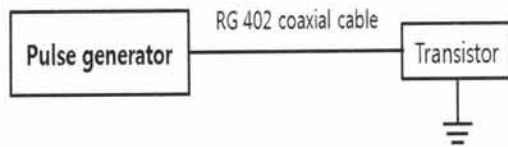


Fig. 1. Pulse injection test setup.

실험에 사용된 소자는 NPN형 BJT로 사양은 표 1과 같다. 트랜지스터는 전자회로에서 저항, 인덕터, 콘덴서 등의 다른 전자부품과 함께 증폭 및 스위칭 기능으로 다양하게 사용되고 있으며 베이스의 전압으로 콜렉터에서 에미터로 흐르는 전류의 양을 조절 가능하다.

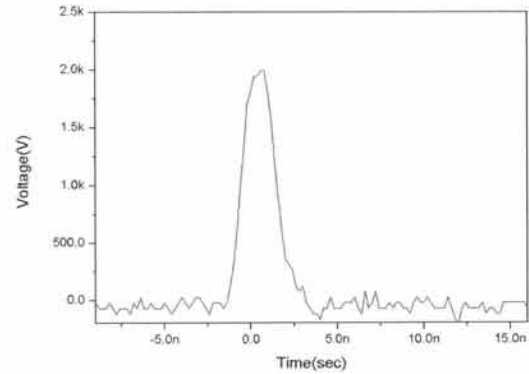


Fig. 2. Injection pulse (rise time : 1 ns).

Table 1. Transistor specifications.

| | Value | Units |
|------------------------------|-------|-------|
| Collector-Emitter Voltage | 45 | V |
| Collector-Base Voltage | 50 | V |
| Emitter-Base Voltage | 6 | V |
| Collector Current-Continuous | 500 | mA |

정상 상태의 트랜지스터는 베이스 전원 off 상태에서 콜렉터에서 에미터로 전하가 통과할 수 없어 전류는 흐르지 않고, 베이스 전원 on 상태에서만 전하가 이동하여 전류가 흐른다. 하지만 트랜지스터가 파괴되었을 경우에는 베이스 전원 off 시에도 전류가 흐르기 때문에 베이스 전원을 off했을 때 전류의 흐름 여부를 트랜지스터의 파괴를 판단하였다.

펄스 주입 실험 후 트랜지스터의 파괴 여부를 알아보기 위해 트랜지스터의 베이스 전원의 on/off시 전류를 측정하였다. 전류 측정을 위한 회로 구성은 그림 3과 같다. 전류는 베이스 전원의 on/off 상태에서 콜렉터에서 에미터로 흐르는 전류를 측정하여 트랜지스터의 파괴 여부를 확인하였다.

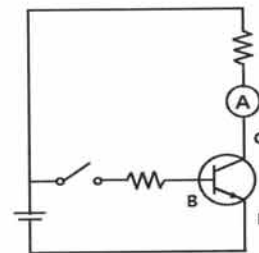


Fig. 3. Current measurement circuit and setup.

트랜지스터의 파괴확률 분석은 DFR (destruction failure rate)을 사용하여 분석하였다. DFR은 실험 횟수에 대한 실험 대상의 파괴가 발생한 확률을 의미하며 식 (1)과 같다 [8].

$$DFR = \frac{\text{Number of destructions}}{\text{Total Number of Tested Devices}} \quad (1)$$

DT (destruction threshold)는 파괴가 발생하기 시작하는 임계 전압으로 DFR의 임계 5%를 나타낸 것이다. 그리고 DB (destruction bandwidth)는 임계 5%에서 95%까지의 전압 대역폭을 나타낸 것이다. TV (threshold variation)와 BV (bandwidth variation)는 두 펄스 반복률의 비율 간의 DT와 DB의 비율을 나타낸 것이며 식 (2), (3)과 같다 [7].

$$TV(A/B) = \frac{DT_A}{DT_B}, \text{ with } A > B. \quad (2)$$

$$BV(A/B) = \frac{DB_A}{DB_B}, \text{ with } A > B. \quad (3)$$

3. 결과 및 고찰

트랜지스터의 베이스에 펄스를 주입한 결과 발행한 파괴 현상은 트랜지스터의 베이스 전원 미인가 시에도 전류가 흐르는 현상이 발생하였다.

그림 4는 단일 펄스와 반복 펄스에 의한 NPN BJT의 파괴 확률 (DFR)을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 펄스의 반복률이 증가할수록 DFR 그래프가 낮은 전압 쪽으로 이동된 것을 볼 수 있고 기울기는 증가한 것을 알 수 있다. 이를 통해 펄스의 반복률이 증가함에 따라 트랜지스터의 파괴가 발생하기 시작하는 임계전압이 감소하여 반복 펄스는 단일 펄스보다 더 낮은 전압에서 파괴가 시작되는 것을 확인할 수 있으며 전압 대역폭도 마찬가지로 감소하여 트랜지스터의 펄스에 대한 내성 여유가 감소한 것을 확인할 수 있다. NPN BJT의 단일 펄스에 대한 DT는 975 V이며 60 Hz의 반복 펄스에서는 575 V, 120 Hz 반복 펄스는 525 V로 나타났으며 DB는 단일 펄스에서 817 V, 60 Hz에서 100 V, 120 Hz에서는 113 V로 그림 5에서 볼 수 있듯이 단일 펄스에 비해 반복 펄스의 DT와 DB가 큰 폭으로 감소한 것을 확인할 수 있다.

