

안테나에 커플링되는 협대역 고출력 전자기파에 대한 저 잡음 증폭기의 민감성 분석

The Susceptibility of LNA(Low Noise Amplifier) Due To Front-Door Coupling Under Narrow-Band High Power Electromagnetic Wave

황 선 목^{*★}, 허 창 수^{**}

Sun-Mook Hwang^{*★}, Chang-Su Huh^{**}

Abstract

This study has examined susceptibility of LNA(Low Noise Amplifier) due to Front-Door Coupling under Narrow-Band high power electromagnetic wave. M/DFR(Malfunction/Destruction Failure Rate) was measured to investigate the diagnostic of IC test. In addition, decapsulation analysis was used to understand the inside of the chip state in LNA devices. The experiments is employed as an open-ended waveguide to study the destruction effects of LNA using a 2.45 GHz Magnetron as a high power electromagnetic wave. The susceptibility level of LNA was assessed by electric field strength, and its failure modes were observed. The malfunction of LNA device has showed as the type of self-reset and power-reset. The electric field strength of malfunction threshold is 524 V/m and 1150 V/m respectively. Also, he electric field of destruction threshold is 1530 V/m. Three types of damaged LNA were observed by decapsulation analysis: component, onchipwire, and bondwire destruction. Based on these results, the susceptibility of the LNA can be applied to a database to help elucidate the effects of microwaves on electronic equipment.

요 약

본 연구는 안테나에 커플링되는 협대역 고출력 전자기파에 대한 저 잡음 증폭기(LNA)의 민감성 특성을 알아보았다. LNA 소자의 오동작/파괴는 MFR/DFR((Malfunction Failure Rate/Destruction Failure Rate)을 이용하여 소자의 민감성을 확인하였다. 그리고 LNA 소자의 내부 칩 상태는 Decapsulation 분석을 이용하여 손상부위를 관찰하였다. 협대역 고출력 전자기파 장치는 2.45 GHz 마그네트론을 사용하였고, LNA의 민감성 레벨은 협대역 고출력 전자기파의 전계강도에 따라 오동작/파괴율을 평가하였다. 그 결과, LNA 소자의 오동작은 셀프리셋(Self Reset)과 파워리셋(Power Reset)의 형태로 나타났고, 이때 오동작 임계 전계강도는 각각 524 V/m, 1150 V/m로 측정되었다. 그리고 LNA의 소자의 파괴 임계 전계강도는 1530 V/m이다. 협대역 고출력 전자기파에 의한 LNA 소자의 내부 칩 파괴는 본드와이어, 온칩와이어 그리고 컴포넌트 세가지 형태로 관찰되었다. 이 결과로, 협대역 고출력 전자기파에 의한 반도체 전자회로의 내성평가 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Key words : Susceptibility, LNA(Low Noise Amplifier), Magnetron, Front-Door Coupling, Narrow-Band

* Research & Development Department 3, Hanwha Corporation Gumi Plant

** Electrical Engineering, Inha University

★ Corresponding author

smhwnag@hanwha.com 054-467-8788

Manuscript received Aug. 28, 2015; revised Sep. 15, 2015; revised Sep. 16, 2015; accepted Sep. 16, 2015

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial

License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

현재 연구 개발하고 있는 고출력 전자기파 발생장치들은 짧은 펄스(~100 nsec)에서 Giga-Watts 수준의 전자파를 발생할 수 있다. 이러한 고출력 전자기파는 군사적인 목적으로 인명살상을 하지 않고, 무기나 전자장비 근처에 강력한 IEMI(Intentional Electromagnetic Interference)를 발생시켜 반도체 소자의 내부회로를 파괴하여, 하드웨어적으로 영구적인 손상을 일으키게 한다. 또한 반도체 소자의 논리적 오류를 발생하게 하여 시스템 작동을 일정 시간동안 마비시키는 역할도 한다. HPEM(High Power Electromagnetics)에 대한 실제적인 실험 예로서 스웨덴의 Mats Backstrom은 협대역의 HPM에 의한 자동차의 민감성에 대한 실험 결과를 1999년 국제 Zurich 심포지엄에서 발표 하였다. HPM의 주파수가 1.3 GHz (L-band)과 2.86 GHz (S-band) 영역에서 전계 강도가 500 V/m 이상이 되면 자동차의 엔진이 멈추는 오동작이 발생하였고, 15 ~ 20 kV/m의 전계 강도에서는 영구적인 파괴가 발생하였다고 보고하였다 [1]. 또한 실제로 전자장비나 반도체 소자가 고출력 전자기파에 노출되었을 때, 칩의 내부회로를 녹여 손상시켰다고 보고되고 있고, 이런 관련된 여러 가지 현상들에 대한 연구가 이루어지고 있다.[2],[3]

