

고출력전자기파에 의한 반도체부품의 고장메커니즘 고찰

김동신, 구용성, 김주희, 강소연, 오원욱, 천성일*
전자부품연구원 융복합전자소재연구센터

Review of Failure Mechanisms on the Semiconductor Devices under Electromagnetic Pulses

Dongshin Kim, Yong-Sung Koo, Ju-Hee Kim, Soyeon Kang,
Wonwook Oh, Sung-II Chan*

Electronic Convergence Material & Device Research Center,
Korea Electronics Technology Institute

요 약 본 논문에서는 고출력 전자기파 (Electromagnetic pulses, EMP) 영향에 의해 발생하는 반도체 부품의 물리적 상호작용에 대한 원리와 고장 발생 메커니즘의 연구를 위해 선행된 연구 내용을 고찰하였다. 반도체 부품에서의 전자기파 전이 과정은 3층 (공기/유전체/도체) 구조로 설명할 수 있으며, 복소반사계수에 의하여 이론적으로 흡수되는 에너지를 예상할 수 있다. 반도체 부품에 전달된 과도한 고출력 전자기파로 인한 반도체 부품의 주요 고장 원인은 전자기파 커플링에 의한 부품 소재의 줄 열에너지의 발생이다. 전기장에 의한 유전가열과 자기장에 의한 맴돌이손실에 의해 반도체 칩의 P-N 접합 파괴, 회로 패턴의 burn-out과 리드 프레임과 칩을 연결하는 와이어의 손상 등이 발생한다. 즉, 반도체 부품에 전달된 전자기파는 반도체 내부 물질과 상호작용을 하며, 쌍극자분극과 이온 전도도 현상이 동시에 발생하여, 칩 내부의 P-N 접합 부분에 과도한 역전압이 형성되어 P-N 접합 파괴를 유발한다. 향후 고 신뢰성을 요구하는 전기전자시스템에 대한 EMP 내성을 향상하기 위한 반도체 부품 수준의 연구가 필요하다.

Abstract This review investigates the basic principle of physical interactions and failure mechanisms introduced in the materials and inner parts of semiconducting components under electromagnetic pulses (EMPs). The transfer process of EMPs at the semiconducting component level can be explained based on three layer structures (air, dielectric, and conductor layers). The theoretically absorbed energy can be predicted by the complex reflection coefficient. The main failure mechanisms of semiconductor components are also described based on the Joule heating energy generated by the coupling between materials and the applied EMPs. Breakdown of the P-N junction, burnout of the circuit pattern in the semiconductor chip, and damage to connecting wires between the lead frame and semiconducting chips can result from dielectric heating and eddy current loss due to electric and magnetic fields. To summarize, the EMPs transferred to the semiconductor components interact with the chip material in a semiconductor, and dipolar polarization and ionic conduction happen at the same time. Destruction of the P-N junction can result from excessive reverse voltage. Further EMP research at the semiconducting component level is needed to improve the reliability and susceptibility of electric and electronic systems.

Keywords : Semiconductor devices, Electromagnetic pulse, Failure mechanism, Coupling, Junction breakdown

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20151520100970).

*Corresponding Author : Sung-II Chan(Korea Electronics Technology Institute)

Tel: +82-10-9884-5117 email: chansi@keti.re.kr

Received November 28, 2016

Revised (1st May 22, 2017, 2nd May 24, 2017, 3rd June 5, 2017)

Accepted June 9, 2017

Published June 30, 2017

1. 서론

고출력전자기파(Electromagnetic Pulse, EMP)는 핵 폭발로 인해 발생하는 핵 전자기파(Nuclear EMP, NEMP)와 전자폭탄이나 고출력 전자파 발생기에 의해 직접적으로 전자파를 발생시키는 비핵 전자기파(Non-nuclear EMP, NNEMP)로 분류 된다. NEMP 중에서는 핵폭발에 의한 고고도 핵 전자기파(High Altitude EMP, HEMP)가 대표적이다. 반면, NNEMP는 파형에 따라 초광대역(Ultra Wide Band, UWB), 광대역(Damped Sinusoidal, DS), 협대역(High Power Microwave, HPM) 전자기파로 구분할 수 있으며[1], 전자기파의 주파수 성분 및 세기를 비교하면 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다[2].

