

論文98-35D-9-4

# MCM/PCB 회로패턴 검사에서 SEM의 전자빔을 이용한 측정방법 (Characterization Method for Testing Circuit Patterns on MCM/PCB Modules with Electron Beams of a Scanning Electron Microscope)

金坡逸\*, 申駿均\*, 池龍\*

(Joon-Il Kim, Joon-Kyun Shin, and Yong Jee)

## 요 약

본 논문은 주사전자현미경(SEM)의 전자총을 이용하여 MCM 또는 PCB 회로기판의 신호연결선에서 전압차를 유도시켜 개방/단락 등의 결함을 측정 검사하는 방법을 제시한다. 본 실험에서는 주사전자현미경의 구조를 변형시키지 않고 회로기판의 개방/단락 검사를 실시할 수 있는 이중전위전자빔(Dual Potential) 검사 방법을 사용한다. 이중전위전자빔(Dual Potential) 측정검사 방법은 이차전자수율 값  $\delta$ 의 차이를 유지시키는  $\delta < 1$  인 충전 전자빔과  $\delta > 1$  인 읽기 전자빔을 사용하여 한 개의 전자총이 각각 다른 가속전압에 의해 생성된 두 개의 전자빔으로 측정하는 방법으로 특정 회로네트에 대한 개방/단락 등의 측정 검사가 가능하다. 또한 읽기 전자빔을 이용할 경우 검사한 회로 네트를 방전시킬 수 있어 기판 도체에 유기된 전압차를 없앨 수 있는 방전시험도 실시할 수 있어, 많은 수의 회로네트를 지닌 회로 기판에 대해 측정 검사할 때 충전되어 있는 회로네트에 대한 측정오류를 줄일 수 있다. 측정검사를 실시한 결과 glass-epoxy 회로기판 위에 실장된 구리(Cu) 신호연결선은 7KeV의 충전 전자빔으로 충전시키고 10초 이내에 주사전자현미경을 읽기 모드로 바꾸어 2KeV의 읽기 전자빔으로 구리표면에서의 명암 밝기 차이를 읽어 개방/단락 상태를 검사할 수 있었다. 또한 IC 칩의 Au 패드와 BGA의 Au 도금된 Cu 회로패드를 검사한 결과도 7KeV 충전 전자빔과 2KeV 읽기 전자빔으로 IC칩 내부회로에서의 개방 단락 상태를 쉽게 검사할 수 있었다. 이 검사방법은 주사전자현미경에 있는 한 개의 전자총으로 비파괴적으로 회로 기판의 신호 연결선의 개방/단락 상태를 측정 검사할 수 있음을 보여 주었다.

## Abstract

This paper presents a characterization method for faults of circuit patterns on MCM(Multichip Module) or PCB(Printed Circuit Board) substrates with electron beams of a SEM(Scanning Electron Microscope) by inducing voltage contrast on the signal line. The experimentation employs dual potential electron beams for the fault characterization of circuit patterns with a commercial SEM without modifying its structure. The testing procedure utilizes only one electron gun for the generation of dual potential electron beams by two different accelerating voltages, one for charging electron beam which introduces the yield of secondary electron  $\delta < 1$  and the other for reading beam which introduces  $\delta > 1$ . Reading beam can read open's/short's of a specific net among many test nets, simultaneously discharging during the reading process for the next step, by removing its voltage contrast. The experimental results of testing the copper signal lines on glass-epoxy substrates showed that the state of open's/short's had generated the brightness contrast due to the voltage contrast on the surface of copper conductor line, when the net had charged with charging electron beams of 7KV accelerating voltages and then read with scanning reading electron beams of 2KV accelerating voltages in 10 seconds. The experimental results with Au pads of a IC die and Au plated Cu pads of BGA substrates provided the simple test method of circuit lines with 7KV charging electron beam and 2KV reading beam. Thus the characterization method showed that we can test open and short circuits of the net nondestructively by using dual potential electron beams with one SEM gun.

\* 正會員, 西江大學校 電子工學科  
(Sogang University, Department of Electronic Engineering)

※ 본 연구는 산업자원부의 공업기반기술개발사업(공

고번호: 961-18-04)의 지원과 교육부 반도체 분야  
학술연구조성비(ISRC 96-E-4049)에 의해서 연구되었음

接受日字: 1997年11月5日, 수정완료일: 1998年8月5日

## I. 서 론

전자제품이 고기능화, 초고속화, 초소형화 되어가고 있는 추세에 따라 반도체를 이용한 전자제품을 구현하는 데에 있어서 고밀도 PCB나 MCM 기판 제작은 필수적이다.<sup>1)</sup> MCM(Multi-Chip Module), ASIC(Application Specific IC), 고밀도 PCB(Printed Circuit Board) 구조에서는 기존 전자부품의 규격과는 달리 기판의 회로 선폭(line width), 회로패드 크기가 매우 작으며 부품의 신호처리속도를 증가시킬 수 있도록 입출력 단자 수를 많이 증가시키고 있다. 따라서 작은 부피에 많은 수의 부품을 실장하고 이를 측정, 검사하는 데에는 기존의 물리적 접촉에 의한 방법은 기판의 손상을 가져올 수 있으며 미세선과 미세한 회로패드에 대한 측정, 검사에 부적합하다.<sup>1)2)</sup> 이러한 요구사항에 대하여 전자빔을 이용한 기판 측정 방법은 측정 시료에 탐침의 접촉없이 10 $\mu$ m 이하의 회로패드에 대해서도 빠르고 정확한 측정검사 능력을 보여주고 있다.