Front-Door Coupling은 EMP(Electromagnetics Pulse)나 HPM(High Power Microwave)등의 고출력 전자기파들이 RF 통신 장비인 안테나에 침투하는 경우를 말한다. 안테나는 기본적으로 전자파를 통신의 목적으로 받거나 보낼 때 쓰이며 언제나 안테나를 사용하는 시스템의 목적에 맞는 주파수 대역 및 신호 크기를 사용하게 된다. 그러나 이렇게 의도하지 않은 고출력 전자기파가 안테나로 침투하게 되면 안테나를 사용하는 전자장비는 큰 피해를 입게 된다.

송/수신 안테나는 용도 및 특성에 따라 사용되는 주파수가 다르며 그 주파수는 안테나의 공진주파수에 해당한다. 모노폴이나 다이폴과 같은 특정 주파수에 대한 선택도가 높은 안테나는 협대역 주파수 어플리케이션에 사용되고 TEM 안테나와 혼안테나 같은 광대역 안테나는 UWB 및 펄스, 다중 주파수 시스템 어플리케이션에 주로 사용된다. 통신장비는 기본적으로 그림 1과 같이 안테나와 통신회로로 이루어지며 그 사이에 통신 신호를 변환하여 주는 통신 모듈 및 저 잡음 증폭기가 사용된다. 외부에서 들어온 통신 신호는 그 크기가 매우 작기 때문에 장비에서 사용할 수 있도록 충분한 크기로 증폭시켜주어야 하기 때문이다. 외부에서 발생한 고출력 전자기파에 의해 가장

먼저 타격을 받는 것은 저잡음 증폭기(Low noise Amplifier)이다. 그 이유는 안테나로부터 들어온 신호를 증폭하기 위해 저잡음 증폭기를 가장 먼저 거치기 때문이다. 그러므로 고출력 전자기파에 의한 저잡음 증폭기의 민감성 분석 및 보호 방안 강구되어야 한다.[4],[5]

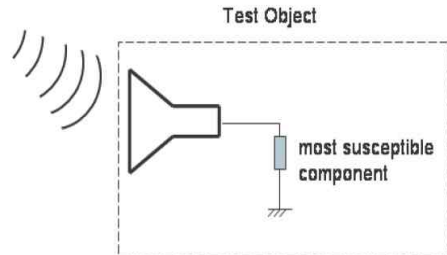


Fig. 1. The schematic of front-door coupling

그림 1. Front-Door Coupling의 개략도

본 연구는 안테나에 커플링되는 협대역 고출력 전자기파에 대한 저 잡음 증폭기의 피해효과 분석을 하였다.

II. 본론

1. 실험방법

본 실험은 저잡음 증폭기 소자를 의도적으로 오동작 및 파괴시키기 위해 비교적 주파수가 높고, 출력 제어가 용이한 마그네트론(magnetron, 삼성 OM75S)을 사용하였다. 실험에 사용된 마그네트론의 정격 발진 주파수는 $2,450 \pm 50$ MHz의 좁은 주파수 대역폭(협대역: Narrow Band)을 가지며, 정격 고주파 출력은 $0 \sim 1\text{kW}$ (V.S.W.R ≤ 1.1) 까지 조절이 가능하다. 그림 2는 마그네트론으로부터 발생하는 협대역 고출력 전자기파의 스펙트럼을 텍트로닉스사(Tektronix)의 스펙트럼 어널라이저(Real-time spectrum analyzer, RSA3303A)로 측정된 것이다. 협대역 고출력 전자기파의 스펙트럼을 측정된 결과 $2,467 \pm 1.5$ MHz로 제조사에서 명시한 주파수 대역보다 상당히 협소하였다.