EMP에 의한 전기전자기기의 파괴 현상이 알려지기 시작하면서, 1970년대 이후로 고출력 펄스 전력 발생 기술, 고속 스위칭 등을 이용한 펄스 성형 기술, 고주파 발전 및 고출력 안테나 개발 기술이 지속적으로 발전 했으며, 또한 핵을 사용하지 않고도 강력한 전자기 펄스를 발생시킬 수 있는 기반기술이 형성되어 왔다[3].

전자기펄스의 관련 연구로는 EMP 시뮬레이터를 제작하여 함정, 미사일, 비행기와 같은 군사 목적의 장비에 전자기펄스를 가하는 연구[4,5]와 전자기펄스 차폐를 목적으로 정보기기, 함정 및 건물 등에 대한 전자기펄스의 발생, 영향 분석 그리고 차폐 관련 연구가 있다[6,7].

하지만 EMP로 인해 근본적으로 영향을 받는 전기전자 시스템을 구성하는 부품 수준에서의 연구는 상대적으로 많이 부족하다.

따라서 본 논문에서는 EMP가 반도체 부품에 주파수 커플링 되었을 때 발생할 수 있는 반도체 부품의 상호작용과 고장 메커니즘에 대하여 고찰하고자 한다.

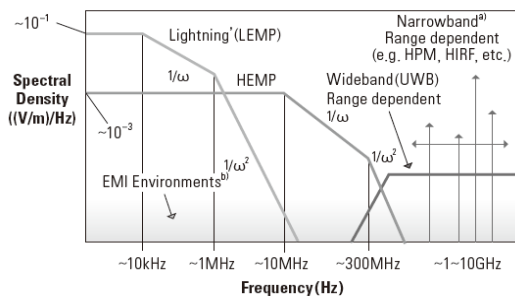


Fig. 1. EMP and its spectral density according to the frequency level [2]

2. EMP에 의한 에너지 커플링

일반적으로 complex system에서의 외부필드와의 커플링은 전달함수(transfer function, $G(j\omega)$)로 나타낼 수 있으며, $G(j\omega)$ 는 특정 보드 구조에서 측정된 전압을 나타내는 출력 함수($P_{out}(j\omega)$)의 스펙트럼과 입사 전자기장($F_{in}(j\omega)$)의 스펙트럼의 스펙트럼 비율에 의해 얻을 수 있다.

$$G(j\omega) = \frac{F_{out}(j\omega)}{F_{in}(j\omega)} \tag{1}$$

$G(j\omega)$ 는 Fig. 2와 같이 간단한 모델과 유사하게 동작하며, 커플링의 진폭(크기)은 전체 시스템의 공진영역에서 최대가 된다.

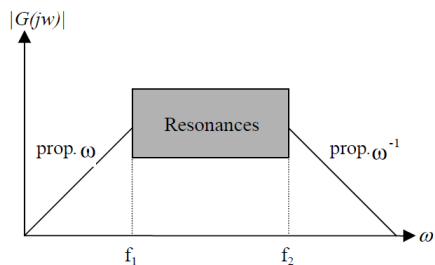


Fig. 2. Transfer function

EMP 또는 펄스의 평면파로 인한 반도체 내의 집적회로에서 발생하는 현상은 Fig. 3과 같이 3층 구조(공기층/유전층/전도층)으로 설명할 수 있다[8].

