

การศึกษาถึงผลการศึกษาและการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิต
STUDY OF THE ELECTROSTATIC DISCHARGED EFFECT

นายจรรพพงศ์ เขียมพิจิตร
พ.อ.อ.สันติภูมิ ชั่งใจ

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ปีการศึกษา 2552
50EE166

หัวข้อโครงการ การศึกษาถึงผลการเกิดและการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิต
โดย นายจรูพงษ์ เจียมพิจิตร
 พ.อ.อ.สันติภูจักร์ ชั่งใจ
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำเร็จ อินท่าไม้

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม อนุมัติให้รับโครงการวิศวกรรม
ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

.....หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
(ดร. นิमित บุญภิรมย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สำเร็จ อินท่าไม้)

(วันที่.....เดือน.....พ.ศ.2553)

รหัสโครงการ 50EE116

การศึกษาถึงผลการเกิดและการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิต

STUDY OF THE ELECTROSTATIC DISCHARGE EFFECT

บทคัดย่อ (Abstract)

โครงการนี้เป็นการศึกษาถึงการเกิดและการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิต ว่าประจุไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้นได้อย่างไร มีผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้า และสนามไฟฟ้านี้ก็ยิ่งไปมีผลกระทบกับวัตถุที่อยู่ใกล้เคียงอย่างไร โดยเฉพาะอย่างยิ่งการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิต มีผลกระทบต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นได้รับเสียหาย หรือทำให้มีผลกระทบต่อคุณภาพ ยิ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กลง ความไวต่อการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิตก็จะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย จนมาเป็นสาเหตุให้มีการศึกษาถึงการเกิด การถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิต และจะมีวิธีการป้องกันอย่างไร จากกรณีดังกล่าว ได้มีความเห็นตรงกันว่า การเกิดไฟฟ้าสถิตนั้น สามารถสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าสถิตได้ 3 แบบ คือ แบบจำลองมนุษย์ แบบจำลองอุปกรณ์ที่มีการสะสมประจุ และแบบจำลองเครื่องจักรกล

เนื้อหาของโครงการนี้จะขอขยกรณิของแบบจำลองมนุษย์ ขึ้นมาศึกษา ว่าร่างกายมนุษย์สามารถสร้างประจุไฟฟ้าสถิต และสามารถถ่ายเทประจุนั้นสู่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จากการหยิบจับจากพนักงานผู้ปฏิบัติงาน เพื่อหาวิธีป้องกันจากอันตรายนี้ การทดสอบกรณีแบบจำลองมนุษย์จึงเกิดขึ้น โดยลักษณะของการศึกษาจะเป็นการศึกษาโดยเปรียบเทียบจากสภาวะจริง การทดสอบเป็นการวัดหาช่วงความปลอดภัยหรือระดับความไวของระบบ ต่อกรณีแบบจำลองมนุษย์

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการนี้ประสบความสำเร็จผลลุล่วงไปด้วยดี ก็เนื่องมาจากคำแนะนำอย่างดีจาก อาจารย์ ศศ.ดร. สำเริง อินทาม้า อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการนี้ จนกระทั่งโครงการนี้เสร็จสมบูรณ์ และขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. สัตยญา คุณขาว ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือสำหรับการทดลอง พร้อมทั้งสถานที่ในการทำการทดลอง และสิ่งต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทดลอง

สิ่งใดที่เป็นประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการนี้ ผู้จัดทำขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบิดามารดา ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านด้วยความเคารพ และหากโครงการนี้มีความผิดพลาดประการใดผู้จัดทำขอน้อมรับไว้ทุกประการ ส่วนความดีความชอบทั้งหลาย ผู้จัดทำขอมอบให้ผู้สนับสนุนโครงการนี้ทุกๆท่าน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1. บทนำ	
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์โครงการ	1
1.3 โครงสร้างของโครงการ	2
1.4 ขอบเขตของโครงการ	2
1.5 ประโยชน์ของโครงการ	2
1.6 แผนการดำเนินงานของโครงการ	3
1.7 รายละเอียดของโครงการ	3
บทที่ 2. ความรู้พื้นฐานด้านไฟฟ้าสถิต	
2.1 ประวัติความเป็นมาของไฟฟ้าสถิต	4
2.2 วัสดุทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการคายประจุไฟฟ้าสถิต	6
2.3 การเกิดประจุไฟฟ้าสถิต	6
2.4 ประเภทของตัวนำ	14
2.5 ความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต	16
2.6 การป้องกันไฟฟ้าสถิต	18
2.7 แบบจำลองการเกิดไฟฟ้าสถิต	23
บทที่ 3. การศึกษากรณีแบบจำลองมนุษย์	
3.1 ประจุไฟฟ้าสถิตกรณีแบบจำลองมนุษย์	30
3.2 ประจุไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นจากการเดิน	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4. การทดลองทดสอบความไวของการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิตกรณีแบบจำลองมนุษย์	
4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	36
4.2 ข้อจำกัดของการทดลอง	38
4.3 ขั้นตอนการทดลอง	38
4.4 ผลการทดลอง	41
บทที่ 5. สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปและข้อเสนอแนะ	42
เอกสารอ้างอิง	43
ภาคผนวก ก EOS/ESD Association Standard	45
ภาคผนวก ข Data Sheet	65

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงแผนดำเนินงานในการจัดทำโครงการการศึกษาถึงผลการเกิดและการ ถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิต	3
ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางทริโบอิเล็กทริกของวัสดุชนิดต่าง ๆ	7
ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างการเกิดศักย์ไฟฟ้าบนร่างกายคนเนื่องจากกิจกรรมต่าง ๆ	11
ตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงความเปราะบางต่อ ESD ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่างๆ	11
ตารางที่ 2.4 ตารางเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเสียหายอันเกิดจากไฟฟ้าสถิตจากโรงงาน ผู้ผลิตจนถึงมือลูกค้า	18
ตารางที่ 2.5 รูปแบบความไวของอุปกรณ์ต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิต ในกรณี HBM	29
ตารางที่ 2.6 รูปแบบความไวของอุปกรณ์ต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิต ในกรณี MM	29
ตารางที่ 2.7 รูปแบบความไวของอุปกรณ์ต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิต ในกรณี CDM	29

สารบัญ

	หน้า	
ภาพที่ 1.1	สร้างแบบจำลองกรณี Human Body Model (HBM)	2
ภาพที่ 2.1	แสดงแบบจำลองการเกิดทริโบอิเล็กทริกของวัสดุ 2 ชนิด	8
ภาพที่ 2.2	การเกิดและการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิตระหว่างวัสดุที่เป็นตัวนำและฉนวน	8
ภาพที่ 2.3	พื้นผิวของวัสดุเมื่อเกิดการทริโบอิเล็กทริก	9
ภาพที่ 2.4	การเกิดประจุไฟฟ้าสถิตของบุคคลเมื่อเดินบนพรม	9
ภาพที่ 2.5	แสดงการเกิดทริโบอิเล็กทริกในระดับอะตอม	10
ภาพที่ 2.6	แสดงขบวนการเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าสถิต	12
ภาพที่ 2.7	แสดงขบวนการนำประจุไฟฟ้าสถิต	13
ภาพที่ 2.8	แสดงค่าที่อ่านได้จากวัสดุที่เป็นฉนวนจากเครื่องวัดค่าความต้านทาน Resistance Meter	14
ภาพที่ 2.9	ภาพแสดงค่าความต้านทานที่วัดได้จากชุด Cleanroom ที่เป็น Dissipative Material	15
ภาพที่ 2.10	ความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต ขณะเครื่องจักรอัตโนมัติกำลังทำงาน	17
ภาพที่ 2.11	การป้องกันไฟฟ้าสถิตโดยอาศัยอุปกรณ์ต่างๆ	19
ภาพที่ 2.12	เครื่องผลิตประจุไฟฟ้าแบบแขวน หรือ Overhead Ionizer	20
ภาพที่ 2.13	แสดงตัวอย่างการลดประจุด้วยวิธีการเติมประจุด้วยเครื่องสร้างประจุไฟฟ้าสถิต	20
ภาพที่ 2.14	เครื่องสร้างประจุ (Ionizer)	21
ภาพที่ 2.15	แสดงตัวอย่างประจุไฟฟ้าที่เกิดจากเครื่องสร้างประจุไฟฟ้า (Ionizer)	21
ภาพที่ 2.16	แสดงวงจรทางไฟฟ้าของแบบจำลองมนุษย์ตามมาตรฐานของ MIL-STD-883 D ลำดับที่ 3015 หรือตามมาตรฐานของ ESD-STM5.1: Electrostatic Discharge Sensitive Testing Human Body Model	24
ภาพที่ 2.17	แสดงรูปคลื่นที่วัดจากค่ากระแสของแบบจำลองมนุษย์	25
ภาพที่ 2.18	แสดงวิธีการทดสอบโดยการใช้แบบจำลองการเกิดประจุไฟฟ้าสถิตในอุปกรณ์	26
ภาพที่ 2.19	แสดงแบบจำลองการเกิดประจุไฟฟ้าสถิตในอุปกรณ์แบบประจุสะสมอยู่ในอุปกรณ์ โดยตรง ตามมาตรฐานของ ASD STM 5.3.1: Electrostatic Discharge Sensitivity Testing-Charge Device Model	27
ภาพที่ 2.20	แสดงวงจรทางไฟฟ้าของแบบจำลองเครื่องจักรกลตามมาตรฐานของ ESD STM 5.2: Electrostatic Discharge Sensitivity Testing-Machine Model	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.1 แสดงวงจรทางไฟฟ้า ของแบบจำลอง HBM	31
ภาพที่ 3.2 วงจรการทดลองกรณี HBM	32
ภาพที่ 3.3 แสดงประจุระหว่างร่องเท่ากับพื้น	33
ภาพที่ 3.4 แสดงวิธีการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า Body Voltage	34
ภาพที่ 3.5 แสดงแรงดันไฟฟ้าบนร่างกายจากการเดินบนพื้นฉนวน	35
ภาพที่ 4.1 แผ่นเก็บประจุแบบแผ่นขนาน	36
ภาพที่ 4.2 ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานที่ออกแบบ	37
ภาพที่ 4.3 แสดงแผ่นเก็บประจุแบบขนานที่ออกแบบ นำมาวัดค่า Capacitance	37
ภาพที่ 4.4 วงจรการทดลอง กรณี HBM	38
ภาพที่ 4.5 การต่อวงจรทดลอง การคายประจุไฟฟ้า	39
ภาพที่ 4.6 วงจรทำการคายประจุที่อยู่บนแผ่นเก็บประจุ	40
ภาพที่ 4.7 แสดงผู้ที่ทำการทดลองเคลื่อนไหวร่างกาย	40
ภาพที่ 4.8 แสดงประจุไฟฟ้าที่เกิดจากการเคลื่อนไหวกของผู้ที่ทำการทดลองโดยสะสมอยู่บนแผ่นเก็บประจุ	41
ภาพที่ 4.9 ค่าการคายประจุที่อ่านได้จากการคายประจุไฟฟ้า ตามกรณี HBM	41

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันวงการอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มีการแข่งขันกันอย่างสูง ทำให้จำเป็นต้องคำนึงถึงคุณภาพด้านการผลิตมากยิ่งขึ้น โดยการทำงานด้านการผลิต ปัญหาการเกิดและการคายประจุไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharged,ESD) มักเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของปัญหาอยู่เสมอ ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จะต้องเผชิญกับไฟฟ้าสถิตอยู่ตลอดเวลา ยิ่งอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ มีความเร็วสูงขึ้นและมีขนาดเล็กลง ความไวต่อ ESD ก็เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ผู้ชำนาญการได้ประเมินว่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต จะอยู่ในช่วง 8-33% คิดเป็นเงินหลายพันล้านดอลลาร์ สหรัฐต่อปี

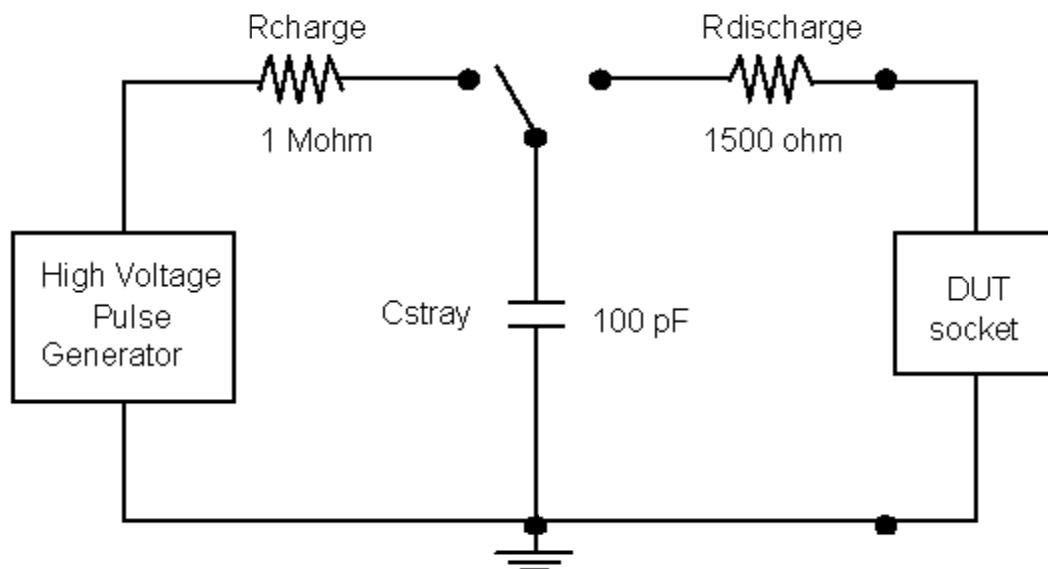
ไฟฟ้าสถิตได้เข้าไปมีผลโดยตรงกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ และความเชื่อถือในคุณภาพผลิตภัณฑ์นั้น ในระยะยาว อีกทั้งไฟฟ้าสถิต ยังเข้าไปมีผลกระทบกับอุตสาหกรรมอื่นๆอีก เช่น อุตสาหกรรมการพิมพ์ อุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น

ถึงแม้ว่าจะมีการพยายามอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาในการพยายามแก้ปัญหาด้านไฟฟ้าสถิต แต่ปัญหานี้ก็ยังคงมีอยู่จนกระทั่งปัจจุบัน ทำให้โรงงานผู้ผลิตประสบปัญหาด้าน ต้นทุนทางการผลิต คุณภาพของผลิตภัณฑ์ ความน่าเชื่อถือในผลิตภัณฑ์ และผลกำไร