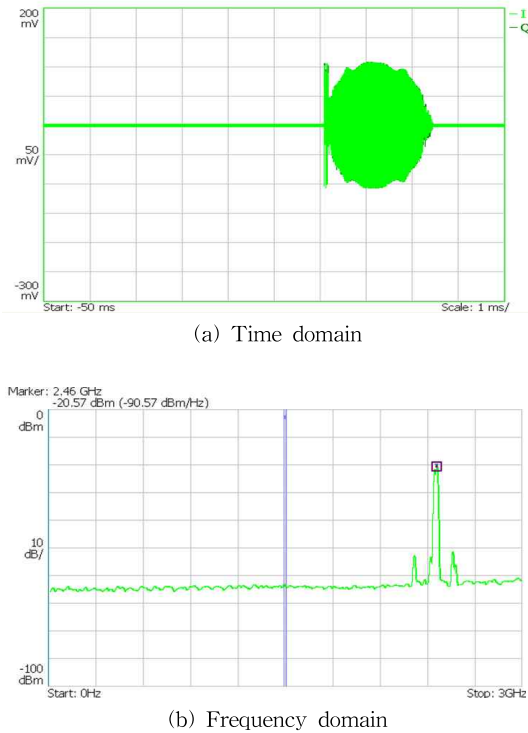


Fig. 2. The spectrum analysis of Narrow-Band high power electromagnetic wave radiated by magnetron

그림 2. 마그네트론으로부터 방사되는 협대역 고출력 전자기파의 스펙트럼 분석

그림 3은 협대역 고출력 전자기파에 의한 저 잡음 증폭기의 피해 효과를 알아보기 위한 실험 개략도이다. 그림에서 알 수 있듯이 협대역 고출력 전자기파 발생장치의 시스템은 전원장치, 마그네트론, 도파관, 그리고 파워메타로 구성되었고, 협대역 고출력 전자기파는 시스템의 도파관 끝단을 개방하여 자유공간(Free space)상으로 1초간 방사되도록 하였다. 협대역의 고출력 전자기파가 자유공간으로 방사될 때, E-field가 평면파를 이루는 최소 far field 거리는 도파관 끝단으로부터 0.15 m 이상 떨어진 지점이고[6], 피시험장치(EUT:equipment under test)의 피해효과는 전계강도세기에 의해서 피시험장치의 동작 특성을 알아보았다. 자유공간에서의 전계강도는 D-dot 센서로 측정하였다.

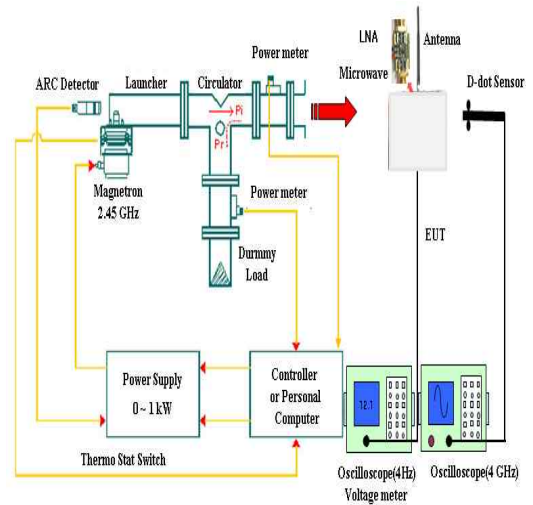


그림 3. 협대역 고출력 전자기파에 의한 저 잡음 증폭기의 피해 실험 개략도

Fig. 3 Experiment schematic of LNA device by Narrow-Band high power electromagnetic Wave