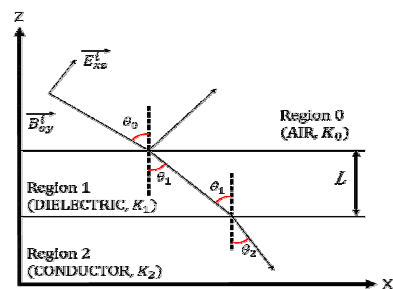


Fig. 3. Plane wave incident in three-layer geometry

3층 구조에서 핵심 인자는 공기와 유전체 그리고 유전체와 도체 계면 사이의 복소반사계수로, 공기와 유전체 사이의 반사계수는 인가되는 전자기파의 주파수, 인가되는 각도와 편광을 변수로 하는 함수이며, 유전체와

도체 계면에서의 흡수되는 에너지는 반사계수에 비례한다.

3. EMP 영향에 의한 반도체 부품 고장 메커니즘

전자기파 혹은 전자기 펄스가 반도체 부품에 인가되는 경우 부품을 구성하는 물질 간 유전손실, 전도성손실, 자기손실 등과 같은 상호작용이 발생한다.

이러한 메커니즘은 인가되는 전자기파의 특성과 상호작용을 하는 물질의 특성에 따라 유전가열과 유도가열을 통한 줄 가열, 그리고 반도체 칩에서의 P-N 접합과괴 현상들의 원인이 된다[9,10].

전자기파의 전기장과 자기장은 서로 다른 메커니즘으로 상호작용이 발생되면, 유전손실로부터 에너지손실이 유도되며, 식(2)와 같이 푸리에 열전달 방정식과 에너지 손실인자 사이의 관계를 통해서 반도체 회로에서 발생하는 열에너지(P_{θ})에 대하여 설명할 수 있다.

$$m C_p \frac{\partial T}{\partial T} + \nabla(-k \nabla T) = P_{\theta} \quad (2)$$

m 은 질량, C_p 는 비열, T 는 온도, t 는 시간 및 k 는 열전달계수를 나타낸다. 왼쪽의 첫 번째 항은 에너지가 가해지는 위치에서의 시간에 따른 열량의 변화를 의미하고, 두 번째 항은 그 위치에서 에너지가 가해지는 순간의 온도 기울기에 따른 열에너지의 흐름을 의미한다. 이러한 열에너지의 변화는 위에서 언급한 유전가열과 유도가열을 통하여 가해진 에너지로 이루어지고, 짧은 시간 동안 높은 온도로 전자기기의 부품을 가열시켜 칩에서의 P-N 접합과괴 현상을 일으킨다[11,12].

3.1 전기장에 의한 발열

유전가열은 가장 일반적인 전기장에 의해 나타나는 현상이며, 마이크로파 영역에서 일차적으로 발생하는 유전가열의 메커니즘은 쌍극자 분극과 이온 전도로 구분할 수 있다.

쌍극자 분극에서 쌍극자는 외부 전기장에 민감하게 반응하고, 전기장 안에서 회전하며 전기장의 방향으로 정렬하려고 한다. 고주파수의 전기장에서는 쌍극자들이 외부 전기장에 반응할 수 있는 시간을 충분히 갖지 못하

고, 쌍극자들끼리 충돌하는 현상이 발생하여 물질에 전달된 에너지는 열의 형태로 바뀌게 된다. 이러한 쌍극자 분극 메커니즘은 유전손실에 의한 반도체 물질의 열 발생의 일차적인 원리를 설명하는 데 이용된다.

반면, 이온 전도 메커니즘은 물질 내부의 전자 또는 이온과 같은 이동전하운반체가 외부 전기장에 따라 움직임에 따라 전류가 발생할 때 일어날 수 있다. 이동전하운반체의 이동으로 인하여 물질 내부의 원자 또는 분자와 충돌하게 되면, 전기저항에 의해 열 발생, 나아가 P-N 접합부분에서의 파괴현상이 발생된다. 그리고 위의 두 가지 메커니즘은 보통 함께 발생하며 서로에게 영향을 미친다.