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาถึงการเกิดประจุไฟฟ้าสถิตว่า ประจุไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้นได้อย่างไร และเมื่อเกิดแล้ว ประจุไฟฟ้าสถิตนี้จะมีผลกระทบกับวัตถุที่อยู่ใกล้อย่างไร และจากกรณีดังกล่าว จะมีวิธีการป้องกันอย่างไร

1.3 โครงสร้างของโครงการ



ภาพที่ 1.1 สร้างแบบจำลองกรณีของ Human Body Model (HBM)

1.4 ขอบเขตของโครงการ

1. สามารถจำลองการเกิดไฟฟ้าสถิตได้
2. สามารถป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิตได้

1.5 ประโยชน์ของโครงการ

1. ทำให้ทราบถึงอันตรายของไฟฟ้าสถิต
2. สามารถเข้าใจและป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิต
3. เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาไฟฟ้าสถิตต่อไป

1.6 แผนการดำเนินงานโครงการ

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนดำเนินงานในการจัดทำโครงการการศึกษาถึงผลการเกิดและการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิต

ลำดับ	รายละเอียด	EEN 491				EEN492			
		ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1	ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงการ	■							
2	ศึกษาการเกิดไฟฟ้าสถิตกรณี HBM			■	■				
3	จัดหาอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง HBM				■	■			
4	สร้างแบบจำลอง HBM						■		
5	ทำการทดลองการเกิดไฟฟ้าสถิตกรณี HBM						■	■	
6	รวบรวมผลการทดลองและเขียนรายงานเพื่อเตรียมสอบ								■

หมายเหตุ : ■ หมายถึง ระยะเวลาดำเนินงาน

1.7 รายละเอียดของโครงการ

โครงการนี้ในบทที่ 1 ได้กล่าวถึงบทนำ ความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของโครงการ โครงสร้างของโครงการ ขอบเขตของโครงการ ประโยชน์ของโครงการ และแผนการดำเนินงาน ในบทที่ 2 กล่าวถึงความรู้พื้นฐานด้านไฟฟ้าสถิต ในบทที่ 3 กล่าวถึงการศึกษากรณีแบบจำลองมนุษย์ ในบทที่ 4 กล่าวถึงการทดสอบความไวของการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิตกรณีแบบจำลองมนุษย์ และในบทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปและข้อเสนอแนะของโครงการ

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานด้านไฟฟ้าสถิต

2.1 ประวัติความเป็นมาของไฟฟ้าสถิต [8]

ในสมัยแรก ๆ มนุษย์รู้ว่าไฟฟ้าเกิดจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น ฟาแลบ ฟาร์ร้อง และฟ้าผ่า นับเป็นเวลานานที่มนุษย์ไม่สามารถให้คำอธิบายความเป็นไปของการเกิดฟาแลบ ฟาร์ร้อง ที่มีอำนาจในการทำลายสูงได้ จนกระทั่งมนุษย์สามารถประดิษฐ์สายล่อฟ้าไว้ป้องกันฟ้าผ่าได้ ในเวลาต่อมา 2500 ปี ก่อนคริสต์ศักราช ชาวกรีกโบราณ ที่อาศัยอยู่แถบฝั่งแชนแนลด์ของทะเลบอลติก ในรัฐเซียมตะวันออก ได้พบหินสีเหลืองชนิดหนึ่งซึ่งเมื่อถูกแสงอาทิตย์ก็จะมีประกายคล้ายทองคำ คุณสมบัติพิเศษของวัตถุชนิดนี้คือเมื่อโยนลงในกองไฟมันจะสุกสว่างและติดไฟได้ เรียกกันว่าอำพัน ซึ่งเกิดจากการทับถมของยางไม้เป็นเวลานานๆ อำพันถูกนำมาทำเป็นเครื่องประดับและหวี เมื่อนำแท่งอำพันมาถูด้วยขนสัตว์ จะเกิดประกายไฟขึ้นได้ และเมื่อหวีผสมด้วยหวีที่ทำจากอำพันก็จะมีเสียงดังอย่างลึกลับและหวีจะดูดเส้นผม เหมือนว่าภายในอำพันมีแรงลึกลับอย่างหนึ่งซ่อนอยู่

เมื่อก่อนคริสต์ศักราช 600 ปี ทาลิส (Thales) นักวิทยาศาสตร์ชาวกรีกได้ค้นพบไฟฟ้าขึ้น กล่าวคือเมื่อเขาได้นำเอาแท่งอำพันถูกับผ้าขนสัตว์ แท่งอำพันจะมีอำนาจดูดสิ่งของต่างๆ ที่เขาได้ เช่น เส้นผม เศษกระดาษ เศษผง เป็นต้น เขาจึงให้ชื่ออำนาจนี้ว่า ไฟฟ้า หรือ อิเล็กตรอน (Electron) ซึ่งมาจากภาษากรีกว่า อิเล็กทรา (Elektra)

ต่อมาเมื่อ พ.ศ. 2280 (ค.ศ. 1747) เบนจามิน แฟรงคลิน (Benjamin Franklin) นักวิทยาศาสตร์ ชาวอเมริกัน ได้ค้นพบไฟฟ้าในอากาศ โดยการทดลองนำว่าวซึ่งมีกุญแจผูกติดอยู่กับสายป่านขึ้นในอากาศขณะที่เกิดพายุฝน เขาพบว่าเมื่อเอามือไปใกล้กุญแจก็ปรากฏประกายไฟฟ้ามายังมือของเขา จากการทดลองนี้ทำให้เขาค้นพบเกี่ยวกับปรากฏการณ์ ฟาแลบ ฟาร์ร้อง และฟ้าผ่า ซึ่งเกิดจากประจุไฟฟ้าในอากาศนับตั้งแต่นั้นมา แฟรงคลินก็สามารถประดิษฐ์สายล่อฟ้าได้เป็นคนแรกโดยเอาโลหะต่อไว้กับยอดหอคอยที่สูงๆ แล้วต่อสายลวดลงมายังดิน ซึ่งเป็นการป้องกันฟ้าผ่าได้ กล่าวคือไฟฟ้าจากอากาศจะไหลเข้าสู่โลหะที่ต่ออยู่กับยอดหอคอยแล้วไหลลงไปตามสายลวดที่ต่อเอาไว้ลงสู่ดินโดยไม่เป็นอันตรายต่อคนหรืออาคารบ้านเรือน

ต่อมาเมื่อ พ.ศ. 2333 (ค.ศ. 1790) วอลตา (Volta) นักวิทยาศาสตร์ชาวอิตาลี ได้ค้นพบไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี โดยนำเอาวัตถุต่างกันสองชนิด เช่น ทองแดงกับสังกะสีจุ่มในน้ำยาเคมี และกรณีกำมะถันหรือกรดซัลฟิวริก โลหะสองชนิดจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำยาเคมีทำให้เกิด

ไฟฟ้าขึ้นได้ เรียกการทดลองนี้ว่า วอลเทอิก เซลล์ (Voltaic Cell) ซึ่งต่อมาภายหลังวิวัฒนาการมาเป็น เซลล์แห้ง หรือถ่านไฟฉาย และเซลล์เปียกหรือแบตเตอรี่

พ.ศ.2374 (ค.ศ. 1831) นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ชื่อ ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ได้ค้นพบไฟฟ้าที่เกิดจากอำนาจแม่เหล็ก โดยนำขดลวดเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็กทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวด ซึ่งต่อมาภายหลังได้ถูกนำมาประดิษฐ์เป็น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้น พ.ศ.2420-2430 (ค.ศ.1877-1887) นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกันชื่อ โทมัส อัลวา เอดิสัน (Thomas A. Edison) ได้ประดิษฐ์หลอดไฟฟ้าขึ้นสำเร็จเป็นคนแรกและยังได้ประดิษฐ์อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ อีกหลายอย่าง เช่น เครื่องฉายภาพยนตร์ หีบเสียง เครื่องอัดสำเนา เป็นต้น จนได้รับฉายาว่าเป็นพ่อมดในวงการอุตสาหกรรมนอกจากนี้ ยังมีนักวิทยาศาสตร์อีกหลายท่าน เช่น อะเล็กซานเดอร์ เกรแฮมเบลล์ (Alexander Graham Bell) ผู้ประดิษฐ์โทรศัพท์และ มาร์โคนี (Marconi) นักวิทยาศาสตร์ชาวอิตาลีเป็นผู้ค้นพบการส่งสัญญาณวิทยุ เป็นต้น

ในทศวรรษที่ 90 เป็นช่วงเวลาของการแข่งขันด้านการพัฒนาคุณภาพของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มีการแข่งขันมากขึ้น มาตรฐานการผลิตที่ดีขึ้น สิ่งเหล่านี้กลายมาเป็นเหตุผลที่ทำให้โรงงานอิเล็กทรอนิกส์ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพทางการผลิต

ในช่วงสิบปีที่ผ่านมาจะเป็นช่วงที่สามารถกล่าวได้ว่าเป็นช่วงสิบปีของคุณภาพ (Decade of Quality) ของวงการอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การแข่งขันทำให้จำเป็นต้องคำนึงถึงคุณภาพมากขึ้นไม่ว่าจะเป็นทางตรงเช่น six-sigma quality หรือทางอ้อมเช่น ISO 9000 ก็ตาม พื้นที่ที่ต้องการพัฒนาคุณภาพ (Quality improvement area) ก็ยังคงมีส่วนหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการดิสก์ซาร์จ ประจุเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งอยู่เสมอ ในวงการอิเล็กทรอนิกส์จะต้องผจญกับไฟฟ้าสถิต และการดิสก์ซาร์จอยู่ตลอดเวลา ยิ่งอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์มีความเร็วสูงขึ้น มีขนาดเล็กลง ความไวต่อ ESD ก็จะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

2.2 วัสดุทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการคายประจุไฟฟ้าสถิต [9]

วัสดุทางไฟฟ้าที่เสมือนว่าเป็นแหล่งสะสมประจุ เส้นทางการคายประจุ หรือแหล่งรับประจุนั้น แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. **ฉนวนไฟฟ้า (Insulator)** เป็นวัสดุที่มีความต้านทานทางไฟฟ้าสูง โดยมีค่าสภาพต้านทานเชิงพื้นผิวมากกว่า 1×10^{12} โอห์มต่อตาราง (Ω/sq) และค่าสภาพต้านทานเชิงปริมาตรมากกว่า 1×10^{11} โอห์มต่อเซนติเมตร (Ω/cm) โดยปกติแล้วประจุจะเคลื่อนที่ได้ยากบนฉนวน หากเกิดประจุนบนฉนวน ประจุนั้นมักจะไม่วิ่งเคลื่อนที่ หรืออาจกล่าวได้ว่า ประจุที่อยู่บนฉนวนจะไม่เคลื่อนที่แม้ว่าจะทำการต่อลงดินก็ตาม

2. **ตัวนำไฟฟ้า (Conductor)** เป็นวัสดุที่มีความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำ โดยมีค่าสภาพต้านทานเชิงพื้นผิวน้อยกว่า 1×10^5 โอห์มต่อตาราง (Ω/sq) และค่าสภาพต้านทานเชิงปริมาตรน้อยกว่า 1×10^4 โอห์มต่อเซนติเมตร (Ω/cm) โดยปกติแล้วประจุจะเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วบนตัวนำ หากเกิดประจุนบนตัวนำ ประจุนั้นจะเคลื่อนที่บนตัวนำ และเมื่อต่อตัวนำลงดิน ประจุนั้นจะใช้เวลาอย่างรวดเร็วในการถ่ายเทลงดินและส่งผลให้อุปกรณ์นั้น เกิดความเสียหาย เนื่องจากการคายประจุไฟฟ้าสถิตอย่างรวดเร็ว

3. **วัสดุที่สามารถสลายหรือถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิตได้ (Static Dissipative Materials)** เป็นวัสดุที่มีความต้านทานทางไฟฟ้าระดับกลาง โดยมีค่าสภาพต้านทานเชิงพื้นผิวระหว่าง $1 \times 10^5 - 1 \times 10^{12}$ โอห์มต่อตาราง (Ω/sq) และค่าสภาพต้านทานเชิงปริมาตรระหว่าง $1 \times 10^4 - 1 \times 10^{11}$ โอห์มต่อเซนติเมตร (Ω/cm) ซึ่งเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการคายประจุไฟฟ้าสถิต เนื่องจากสามารถควบคุมการเคลื่อนที่หรืออัตราการไหลของอิเล็กตรอนได้จากค่าความต้านทานทั้งสอง เพราะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนบนวัสดุประเภทนี้จะช้ากว่าตัวนำไฟฟ้า แต่เร็วกว่าฉนวนมาก โดยทั่วไปค่าสภาพต้านทานเชิงพื้นผิวที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง $1 \times 10^6 - 1 \times 10^9$ โอห์มต่อตารางเมตร (Ω/sq)

2.3 การเกิดประจุไฟฟ้าสถิต [3],[9]

ประจุไฟฟ้าสถิต เกิดจากความไม่สมดุลของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวของวัสดุ การไม่สมดุลนี้ทำให้เกิดความต่างศักย์ ที่สามารถวัดได้เป็นสนามไฟฟ้าสถิตและยังสามารถมีผลถึงวัตถุอื่นที่อยู่ใกล้เคียง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างของวัตถุทั้งสอง

การถ่ายเทประจุไฟฟ้าอย่างทันทีทันใด สามารถเปลี่ยนคุณลักษณะหรือการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้เสียหายใช้งานไม่ได้ในทันที หรืออาจเกิดความเสียหายแบบแฝง ผลการเกิด

ประจุไฟฟ้าสถิตทำให้เกิดความเสียหายอีกด้านหนึ่งคือ ความสะอาด โดยประจุที่อยู่บนพื้นผิวของอุปกรณ์สามารถดึงดูดอนุภาคฝุ่นให้มาเกาะอยู่บนชิ้นงาน