전자빔을 이용한 측정방법은 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope)의 전자빔을 이용하여 저 배율로써 측정하고자 하는 회로패드의 신호연결선의 상태를 관찰하는 것이다. 즉, 일차적으로 주입된 전자(primary electron beam)가 측정시료의 표면에서 시료와 상호 작용하여 발생시키는 이차전자(secondary electron)와 후방산란전자(backscattered electron)의 발생 수율(yield)로 나타나는 명암 차나 이차전자의 신호크기를 이용하여 신호연결 상태를 측정하는 방법이다.<sup>2)3)7)</sup> 이 때 충전(charging)된 회로패드와 충전되지 않은 회로패드 사이의 명암 차를 Voltage Contrast 현상을 이용하여 관찰함으로써 기판의 신호선 연결상태인 개방/단락을 판별한다. 즉, 충전된 회로패드에는 입사된 전자들이 전도물질인 도선을 따라 분포하기 때문에 연결된 회로패드들은 밝게 보일 것이며, 연결되지 않은 회로패드는 명암 차의 변화가 없어서 같은 밝기로 보이게 된다.

이와 같은 현상을 이용한 검사 방법으로는 이중전위 전자빔(Dual Potential) 검사 방법과 단일전위전자빔(Single Potential) 검사 방법이 있다.<sup>3)</sup> 이중전위전자빔(Dual Potential) 검사 방법은 충전과정(charging)과 읽기 과정(reading)시 서로 다른 가속전압에 의해 생성된 전자빔을 이용하여 시편 윗면에서만 전자빔을

입사시켜 검사하는 방법이며, 단일전위 전자빔(Single Potential) 검사 방법은 같은 전위의 전자빔을 이용하여 윗면과 아랫면에서 두 개의 전자빔을 입사시켜 측정하는 방법이다. 이중전위 전자빔(Dual Potential) 검사 방법은 다층 기판의 내부 신호선의 연결 상태를 측정할 수 있지만, 단일전위전자빔(Single Potential) 검사 방법은 특정 회로네트에 대한 측정검사가 불가능하며 전자들의 방전이 불확실하다는 단점이 있다. 따라서 이중 전위 전자빔을 이용함으로써 다층으로 이루어진 회로기판의 내부 층에서의 개방/단락을 비파괴적인 방법으로서 간단히 판별할 수 있게 된다.<sup>3)</sup>

본 논문은 한 개의 전자총에서 방출되는 전자빔에서 두 개의 다른 가속전압에 의한 전자빔을 기판 윗면에서만 입사시켜 측정검사를 할 수 있는 이중전위전자빔(Dual Potential) 검사 방법을 이용하여 IC 칩과 MCM/PCB 모듈에서의 회로패턴의 개방/단락을 검사할 수 있는 방법을 제시하였다. 2장은 주사전자현미경(SEM)을 이용한 측정변수인 이차전자 및 후방산란전자의 형성 및 수율에 따른 충전/방전 과정을 설명하고, 한 개의 전자총을 이용하였을 때 신호연결선의 개방/단락상태를 검출할 수 있는 측정 및 검사 방법에 대해 기술하였다. 3장에서는 측정 시료에 대한 실험결과에 대해 기술하였고 4장에서는 한 개의 전자총을 이용한 MCM/PCB 모듈 실험 결과에 대한 검토 및 분석을 하였고 5장에서는 결론을 맺었다.

## II. e-beam 측정검사원리

1. 주사전자현미경(SEM)에서의 이차전자수율(Yield)  
주사전자현미경(SEM)에서 전자빔을 입사시켜 발생되는 이차전자를 이용한 MCM/PCB 모듈에서의 개방/단락 검사방법은 이차전자의 수율에 따라서 결정된다. 시편에 입사하는 전자빔과 이 전자빔에 의해 생성된 후방산란전자에 의해 생성되는 이차전자는 50eV 미만의 에너지를 가지며 후방산란전자는 50eV 이상의 에너지를 가지게 되는데, 이 때 시편에 입사하는 전자의 수에 대하여 시편으로부터 방출되는 이차전자와 후방산란전자의 수의 합의 비율을 이차전자의 수율로 정의한다. 이 수율은 전자총에 인가되는 특정한 가속전압에 따라 여러가지 값을 갖는다. 이차전자의 수율은 재료 내에서의 입사전자의 에너지 분포를 고려하면 다음과 같이 주어진다.<sup>1)</sup>

$$\delta = B \frac{E_{PE}}{\epsilon} \frac{\lambda}{R} (1 - e^{-R/\lambda})$$

여기서 R은 입사전자의 범위로서 단위는 nm이며, 일차전자 가속전압 에너지 E<sub>PE</sub>의 단위는 KeV이고, ε는 이차전자를 생성하기 위해 필요한 에너지를 의미하며, B는 1보다 작은 상수로서 시편 표면으로 이동하는 전자들의 수와 표면장벽을 지나 진공 중으로 빠져나가는 확률을 나타낸다. 이차전자의 수율 δ는 E<sub>mPE</sub>에서 최대값 δ<sub>m</sub>을 갖고 그 이후에는 감소하게 되는데, 수율 δ의 최대값 δ<sub>m</sub>은 실제탈출깊이(mean escape depth)를 λ라 할 때 R = 2.3 λ로 얻어지며 수율 곡선 상에서 입사된 전자빔의 범위 R이 이차전자의 탈출깊이와 같을 때 수율이 최대값 δ<sub>m</sub>이 된다. 이 때 이차전자의 수율 δ는 다음과 같이 주어진다.

$$\delta = 0.86 (\delta_m)^{1.35} E_{PE}^{-0.35}$$

이 식을 이용하여 순수한 구리(Cu) 박막에 대한 수율 δ를 계산하면 이차전자의 수율은 E<sub>mPE</sub> = 600eV에서 최대 수율 δ<sub>m</sub> = 1.3을 가질 때까지 E<sub>PE</sub>가 증가하다가 그 이후로 감소한다. 감소되는 수율 δ/δ<sub>m</sub>은 E<sub>PE</sub>/E<sub>mPE</sub>의 함수로서 B, ε 값과는 무관하며 이에 따른 실험과 계산에 의해서 E<sub>IPE</sub> = 200eV 와 E<sub>IIPE</sub> = 1,500eV의 값을 구할 수 있게 된다.<sup>5)6)8)</sup> 마찬가지로 금(Au) 박막에 대하여도 이차전자의 수율은 E<sub>mPE</sub> = 800eV에서 최대 수율 δ<sub>m</sub> = 1.5을 가질 때까지 E<sub>PE</sub>가 증가하다가 그 이후로 감소하며 E<sub>IPE</sub> = 200eV 와 E<sub>IIPE</sub> = 2,000eV 이상의 값을 갖게 된다.<sup>5)6)8)</sup> 표 1은 다른 금속에 대한 수율과 E<sub>IPE</sub> 와 E<sub>IIPE</sub> 의 가속 전압을 보여주고 있다.