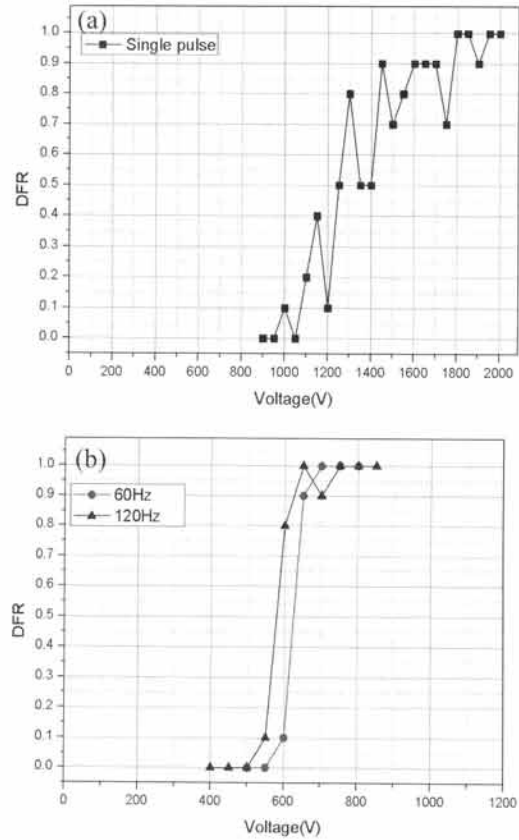


Fig. 4. DFR (destruction failure rate) by the variable pulse repetition rate. (a) single pulse, (b) repetitive pulse.

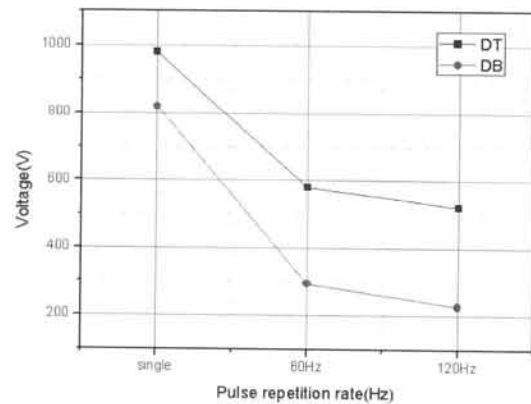


Fig. 5. DT (destruction threshold) and DB (destruction bandwidth) by the variable pulse repetition rate.

반복 펄스 60 Hz와 120 Hz 사이의 DT의 차이는 50 V, DB의 차이는 13 V로 차이가 작은 것을 확인할 수 있다.

Table 2. TV (threshold variation) and BV (bandwidth variation) with increasing repetition rate.

| A/B | TV | BV |
|--------|------|------|
| 60/1 | 0.59 | 0.12 |
| 120/1 | 0.54 | 0.14 |
| 120/60 | 0.91 | 1.13 |

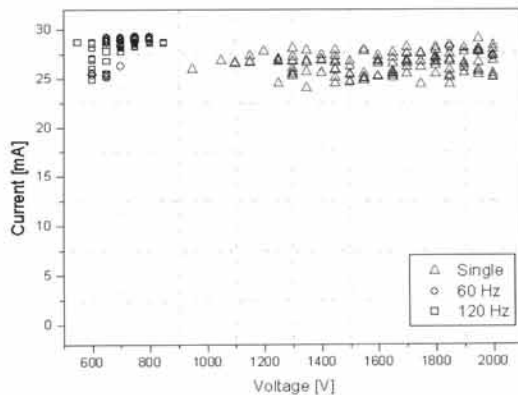


Fig. 6. Current of destruction transistor (base : on).

표 2는 펄스 반복률 사이의 DT, DB의 비율을 TV와 BV로 나타낸 것이다. 단일 펄스와 60 Hz의 반복 펄스의 TV(60/1)는 0.59로 60 Hz의 반복 펄스에서 트랜지스터의 파괴가 발생하기 위한 전압은 단일 펄스에서 파괴가 발생하기 시작하는 전압의 59%이며 120 Hz의 반복 펄스에서는 TV(120/1)는 0.54로 54%이다. 이 결과를 통해 반복 펄스가 트랜지스터의 파괴를 발생시키기 시작하는 전압이 단일 펄스의 54~59%로 낮아지는 것을 확인할 수 있으며 60 Hz와 120 Hz의 반복 펄스의 차이는 5%로 펄스의 반복률이 증가할수록 전압 감소 폭이 줄어드는 것을 알 수 있다.