그림 4는 협대역 고출력 전자기파에 의한 저잡음 증폭기의 피해효과를 알아보기 위한 EUT를 구성한 그림이다. 외부의 협대역 고출력 전자기파를 차폐하기 위해 외부 함체를 금속과 흡수체로 설치하였고, 저잡음 증폭기는 함체 외부 안테나와 연결하여 랜(LAN) 신호를 받아 랜 신호를 증폭하였다. 그리고 랜 신호의 증폭 신호는 오실로스코프로 확인하였다. 안테나 출력전압은 안테나와 저잡음 증폭기 사이에 포트를 설치하고, 출력 전압 변화를 확인하였다.

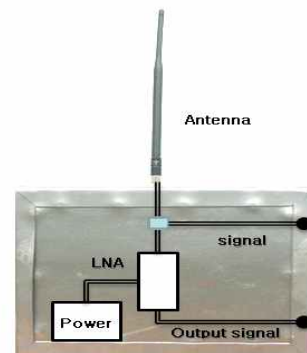


Fig. 4 EUT(Equipment under test) setup

그림 4. 피시험장치 구성

저 잡음 증폭기는 RF 수신단에 위치하여 잡음을 최소화하는 증폭기로서 전체 시스템의 수신 감도를 결정짓는 중요한 회로이다. 실험에 사용한 저잡음 증폭기는 MMIC GaAs E-pHEMT공정으로 제조한 제품으로 2.45 GHz의 주파수에서 21.5 dB의 전력이득을 갖는다. 그림 5는 무선 랜(LAN) 신호가 저잡음 증폭기를 통해 무선 랜 신호를 증폭한 전압파형이다. 이때 출력 전압은 약 1.5 V로 매우 안정한 신호가 검출되었다.

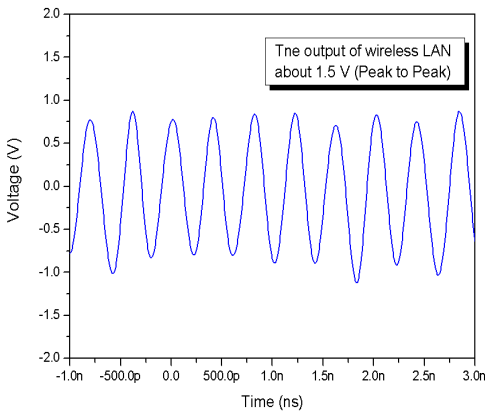


Fig. 5. The output signal of wireless LAN
그림 5. 무선 LAN 출력 신호

그림 6은 협대역 고출력 전자기파에 의한 저잡음 증폭기 소자의 오동작 및 파괴를 정의하였다. 오동작 (Malfunction)은 물리적 손상을 의미하지 않고 단지 reset(self-, external- or power reset)을 통해 원래의 기능으로 회복되는 경우를 의미하는 용어로 사용하였다. 그리고 파괴(Destruction)는 물리적 손상을 의미하며, 하드웨어적 교체를 통해서만 회복되는 경우를 정의하였다.

Malfunction	Destruction
$MFR = \frac{\text{Number of Malfunctions}}{\text{Total Number of Tested Devices}}$	$DFR = \frac{\text{Number of Destructions}}{\text{Total Number of Tested Devices}}$

Fig. 6. The definition of malfunction and destruction
그림 6. 오동작/파괴 정의

MFR(Malfunction Failure Rate)은 고출력 전자기파에 의해 저잡음 증폭기의 오동작 발생 횟수를 시스템에 사용된 총 저잡음 증폭기의 실험 횟수로 나눈 것을 의미한다. 그리고 DFR(Destruction Failure Rate)은 고출력 전자기파에 의해 저잡음 증폭기의 파괴 횟수를 시스템에 사용된 총 저잡음 증폭기의 실험 횟수로 나눈 것을 정의하였다. 이때 MT(Malfunction Threshold)는 임계 전계강도 값으로 MFR의 임계 5%를 나타낸 것이다. 그리고 MR(Malfunction Range)는 전계강도의 대역폭으로 MFR의 임계 5%에서 95%까지의 변화를 나타낸 것이다. DFR의 DT(Destruction Threshold)와 DR(Destruction Range)은 MT, MR과 같이 설명할 수 있다.[7],[8]