수율은 입사전자와 방출전자의 비율을 나타내는데, 입사된 전자빔에 따라 방출되는 이차전자 및 후방산란전자의 비율이 1 이상이 되는 가속전압에서는 시편으로부터 방출되는 이차전자 및 후방산란전자의 수가 입사되는 전자 수에 비하여 더 많음을 의미하며, 수율이 1 이하인 경우는 그 반대로 시편으로 입사되는 전자 수가 방출되는 전자 수보다 더 많음을 의미하고, 수율이 1 인 경우에는 입사전자 수와 방출 전자수의 비율이 같음을 나타낸다.<sup>3)5)</sup> 이러한 현상을 표면 에너지 관점에서 보면, 수율이 1 보다 클 때는 시편의 표면에서 방출되는 전자 수가 많아 표면 전위가 (+)로 되지만, 시편 표면이 입사전자 에너지와 평형상태를 이루기 위해서 (+)극성의 표면 전위가 보다 더 많은 전자 받아

들이게 되므로 그림 1과 같이 시편의 표면에너지는 δ =1의 상태인 E<sub>IPE</sub> 나 E<sub>IIPE</sub>로 이동하게 된다. 또한 수율이 1 보다 작을 경우에는 입사 전자 수가 방출 전자 수보다 많아지지만, 시편의 표면에서의 전위가 (-)가 되어 (-)전위와 전자 사이의 척력에 의해서 전자가 시편에 주입되는 수가 줄어들어 최종적으로 시편은 평형 상태를 이루게 되어 δ=1의 상태인 일차전자에너지 E<sub>IPE</sub> 나 E<sub>IIPE</sub>로 이동하여 평형을 이루게 된다.<sup>1)</sup> 각 재료들에 대한 최대수율과 E<sub>IPE</sub>, E<sub>IIPE</sub>는 표 1과 같다.<sup>1)</sup>

2. 시편 표면에서의 충·방전

이차전자의 수율은 시편 표면에서의 입사전자빔에 의한 충·방전현상을 나타내기도 한다. 충전현상은 수율이 1보다 작은 경우로서 입사되는 전자의 수가 많고 방출되는 전자의 수가 상대적으로 적으므로 시편에 입사되는 전자의 일부분이 시편에 축적되면서 일어난다. 따라서 그림 1a)에서와 같이 수율이 1보다 작은 가속 전압의 전자빔으로 입사시키면 일정한 시간이 지나 평형상태 E<sub>IPE</sub>에 이를 때까지 시편에는 전자가 계속 쌓이는 전자의 충전 현상이 일어난다.

표 1. 전도체 및 절연체의 수율

Table 1. The yield of secondary electrons for several conductors and insulators.

원소기호	최대수율 (σ <sub>m</sub> )	E <sub>IPE</sub> [eV]	E <sub>mPE</sub> [eV]	E <sub>IIPE</sub> [eV]
Al(13)	0.95		300	
Si(14)	1.1	90	250	650
Fe(26)	1.3	120	400	1,400
Ni(28)	1.4	150	550	1,750
Cu(29)	1.3	200	600	1,500
W(74)	1.4	250	650	>1,500
Au(79)	1.5	150	800	>2,000
Pb(81)	1.1	250	500	1,000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.5-4.8	37-40	350-1,300	
Soda Glass	2.1		300	

이에 반하여 전자 방출 상태인 방전현상은 그림 1b)에서와 같이 수율이 1보다 큰 경우에 나타나는데 이때 시편 표면 전위가 평형상태에 도달할 때까지 입사되는 전자 수보다 방출되는 전자의 수가 더 많아서 계속 방출 상태인 방전 상태를 갖게 된다. 따라서 보다 많은 수의 전자들을 방출시키게 된다.<sup>4)</sup> 그림 1에서

$E_{IPE}$ 와  $E_{IPE}$ 는 이차전자의 수율이 1 이 되는 전자총의 가속전압을 나타내며 시편에 입사되는 전자빔과 방출되는 이차전자 및 후방산란 전자빔의 에너지가 평형상태가 이루어짐을 표시한다. 따라서 시편의 일부분만이 전자로 충전되어 있을 경우에는 충전된 부분은 전자가 상대적으로 덜 입사하게 되고, 충전되지 않은 부분은 전자가 더 들어가게 되어 일정시간 이상 전자빔을 계속 입사시키면 전체적으로 시편은 동일한 전위를 가지게 된다. 그러므로 일반적으로  $E_{IPE}$  가속 전압보다 높은 에너지를 갖는 15 - 20KeV의 주사전자현미경(SEM)으로 시료를 관찰할 경우 수율이 1 보다 작게 되어서 관찰하고자 하는 시료가 충전현상을 일으키게 되어 일정시간이 지나면 시료가 충전되는 현상을 볼 수 있게 된다.