3.2 자기장에 의한 발열

자기장에 의한 발열현상은 전기장과 비교하여 많이 발생하지 않는다[13]. 하지만, 자성을 띠는 유전체 물질이나 전도성 물질에서는 전기장보다는 자기장에 의한 발열현상이 더 크다[14-16].

자성체, 전도체 및 반도체와 같은 물질에서 자기장에 의한 발열은 자기손실이 기여하는 부분은 상당히 크며, 자기장에 의한 발열과정은 전기장에 의한 발열과정과는 상이하다.

기본적으로 자기 마이크로파에 의한 발열 메커니즘은 맴돌이손실, 히스테리시스손실, 자기공명손실 그리고 잔류손실에 의해 설명된다.

맴돌이손실은 외부 자기장에 의해 발생된 와전류로부터 나타나는 줄 손실로 설명되며, 와전류는 외부 자기장이 전도체에 가해질 때 나타나는 전류를 의미한다[17,18]. 특히, 전자기파가 금속과 같은 물질에 가해지면 자기장에 노출된 부분에서 물질의 상대적인 움직임이나 시간에 따른 자기장의 변화가 있을 경우 맴돌이손실이 발생한다. 대부분 맴돌이손실은 자기장에 의한 발열현상에서 물질의 전기전도도와 관계가 있으며, 발열이 일어나는 과정 중에서 가장 먼저 발생한다[19,20].

히스테리시스손실은 외부 교류 자기장에서 비가역적 자화과정에 의해 발생한다[21]. 따라서 보통 철 성분의 물질인 철강, 니켈이나 그 외의 일부 물질에서 발생한다. 자성 물질이 교류 자기장 안에 놓이게 되면, 자화 분극이 외부 자기장에 따라 진동하게 되며[22], 이러한 교류 자기장에서 분극 뒤집힘이 빠르게 발생하면, 물질 내부에서 열이 발생하게 된다. 이러한 진동 메커니즘에 의한 발

열이 히스테리시스손실로 알려져 있다.

자기공명손실은 일부 페라이트 혹은 자성 물질에서의 발열을 설명하는 메커니즘으로, 자기공명손실은 주로 자기 구역벽 공명과 전자스핀공명을 의미한다[23]. 그 외의 잔류손실의 경우, 다른 종류의 자기 완화에 의해 발생한다[21,24].

반도체 부품 및 금속 등에서 발생하는 자기장에 의한 발열의 주요 메커니즘은 맴돌이손실이며, 히스테리시스 손실은 주로 철 성분의 자성 물질에서 발생한다. 자기공명손실과 잔류 손실의 경우, 페라이트와 같은 자성 물질이 교류 자기장 안에 있을 경우, 발열에 의해 일어난다.

3.3 P-N 접합 파괴

일차 전자기파에 의해 물질 내부에 상호작용이 발생하며, 이로 인해 발생하는 이차 전자파는 반도체 칩에서의 P-N 접합 부분에서 과도한 역 전압을 형성하게 된다. 이러한 역 전압은 열 이차 파괴라고 하는 부품손상을 유발한다[25].

일반적으로 전자기기에서 사용하는 주파수의 영역은 GHz 영역이며, 이 영역의 전자파가 1 ms 동안 전자기기에 인가되며, 대략 100 W 정도의 에너지를 가할 수 있게 된다.

대략 100 W의 에너지는 전기전자시스템 내부의 반도체 부품 손상을 유발할 수 있는 힘의 세기이며, 특히 많은 수의 반도체 부품으로 구성된 전기전자 인쇄회로기판에서 특정 반도체 부품의 P-N 접합 파괴현상이 일어날 경우, 연쇄적으로 다른 반도체 부품에 파괴현상을 유발할 수도 있다.

과도한 역 전압에 발생하는 P-N 접합 부분에서의 열 이차 파괴 현상의 문턱 에너지(threshold energy, P)는 식 (3)과 같다.

$$P = AKt^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

A는 P-N 접합 영역, K는 비례상수, t는 전자기 펄스의 폭을 의미한다.