2.3.1 การเกิดประจุไฟฟ้าสถิตเนื่องจากการทริโบอิเล็กทริก

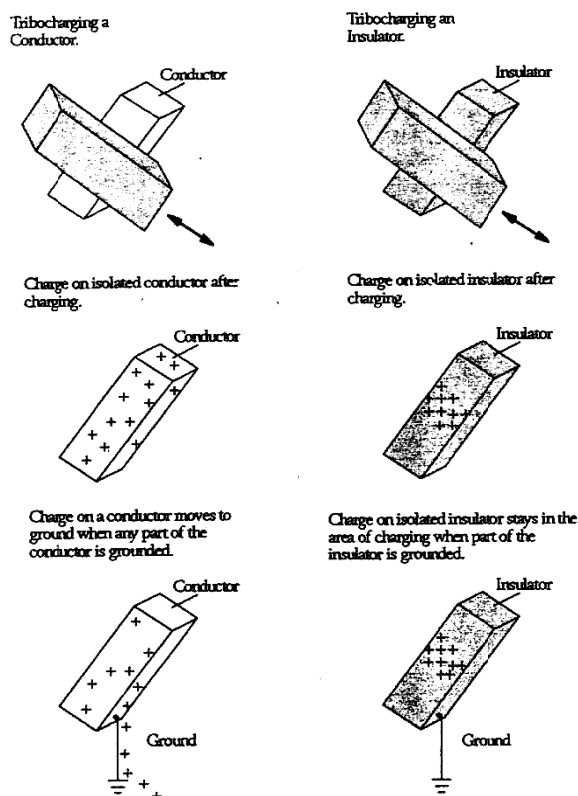
หากนำวัสดุที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าหรือมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ต่างกันมาขัดถูกัน แล้วแยกออกจากกันอย่างทันใดนั้น ก็จะปรากฏประจุบวกบนวัสดุชิ้นหนึ่ง และจะมีประจุลบเกิดขึ้นบนวัสดุอีกชิ้นหนึ่ง จำนวนของประจุที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางอะตอมของวัสดุเหล่านั้น รวมทั้งอัตราความเร็วในการแยกจากกัน ความชื้น อุณหภูมิ และความเรียบของผิว ปรากฏการณ์นี้จะเรียกว่า การทริโบอิเล็กทริก (Triboelectircity) ดังภาพที่ 2.1 และตัวอย่างการจำแนกคุณสมบัติของวัสดุแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางทริโบอิเล็กทริกของวัสดุชนิดต่าง ๆ

ประจุบวก (+)	เป็นกลาง (±)	ประจุลบ (-)
อากาศ (Air)	ฝ้าย (Cotton)	ออร์ลอน (Orlon)
แร่ใยหิน (Asbestos)	เหล็กกล้า (Steel)	โพลียูรีเทน (Polyurethane)
แก้ว (Glass)	ไม้ (Wood)	โพลีโพรเพน (Polypropene)
ไมก้า (Mica)	อำพัน (Amber)	พีวีซี (PVC)
เส้นผม (Human Hair)	ขี้ผึ้ง (Sealing-wax)	ซิลิโคน (Silicon)
ไนลอน (Nylon)	นิกเกิล, ทองแดง, เงิน (Nickel, Copper, Silver)	เทฟลอน (Teflon, PTFE)
ขนแกะ (Wool)	ทอง (Gold)	
หนังฟอก (Leather)	ทองเหลือง (Brass)	
ตะกั่ว (Lead)	ยางผสมกำมะถัน (Ebonite)	
อลูมิเนียม (Aluminum)	โพลีเอสเตอร์ (Polyester)	
กระดาษ (Paper)	เซลลูลอยด์ (Celluloid)	

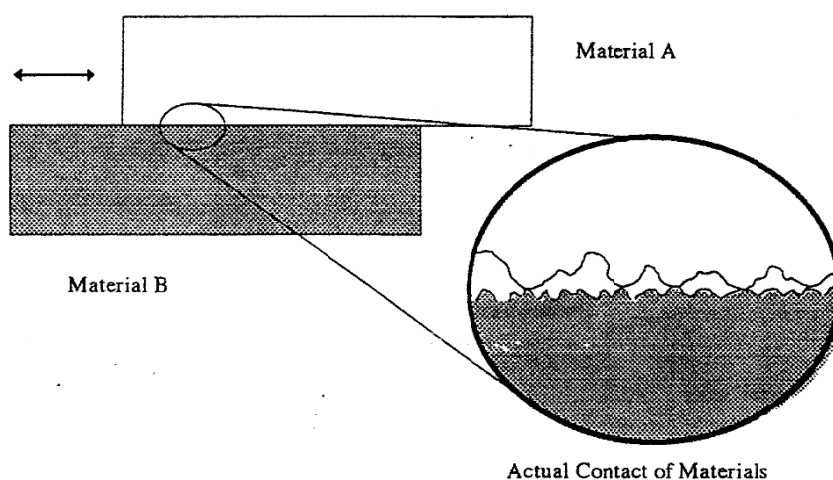


ภาพที่ 2.1 แสดงแบบจำลองการเกิดทริโบอิเล็กทริกของวัสดุ 2 ชนิด



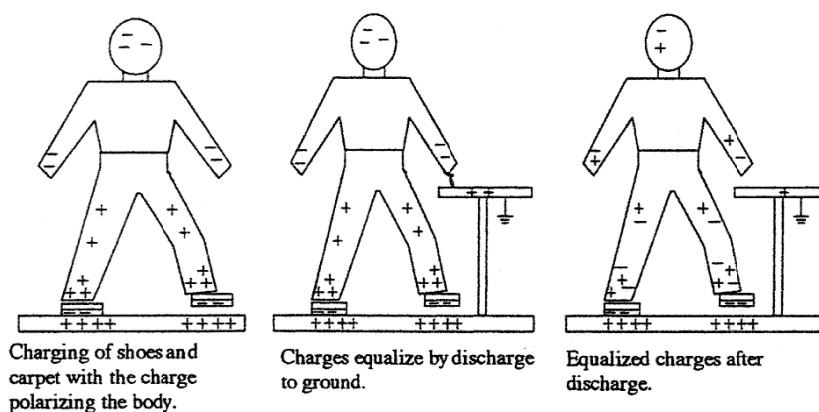
ภาพที่ 2.2 การเกิดและการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิตระหว่างวัสดุที่เป็นตัวนำและฉนวน

จากภาพที่ 2.2 อธิบายได้ว่า เมื่อนำวัสดุ 2 ชนิดมาขัดถูกัน เมื่อเกิดประจุไฟฟ้าบนวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้า เราสามารถถ่ายเทประจุไฟฟ้านั้นได้โดยการต่อกราวด์ แต่หากนำวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดมาขัดถูกัน วัสดุนั้นเมื่อเกิดมีประจุไฟฟ้าสะสมอยู่ จะไม่สามารถลดประจุนั้นโดยการต่อกราวด์ได้ แต่สามารถลดประจุนั้นลงได้โดยการเติมประจุเข้าไปเท่านั้น โดยเครื่องมือที่ใช้คือ เครื่อง IONIZER



ภาพที่ 2.3 พื้นผิวของวัสดุเมื่อเกิดการทริโบอิเล็กทริก

จากภาพที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่า พื้นผิวของวัสดุเมื่อนำมาขยายจะพบว่า มีพื้นผิวที่ขรุขระ ทำให้มีพื้นที่หน้าสัมผัสเพิ่มมากขึ้น และยังผลทำให้การเกิดประจุไฟฟ้าจากการขัดถูมากขึ้นด้วย

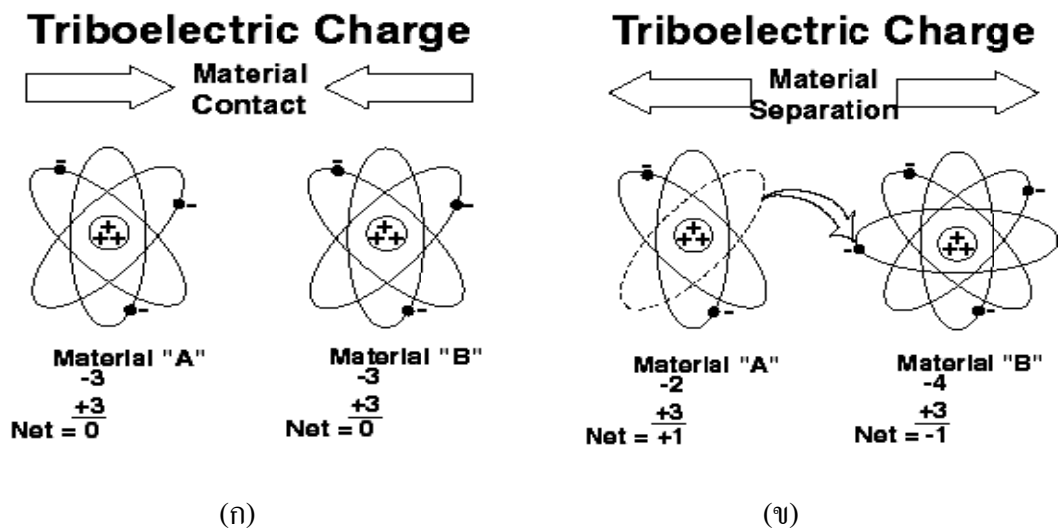


ภาพที่ 2.4 การเกิดประจุไฟฟ้าสถิตของบุคคลเมื่อเดินบนพรม

จากภาพที่ 2.4 เมื่อบุคคลเดินอยู่บนพรมจะเกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าระหว่างพรมกับพื้นรองเท้าทำให้เกิดประจุไฟฟ้าสถิต และเมื่อบุคคลนั้นสัมผัสกับกราวด์ หรือวัตถุอื่น จะทำให้เกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้า

อะตอมในสถานะที่เป็นกลางทางไฟฟ้าจะประกอบด้วย นิวเคลียสที่เป็นประจุบวก ซึ่งอยู่ตรงกลางของอะตอมและมีอิเล็กตรอนรอบๆ โดยที่อิเล็กตรอนนั้นเบามาก หรือเกือบไม่มีน้ำหนักเลย หากอะตอมนั้นสูญเสียอิเล็กตรอน อะตอมนั้นจะมีอยู่ในสถานะอะตอมที่ถูกทำให้เป็นไอออน (Ionized) ในทางตรงกันข้าม อะตอมสามารถจับอิเล็กตรอนเพิ่มทำให้กลายเป็นไอออนลบหรือประจุลบได้ โดยอิเล็กตรอนนั้นจะมีทั้งพลังงานศักย์ (Potential Energy) และพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ซึ่งผลรวมของพลังงานทั้งสองจะมีค่าคงที่

อิเล็กตรอนสามารถหลุดออกจากอะตอมได้ หากได้รับพลังงานจากภายนอกมากพอ ซึ่งจะทำให้อะตอมนั้นกลายเป็นไอออนบวกหรือประจุบวก โดยในการเกิดทริโบอิเล็กทริกนั้น อะตอมตัวหนึ่งจะมีการปล่อยอิเล็กตรอนออกมาให้กับอะตอมอีกตัวหนึ่ง ทำให้เกิดประจุบวกและลบตามลำดับ ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 แสดงการเกิดทริโบอิเล็กทริกในระดับอะตอม เมื่อ

- (ก) สัมผัส
- (ข) แยกจากกันอย่างรวดเร็ว

ในชีวิตประจำวัน ร่างกายของเราจะมีการสร้างและการคายประจุไฟฟ้าสถิตตลอดเวลา จากการเดินหรือการเคลื่อนไหวร่างกาย หากส่วนหนึ่งส่วนใดของร่างกายสัมผัสกับโลหะที่เปรียบเสมือนการต่อลงดิน ก็จะทำให้ประจุไหลผ่านผิวหนังลงไปยังโลหะที่สัมผัส ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าที่บางครั้งสามารถรู้สึกได้ แต่หากประจุไฟฟ้าสถิตนี้ถ่ายเทสู่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ก็อาจทำให้วัสดุเหล่านั้นเสียหายได้

ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างการเกิดศักย์ไฟฟ้าบนร่างกายคนเนื่องจากกิจกรรมต่าง ๆ

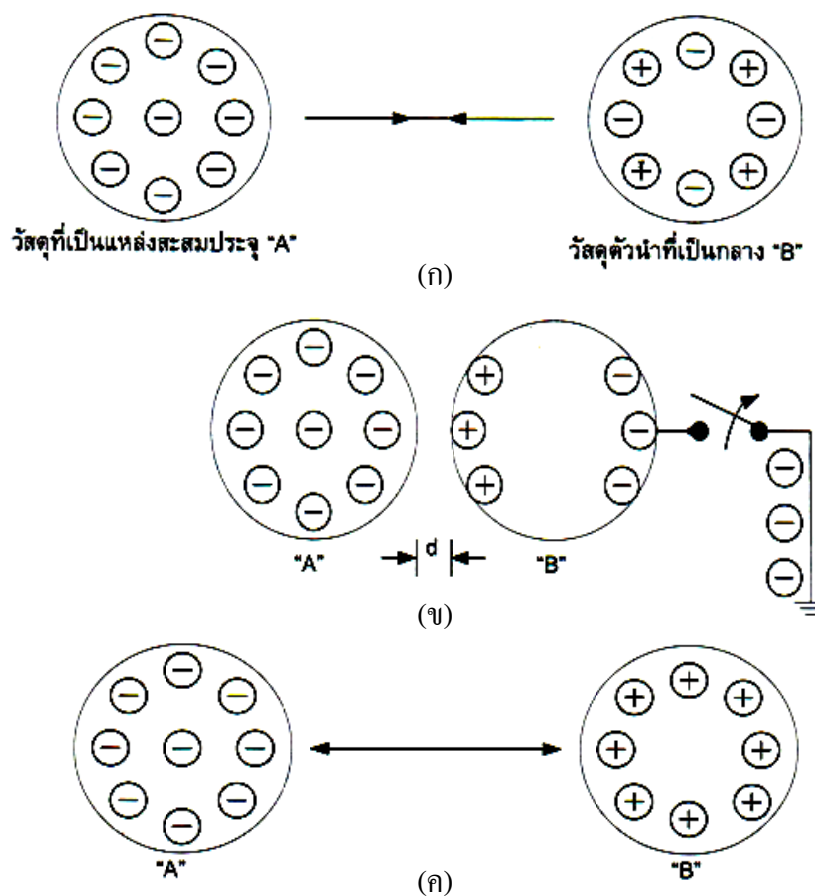
ตัวอย่างกิจกรรม	ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนร่างกายคน (V)	
	ความชื้นสัมพัทธ์ 10-25%	ความชื้นสัมพัทธ์ 65-90%
เดินบนพื้นพรม	35,000	1,500
เดินบนแผ่นไวนิล (Vinyl Tile)	12,000	250
ทำงานบนโต๊ะทำงานหรือ โต๊ะทดลอง	6,000	100
ยกกระเป๋าพลาสติกจากโต๊ะทำงาน	20,000	1,200
นั่งเก้าอี้ที่เป็นวัสดุโพลียูรีเทน	18,000	1,500

ตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงความเปราะบางต่อ ESD ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่างๆ

ประเภทของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	อัตราทนแรงดันจาก ESD (Volts)
VMOS	30-1,200
Mosfet, GaAsfet, EPROM	100-300
JFET	150-7,000
OP-AMP	190-2,500
Schottky Diodes	300-2,500
Film Resistors	300-3,000
Schottky TTL	1,000-2,500