이와 같은 현상을 이용하여 본 논문의 측정검사 방법에서는 회로패드의 개방/단락 상태를 검사하기 위해서 그림 1과 같이 수율이 1보다 작은 가속전압, 즉  $E_{IPE}$ 보다 높은 가속전압의 전자빔인 충전 전자빔으로 회로패드를 일단 충전시킨 후 충전된 전자들이 방출되기 이전에 수율이 1 보다 큰 가속전압인  $E_{IPE}$ 와  $E_{IPE}$  사이의 전자빔인 읽기 전자빔으로 시편을 검사한다.

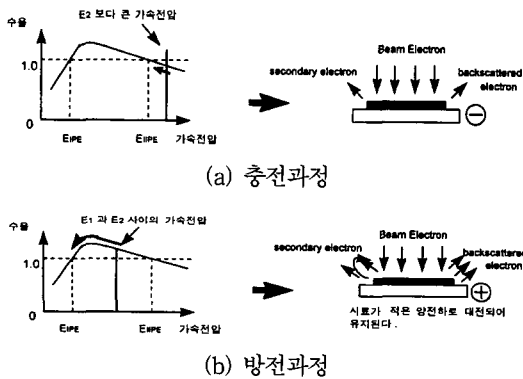


그림 1. 이차전자의 수율에 의한 충전 및 방전  
Fig. 1. Charging and Discharging due to the yield of secondary electrons.

이 때 시편의 명암차이가 발생하는데 전자빔을 시편 표면에 입사시켜 시료 표면이 (-) 전위로 충전되면 충전된 부분의 전압이 낮아지게 되고 지역적인 전기장(Local Field)에 의해 Voltage Contrast 현상이 발생된다. 즉, 시편의 일부분이 전자빔 등에 의해 충전되면 전기장에 의해 충전된 회로패드가 그 주위의 충전되지 않은 회로패드보다 밝게 나타나는 Voltage

Contrast현상이 발생한다. 시편이 음의 전위를 갖게 되는 경우 그 부분과 인접한 다른 부분에서의 이차전자의 방출이 억제되어 detector에 감지되는 이차전자의 수가 줄어들어서 시료의 명암차이가 생기게 된다. Voltage Contrast 현상에 의해서 발생된 명암차이를 사진으로 현상하면서 회로 패드의 개방단락 상태를 검사할 수 있게 된다.

3. 한 개의 전자총을 이용한 측정/검사 방법

한 개의 전자총을 이용하여 회로기판 표면에서 회로네트의 신호선이 연결된 상태를 측정/검사 할 때 기판의 회로패드들과 신호연결선들과 연관된 비아들이 서로 연결되어 있으면 충전 전자빔으로 회로패드를 충전시킬 때 신호연결선의 금속과 비아들은 모두 같은 전위로 충전된다. 이 때 읽기(Reading) 전자빔을 이용하여 회로패드와 신호연결선과 비아 사이의 전기적 개방/단락상태를 감지할 수 있다. 회로패드를 충전시켰을 때 회로패드와 신호연결선이 서로 분리되어 있으면 연결되어야 할 신호연결선들이 충전되지 않은 상태로 되어 읽기 과정에서 개방되었음을 감지할 수 있으며 단락의 경우도 같은 방법으로 읽기 과정에서 충전상태로 나타나서 단락상태로 감지할 수 있게 된다.<sup>2)</sup> 그림 2는 이중전위전자빔(Dual Potential) 검사 방법을 이용하여 검사하였을 때 B 회로패드는 단락된 상태로서 충전 전자빔에 의해서 회로패드와 신호연결선이 모두 충전되고 읽기 전자빔에 의해서 주변의 다른 회로패드에 비해 밝게 빛나는 것을 설명하고 있다. 반면 A 회로패드는 개방된 상태로서 충전 전자빔에 의해서 회로패드만 충전되고 다른 연결 안된 신호연결선들은 그 밝기에 변화가 없음을 보여주고 있다.

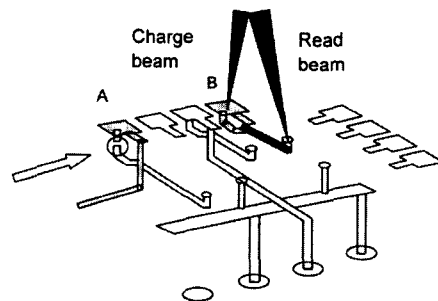


그림 2. 이중전위전자빔(Dual Potential) 측정방법  
Fig. 2. The testing method for dual potential electron beam.

이중전위전자빔 검사는 먼저 이차전자의 수율이 1보

다 작은 값의 펄스인 입사 전자에너지가 높은 전자빔을 이용하여 회로네트를 충전시키고, 그 후에 이차전자의 수율이 1보다 큰 에너지인  $E_{IPE}$ 와  $E_{IPE}$ 사이 에너지의 전자빔을 이용하여 읽어 충전된 회로네트를 충전된 부분과 충전되지 않은 부분의 밝기 차이를 관찰하게 된다. 또한 읽기과정에서 수율이 1보다 큰 가속전압을 이용하기 때문에 충전되었던 회로패드를 방전시키는 현상이 동시에 일어나게 되어서 읽기 과정을 수행하면서 동시에 시편을 검사초기 상태로 되돌려 놓을 수 있는 방전과정을 수행하게 된다.<sup>3)4)6)</sup>

위의 측정방법은 그림 6과 같이 다음의 측정 알고리즘으로 설명할 수 있다. 1) 회로네트 n의 하나의 회로패드에 충전전자빔으로 전자를 충전시킨다. 2) 동일한 회로네트의 모든 다른 회로패드들의 밝기 상태를 읽기 전자빔으로 읽는다. 이 회로패드들은 모두 충전되어 있어야 하며 그렇지 않다면 회로가 "개방"되어 있음을 의미한다. 3) 동일한 회로네트의 모든 회로패드에 남아있는 전하를 읽기 전자빔으로 방전시킨다. 4) 다음번의 회로네트 n+1의 회로패드를 충전시킨다. 이때 다른 모든 회로네트의 패드들은 충전되어있지 않아야 하며 충전되어있는 회로패드가 있으면 이는 회로네트 n+1에 "단락"되어 있음을 의미한다. 5) 회로네트 n+1의 하나의 회로패드를 읽는다. 6) 위의 2)-4) 과정을 반복한다.