3.4 침투 깊이

유전손실에 의한 출력밀도 값이 매우 크더라도 실제 전자기파가 물질에 가해졌을 때 영향이 크지 않을 수 있다. 이 경우, 가장 먼저 고려해야 하는 것은 전자기파의

침투 깊이이다.

고전적으로 침투 깊이는 발열 효과의 정량적 분석을 하는데 사용되는 인자로, 전자기파가 물질 내부로 들어갈 때, 침투 깊이(d)는 물질의 표면에서의 전자기장의 세기가 e^{-1} 에 비례하게 떨어지는 거리로 정의된다. 동시에 파워 침투 깊이(power penetration depth, D_p) 또한 표면에서의 에너지가 e^{-1} 에 비례하게 떨어지는 깊이로 정의되며, 침투 깊이(d)의 1/2에 해당된다.

일반적으로 d는 물질의 상대 유전율(ω)과 상대 투자율(μ')에 의해 결정되며, 다음과 같이 정의된다[26,27].

$$d = \frac{2p}{(\omega\mu_0\mu')}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

p는 물질의 비저항, μ_0 는 진공에서의 투자율, μ' 는 물질의 상대 투자율의 실수 부분을 의미한다.

이론적으로 완벽한 도체의 경우($p=0$), $d = 0$ 이며, 전자기파에 의한 손상이 없다. 하지만 일반적으로 각각의 물질은 고유의 p, ω 및 μ' 의 값을 가지며 따라서 고유한 침투 깊이($d \neq 0$)를 가진다[28].

4. EMP에 의한 반도체 부품의 고장

연세대에서는 MOSFET이 삽입된 인쇄전자회로기판을 Fig.4와 같이 알루미늄으로 폐쇄하고, EMP를 직접 인가하는 실험을 진행하였다. 그 결과, MOSFET의 drain 부분에서 발열현상 발생을 확인하였다[29].

인하대에서는 인위적으로 발생된 HPM을 이용하여 TTL과 CMOS 소자에서의 파괴 현상을 직접적으로 관찰하였다[30]. 세 가지 다른 출력(600, 800, 1,100 V/m)의 HPM을 TTL 및 CMOS 소자에 인가하는 실험을 진

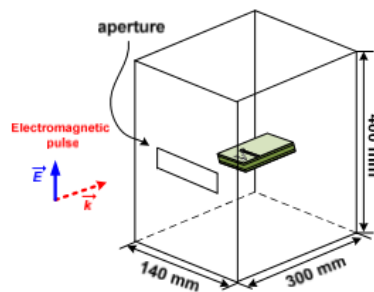


Fig. 4. Multi-layered PCB in metallic enclosure[29]

행하였으며, 그 결과 600과 800 V/m의 HPM에서는 소자 파괴가 발생하지 않았지만, 1,100 V/m의 HPM에서 Fig. 5와 같이 반도체 칩의 파괴 현상이 발생함을 확인할 수 있었다. 실험 결과를 통하여 EMP에 의한 반도체 부품의 파괴는 일정 수준 이상의 에너지가 필요함을 확인할 수 있다.

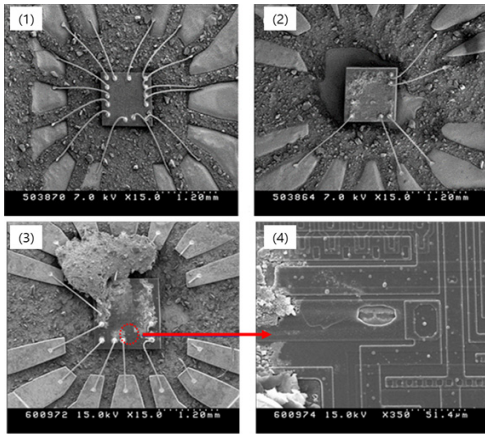


Fig. 5. SEM images before/after electromagnetic wave exposure of CMOS NAND and TTL NAND (1) before test of CMOS NAND (2) after test of CMOS NAND (3) before test TTL NAND (4) after test of TTL NAND[31]

CMOS 소자에 EMP를 인가하는 실험은 이후에도 진행되었으며, 아래와 같이 세 가지 파괴 패턴이 보고되었다[31].