2.3.2 การเกิดประจุไฟฟ้าเนื่องจากการเหนี่ยวนำประจุ

การเหนี่ยวนำประจุ เกิดจากการที่วัสดุตัวนำที่เป็นกลาง “B” เคลื่อนที่เข้ามาใกล้กับวัสดุที่เป็นแหล่งสะสมประจุ “A” ดังภาพที่ 2.6 โดยสนามไฟฟ้าจากวัสดุที่เป็นแหล่งสะสมประจุจะเหนี่ยวนำประจุของวัสดุตัวนำทำให้เกิดการแยกขั้ว หรือโพลาไรเซชัน และจากนั้นทำการต่อตัวนำลงดินอย่างรวดเร็ว แล้วแยกออกหรือเข้ามาใกล้ทันทีทันใด จะส่งผลให้วัสดุตัวนำเกิดประจุไฟฟ้าสถิตที่มีขั้วตรงข้ามกับวัสดุที่เป็นแหล่งสะสมประจุ โดยประจุที่ถูกเหนี่ยวนำจะมีปริมาณมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามไฟฟ้า



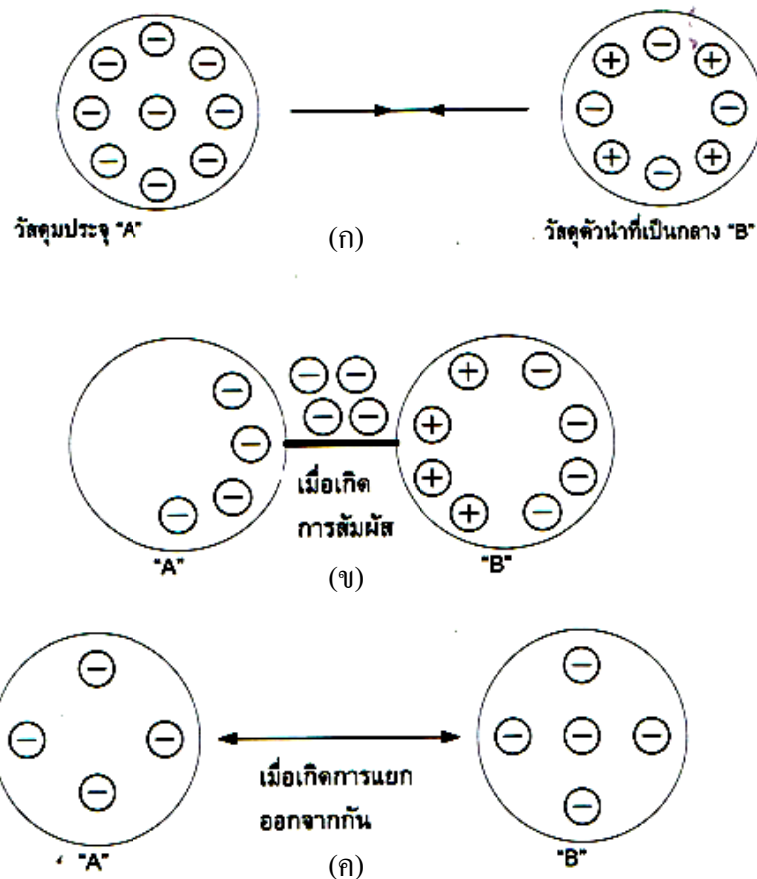
ภาพที่ 2.6 แสดงขบวนการเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าสถิต เมื่อ

- (ก) วัสดุตัวนำเคลื่อนที่เข้ามาใกล้วัสดุที่เป็นแหล่งสะสมประจุ
- (ข) วัสดุตัวนำถูกต่อลงดินอย่างรวดเร็ว
- (ค) วัสดุตัวนำและวัสดุที่เป็นแหล่งสะสมประจุแยกออกอย่างรวดเร็ว

2.3.3 การเกิดประจุไฟฟ้าสถิตเนื่องจากการนำประจุ

การนำประจุ คือ การถ่ายเทประจุจากวัสดุที่เป็นแหล่งสะสมประจุไปยังวัสดุตัวนำ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อวัสดุทั้งสองมาสัมผัสกัน ตามภาพที่ 2.7 โดยส่วนใหญ่การนำประจุจะเกิดขึ้นกับวัสดุประเภทตัวนำ

จากภาพที่ 2.7 จะเห็นว่า วัสดุตัวนำ "A" มีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ ขณะที่แหล่งสะสมประจุ "B" นั้นเป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อวัสดุทั้งสองสัมผัสกัน ประจุลบจากวัสดุตัวนำจะถ่ายเทไปยังแหล่งสะสมประจุ และไปจับตัวกับประจุบวกจนหมด ซึ่งเมื่อแยกวัสดุทั้งสองออกจากกันอย่างรวดเร็ว จะทำให้แหล่งสะสมประจุมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเช่นกันกับวัสดุตัวนำ



ภาพที่ 2.7 แสดงขบวนการนำประจุไฟฟ้าสถิต เมื่อ

- (ก) วัสดุตัวนำเคลื่อนที่เข้ามาใกล้วัสดุที่เป็นแหล่งสะสมประจุ
- (ข) วัสดุตัวนำถ่ายเทประจุให้กับแหล่งสะสมประจุ
- (ค) วัสดุตัวนำ และวัสดุที่เป็นแหล่งสะสมประจุแยกออกทันทีทันใด

2.4 ประเภทของตัวนำ [1]

แบ่งเป็นประเภทต่างๆดังนี้

2.4.1 วัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulator)

วัสดุที่ประจุไฟฟ้าสถิตสามารถเกิดขึ้นได้บนวัสดุที่เป็นฉนวน โดยการให้พลังงานจากการขั้วแล้วแยกจาก อย่างทันทีทันใด หากพิจารณาถึงประจุบนพื้นผิวของฉนวน ประจุไฟฟ้าสถิตสามารถอยู่บนพื้นผิวฉนวนได้ทั้ง ประจุบวก และ ลบ ในเวลาเดียวกันและในพื้นที่ต่าง ๆ กัน ทั้งนี้เนื่องจากความเป็นฉนวนของวัสดุ ประจุบวกและประจุลบจึงไม่สามารถรวมตัวกันได้ หากไม่มีการให้พลังงาน



ภาพที่ 2.8 แสดงค่าที่อ่านได้จากวัสดุที่เป็นฉนวนจากเครื่องวัดค่าความต้านทาน (Resistance meter)

2.4.2 Conductive Materials

เป็นวัสดุที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำโดยสามารถยอมให้อิเล็กตรอนไหลผ่านพื้นผิวได้ง่าย หากวัสดุที่เป็นตัวนำเกิดประจุไฟฟ้าสถิต ประจุนั้นจะกระจายอยู่ทั่วทุกพื้นผิว และหากนำวัสดุนี้ไปสัมผัสกับวัสดุตัวนำอีกชิ้นหนึ่ง ประจุจะสามารถถ่ายเทไปยังวัสดุตัวนำนั้นได้อย่างง่ายดาย และหากนำวัสดุนี้มาต่อลงกราวด์ (Earth Ground) จะทำให้ประจุนั้นวัสดุถูกถ่ายเทลงกราวด์ ทำให้วัสดุนั้น เป็นกลางทางไฟฟ้า (Neutralized)

2.4.3 Static Dissipative Materials

วัสดุที่เป็น Dissipative จะมีค่าความต้านทานอยู่ระหว่างวัสดุที่เป็นฉนวนกับวัสดุที่เป็นตัวนำ โดยอิเล็กตรอนสามารถเกิดและอยู่บนวัสดุได้โดยการให้พลังงานและจะมีได้เพียงชั่วไฟฟ้าเดียวเท่านั้น ประจุไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบนวัสดุ สามารถทำให้หมดไปได้โดยการต่อกราวด์



ภาพที่ 2.9 ภาพแสดงค่าความต้านทานที่วัดได้จากชุด Cleanroom ที่ทำจากวัสดุที่กระจายประจุ (Dissipative material)

ตารางที่ 2.3 ตารางจัดประเภทของวัสดุ ตามค่าความต้านทาน

Designation	Resistance (ohms)	Exponent Format
	10	10^1
Shielding $<10^2$	100	10^2
Conductive $<10^4$	1,000	10^3
	10,000	10^4
	100,000	10^5
Dissipative $\geq 10^4$ to $<10^{11}$	1,000,000	10^6
	10,000,000	10^7
	100,000,000	10^8
	1,000,000,000	10^9
	10,000,000,000	10^{10}
Insulative $\geq 10^{11}$	100,000,000,000	10^{11}

ANSI ESD S541

2.5 ความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต [7]

ความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต ในทางอุตสาหกรรม สามารถเกิดได้จากต้นทางคือ ผู้ผลิตจนกระทั่งถึงผู้ใช้งานผลิตภัณฑ์นั้นๆ เกิดจากการหยิบจับ โดยไม่ได้ระวังเรื่องการควบคุมไฟฟ้าสถิต โดยทั่วไปแล้วได้มีการแบ่งความเสียหายจากไฟฟ้าสถิตได้ 2 แบบคือ

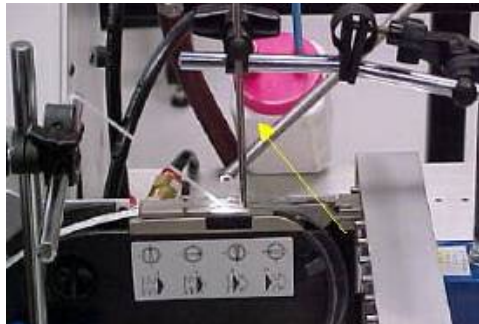
2.5.1 ความเสียหายแบบทันที

ความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานผิดปกติหรือเสียหายอย่างทันที โดยประจุไฟฟ้าสถิตจะทำให้เกิดความเสียหายกับ ผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ขั้นตอนการผลิต จัดเป็นความเสียหายอันเนื่องมาจากการผลิต แต่ความเสียหายประเภทนี้สามารถตรวจพบ โดยกระบวนการทดสอบระหว่างการผลิต จึงสามารถควบคุมและป้องกันในส่วนการผลิตได้ทันทีก่อนที่อุปกรณ์นั้นจะออกสู่ตลาด

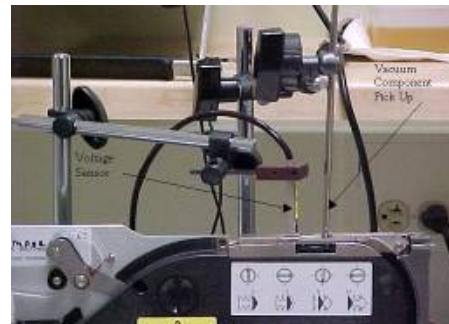
2.5.2 ความเสียหายแอบแฝง

ความเสียหายแบบแอบแฝงเมื่อเกิดขึ้นแล้วอาจตรวจสอบไม่พบจากการทดสอบอุปกรณ์ระหว่างขั้นตอนการผลิต และอุปกรณ์ยังคงทำงานอยู่ได้อย่างปกติตามที่ได้ออกแบบไว้เมื่อถึงมือลูกค้า แต่ความเสียหายอาจเกิดขึ้นหลังจากนำไปใช้งานระยะหนึ่ง ความเสียหายแบบแอบแฝงนี้มีผลต่อความมั่นใจในของลูกค้า ในผลิตภัณฑ์นั้นๆ

2.5.3 ความเสียหายอันเนื่องมาจากกระบวนการผลิต



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 2.10 ตัวอย่างความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต ขณะเครื่องจักรอัตโนมัติกำลังทำงาน

- (ก) ภาพแสดงขณะขบวนการที่เครื่องจักรกำลังนำชิ้นส่วนอุปกรณ์ SMT ออกจากแพคเกจ
- (ข) เครื่องจักรทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดไฟฟ้าสถิต ตำแหน่งลูกศรชี้สีดำ เพื่อวัดค่าการเกิดประจุไฟฟ้าจากการดึงแผ่นหุ้มอุปกรณ์ออก
- (ค)-(ง) อุปกรณ์ขณะอยู่ในแพคเกจโดยมีประจุไฟฟ้าที่เกิดขณะดึงแผ่นหุ้มออกอย่างรวดเร็วทำให้เกิดประจุไฟฟ้าสถิตแล้วดูดอุปกรณ์ออกจากแพคเกจทำให้เครื่องจักรไม่สามารถจับอุปกรณ์ SMT ไปวางในตำแหน่งได้อย่างถูกต้อง

จากภาพที่ 2.10 ภาพขณะที่เครื่องจักรหยิบจับอุปกรณ์ SMT ที่มีขนาดเล็ก ประจุไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้นในขณะที่ดึงแผ่นหุ้มอุปกรณ์ออก โดยแรงจากสนามไฟฟ้าสถิตจะดูดอุปกรณ์บางชิ้นออกจากรางที่วางอุปกรณ์ ทำให้เครื่องจักรไม่สามารถหยิบอุปกรณ์ไปวางในตำแหน่งต่างๆ ได้อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 2.4 ตารางเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเสียหายอันเกิดจากไฟฟ้าสถิตจากโรงงานผู้ผลิต จนถึงมือลูกค้า

Information Summary of Static Losses By Level			
Static Losses Reported			
Description	Min, Loss	Max, Loss	Est. Avg, loss
Component Manufacturer	4%	97%	16-22%
Subcontractor	3%	70%	9-15%
Contractor	2%	35%	8-14%
User	5%	70%	27-33%

2.6 การป้องกันไฟฟ้าสถิต [7]

การควบคุมไฟฟ้าสถิตจะต้องเริ่มจากความเข้าใจที่ว่า ประจุไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้นได้อย่างไร โดยพื้นฐานแล้ว ประจุไฟฟ้าสถิตเกิดจาก การสัมผัสแล้วแยกจากวัตถุที่เหมือนกันหรือแตกต่างกัน เช่น คนเดินอยู่บนพื้นก็จะเกิดการสัมผัสของพื้นรองเท้ากับพื้นแล้วแยกจากอย่างทันทีทันใด หรือ เกิดจากการลื่นไถลของวัตถุกับพื้นผิว โดยความมากน้อยของปริมาณประจุไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นจะอยู่กับชนิดของวัสดุ ความกว้างของพื้นผิวที่สัมผัสกัน ความเร็วและความแรงจากการสัมผัส

เราสามารถป้องกันความเสียหายจากฟ้าสถิตได้จากการควบคุมความเร็วในการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิตจากวัตถุไปยังกราวด์ โดยใช้วัสดุที่เป็นตัวนำ เช่น Dissipative material เพื่อลดการถ่ายเทประจุอย่างทันทีทันใด