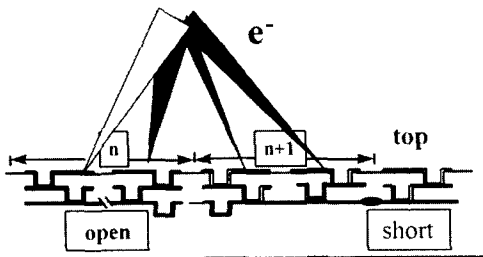


그림 3. 한 개의 전자총을 이용한 측정알고리즘  
Fig. 3. The test algorithm using one electron gun.

### III. 실험

#### 1. 주사전자현미경(SEM)

본 측정실험에서는 3.5nm의 분해능과 0.3-30KV 범위의 가속전압 변화가 가능한 JEOL사의 JSM-5800 Scanning Microscope를 이용하였다. 그림 4는 본 장비의 전자총에서부터 시편까지의 단면을 보여주고 있다. 실험에서의 진공도는 0.2Torr이었고 전자총

으로는 텅스텐 필라멘트를 이용하였다.

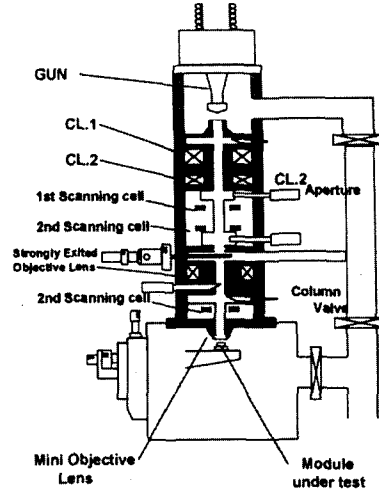


그림 4. 주사전자현미경의 구조  
Fig. 4. The structure of scanning electron microscope.

#### 2. 실험시편

실험에 사용된 시편은 그림 5와 같이 glass-epoxy 절연체 위에 Cu 도선이 형성된 FR-4 기판 위에 있는 200 $\mu$ m의 정사각형 형태의 회로패드와 100 $\mu$ m의 선 폭과 60 $\mu$ m의 전도체 두께를 가진 도선으로 이루어졌다. 회로패드의 면적은 400 $\times$ 10<sup>-4</sup>cm<sup>2</sup>이며 배선길이는 1.5mm이다. 전도체 밑면의 재질은 glass-epoxy 절연물질이다.

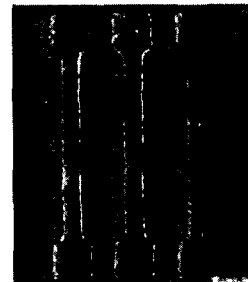


그림 5. 실험 패턴  
Fig. 5. The test pattern.

다른 시편은 집적회로(IC)위에 형성된 회로 패턴으로 회로패드는 99.9%의 금으로 100 $\times$ 100 $\times$ 20 $\mu$ m로 형성되어있고, ball grid array 패턴의 회로패드는 금으로 도금된 구리(Cu)로 200 $\mu$ m $\phi$   $\times$  18 $\mu$ m 구성되어 있다.

#### 2. 실험결과

회로패턴의 개방/단락을 측정 검사하기 위한 실험에

서 준비된 시편 위에 표 2와 같은 조건으로 측정실험을 수행하였다. 구리 신호선과 glass-epoxy 기판으로 이루어진 MCM 또는 PCB 기판 측정에서 7KV의 충전전자빔으로 충전시켰으며 이때 인가된 전류는 54 $\mu$ A였다. 충전된 기판을 읽기 전자빔 2KV, 56 $\mu$ A의 측정전류를 이용하여 패턴의 명암차이를 읽었다. 충전과 읽기 과정 사이의 시간 간격은 약 10초 미만이었다. 이 때 충전상태를 사진으로 출력시킬 수 있었으며 읽기 과정과 충전과정 사이가 약 55초 이상일 때는 충전된 회로패드의 전위가 주변회로패드의 전위와 동일하게 되어서 전위차이가 없어짐을 볼 수 있었다.

그림 10은 회로 패턴의 개방 단락 검사의 결과로서 voltage Contrast에 의해 충전된 패턴과 충전되지 않은 패턴의 명암차이를 나타내고 있다. 그림 6은 7KV의 읽기 전자빔으로 2분간 회로패드를 충전시키고 난 후 1KV, 2KV, 3KV, 4KV, 5KV, 6KV의 읽기 전자빔으로 약 10초 후에 읽은 것으로서 각각의 읽기 전자빔에 따라 충전된 회로패드부분이 다른 회로패드에 비해 밝게 됨을 볼 수 있다. 이 때 읽기 전자빔을 1KeV에서 6KeV로 증가시키에 따라 충전된 회로패드의 밝기가 변화하는 것을 볼 수 있는데, 1KeV-3KeV 사이의 읽기 전자빔에 의해서 충전된 회로패드는 밝게 나타나지만 4KeV 이상의 읽기 전자빔으로 읽었을 때 충전된 회로패드가 주변의 회로패드와 그 밝기 차이가 없음을 볼 수 있었다.

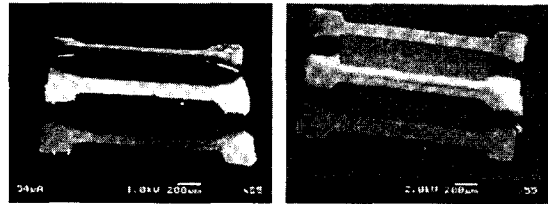
표 2. 실험결과

Table 2. The test results.