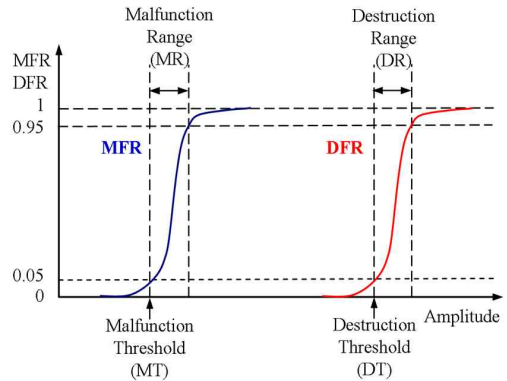


Fig. 7. The principle of MFR and DFR
그림 7. 오동작/파괴 확률의 원리

저잡음 증폭기 소자가 고출력 전자기파에 의해 손상 받기 전·후를 비교하여 저잡음 증폭기 소자의 결합 위치 및 취약 부분을 조사하였다. 저잡음 증폭기 소자는 내부의 칩을 보호하기 위해 에폭시몰딩컴파운드(EMC: Epoxy Molding Compound)로 둘러 싸여 있다. 내부의 칩 혹은 금 와이어, 리드 프레임을 관찰하기 위해 에폭시몰딩컴파운드를 제거 하는 과정을 decapsulation이라고 한다.

2. 실험결과 및 고찰

일반적으로 반도체 소자의 오동작과 파괴는 임계의 전계강도를 초과했을 때 발생한다. 만약 그림 8과 같이 오동작과 파괴율이 1보다 작다면, 이 오동작과 파괴의 임계 전계강도는 각각의 소자에 대해 불규칙하게 가지게 된다. 이때 불규칙하게 가지는 각 소자의 임계 전계강도는 소자의 칩 제조 기술, 칩 layout등과 같은 요소 또는 트랜지스터의 스위칭 상태와 같은 가변적인 요소들과 아주 밀접한 관계가 있다. 이 요소

들 때문에 임계 전계강도는 불규칙하게 변화하는 값을 가지게 된다. 그러므로 인위적인 고출력 전자기파에 의한 저잡음 증폭기 소자의 피해 오동작과 파괴 확률을 정의함으로써 이 소자의 피해 전계강도를 정량화 할 수 있을 것으로 사료된다[9].

그림 8은 협대역 고출력 전자기파에 의한 저잡음 증폭기 소자의 오동작과 파괴 확률을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 저잡음 증폭기 소자는 전계강도에 따라 두 가지(Self-reset, Power-reset) 오동작 특성을 가지고 있다. 셀프리셋의 오동작은 협대역 고출력 전자기파를 방사하는 동안 오동작이 발생되고, 그 이후에는 정상상태로 되돌아오는 유형이다. 이 오동작이 발생하는 이유는 협대역 고출력 전자기파에 의한 안테나에서의 커플링되는 전압이 증가하여 저잡음 증폭기의 출력전력에 영향을 준 것으로 사료된다. 또한 파워리셋의 오동작은 반드시 전원을 Off/On 했을 때, 정상상태로 되돌아오는 유형이다. 파워리셋의 오동작이 발생하는 이유는 소자의 n형과 p형 채널 트랜지스터 부근에서 기생하는 사이리스터(Thyristor)에 의한 래치업으로 사료된다.[10],[11] 그리고 협대역 고출력 전자기파에 의한 저잡음 증폭기의 피해 진행과정은 전계강도에 따라서 오동작인 self-reset, power-reset이 발생하고, 더 높은 전계강도에서는 원상태로 되돌아 올 수 없는 파괴로 발전된다.