การป้องกันไฟฟ้าสถิตเบื้องต้น

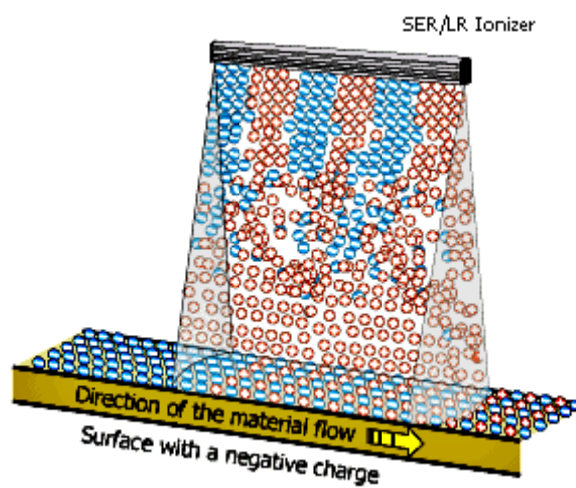


ภาพที่ 2.11 การป้องกันไฟฟ้าสถิตโดยอาศัยอุปกรณ์ต่างๆ

1. ออกแบบอุปกรณ์ให้มีความทนทานต่อESD หรือการคายประจุไฟฟ้าสถิต
2. กำจัดและลดการเกิดประจุไฟฟ้าสถิต โดยพื้นฐานที่ว่า หากไม่มีประจุแล้วย่อมไม่มีการถ่ายเทประจุ ดังนั้นสามารถทำได้โดยการพยายามลดการเสียดสีและการแยกจากกันของวัสดุต่างชนิดกันภายในบริเวณที่ปฏิบัติงาน โดยพยายามทำให้กระบวนการและวัสดุต่างๆ อยู่ที่ศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน ทำให้ไม่เกิดการถ่ายเทประจุเกิดขึ้น
3. กระจายประจุนอกและทำให้เป็นกลาง (Dissipate and neutralize) ในสภาพความเป็นจริง เราไม่สามารถกำจัดแหล่งกำเนิดประจุได้หมด ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องป้องกันแหล่งกำเนิดประจุมิให้มีประจุเกิดขึ้น อาจสามารถทำได้โดยการต่อกราวด์ แต่สำหรับวัสดุบางชนิด เช่น พลาสติกและฉนวนต่างๆ ไม่สามารถลดประจุที่สะสมอยู่ได้โดยการต่อกราวด์ แต่สามารถทำได้โดย การเติมประจุเพื่อให้เป็นกลาง หรือมีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ โดยการใช้เครื่องสร้างประจุ (Ionizer)



ภาพที่ 2.12 เครื่องผลิตประจุไฟฟ้าแบบแขวน (Overhead Ionizer)



ภาพที่ 2.13 แสดงตัวอย่างการลดประจุด้วยวิธีการเติมประจุด้วยเครื่องสร้างประจุไฟฟ้าสถิต



ภาพที่ 2.14 เครื่องสร้างประจุ (Ionizer)



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 2.15 แสดงตัวอย่างประจุไฟฟ้าที่เกิดจากเครื่องสร้างประจุไฟฟ้า (Ionizer)

- (ก) เข็มประจุลบ (-) บนซ้าย
- (ข) เข็มประจุบวก (+) บนขวา
- (ค) เข็มประจุลบ (-) ล่างซ้าย
- (ง) เข็มประจุบวก (+) ล่างขวา

4. ปกป้องชิ้นส่วนและอุปกรณ์ โดยการแยกอุปกรณ์ที่ไวต่อไฟฟ้าสถิตออกจากสภาพแวดล้อมที่อาจมีการถ่ายเทประจุ เช่น โดยหีบห่อ (Shield) ที่มีคุณสมบัติป้องกันไฟฟ้าสถิตได้

บริเวณที่ต้องทำการป้องกัน ESD หรือการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิตในโรงงาน

- บริเวณรับงาน (Receiving)
- บริเวณที่แกะหีบห่อและทำการตรวจรับชิ้นงาน (Inspection)
- พื้นที่เก็บวัตถุดิบและสินค้า (Store and Warehouse)
- ส่วนที่ทำการประกอบชิ้นส่วน (Assembly area)
- บริเวณทดสอบและตรวจสอบ (Test and Inspection)
- ส่วนที่ทำการวิจัยและพัฒนา (Research and Development)
- บริเวณบรรจุหีบห่อ (Packaging)
- ส่วนซ่อมนอกสถานที่ (Field service and repair)
- สำนักงานและห้องทดลอง (Office and laboratories)

พนักงานและเครื่องมือเครื่องใช้

- พนักงานและเครื่องมือที่มีการเคลื่อนที่ ในหลายพื้นที่ที่ทำงาน ตัวผู้ปฏิบัติงานเองเป็นต้นกำเนิดของไฟฟ้าสถิต เพียงการเดินบนพื้น หากไม่มีการควบคุมที่เหมาะสมก็จะเกิดการถ่ายเทประจุลงสู่ชิ้นงานจนเกิดความเสียหาย
- สายรัดข้อมือ (Wrist strap) โดยทั่วไปเราสามารถควบคุมประจุนร่างกายและเครื่องแต่งกายได้โดยใช้สายรัดข้อมือ โดยปลายสายรัดข้อมือจะต่อเข้ากับระบบกราวด์ ผลที่ได้คือผู้ปฏิบัติงานนั้นจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ (คือระดับศักย์ของดิน) โดยบนสายรัดข้อมือด้าน wristband จะมีตัวต้านทานที่มีค่า 1 เมกกะโอม์ ขนาด $\frac{1}{4}$ วัตต์ ต่ออยู่ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยไม่ให้ผู้ปฏิบัติงานถูกไฟฟ้าดูดในกรณีที่เครื่องจักรอาจมีไฟฟ้ารั่วอยู่
- พื้นแผ่นปูรองพื้น และวัสดุที่ใช้ทำพื้น เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถควบคุมประจุนตัวผู้ปฏิบัติงานคือ ใช้พื้นหรือแผ่นปูพื้นที่ป้องกันไฟฟ้าสถิตร่วมกับรองเท้าที่ป้องกันไฟฟ้าสถิต ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุนออกจากร่างกาย นอกจากนั้นยังสามารถลดการเกิดประจุนที่เกิดจาก Triboelectric ได้อีกด้วย
- เสื้อผ้าและเครื่องแต่งกาย โดยเสื้อผ้าเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงค่อนข้างมากในบริเวณที่มีการควบคุมไฟฟ้าสถิต โดยเฉพาะในห้องสะอาด (Cleanroom) และในพื้นที่ที่มี

ความชื้นต่ำ วัสดุที่ใช้ทำเสื้อผ้าสามารถกำเนิดประจุไฟฟ้าสถิตได้เมื่อสัมผัสหรือเสียดสีกับวัสดุต่างชนิดกัน ประจุบนเสื้อผ้าเหล่านี้สามารถทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้จนทำให้เกิดประจุไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเป็นอีกวิธีการหนึ่งของการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิต

- โตะงานและพื้นผิวสำหรับทำงาน โตะงานเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญมากในการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิต โดยพื้นของโตะอาจปูด้วยแผ่นรองที่สามารถนำไฟฟ้าได้

2.7 แบบจำลองการเกิดไฟฟ้าสถิต [2]

ประเภทของการเกิดไฟฟ้าสถิต แบ่งเป็น 3 ประเภทดังนี้

2.7.1 แบบจำลองมนุษย์ (HBM: Human Body Model)

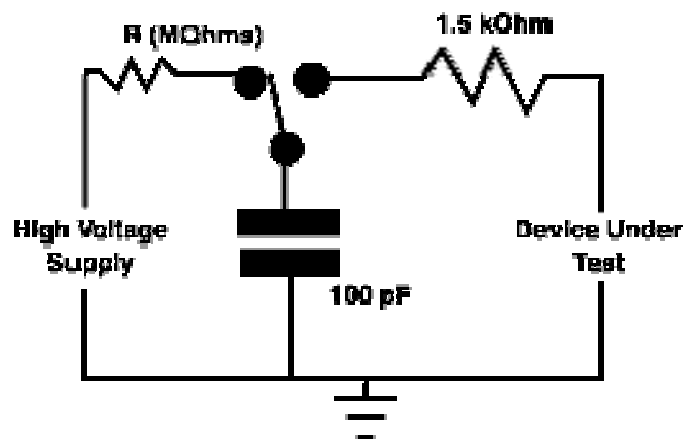
เป็นหนึ่งในสาเหตุหลักของความเสียหายทางการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิต คือการถ่ายเทตรงของประจุไฟฟ้าสถิต ผ่านความต้านทานอนุกรม จากร่างกายมนุษย์ มีผลกระทบด้าน electrostatic discharge sensitivity (ESDS) เมื่อเดินอยู่บนพื้นจะเกิดประจุสะสมอยู่บนร่างกาย การสัมผัสง่าย ๆ จากปลายนิ้วนำไปสู่เหตุการณ์ ESD โดยแบบจำลองที่จำลองเพื่อกรณีนี้คือ Human Body Model (HBM)

แบบจำลองกรณี HBM เป็นแบบจำลองแรกและถูกนำมาใช้บ่อยที่สุด ในการแบ่งแยกชนิดของชิ้นงานที่ไวต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิต ซึ่งเป็นการจำลองการคายประจุไฟฟ้าสถิตจากผู้ปฏิบัติงานสู่ชิ้นงาน ตัวอย่างเช่น การเดินของผู้ปฏิบัติงานบนพื้นผิวที่ไม่มีการต่อสายดินนั้น จะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าบนตัวผู้ปฏิบัติงาน เมื่อผู้ปฏิบัติงานไปสัมผัสชิ้นงานก็จะเกิดการคายประจุไฟฟ้าไปยังชิ้นงาน ซึ่งอาจทำให้ชิ้นงานนั้นเสียหายได้

แบบจำลองมนุษย์นี้จะสร้างกระแสชั่วคราวแบบอิมพัลส์ที่มีรูปร่างเหมือนการคายประจุไฟฟ้าตามธรรมชาติในมนุษย์ โดยแทนร่างกายของมนุษย์ด้วยตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน เนื่องจากค่าการเก็บประจุ ระหว่างร่างกายของมนุษย์กับพื้นดิน สามารถสะสมประจุได้ โดยหากมีส่วนหนึ่งส่วนใดของร่างกายสัมผัสกับวัตถุ ก็จะทำให้เกิดกระแสไหลสู่วัตถุ

แบบจำลองมนุษย์ ถูกนำมาใช้อย่างหลากหลาย สำหรับการกำหนดชั้นความไวต่อ ESD ค่าการทดสอบ HBM แสดงการคายประจุจากปลายนิ้วสู่อุปกรณ์ แบบจำลองคือ 100 พิโคฟารัด ตัวเก็บประจุจะคายประจุจากการสับสวิทช์สู่ค่าความต้านทานที่ 1,500 โอห์ม เข้าสู่อุปกรณ์ ตามมาตรฐานทางการทหารของประเทศสหรัฐอเมริกา (Military Standard) หมวดที่ MIL-STD-883 D ลำดับที่ 3015 และตามมาตรฐานของสมาคมการคายประจุไฟฟ้าสถิต (ESD Association Standard)

หมวดที่ ESD-STM5.1: Electrostatic Discharge Sensitivity Testing – Human Body Model เมื่อปี ค.ศ. 2001 นั้น ค่าการเก็บประจุจะมีค่าเป็น 100 พิโคฟารัด และค่าความต้านทานจะมีค่าเป็น 1,500 โอห์ม ดังภาพที่ 2.16 ขณะที่มาตรฐานของคณะกรรมการด้านเทคนิคไฟฟ้านานาชาติ (IEC : International Electrotechnical Commission) หมวดที่ IEC 60749 นั้น ค่าการเก็บประจุและค่าความต้านทานจะมีค่าแตกต่างออกไป และจะไม่กล่าวในที่นี้ เนื่องจากมาตรฐานของสมาคมการคายประจุไฟฟ้าสถิต เป็นที่ยอมรับในภาคอุตสาหกรรมมากกว่า



ภาพที่ 2.16 แสดงวงจรทางไฟฟ้าของแบบจำลองมนุษย์ตามมาตรฐานของ MIL-STD-883 D ลำดับที่ 3015 หรือตามมาตรฐานของ ESD-STM5.1: Electrostatic Discharge Sensitive Testing Human Body Model

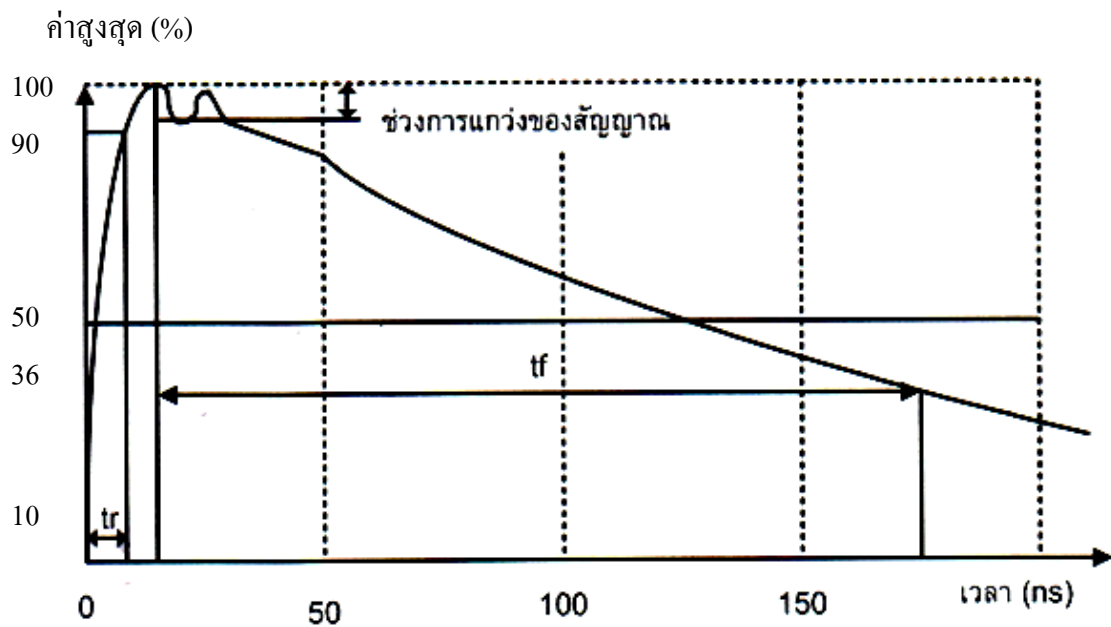
ทดสอบโดยวางชิ้นงานในชุดทดสอบและต่อเข้ากับชุดรีเลย์ จากนั้นก็จะทำการคายประจุไฟฟ้าสถิต (ESD Zap) และวัดสัญญาณกระแส แรงดัน เพื่อที่จะดูว่าชิ้นงานนั้นถูกทำลายหรือไม่ โดยช่วงเวลาต่ำสุดในการคายประจุ (Minimum Time Interval between Zaps) แต่จะอยู่ระหว่าง 1-300 มิลลิวินาที และเวลานานสุดสำหรับช่วงขาขึ้น (Maximum Rise Time) ของสัญญาณจะมีค่าไม่เกิน 25 นาโนวินาที หากต่อโหลดที่เป็นตัวต้านทานขนาด 500 โอห์ม