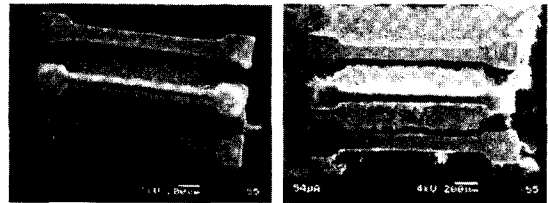
시편종류	MCM/PCB 기판
시편재질	구리(Cu) + glass-epoxy(FR-4)
충전시 가속전압	7[Kv]
Reading시 가속전압	2[Kv]
방전시간	55[sec]
충전시간	2[min]
Reading Interval	10[sec]
Probe 전류	56[ $\mu$ A]

그림 7은 금(Au)으로 형성된 IC 칩 회로패드를 5KV 충전 전자빔으로 충전시키고 2KV의 읽기 전자빔으로 읽은 IC의 회로 일부분을 보여 주고 있다. 그림 7은 충전된 회로패드와 신호선이 밝게 보임을 알

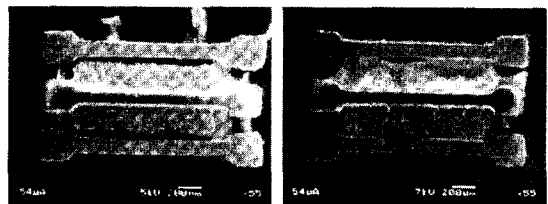
수 있다. 즉, 두 개의 회로패드가 연결되었음을 보여주고 있다. 그림 8은 BGA 패드의 금(Au)으로 도금된 구리(Cu) 회로패드가 충전되었을 때 그 회로패드가 밝게 나타나고 있음을 보여주고 있다. 연결이 안된 회로 패드는 어둡게 나타남을 볼 수 있다.



(a)충전: 7KV 읽기: 1KV (b)충전: 7KV 읽기: 2KV



(c)충전: 7KV 읽기: 3KV (d)충전: 7KV 읽기: 4KV



(e)충전: 7KV 읽기: 5KV (f)충전: 7KV 읽기: 6KV

그림 6. glass-epoxy 기판 위의 Cu 신호선에 대한 충전 가속전압 7KV 인가후 읽기 가속전압을 변화시키에 따른 주사전자현미경 사진

Fig. 6. The SEM image pictures by various reading accelerating voltages after charging the Cu signal lines on glass-epoxy substrate with 7KV charging electron beam.

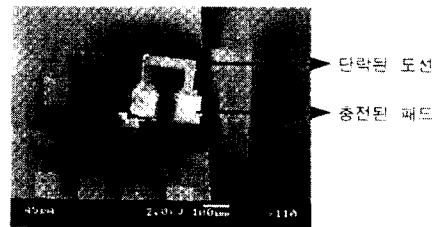


그림 7. 집적회로 도선에서의 충전된 회로패드의 모습  
Fig. 7. The tested image of the Au pad on a IC chip.



그림 8. BGA 기판에서의 실험  
Fig. 8. The tested image on a BGA substrate.

충전된 회로 패턴에 대한 방전 실험은 FR-4 기판 위에 실장된 Cu 회로 패턴을 이용하여 수행하였다. 그림 9(a)는 충전 전자빔인 7KV의 전자총 가속전압과 54 $\mu$ A의 측정전류로 2분간 회로패드를 충전시킨 후 읽기전자빔인 2KV의 전자총 가속전압, 56 $\mu$ A의 측정전류를 이용하여 10초 이내에 읽었을 때, 충전 전자빔으로 충전된 회로패드와 그렇지 않은 회로패드 사이의 명암 차를 나타내고 있다. 하지만 읽기 전자빔으로 읽기 시작한 후 약 55초가 지난 후에는 충전된 전자들이 모두 소멸하여 회로패드간의 전위차가 없어져서 그림 14(b)와 같이 방전됨을 보여 주었다. 이와 같은 실험을 세 차례 이상 반복하여도 같은 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

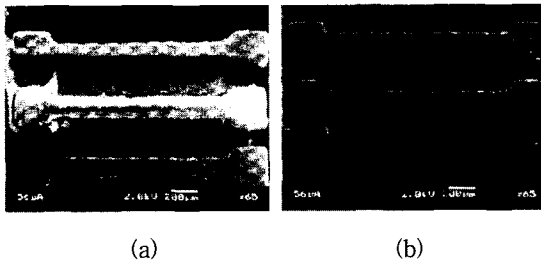


그림 9. 충전된 회로패드의 방전실험  
(a) 7KV 충전 전자빔으로 충전시키고 10초 후에 2KV 읽기 전자빔으로 읽은 사진 (b) (a)의 조건에서 읽기 시작한 55초 지나서 찍은 사진  
Fig. 9. Discharging experiment on charged pads.  
(a) The image with 2KV reading e-beam of 10 seconds later after charging with 7KV charging e-beam (b) The image of 55 seconds later with the same condition of (a)

따라서 수율이 1 이상이 되는 2KeV의 읽기 전자빔으로 회로패턴을 읽었을 때 충전된 회로패드와 그렇지 않은 회로패드사이의 전위차에 의해 생긴 명암차이가 충전 전자빔과 읽기 전자빔 사이의 시간간격이 10초 정도이내면 그림 9(a)와 같이 읽을 수 있었지만 그 시

간 간격을 약 1분 이상 입사시키면 이차전자 수율이 1로 평형상태에 도달하게 되어서 명암 차이가 사라짐을 확인하였다.