BV의 경우 BV(60/1)는 0.12, BV(120/1)는 0.14로 60 Hz의 BV가 120 Hz보다 더 감소하였으며 60 Hz와 120 Hz 사이의 차이는 2%로 유사하게 나타났다. 따라서 펄스의 반복률이 증가할수록 BV가 감소하는 것을 알 수 있다.

실험에 사용된 정상 상태의 트랜지스터의 경우 베이스 전원 미인가 시에는 전류가 흐르지 않으며 전원 인가 시에는 평균 25.7 mA의 전류가 흐른다. 본 실험에 의해 파괴된 트랜지스터는 베이스 전원이 인가된 경우 평균 전류는 27.25 mA로 약 1.5 mA 증가하였고 (그림 6), 베이스 전원이 인가되지 않았을 경우에

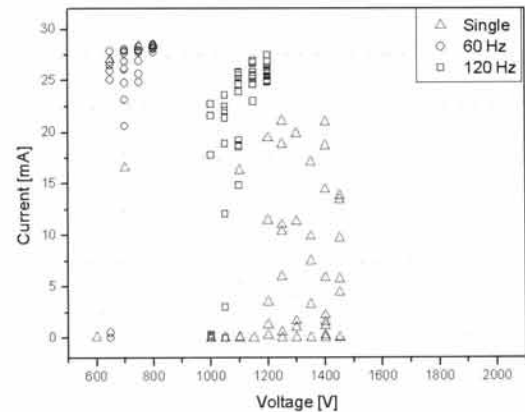


Fig. 7. Current of destruction transistor (base : off).

는 전류가 그림 7에서 보이는 것과 같이 수 $\mu\text{A} \sim 28 \text{ mA}$ 전류가 흐른다. 또한 단일 펄스보다 반복 펄스에 파괴된 트랜지스터의 전류의 분포가 더 높은 곳에 집중되어 있는 것을 볼 수 있으며 이를 통해 반복 펄스가 단일 펄스보다 트랜지스터에 더 치명적인 영향을 주는 것을 알 수 있다. 따라서 회로를 구성하는 트랜지스터가 고출력 전자기 펄스의 전자회로의 커플링에 의해 파괴될 경우 전자회로의 오동작 및 과전류에 의한 전자회로의 파괴의 원인이 될 수 있다. 또한, 단일 펄스보다 반복 펄스가 전자회로에 더 치명적인 영향을 줄 수 있다.

4. 결론

본 연구는 NPN BJT를 대상으로 베이스단에 펄스를 주입하여 피해 효과 및 펄스 반복률의 영향을 조사하였다. 실험 결과 펄스의 반복률이 증가할수록 트랜지스터의 파괴가 발생하기 시작하는 임계전압이 감소하는 것을 확인할 수 있으며 전압 대역폭도 마찬가지로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 펄스 반복률이 증가하여도 파괴가 발생하기 시작하는 전압이 선형적으로 감소하는 것이 아니라 감소폭이 작아지는 것을 알 수 있었다. 또한, 펄스에 의해 트랜지스터가 파괴되었을 경우에는 베이스 전원 미인가 시에도 수 $\mu\text{A} \sim 28 \text{ mA}$ 전류가 흐르는 현상이 발생하였으며 이는 펄스에 의한 과전류가 흘러 이로 인한 PN접합 부위의 열적 파괴가 발생하는 것으로 사료된다. 따라서 회로를 구성하고 있는 트랜지스터가 파괴될 경우 전자회로의 오동작 및 파괴의 원인이 되며 단일 펄스보다 반복 펄스가 전자회로에 더 치명적인 영향을 줄 것으로 사료된다.

이상과 같은 연구 결과를 통해 반복 펄스에 의한 전자회로를 구성하는 소자들의 영향에 대한 이해와 전자 회로 및 소자를 보호하기 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소 지원에 의한 연구 결과입니다.

REFERENCES

- [1] J. I. Hong, S. M. Hwang, and C. S. Huh, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 23, 571 (2009).
- [2] S. M. Han, C. S. Huh, and J. S. Choi, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 23, 1991 (2009).
- [3] S. M. Hwang, J. I. Hong, S. M. Han, C. S. Huh, and J. S. Choi, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 24, 1059 (2010).
- [4] H. Xie, J. Wang, D. Sun, R. Fan, and Y. Liu, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 23, 2313 (2009).
- [5] M. G. Bäckström, *3rd European Survivability Workshop*, 16 (2006).
- [6] M. G. Bäckström, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 46, 396 (2004).
- [7] S. Korte and H. Garbe, *Adv. Radio Sci.*, 4, 10 (2006).
- [8] J. I. Hong, S. M. Hwang, S. M. Han, and C. S. Huh, *The Journal of Korea Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, 19, 597 (2008).