คุณสมบัติของรูปคลื่นหลัก เมื่อทดสอบโดยการลัดวงจรจุดที่ต่อกับชิ้นงานที่ถูกทดสอบ (DUT: Device under Test) ได้แก่

- เวลาช่วงขาขึ้นของคลื่น (tr) (10% - 90% ของยอดคลื่นมีค่าน้อยกว่า 10 นาโนวินาที)
- ความยาวหางคลื่น (tf) วัดจากจุดของยอดคลื่นถึงจุดที่คลื่นมีค่า $1/e$ หรือประมาณ 36.8% โดยตามมาตรฐาน MIL-STD-883 D นี้ ความยาวคลื่นจะมีค่าประมาณ 150 ± 20 นาโนวินาที

รูปร่างของคลื่นที่วัดจากค่ากระแสตามวงจรในภาพที่ 2.16 นั้น ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.17 โดยแรงดันจะลดลงตามสมการ 2.1

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{\sqrt{LC}}} \frac{t}{\sqrt{RC}} \quad (2.1)$$



ภาพที่ 2.17 แสดงรูปคลื่นที่วัดจากค่ากระแสของแบบจำลองมนุษย์ ตามภาพที่ 2.16

2.7.2 แบบจำลองอุปกรณ์ที่มีการสะสมประจุ (CDM: Charged Device Model)

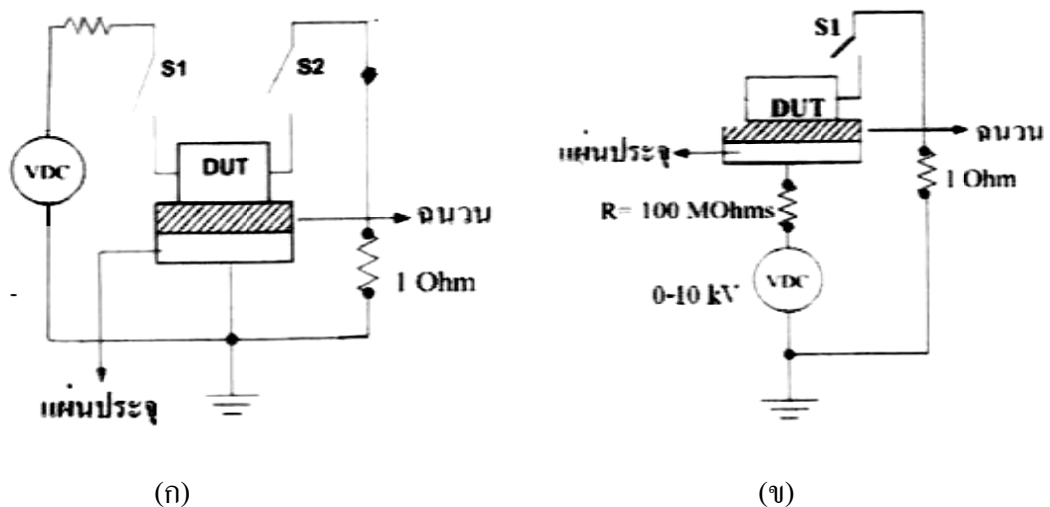
กรณีที่อุปกรณ์มีประจุอันเกิดจากการลัดไถลไปมาของอุปกรณ์ขณะอยู่ในช่วงการผลิตหรือช่วงการเคลื่อนย้าย และเมื่อมีการสัมผัสกับวัตถุที่เป็นตัวนำ จะเกิดการถ่ายเทประจุอย่างทันทีทันใด เรียกเหตุการณ์นี้ว่า Charged device model (CDM) สามารถทำลายอุปกรณ์เองได้รุนแรงกว่ากรณี HBM ในบางอุปกรณ์ ถึงแม้ว่าระยะเวลาการคายประจุจะสั้นมาก ต่ำกว่า 1 นาโนวินาที และ ช่วงกระแสสูงสุด สามารถขึ้นได้ถึงหลายสิบล้านแอมแปร์

แบบจำลองประเภทนี้แบ่งตามประเภทของการสะสมประจุ ได้ 2 แบบ คือ

- แบบจำลองที่มีการสะสมประจุในอุปกรณ์โดยตรง (DCDM : Direct Charged Device Model) ตามแบบทดสอบพื้นฐาน ดังแสดงในภาพที่ 2.18 (ก) นั้นจะทำการปิดสวิตซ์ s1

เพื่อให้เกิดการสะสมประจุบนชิ้นงานที่ถูกทดสอบ จากนั้นจึงเปิดสวิตช์ s1 และปิดสวิตช์ s2 เพื่อให้เกิดการคายประจุผ่านตัวต้านทานขนาด 1 โอห์ม อย่างไรก็ตาม ได้มีการพัฒนาแบบจำลองนี้ตามมาตรฐานของสมาคมการคายประจุไฟฟ้าสถิต (ESD Association Standard) หมวดที่ ESD STM 5.3.1: Electrostatic Discharge Sensitivity Testing-Charge Device Model เมื่อปี ค.ศ. 1999 ดังวงจรที่แสดงไว้ในภาพที่ 2.19

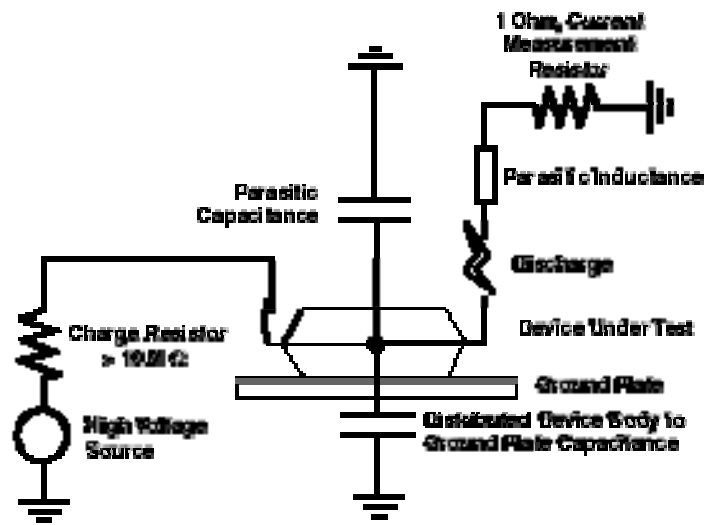
- แบบจำลองที่มีการสะสมประจุในอุปกรณ์โดยการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้า (FCDM/FICDM: Field Induce Charge Device Model) ซึ่งเป็นการสร้างประจุให้กับอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบโดยอาศัยการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการจ่ายแรงดันให้แก่แผ่นตัวนำ หรือที่เรียกว่า แผ่นประจุ (Charge Plate) แล้วคายประจุผ่านความต้านทานค่าหนึ่ง จากค่ามาตรฐานของสภาร่วมวิศวกรรมเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ (Joint Electron Device Engineering Council) หมวด JESD22-C101-A ที่ใช้ค่าความต้านทานขนาด 1 โอห์ม ในการคายประจุไฟฟ้าสถิต ดังภาพที่ 2.18 (ข)



ภาพที่ 2.18 แสดงวิธีการทดสอบโดยใช้แบบจำลองการเกิดประจุไฟฟ้าสถิตในอุปกรณ์

(ก) แบบประจุสะสมในอุปกรณ์โดยตรง

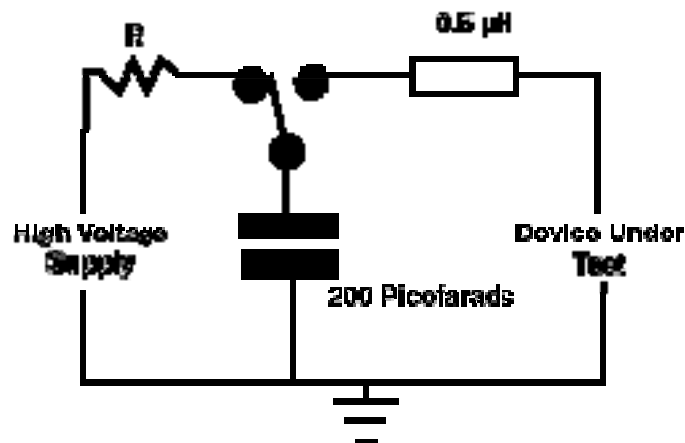
(ข) แบบประจุสะสมที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้า



ภาพที่ 2.19 แสดงแบบจำลองการเกิดประจุไฟฟ้าสถิตในอุปกรณ์แบบประจุสะสมอยู่ในอุปกรณ์ โดยตรง ตามมาตรฐานของ ASD STM 5.3.1: Electrostatic Discharge Sensitivity Testing-Charge Device Model

2.7.3 Machine Model (MM)

แบบจำลองนี้จะคล้ายกับแบบจำลองมนุษย์ ที่เกิดจากอุปกรณ์ตัวนำที่มีการสะสมประจุ ตัวอย่างเช่น เครื่องมือที่เป็นโลหะ เป็นต้น โดยแบบจำลองนี้จะประกอบด้วย ตัวเก็บประจุขนาด 200 พิโคฟารัด ที่มีการคายประจุโดยตรงไปยังชิ้นงาน โดยไม่ผ่านตัวต้านทานดังภาพที่ 2.20 ตามมาตรฐานของสมาคมการคายประจุไฟฟ้าสถิต (ESD Association Standard) หมวดที่ ESD STM 5.2: Electrostatic Discharge Sensitivity Testing-Machine Model เมื่อปี ค.ศ. 1999



ภาพที่ 2.20 แสดงวงจรทางไฟฟ้าของแบบจำลองเครื่องจักรกลตามมาตรฐานของ ESD STM

5.2: Electrostatic Discharge Sensitivity Testing-Machine Model

แบบจำลองเครื่องจักรกลนี้ อาจกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่า เป็นกรณีที่เลวร้ายที่สุดของแบบจำลองมนุษย์ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ ๆ โดยในทางปฏิบัตินั้นแบบจำลองเครื่องจักรกลนี้สามารถแสดงสถานะของความเป็นจริงในกรณีต่าง ๆ เช่น การคายประจุอย่างทันทีทันใด จากขบวนการประกอบแผงวงจรที่มีการประสมประจุ หรือจากสายไฟฟ้าที่มีการสะสมประจุของเครื่องทดสอบแบบอัตโนมัติ เป็นต้น

จะเห็นว่า แบบจำลองนี้ ตัวเก็บประจุจะเพิ่มจาก 100 พิโคฟารัด เป็น 200 พิโคฟารัด และไม่มีตัวต้านทานขนาด 1.5 กิโลโอห์ม ดังในแบบจำลองมนุษย์ แต่จะมีตัวเหนี่ยวนำที่จะเป็นตัวหลักในการกำหนดรูปร่างของสัญญาณคลื่น ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำนี้ค่อนข้างที่จะกำหนดได้ยากเพราะมีขนาดน้อยมาก เช่น ประมาณ 0.5 ไมโครเฮนรี เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องทดสอบการคายประจุไฟฟ้าสถิตแบบอัตโนมัติที่มีค่าความเหนี่ยวนำที่ต่ำมาก ๆ ดังนั้นผลที่ได้จากแบบจำลองนี้จึงแตกต่างกันไปตามชนิดของเครื่องจักรกล

ในแต่ละการทดสอบ จะมีการกำหนดลำดับของความไวของอุปกรณ์ ต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิต รูปแบบต่างๆ ดังตาราง 2.5, 2.6 และ 2.7

ตารางที่ 2.5 รูปแบบความไวของอุปกรณ์ต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิต ในกรณี HBM

Class	Voltage Range
Class 0	<250 volts
Class 1A	250 volts to <500 volts
Class 1B	500 volts to < 1000 volts
Class 1C	1000 volts to < 2000 volts
Class 2	2000 volts to < 4000 volts
Class 3A	4000 volts to < 8000 volts
Class 3B	\geq 8000 volts

ตารางที่ 2.6 รูปแบบความไวของอุปกรณ์ต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิต ในกรณี MM

Class	Voltage Range
Class M1	<100 volts
Class M2	100 volts to <200 volts
Class M3	200 volts to < 400 volts
Class M4	$>$ or $=$ 400 volts

ตารางที่ 2.7 รูปแบบความไวของอุปกรณ์ต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิต ในกรณี CDM

Class	Voltage Range
Class C1	<125 volts
Class C2	125 volts to <250 volts
Class C3	250 volts to < 500 volts
Class C4	500 volts to < 1000 volts
Class C5	1000 volts to < 1500 volts
Class C6	1500 volts to < 2000 volts
Class C7	\geq 2000 volts

บทที่ 3

การศึกษากรณีแบบจำลองมนุษย์

อุตสาหกรรมผู้ผลิตอุปกรณ์ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์วันนี้ ได้มีการเพิ่มคุณสมบัติหรือประสิทธิภาพของระบบของอุปกรณ์ภายใน Semiconductor Packaging แต่มีขนาดชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่เล็กลง ความต้องการใช้พลังงานของอุปกรณ์ลดลง อุณหภูมิการทำงานที่สูงขึ้น โดยเหตุนี้ความน่าเชื่อถือในประสิทธิภาพต่อตัวอุปกรณ์ โดยการลดความผิดพลาดคือกุญแจของความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์

Electrostatic Discharge (ESD) หรือการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิต คือปัญหาหนึ่งของการที่ทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลงหรือเสียหายแบบทันทีทันใด ถึงแม้ว่าการออกแบบวงจรรวม IC ในปัจจุบัน จะมีการออกแบบเพื่อป้องกันไฟฟ้าสถิตไว้แล้วในระดับหนึ่งก็ตาม