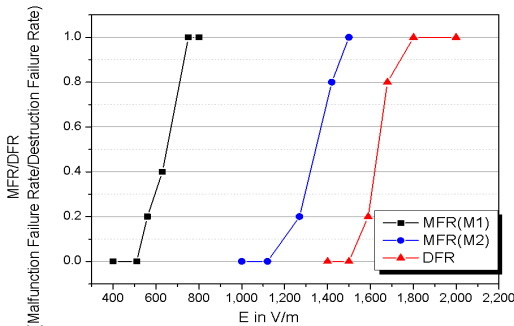


Fig. 8. The MFR and DFR of LNA by the electric field strength of Narrow-Band high power electromagnetic Wave

그림 8. 협대역 고출력 전자기파의 전계강도에 따른 저잡음 증폭기 소자의 오동작/파괴 확률

이때 전계강도 MT(M1, M2)는 각각 524 V/m, 1150 V/m이고, MR(M1, M2)는 각각 524 ~ 740 V/m, 1150 ~ 1470 V/m이다. 그리고 DT는 약 1530 V/m 이고, DR은 약 1530 ~ 1770 V/m 이다.

그림 9는 협대역 고출력 전자기파에 의한 저잡음 증폭기의 오동작 출력 신호를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 출력전압은 매우 불안정하게 오

동작 출력 신호가 검출되었고, 이때 출력전압은 5.2 V이다. 그리고 안테나를 통해 저잡음 증폭기에 들어가는 전압은 약 10 V로 외부 협대역 고출력 전자기파에 의해 안테나 출력전압이 10 V이면 오동작 신호가 발생하는 것으로 알 수 있었다. 이는 안테나의 공진 주파수와 협대역 고출력 전자기파의 주파수가 동일하기 때문에 유기되는 모든 에너지는 거의 전달된다. 따라서 다른 반도체 시스템보다 더 민감하게 반응하였고, 파괴되었다. 그리고 이러한 경우, 일반적으로 협대역 고출력 전자기파는 광대역 고출력 전자기파보다 더 파괴적이다. 그러므로 저잡음 증폭기의 보호가 절실히 필요하고 저잡음 증폭기가 앞부분에 보호소자를 연결하여 저잡음 증폭기를 보호해야 할 것이다.[11],[12]

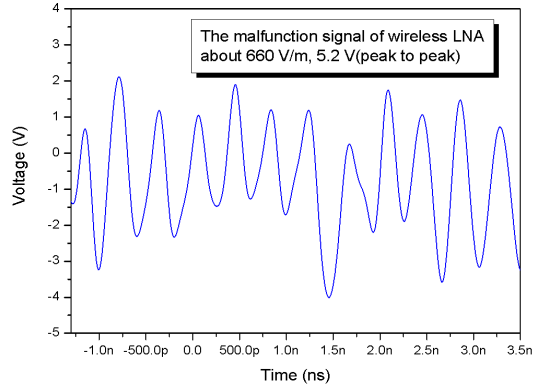


Fig. 9. The malfunction output signal of LNA by Narrow-Band high power electromagnetic Wave
그림 9. 협대역 고출력 전자기파에 의한 저잡음 증폭기의 오동작 출력 신호

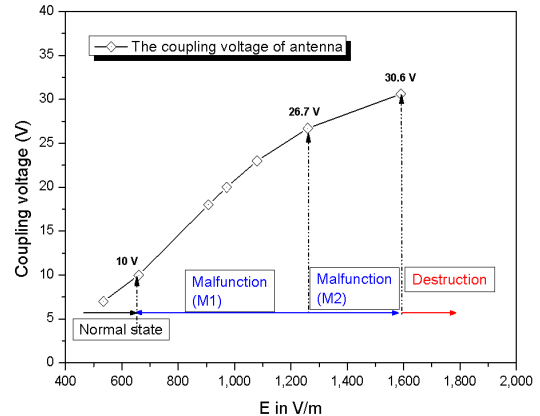
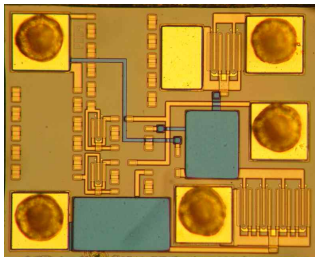
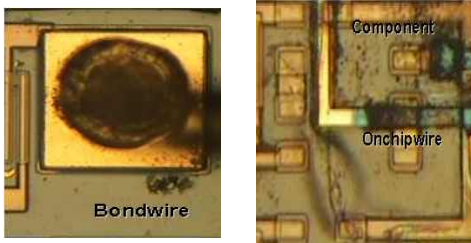