#### IV. 검토 및 분석

7KV 충전 전자빔과 1-3KV의 읽기 전자빔으로 시료표면의 이차전자 수율을 변화시켜 voltage contrast 밝기 차이를 보여 주는 것은 충전 전자빔에 의한 충전 현상과 읽기 전자빔에 의한 읽기와 방전 현상이 일어나는 것을 이용한 것인데 이러한 실험은 충전 전자빔인 7KV, 54 $\mu$ A의 측정전류를 이용하여 60 $\mu$ m의 MCM/PCB 기판의 충전을 가능하게 하며 읽기 전자빔인 2KV, 56 $\mu$ A의 측정전류로 읽기 작업 및 방전 작업이 가능하기 때문이다. 따라서 회로네트 충전방법은 이차전자 수율이 1보다 작은,  $E_{IPE}$ 보다 큰 전자총 가속전압의 충전전자빔을 이용하는 것이고, 읽기 방법은 이차전자수율이 1보다 큰,  $E_{IPE}$ 와  $E_{IPE}$  사이의 전자총 가속전압의 읽기 전자빔을 이용하여 회로패드의 개방/단락 상태를 읽는 것이다. 이러한 실험을 수행하기 위해서는 측정하고자 하는 회로의 도체에 대한  $E_{IPE}$ ,  $E_{IPE}$  찾기 실험이 먼저 수행되어야 하며, 기판 검사 측정은 이차전자 수율에 따라 충전, 읽기, 방전 검사로 실시할 수 있게 된다. 이와 같은 실험 결과에 따라서 IC 집적회로와 BGA 기판에서의 실험도 가능한 것을 보여 주었다.

Electron Flight Simulator로서 사전모의 실험<sup>1)</sup>을 하여 이차전자 생성개수를 조사하였다. 이는 사전모의 실험을 통해서 측정하고자 하는 재료가 충전될 수 있는 전자총 가속전압을 예상할 수 있으며 전자빔과 시편재료와의 상호작용을 통하여 생성되는 이차전자와 후방산란전자의 형성 결과를 유추할 수 있기 때문이다. 그림 10은 100 $\mu$ m의 순수 구리박막에 대하여 이차전자 수율이 1보다 큰 값인 1KV의 읽기 전자빔을 입사시킨 사전모의실험으로서 투과깊이는 약 60 $\mu$ m로서 박막을 통과하는 전자빔은 없으며 후방산란전자 상수는 0.36이고 이차전자의 생성궤도의 개수는 1200개임을 나타내고 있다. 따라서 1KV 근방의 읽기 전자빔은 입사 전자들을 구리(Cu)박막을 투과시키지 않고, 즉 기판의 절연체를 전자로 충전시키지 않으면서 voltage contrast를 유도해 낼 수 있음을 볼 수 있었다. 이 결과는 사전모의실험에서 Simulator의 실험 단위가

1KV, 5KV, 10KV 단위로 지정되어 있기 때문에 이차전자 수율이 1보다 큰 값을 갖는 실험 조건인 읽기 전자빔 1KV에서만 수행한 것이다. 따라서 이차전자 수율이 1보다 큰 값을 갖는 2KV나 3KV에서의 일차 전자와 이차전자의 형성상태는 위와 같이 유추할 수 있다.

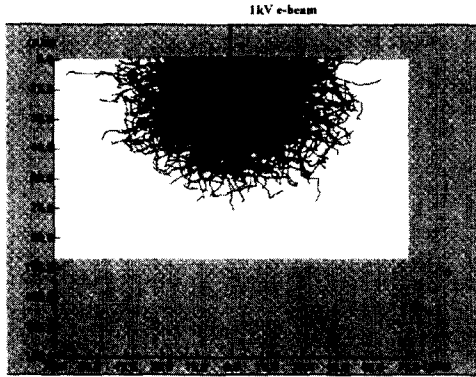


그림 10. 전자 분포에 대한 사전모의실험  
Fig. 10. Simulation of electron trajectories.

실험에서의 인가전류는 7KV의 가속전압으로 회로패드를 충전시킬 때 약 54 $\mu$ A로서 회로패드의 전하량은 60Hz의 주파수를 고려하면  $9.0 \times 10^{-7}$ C이므로 이에 의해  $5.6 \times 10^{12}$ 개의 전자가 입사함을 계산할 수 있었고 읽기과정에서의 2KV 전자총 가속전압, 56 $\mu$ A 인가전류에 대해서는  $5.8 \times 10^{12}$ 개의 전자가 입사됨을 알 수 있다. 이는 입사되는 전자수는 같지만 입사되는 전자 에너지를 변화시켜가면서 시편의 표면 전위와 이차전자 수율을 변화시켜 시편표면의 명암 밝기 차이를 유도해 낸다는 것을 알 수 있었다.

이 결과로부터 그림 6과 같이 읽기 전자빔의 가속전압을 변화시켜 가면서 주사전자현미경(SEM)의 영상에 밝기차이를 검사한 결과 구리도체의 전자빔에 대한 수율 관계는 그림 11과 같이 표시할 수 있었다. 그림 6의 실험 결과에 따라 읽기 가속전압이 1KV, 2KV, 3KV인 경우는 충전된 회로패드가 밝게 나타남에 따라 수율이 1 이상이 되고 읽기 가속전압이 4KV 이상의 경우에는 충전된 회로패드의 밝기가 주위의 충전되지 않은 회로패드에 비하여 밝지 않으므로 이차전자 수율이 1 이하가 되는 것을 알 수 있다. 따라서 그림 11의 이차전자 수율 곡선을 통해 수율이 1이 되는 가속전압은  $E_{IPE}$  약 0.7KV,  $E_{IPE}$  약 3.5KV의 사이로 예측할 수 있었다. 이 결과가 참고문헌 7)과 표 1에

주어진 값( $E_{IPE} = 0.7KV$ ,  $E_{IPE} = 3.5KV$ )과 차이가 있는 것은 참고문헌 7)과 표 1의 수치는 시료 표면에 입사되는 전자 에너지를 나타낸 것이고, 본 실험 결과의 수치는 주사전자현미경의 전자총에 인가되는 가속전압을 나타낸 것으로, 가속전압이 전자에너지로 변환되는 차이를 고려하지 않았기 때문이다. 하지만 이차전자 수율 곡선의 모양과 경향은 본 실험 결과의 데이터와 같은 것으로 나타났다.