- (1) 다이오드, 트랜지스터, 저항과 같은 부품의 내부의 칩의 손상
- (2) 반도체 칩 내부 금속 또는 칩 패턴의 손상
- (3) 리드프레임과 반도체 칩을 연결하는 와이어 손상

이러한 반도체 부품의 고장발생 메커니즘은 반도체 칩 위의 교차점에서 수 ns의 시간동안 고주파수의 전기장이 형성으로 수 백 ℃ 이상의 고온이 칩 내부의 금속패턴에서 발생한다. 그 결과, 금속패턴에 burn-out과 같은 파괴고장이 발생한다.

5. 검토 및 논의

본 연구에서는 고출력전자기파가 반도체 부품에 커플

링 되는 과정에 대하여 검토하였으며, 반도체 부품에 커플링 되어 발생하는 고장 메커니즘은 다음과 같다.

- (1) 반도체 부품에 전자기파가 커플링 되는 과정은 3층(공기/유전체/도체) 구조로 설명할 수 있으며, 이론적으로 흡수되는 에너지는 복소반사계수에 의하여 예상할 수 있다.
- (2) 반도체 부품에 전달된 전자기파는 반도체 내부 물질과 상호작용을 하며, 전기장에 의해 쌍극자분극과 이온 전도 현상이 동시에 발생하며, 칩 P-N 접합 부분에 과도한 역 전압이 형성되어 P-N 접합 파괴를 유발한다.

6. 결론

본 논문에서는 고출력 전자기파(Electromagnetic Pulses, EMP)에 의해 발생하는 반도체 부품의 물리적 상호작용 및 고장 메커니즘에 대한 기존 연구결과 검토를 통하여 EMP가 반도체 부품에 커플링 되는 과정과 반도체 부품의 고장 발생 메커니즘에 대하여 고찰 하였다.

향후, 원자력발전소와 같은 중요 시설에서 사용 중인 전기전자시스템의 고 신뢰성 확보 위하여 반도체 부품 수준에서의 EMP에 대한 내성 연구가 필요하다.

감사의 글

그림 인용을 허락해주신 인하대 허창수 교수님, 연세대 육종관 교수님께 감사드립니다. Copyright Clearance Center로부터 그림 인용을 승인 받았습니다.

References

- [1] D. V. Giri, F. M. Tesche, "Classification of International Electromagnetic Environments(IEME)," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 46, no. 3, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEMC.2004.831819>
- [2] Ianoz, Michel, "A Comparison between HEMP and HPEM parameter. Effects and mitigation methods", Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2008. Asia-Pacific Symposium on. IEEE, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1109/apemc.2008.4559865>