Fig. 10. The malfunction and destruction voltage of LNA by Narrow-Band high power electromagnetic wave
그림 10. 협대역 고출력 전자기파에 의한 저잡음 증폭기의 오동작/파괴 전압

그림 11은 협대역 고출력 전자기파에 의한 저 잡음 증폭기 소자의 파괴 상태를 보여주는 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 협대역 고출력 전자기파에 의한 저잡음 증폭기 소자의 영구적인 파괴는 크게 세 가지 형태로 관찰되었다. 협대역 고출력 전자기파에 의해 형성된 전계의 세기가 어떤 임계 전계의 세기에 노출되면, 반도체 소자의 내부 칩에 있는 다이오드, 트랜지스터 또는 저항과 같은 컴포넌트(Component)에 손상이 일어난다. 그리고 그 전계의 세기가 조금 더 증가하면 섬락(Flashover)에 의한 효과를 제외한 PCB 트레이 녹는 온칩와이어(Onchipwire)의 파괴와 다수 컴포넌트의 영구적인 파괴가 일어나게 된다. 여기서 더욱더 전계의 세기를 증가하면 본드와이어(Bondwire)의 파괴와 더불어 다수 온칩와이어, 컴포넌트의 영구적인 파괴로 진전된다. 이러한 현상은 반도체 IC 소자의 내부 칩으로 높은 에너지가 전도되어 칩 안에 있는 본드와이어와 온칩와이어 그리고 컴포넌트가 높은 온도 상승으로 이 지점이 녹는 열적 파괴가 일어난다.[13],[14] 이때 컴포넌트, 온칩와이어, 본드와이어의 파괴 전계강도는 각각 1590 V/m, 1680 V/m, 2120 V/m이다.



(a) Normal state



(b) Destruction

Fig. 11. The destruction state of LNA by Narrow-Band high power electromagnetic wave at 2120 V/m

그림 11. 협대역 고출력 전자기파에 의한 저잡음 증폭기의 파괴 상태

III 결론

본 논문은 안테나에 커플링되는 협대역 고출력 전자기파에 대한 저 잡음 증폭기의 피해효과 분석을 알아보았다.

협대역 고출력 전자기파에 의한 저잡음 증폭기 소자는 전계강도에 따라서 두가지 오동작 특성(셀프리셋, 전원리셋)을 가지고 있다. 셀프 리셋의 오동작은 협대역 고출력 전자기파에 의해 저잡음 증폭기의 출력전력에 변동으로 발생하는 것으로 사료되어지고, 전원리셋의 오동작은 n형과 p형 채널 트랜지스터 부근에서 기생하는 사이리스터에 의한 래치업으로 사료된다. 그리고 저잡음 증폭기의 피해 진행과정은 전계강도의 세기에 따라서 셀프리셋, 전원리셋 그리고 파괴로 발전된다. 또한 협대역 고출력 전자기파에 의한 저잡음 증폭기의 출력전압은 매우 불안정하게 오동작 출력신호가 검출되었고, 이때 외부 고출력 전자기파에 의해 안테나 출력전압이 10 V이면 오동작 신호가 발생하는 것으로 알 수 있었다. 그리고 협대역 고출력 전자기파에 의해 안테나 출력전압이 30.6 V이면, 저잡음 증폭기가 파괴되었고, 이때 전계강도는 1590 V/m 이다. 협대역 고출력 전자기파에 의한 저 잡음 증폭기의 내부 칩 파괴는 컴포넌트, 온칩와이어, 본드와이어에서 높은 온도 상승으로 이 지점이 녹는 열적 파괴가 일어났다. 이때 전계강도는 2120 V/m 이다.