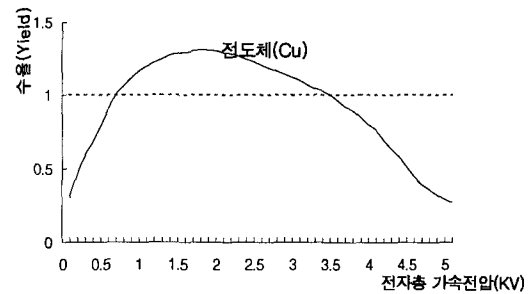


그림 11. 구리에 대한 이차전자 수율 곡선  
Fig. 11. The yield curve of secondary electron of the copper(Cu).

## V. 결 론

본 논문은 하나의 전자총을 이용하여 기존의 주사전자현미경에 대한 구조적인 변형없이 MCM/PCB 모듈 회로 기판에 대한 결함을 측정 검사하는 방법을 제시하였다. MCM/PCB의 회로패턴에 대한 측정검사를 수행할 때 충전된 회로패드의 명암차이를 조사함으로써 주사전자현미경에 대한 별도의 추가적인 장치의 부착없이 MCM/PCB의 회로 패턴상태인 개방과 단락 상태를 검사할 수 있음을 확인하였다. 주사전자현미경(SEM)에서 충전용 및 읽기용 전자빔을 입사시켜 발생하는 이차전자를 이용하여 MCM/PCB 모듈에서의 개방/단락 검사방법은 시료표면에서 나타나는 이차전자의 수율에 따라 검사할 시편을 충전 전자빔으로 충전시킨 후 수율이 1보다 높은 읽기 전자빔으로 Voltage Contrast를 살펴보면 명암 밝기 차이로 신호연결선의 연결상태를 검사할 수 있게 된다. FR-4 기판 위의 Cu 회로 패드와 IC 칩 위의 Au 패드, BGA의 Au 도금된 Cu패드들을 실험한 결과 개방 단락 측정 검사 과정에서 충전된 회로패드와 충전되지 않은 회로패드에서 확실한 명암차이를 볼 수 있었고 방전 실험에서도 축적된 전자들이 이차전자수율이 1



보다 높은 읽기 전자빔으로 1분이상 오랫동안 읽으면 명암차이가 소멸됨을 볼 수 있었다. 본 실험에서 충전 시간은 약 2분 정도이었으며 읽기 과정에서 읽기 전자빔 사용시간은 10초 이내이고 방전과정으로는 읽기 전자빔 사용시간이 55초 이상이어야 함을 알 수 있었다. 이러한 측정속도는 제품의 개방 단락 측정시간을 최대한 줄일 수 있어 제품 전체에 대한 측정, 검사속도를 빠르게 할 수 있고 비파괴 검사가 가능하다. 따라서 단층 기판으로 구성된 모듈과 IC 집적회로뿐만 아니라 다층 배선층의 모듈이 내부적인 결함을 가졌을 경우 고속으로 정확한 측정이 가능하며 주사전자현미경의 전자빔을 이용하므로써 탐침의 접촉이 없이 고속 비파괴 제품 검사를 가능하게 한다.

#### 참 고 문 헌

- [1] R. R. Tummala and E. J. Rymaszewski, "Microelectronics Packaging Handbook," Van Nostrand Reinhold, 1989.
- [2] M. Brumer, R. Schmid, R. Schmitt, M. Strum and O. Gessner, "Electron Beam MCM Testing and Probing," IEEE Transaction on Component Packaging and Manufacturing Technology, vol. 17, no. 1, pp. 62-68, Feb. 1994.
- [3] S. D. Golladay, N. A. Wagner, J. R. Rudert and R. N. Schmidt, "Electron-Beam Technology for Open/Short Testing of Multi-Chip Substrates," IBM Journal of Research and Development, vol. 34, no. 2/3, pp. 250-259, March/May, 1990.
- [4] K. Kanaya, S. Ono and F. Ishigaki, "Secondary Electron Emission from Insulators," J. Phys. D, vol. 11, pp. 2425-2437, 1978.
- [5] J. T. L. Thong, Electron Beam Testing Technology, Plenum Press, 1993.
- [6] H. C. Pfeiffer, G. O. Langner, W. Stickel and R. A. Simpson, "Contactless Electrical Testing of Large Area Specimens Using Electron Beams," J. Vac. Sci. Technol. 19(4), Nov./Dec., pp. 1014-1018, 1981.
- [7] H. Seiler, "Secondary Electron Emission in the Scanning Electron Microscope," Journal of Applied Physics, 54(11), Nov., pp. R1-R18, 1983.
- [8] D. Brundle, Y. Urisky, D. Chernoff, "Real-Time Simulation for X-Ray Microanalysis," Solid State Technology, March, pp. 105-194, 1996.
- [9] O. C. Wells, Scanning Electron Microscopy, McGraw-Hill, 1974.
- [10] R. E. Lee, Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis, Prentice Hall, 1993.

#### 저 자 소 개



金竣逸(正會員)

1971年 8月 8日生. 1995年 2月 서강대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1998년 2월 서강대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1998년 3월 ~ 현재(주)삼성전기 종합연구소 마이크로 디바이스팀 주임연구원. 주관

심분야는 전자빔 응용기술, MEMS(Inkjet Printer Head, Micro Pump), LSI 공정기술, MCM-D, C 기판제작기술



申駿均(正會員)

1974年 10月 20日生. 1997年 2월 서강대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1997년 3월 ~ 현재서강대학교 전자공학 공학석사 과정. 주관심분야는 MCM(Multichip Module)-L, E-beam Tester

池 龍(正會員) 第 31卷 A編 第 3號 參照

현재 서강대학교 전자공학과 부교수