- [3] J. S. Choi, D. W. Im, Electromagnetic pulse generation and application, *Physics high technology*, pp. 36-41, 2006.
- [4] MK Bumgardner, MA Dreger, JC Giles, GF Ross, "EMP simulators for missiles and airplanes," No. EG/G-AL-1026, EG AND G INC ALBUQUERQUE NM ALBUQUERQUE DIV, 1974.
- [5] U. S. Navy, "Final Environmental Impact Statement for the Proposed Operation of the Navy Electromagnetic Pulse Radiation Environment Simulator for Ships in the Chesapeake Bay and Atlantic Ocean," 1988.
- [6] Jin-Ho Yang, Sang-Wook Nam, "Electromagnetic Pulse Coupling into Naval Warship and Protective Measures," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 25, no. 4, pp. 426-433, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2014.25.4.426>
- [7] Waedeuk Kim, "A study on the Improvement Methodology for Protection Design Based on EMP Shielding Effectiveness Test of Reinforced Concrete Facilities," Inhha university in partial fulfilment of the requirements for the degree of master of engineering, 2016.
- [8] Preis. D, "High-Speed Pulse Propagation in Integrated Circuits," TUFTS UNIV MEDFORD MA DEPT OF ELECTRICAL ENGINEERING, 1986.
- [9] AC Metaxas, Roger J Meredith, "Industrial Microwave Heating", London,(UK), 1983.
- [10] CA Crane, ML Pantoya, BL Weeks, "Spatial observation and quantification of microwave heating in materials," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 84, no. 8, pp. 084705, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4818139>
- [11] JH Yee, WJ Orvis, LC Martin, "Theoretical Modeling of EMP Effects in Semiconductor Junction Devices", Lawrence Livermore National Laboratory, California, USA, 1983.
- [12] Jeni Anto, Raj C Thiagarajan, "Coupled Electromagnetic and Heat Transfer Simulations for RF Applicator Design for Efficient Heating of Materials," *simulation*, Vol. 1, no. 5, 2012.
- [13] Zhiwei Peng, Jiann-Yang Hwang and Matthew Andriese, "Absorber Impedance Matching in Microwave Heating," *IOP science*, Vol. 5, no. 7, 2012.
- [14] Jiping Cheng, Rustum Roy, Dinesh Agrawal, "Experimental proof of major role of magnetic field losses in microwave heating of metal and metallic composites," *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 20, no. 17, pp. 1561-1563, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1017900214477>
- [15] Jiping Cheng, Rustum Roy, Dinesh Agrawal, "Radically different effects on materials by separated microwave electric and magnetic fields," *Material Research Innovations*, Vol. 5, no. 3-4, pp. 170-177, 2002.
- [16] Rustum Roy, Ramesh Peelamedu, Craig Grimes, Jiping Cheng, Dinesh Agrawal, "Major phase transformations and magnetic property changes caused by electromagnetic fields at microwave frequencies," *Journal of materials research*, Vol. 17, no. 12, pp. 3008-3011, 2002.
- [17] Lev Davidovich Landau, JS Bell, MJ Kearsley, LP Pitaevskii, EM Lifshitz, JB Sykes, *Electrodynamics of continuous media*, Vol. 8, elsevier, 2013.
- [18] Pedro M Aguiar, Jacques-François Jacquinot, Dimitris Sakellariou, "Experimental and numerical examination of eddy (Foucault) currents in rotating micro-coils: Generation of heat and its impact on sample temperature," *Journal of Magnetic Resonance*, Vol. 200, no. 1, pp. 6-14, 2009.
- [19] Desgardin G Cherradi, J Provost, B Raveau, "Electric and magnetic field contributions to the microwave sintering of ceramics," *Electroceramics IV*, Vol. 2, pp. 1219-12224, 1994.
- [20] Ziping Cao, Zhanjie Wang, Noboru Yoshikawa, Shoji Taniguchi, "Microwave heating origination and rapid crystallization of PZT thin films in separated H field," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 41, no. 9, pp. 092003, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/9/092003>
- [21] Yi Zhang, Ya Zhai, "Magnetic Induction Heating of Nanosized Ferrite Particles," INTECH Open Access Publisher, 2011.
- [22] RE Haimbaugh, "Theory of Heating by Induction," *Practical Induction Heat Treating*, pp. 5-11, 2001.
- [23] Satoshi Horikoshi, Takuya Sumi, Nick Serpone, "Unusual effect of the magnetic field component of the microwave radiation on aqueous electrolyte solutions," *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 46, no. 4, pp. 215-228, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/08327823.2012.11689838>
- [24] Kurt H Jürgen Buschow, *Handbook of magnetic materials*. Vol. 15, Elsevier, 2003.
- [25] Wallace B Smith, Duane H Pontius, PAUL P Budenstein, "Second breakdown and damage in junction devices," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 20, no. 8, pp. 731-744, 1973. DOI: <https://doi.org/10.1109/T-ED.1973.17735>
- [26] Zhiwei Peng, Jiann-Yang Hwang, Chong-Lyuck Park, Byoung-Gon Kim, Gerald Onyedika, "Numerical analysis of heat transfer characteristics in microwave heating of magnetic dielectrics," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 43, no. 3, pp. 1070-1078, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-011-1014-3>
- [27] Zhiwei Peng, Jiann-Yang Hwang, Joe Mouris, Ron Hutcheon, Xiaodi Huang, "Microwave penetration depth in materials with non-zero magnetic susceptibility," *ISIJ international*, Vol. 50, no. 11, pp. 1590-1596, 2010. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.1590>
- [28] Wen Chen, Bernhard Gutmann, C Oliver Kappe, "Characterization of Microwave Induced Electric Discharge Phenomena in Metal-Solvent Mixtures," *Chemistry Open*, Vol. 1, no. 1, pp. 39-48, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/open.201100013>
- [29] Yuna Kim, Jongwon Lee, Jin Soo Choi, Doo-Soo Kim, Jong-Gwan Yook, "Transient Thermal Analysis of MOSFET in Metallic Enclosure Illuminated by Electromagnetic Pulse", *European Electromagnetics Symposium*, 2016.
- [30] Joo-II Hong, Sun-Mook Hwang, Cheong-Ho Hwang, Shin-Woo Park, Chang-Su Huh, "Destruction Effect of Semiconductors by Impact of Artificial Microwave," *proc. of The Korean Institute of Electrical Engineers*. pp. 1609-1610, 2006.