앞으로 이 연구결과는 보호기술 방안 자료에 활용 할 수 있을 것으로 판단된다.

References

[1] M. Backstrom, "HPM Test of a Car : A Representative Example of the Susceptibility of Civil Systems", 1999 13th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 189-190, 1999.

[2] W. A. Radasky, C. E. Baum, M. W. Wik, "Introduction to the Special Issue on High-Power Electromagnetics (HPEM) and Intentional Electromagnetic Interference (IEMI)", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 46, No. 3, pp. 314-321, 2004

[3] R. J. Barker, "High-Power Microwave Sources and Technologies", IEEE Press, 2001

[4] Thomas Weber, Roland Krzikalla, Jan Luiken ter Haseborg, "Linear and Nonlinear Filters Suppressing UWB Pulses", Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on, Vol. 46, Issue

3, Aug. 2004

[5] Tony nilsson, Rolf jasson, "Investigation of HPM front-door protection devices and component susceptibility", The. Swedish Defense Research Agency (FOI) Technical Report, Nov. 2005

[6] D.V. Giri, "High Power Electromagnetic Radiators: Nonlethal Weapons and Other Applications", Harvard University Press Dec. 15, 2004

[7] M. Camp, H. Garbe, D. Nitsch, "Influence of the Technology on the Destruction Effects of Semiconductors by Impact of EMP and UWB Pulses", 2002 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Vol. 1, pp. 87-92, 2002.

[8] M. Camp, H. Garbe, "Influence of Operation- and Program-States on the Breakdown Effects of Electronics by Impact of EMP and UWB", 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Vol. 2, pp. 1032-1035, 2003

[9] Kyechong Kim, "Critical Upsets of CMOS Inverters in Static Operation Due to High-Power Microwave Interference" IEEE Trans. on EMC, Vol. 49, No. 4, 2007

[10] Sun-Mook Hwang, Joo-Il Hong, Seung-Moon Han, Chang-Su Huh, Uk-Youl Huh, and Jin-Soo Choi, "The Susceptibility of Microcontroller Device with Coupling Caused by UWB-HPEM", PIERS, Proceedings, 2009

[11] Sun-Mook Hwang, Joo-Il Hong, Chang-Su Huh, "The Destruction Effects of Semiconductors by High Power Electromagnetic Wave" The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 56, No. 9, pp.1638-1642, Sep. 2007

[12] M. Camp, H. Garbe, D. Nitsch, "Influence of the technology on the destruction effects of semiconductors by impact of EMP and UWB pulses", IEEE Trans. on EMC Vol. 1, pp. 87-92, 2002

[13] S. Korte, M. Camp, H. Garbe, "Hardware and Software Simulation of Transient Pulse Impact on Integrated Circuits", 2005 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Vol. 2, pp. 489-494, 2005.

[14] Daniel Nitsch, Michael Camp, Frank Sabath, Jan-Luiken ter Haseborg, Heyno Garbe, "Susceptibility of Some Electronic Equipment to

HPEM Threats", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 46, No. 3, Aug. 2004

BIOGRAPHY

Sun Mook Hwang (Member)



2003 : BS degree in Electrical Engineering, Wonkwang University.
2005 : MS degree in Electrical Engineering, Inha University.
2010 : PhD degree in Electrical Engineering, Inha University.
2010~ Present: Research Engineer,

Hanwha.

Chang Su Huh (Member)



1981 : BS degree in Electrical Engineering, Inha University.
1983 : MS degree in Electrical Engineering, Inha University.
1987 : PhD degree in Electrical Engineering, Inha University.
1993~Present: Professor, Electrical

Engineering, Inha University.