[31] Joo-Il Hong, Sun-Mook Hwang, Chang-Su Huh, "Breakdown and Destruction Characteristics of the CMOS IC by High Power Microwave," The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 56, no. 7, pp. 1282-1287, 2007.

김 동 신(Dongshin Kim) [정회원]



- 2004년 2월 : 전북대학교, 제어계측 공학과, 석사졸업
- 2007년 7월 ~ 현재 : 전자부품연구원, IT 응용연구센터, 선임연구원

<연구 분야>
자동차, 전자파 적합성

구 용 성(Yong-Sung Koo) [정회원]



- 2007년 2월 : 인하대학교, 물리학과, 석사졸업
- 2012년 2월 : 인하대학교, 물리학과, 박사졸업
- 2016년 7월 ~ 2016년 10월 : 전자부품연구원, 융복합전자소재연구센터, 연구원

<연구 분야>
고체물리, 재료과학

김 주 희(Ju-Hee Kim) [정회원]



- 2013년 2월 : 과학기술연합대학원대학교, 차세대소자공학과, 석사졸업
- 2013년 6월 ~ 현재 : 전자부품연구원, 융복합전자소재연구센터, 연구원

<연구 분야>
고장분석, 반도체, 태양광

강 소 연(Soyeon Kang) [정회원]



- 2016년 2월 : 한국교통대학교, 산업공학과, 학사졸업
- 2015년 12월 ~ 2017년 2월 : 전자부품연구원, 융복합전자소재연구센터, 연구원

<연구 분야>
산업공학, 데이터 분석

오 원 욱(Wonwook Oh) [정회원]



- 2011년 2월 : 가천대학교, 정보기술, 석사졸업
- 2015년 2월 : 고려대학교, 신소재공학과, 박사졸업
- 2015년 2월 ~ 현재 : 전자부품연구원, 융복합전자소재연구센터, 연구원

<연구 분야>
고장분석

천 성 일(Sung-Il Chan) [정회원]



- 2001년 8월 : 수원대학교, 산업공학과, 석사졸업
- 2011년 2월 : 아주대학교, 산업공학과, 박사졸업
- 1997년 2월 ~ 현재 : 전자부품연구원, 융복합전자소재연구센터, 수석연구원

<연구 분야>
고장분석, 산업공학