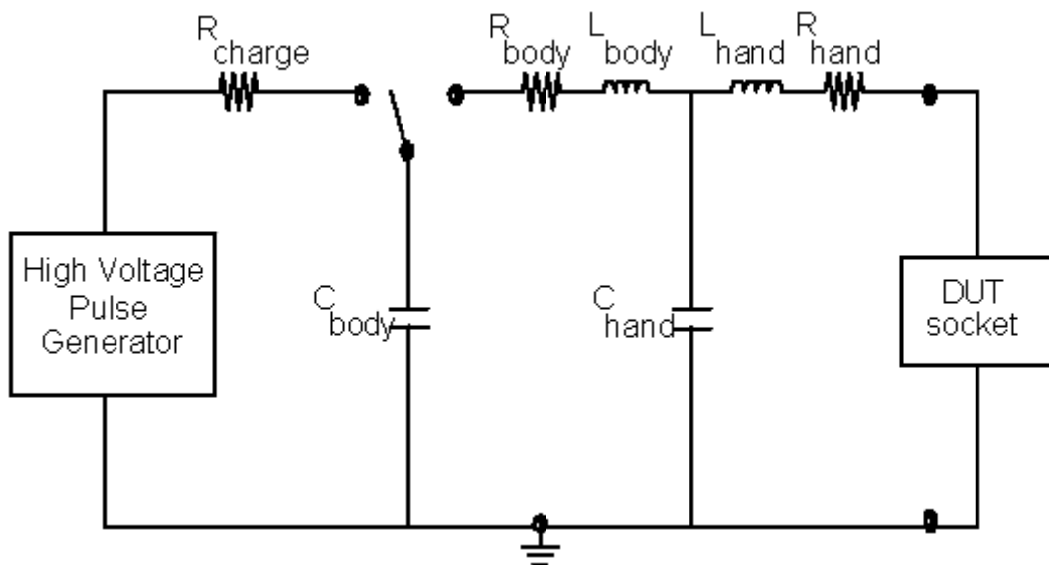
จากการที่ได้มีการศึกษาถึงเหตุการณ์ของการเกิดไฟฟ้าสถิต สามารถสรุปได้เป็น 3 กรณี คือ Human Body Model (HBM), Machine Model (MM), และ Charged Device Model (CDM) โดยในที่นี้จะขอยกกรณี HBM ขึ้นมาศึกษา

3.1 ประจุไฟฟ้าสถิตกรณีแบบจำลองมนุษย์ [5]

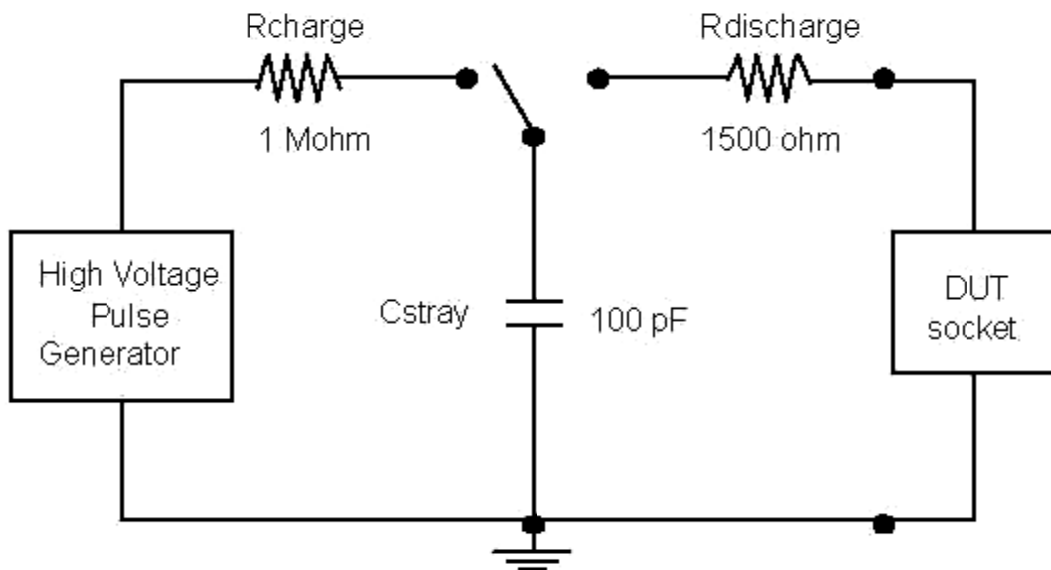
เมื่อวัตถุสองชนิดมาสัมผัสกันจะเกิด ปฏิกริยาการถ่ายเทอิเล็กตรอน Triboelectric ระหว่างกัน เมื่อแยกจากกันอย่างทันทีทันใดจะเกิดประจุไฟฟ้าสะสมอยู่บนวัตถุ มนุษย์สามารถสร้างประจุไฟฟ้าสถิตได้มากถึง 15,000 โวลต์ โดยการเดินบนพื้นพรม โดยความต่างศักย์ระหว่างประจุไฟฟ้าบนร่างกายมนุษย์และบนวัตถุ สามารถเกิดขึ้นได้จากเพียงไม่กี่โวลต์ จนสูงถึง 30,000 โวลต์

โดยทั่วไป เหตุการณ์ ESD หรือการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิตจะพุดถึง ความเร็ว ค่ากระแสสูงสุด และค่อย ๆ ลดลงอย่างช้าๆ ระดับพลังงานรวมจะสามารถเกิดได้ถึง 10 มิลลิจูล กับ ค่า Time Constant ที่วัดในหน่วย พิโควินาที และพลังงานไม่กี่ กิโลวัตต์ ด้วยจำนวนพลังงานเหล่านี้ พอที่จะทำให้การเกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิตเพียงครั้งเดียว จะมีผลทำให้อุปกรณ์เสียหายได้ หรืออาจเสียหายเพียงเล็กน้อยในระยะแรก และความเสียหายนั้นจะเกิดเสียหายอย่างถาวรจากการใช้งานไปแล้วระยะหนึ่งต่อไป

โมเดลของ Human body model ที่ง่ายที่สุดคือ วงจรอนุกรม RLC แสดงดังภาพที่ 3.1 ซึ่ง R เปรียบเทียบกับ ค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์ ค่า L เปรียบเทียบกับค่าความเหนี่ยวนำ และ C เปรียบเทียบกับค่าความจุทางไฟฟ้าของร่างกาย โดยค่าความเหนี่ยวนำจะไม่มีให้นำมาใช้ ตามมาตรฐาน MIL-STD 883 ขณะที่ ค่าความจุไฟฟ้าของร่างกายจะอยู่ที่ 100 ถึง 200 พิโคฟารัด และค่าความต้านทานของร่างกายที่ใช้กันทั่วไปจะอยู่ที่ 1000 ถึง 2000 โอห์ม การพัฒนาแบบจำลองของ human body model ในปัจจุบันจะแนะนำว่าค่า human body ESD โดย fisher และดังแสดงดังภาพที่ 3.2 คือ Parameter ดังนี้ $R_{charge} = 1$ เมกกะโอห์ม, $C_{body} = 60 - 300$ พิโคฟารัด, $R_{body} = 150 - 15,000$ โอห์ม, $L_{body} = 0.5 - 0.2$ เฮนรี และ $R_{hand} = 20 - 200$ โอห์ม



ภาพที่ 3.1 วงจรทางไฟฟ้าของแบบจำลอง กรณี HBM



ภาพที่ 3.2 วงจรการทดลอง กรณี HBM

3.2 ประจุไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นจากการเดิน [6]

ประจุไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากการเดินสามารถอธิบายได้โดยสมมติว่า เมื่อมีหน้าสัมผัสและแรงเสียดทานของพื้นรองเท้าของบุคคลเกิดขึ้นกับพื้นที่เป็นฉนวนไฟฟ้าแล้วแยกจากกันอย่างทันทีทันใด ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุเป็น Δq ในหนึ่งก้าวเดิน และให้ n คือจำนวนก้าวเดินต่อหน่วยเวลา จะได้สูตรหาค่ากระแสจากการเดินดังนี้

$$i_c = n\Delta q \quad (3.1)$$

จะได้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในอัตรา $\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{n\Delta q}{C}$ (3.2)

ซึ่ง C แทนค่าความจุไฟฟ้าของมนุษย์กับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง ΔV จะได้

$$\Delta V = \frac{\Delta q}{C} \quad (3.3)$$

ค่าของแรงดันจะมีผลกับการลดลงของกระแส i_d ตลอดจนถึง ค่า ความต้านทาน R จากจนถึง กราวด์ จากสมการ 3.4

$$i_d = \frac{V}{R} \quad (3.4)$$

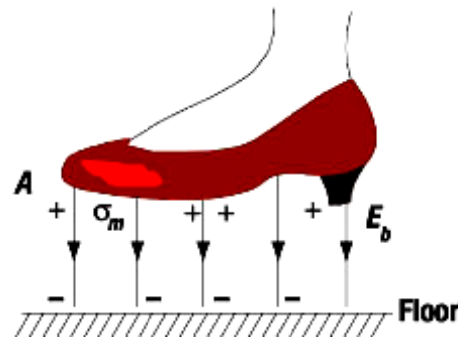
และแรงดันไฟฟ้าจะถึงค่าสูงสุด, V_m เมื่อ $i_c = i_d$ หรือ

$$V_m = Rn\Delta q \quad (3.5)$$

และถ้าให้แรงดันสูงสุดที่ร่างกายคือ V_{accep} ดังนั้นจะได้ค่าความต้านทานถึงกราวด์เท่ากับ

$$R \leq \frac{V_{accep}}{n.\Delta q_{max}} \quad (3.6)$$

เมื่อ Δq_{max} คือค่าของประจุสูงสุดที่เกิดขึ้นหลังจากเท้ามีการแยกจากกันจากพื้น



ภาพที่ 3.3 แสดงประจุระหว่างรองเท้ากับพื้น

เส้นแรงในแนวตั้ง คือค่าประจุสูงสุดของ Δq_{max} จะหาได้จาก

$$\Delta q_{max} = \epsilon_0 E_b A \quad (3.7)$$

เมื่อ

ϵ_0 คือ ค่า Permittivity ของอากาศ = 8.85×10^{-12} F/m

E_b คือ ค่า Breakdown field strength ของอากาศระหว่าง plane electrode $\approx 3 \times 10^6$ V/m

A คือ พื้นที่พื้นรองเท้า ≈ 150 cm²

เมื่อนำค่าเหล่านี้ไปแทนในสมการจะได้

$$\Delta q_{max} = 4 \times 10^{-7} C \quad (3.8)$$

จะได้ค่ากระแสเท่ากับ

$$i_{c,max} = n \times \Delta q_{max} = 8 \times 10^{-7} A \quad (3.9)$$

สมมติให้จังหวะก้าวเดินเท่ากับ 2 ก้าวต่อวินาที ดังนั้น ถ้าให้ $V_{accep} = 100V$

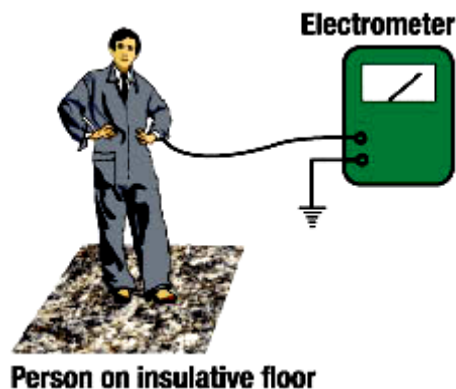
ดังนั้น

$$R \leq 100M\Omega$$

จากสูตร $\Delta V = \frac{\Delta q}{C}$ จะได้ค่าแรงดันที่เพิ่มขึ้นในก้าวแรกเท่ากับ

$$\Delta V = \frac{4 \times 10^{-7}}{100 \times 10^{-12}} = 4kV \quad (3.10)$$

สมมติให้ค่าความจุไฟฟ้าของร่างกายมนุษย์ยืนเพียงเท้าเดียวเท่ากับ 100 พิโคฟารัด โดยยืนอยู่บนพื้นซึ่งมีค่าความเป็นฉนวนสูง (Vinyl Tiles) ค่าความต้านทานของร่างกายจากพื้นถึงกราวด์ที่ได้จากการวัดเท่ากับ 10^{11} โอห์ม โดยมีค่าคลาดเคลื่อนที่ 0.5 ถึง 1.5×10^{11} และค่าความจุไฟฟ้าของร่างกายจะเท่ากับ 160 พิโคฟารัด เมื่อยืนด้วยสองเท้า



ภาพที่ 3.4 แสดงวิธีการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า Body Voltage

จากการทดลองตามรูป โดยที่ผู้ทำการทดลองต่ออยู่กับเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ โวลต์มิเตอร์ ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้ง เครื่องวัดประจุไฟฟ้า หรือเป็นเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าสถิต โดยในขั้นแรกปรับการใช้งานไปที่โหมด การวัดค่าประจุไฟฟ้าและทำการวัดค่าประจุไฟฟ้าด้วยการยืนเพียงเท้าเดียวตามรูปและด้วยการทำซ้ำ 10 ครั้ง

จะได้

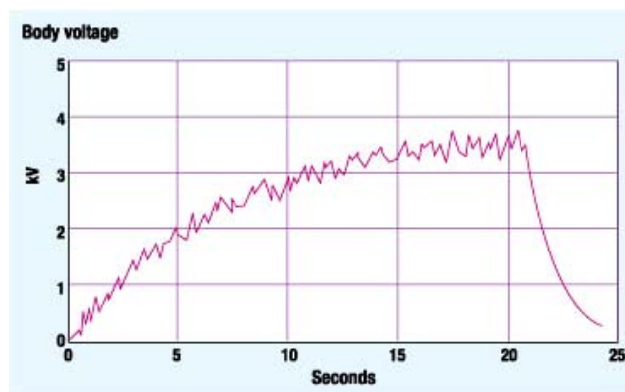
$$\Delta q = 3 \times 10^{-8} C \quad (3.11)$$

และจากสมการ 3.3
$$\Delta V = \frac{\Delta q}{C}$$

จะได้
$$\Delta V = \frac{3 \times 10^{-8}}{100 \times 10^{-12}} = 300V \quad (3.12)$$

และจากการให้การเดินอยู่ที่ 2 ก้าวต่อวินาที จะได้

$$V_m = Rn\Delta q = 10^{11} \times 2 \times 3 \times 10^{-8} = 6kV \quad (3.13)$$



ภาพที่ 3.5 แสดงแรงดันไฟฟ้าบนร่างกายจากการเดินบนพื้นฉนวน

จากกราฟจะแสดงความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าบนร่างกายเทียบกับเวลา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงดันเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดที่ประมาณ 3.5 กิโลโวลต์ หลังจากผ่านไปประมาณ 15 วินาที เหตุที่ไม่สามารถขึ้นถึง 6 กิโลโวลต์ ตามที่ได้คำนวณไว้ สามารถแสดงได้จากกราฟที่ตกลงหลังวินาทีที่ 21 โดยที่ผู้ที่ทำการทดลองยังคงยืนอยู่ และค่อยๆ ให้ประจุกเริ่มสลายไป

บทที่ 4

การทดสอบความไวของการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิตกรณีแบบจำลองมนุษย์

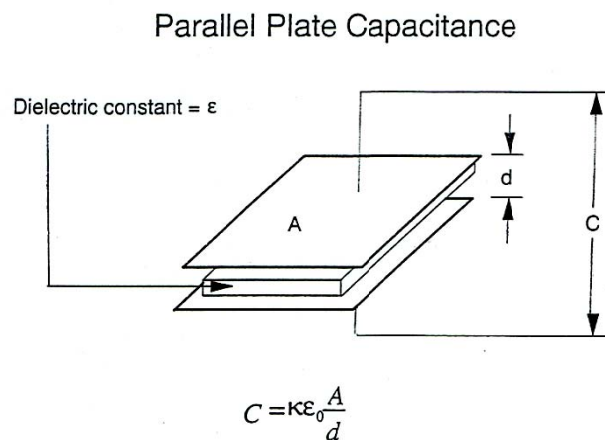
4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง [4]

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. Oscilloscope minimum single bandwidth of 350 MHz
2. TREK 520 Electrostatic Voltmeter
3. CT-1 High speed current probe or equivalent
4. แผ่นเก็บประจุแบบแผ่นขนาน ค่า 100 พิโคฟารัด
5. ค่าความต้านทาน 1,500 โอห์ม ± 1 เปอร์เซ็นต์
6. ค่าความต้านทาน 500 โอห์ม ± 1 เปอร์เซ็นต์

สามารถออกแบบตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานได้โดยหาขนาดของตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานโดยมี Teflon หนา 3 มิลลิเมตร กั้นระหว่างแผ่นขนานโดยค่า K ของ Teflon = 2.0 หากต้องการค่าความจุไฟฟ้า 100 พิโคฟารัดตามค่าอ้างอิง จากสมการ 4.1

$$C = K\epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (4.1)$$



ภาพที่ 4.1 แผ่นเก็บประจุแบบแผ่นขนาน

จากสมการ 4.1 หาค่าแผ่นเก็บประจุแบบขนานได้

$$100 \times 10^{-12} = k\epsilon_0 \frac{A}{d} = 2.0(8.85 \times 10^{-12}) \left(\frac{A}{3 \times 10^{-3}} \right) \quad (4.2)$$

จะได้ $A = 169$ มิลลิเมตร หรือ 13×13 เซ็นติเมตร

คือ ขนาดของแผ่นเก็บประจุแบบขนาน มีค่าเท่ากับ 13×13 เซ็นติเมตร



ภาพที่ 4.2 ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานที่ออกแบบ



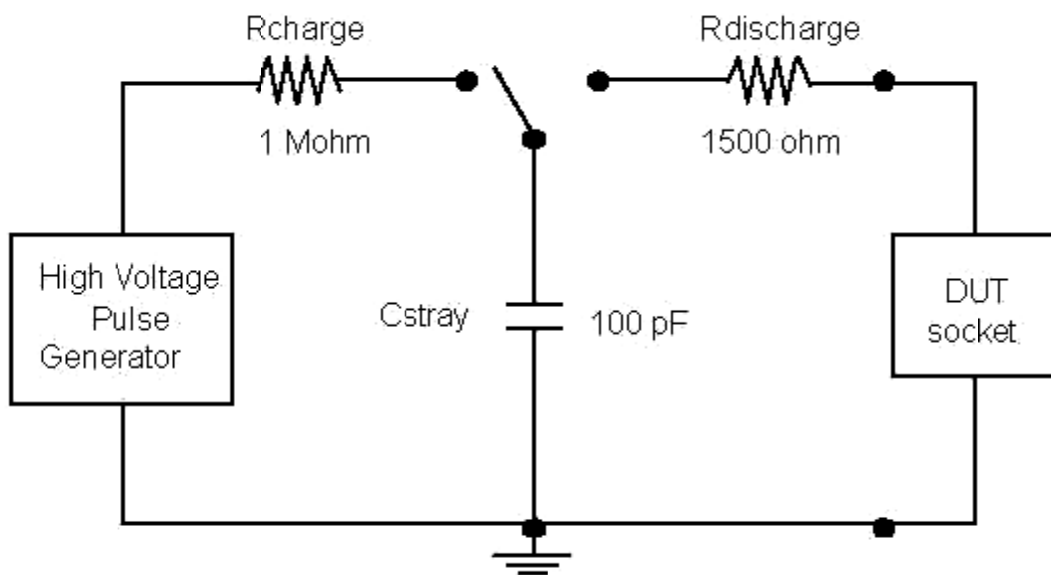
ภาพที่ 4.3 แสดงแผ่นเก็บประจุแบบขนานที่ออกแบบ นำมาวัดค่า Capacitance

4.2 ข้อกำหนดของการทดลอง

เพื่อที่จะลดความผิดพลาดของการทดลอง

1. ความหลากหลายของสภาพแวดล้อม ในแต่ละสถานที่ การทดลองควรทำภายใต้การควบคุมสภาวะห้องที่มีการควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นให้คงที่ โดยอุณหภูมิอยู่ที่ระดับ 23 ± 4 องศาเซลเซียส และความชื้นอยู่ที่ระดับ 32 ± 5 เปอร์เซ็นต์
2. ความเสถียร หรือความถูกต้องแม่นยำของอุปกรณ์ที่นำไปใช้ทำการทดลอง

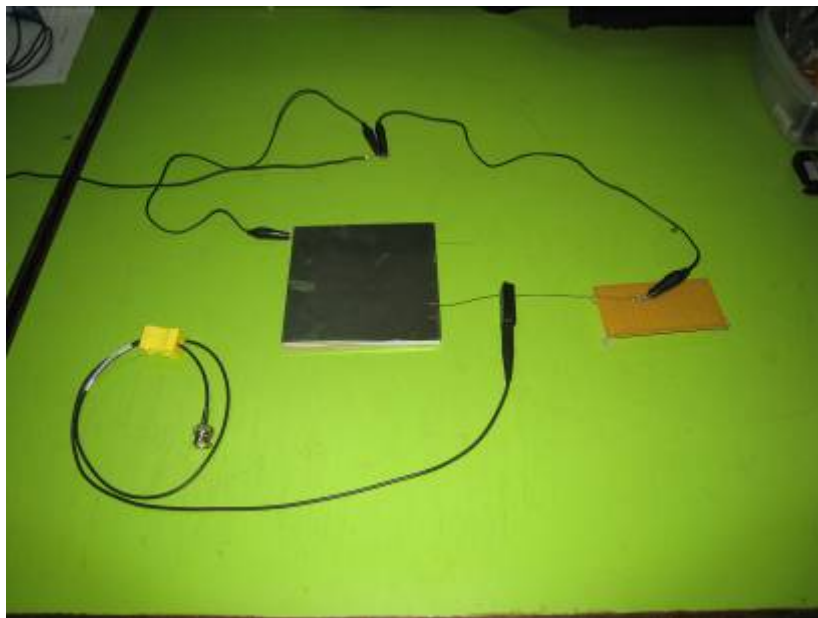
4.3 ขั้นตอนการทดลอง



ภาพที่ 4.4 วงจรการทดลอง กรณี HBM

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการต่อวงจรตามรูปแบบวงจรไฟฟ้า ในภาพที่ 4.4 ดังแสดงตามภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 การต่อวงจรทดลอง การคายประจุไฟฟ้า

2. ผู้ที่ทำการทดลองทำการเคลื่อนไหวร่างกายเพื่อสร้างประจุไฟฟ้าสถิตให้สะสมอยู่บนแผ่นเก็บประจุ 1000 โวลต์ จากนั้นทำการคายประจุที่อยู่บนแผ่นเก็บประจุ โดยผ่านหลอดทองแดงที่ต่อผ่าน Probe CT 1 และผ่านไปยังค่าความต้านทานขนาด 1,500 โอห์ม ไปยังกราวด์ ดังแสดงตามภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 วงจรทำการคายประจุที่อยู่บนแผ่นเก็บประจุ

3. ผู้ที่ทำการทดลองเคลื่อนไหวร่างกาย เพื่อทำให้เกิดประจุบนแผ่นเก็บประจุ โดยอาศัย เครื่องวัดประจุไฟฟ้า (TREK 520) เป็นเครื่องอ่านค่าที่เกิดขึ้น ดังแสดงตามภาพที่ 4.7



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.7 แสดงผู้ที่ทำการทดลองเคลื่อนไหวร่างกาย

- (ก) ผู้ที่ทำการทดลองขยับเท้าโดยการเดินอยู่กับที่จนเกิดประจุไฟฟ้าสถิตจนถึงค่าที่ต้องการ โดยอ่านค่าจากเครื่องวัดประจุไฟฟ้า (TREK 520)
- (ข) แสดงภาพระยะใกล้ โดยผู้ที่ทำการทดลอง สัมผัสกับแผ่นตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานที่ใช้เก็บประจุที่เกิดจากการเดิน

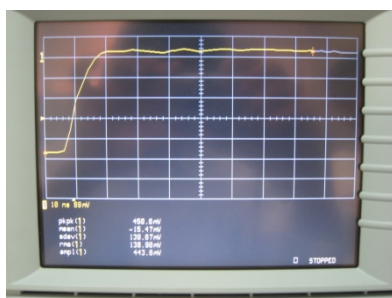
4. ทำการอ่านค่าที่ได้ ดังแสดงตามภาพที่ 4.8



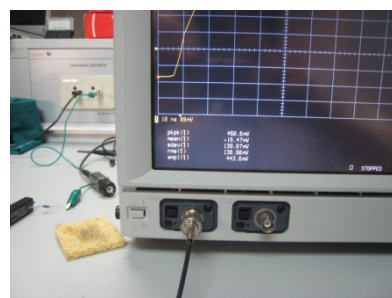
ภาพที่ 4.8 แสดงประจุไฟฟ้าที่เกิดจากการเคลื่อนไหวนของผู้ที่ทำการทดลองโดยสะสมอยู่บนแผ่นเก็บประจุ

4.4 ผลการทดลอง

จากการทดลองการถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิตโดยการใช้กรณี Human Body Model ทำให้ทราบค่าการคายประจุไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบกับค่า Standard พบว่าค่าการคายประจุเป็นไปในแนวเดียวกัน จากแรงดันที่ใช้การทดสอบนี้ประมาณ 1,000 โวลต์ ทำการวัดค่าการคายประจุโดยผ่าน Probe CT-1 ซึ่งมีการค่าการวัดที่ 5 มิลลิโวลต์ต่อมิลลิแอมป์ และจากค่าที่วัดได้จาก Scope เท่ากับ 450.6 มิลลิโวลต์ จะได้ค่ากระแส เท่ากับ 90.12 มิลลิแอมป์



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.9 ค่าการคายประจุที่อ่านได้จากการคายประจุไฟฟ้าตามกรณี HBM ค่าแรงดัน Peak ที่วัดได้เท่ากับ 450.6 มิลลิโวลต์

(ก) ภาพแสดงคลื่นที่เกิดจากการคายประจุหรือการคายประจุจากแผ่นเก็บประจุ

(ข) แสดงค่าของแรงดันยอดคลื่นที่อ่านได้เท่ากับ 450.6 มิลลิโวลต์

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองหาค่าการคายประจุไฟฟ้าพบว่า เนื่องจากการทดลองเป็นการวัดค่าประจุไฟฟ้าที่มีความไวในการถ่ายเทประจุไฟฟ้าที่สูงมาก และการวัดค่าต่างๆจะต้องใช้อุปกรณ์การวัดที่มีประสิทธิภาพสูงตามไปด้วยทำให้เกิดข้อปัญหาทั้งจากการใช้งานอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้มีการอ่านค่าอย่างถูกต้องในด้านการใช้งานเครื่องมือวัด ของ Oscilloscope และ CT1 probe (high Speed current probe) จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ไม่สามารถแสดงผลการถ่ายเทประจุไฟฟ้าจากการทดสอบนี้ได้

แต่อย่างไรก็ตามจากการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าสถิตนี้ จากการทดลองพบว่าประจุไฟฟ้าสถิตเกิดจากมนุษย์ได้ในระดับที่สูง สามารถทำอันตรายกับอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ในการทดลอง

ข้อเสนอแนะของการทดสอบการเกิดและการคายประจุไฟฟ้าสถิต

- ควรมีการควบคุมสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้นภายในห้องที่ทำการทดลองเพื่อผลของการเกิดและการคายประจุไฟฟ้า
- บอร์ดวงจรสาธิตควรจะต้องทำให้เล็กหรือสายลวดตัวนำให้สั้นที่สุด
- ไม่นำวัสดุที่เป็นฉนวนเข้าใกล้บริเวณที่ทำการทดลองเนื่องจากบนวัสดุที่เป็นฉนวน
- อาจมีประจุไฟฟ้าสถิตสะสมอยู่และทำให้มีผลกระทบกับการทดลอง
- หลีกเลี่ยงอุปกรณ์ที่มีสนามไฟฟ้าไม่ให้อยู่ใกล้เคียงกับพื้นที่ทำการทดลอง
- ตรวจสอบระบบกราวด์ว่าเชื่อมต่ออย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่

เอกสารอ้างอิง

- [1] ANSI/ESD S541-2008 “Packaging Materials for ESD Sensitive Items” ESD Association, Rome NY, 2008.

- [2] ESD SIM 5.1-2001 “Electrostatic Discharge Sensitivity Testing” Human Body Model, ESD Association, Rome NY, 2003.

- [3] Electrostatic Discharge Association “Triboelectric Charge Accumulation Testing” ESD ADVI11.2, Rome NY, 1995.

- [4] Human Body Model-Microsoft Internet Explorer “Human Body Model (HBM) Component Level” ESD Association, Inc., 1993.

- [5] M.A. Kelly, G.E. Servais and T.V. Pfaffenbach “An Investigation of Human Body Electrostatic Discharge” Delco Electronics Kokomo, Indiana. United States of America, 1993.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [6] Niels Jonossen “Is Static Electricity Static” Compliance Engineering 17, NO1, Technical University of Denmark, 2000.
- [7] สุภาพร จาตุรันต์เรืองศรี “การป้องกันและควบคุมไฟฟ้าสถิต” จัดพิมพ์โดย โครงการฟิสิกส์ และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์ 2547
- [8] ประวัติความเป็นมาของไฟฟ้าสถิต <http://physics602.spaces.live.com> : วัชรพงษ์ ยงไสว, 2550
- [9] อภิรัฐ ศิริขรรีวัตร “ผลการคายประจุไฟฟ้าสถิตในหัวบันทึก” จัดพิมพ์โดย เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ 2549

ภาคผนวก ก

EOS/ESD Association Standard

ANSI/ESD STM5.1-2001

ESD association standard test method

ANSI/ESD STM5.1-2001

*For Electrostatic Discharge
Sensitivity Testing*

*Human Body Model (HBM)
Component Level*

*Electrostatic Discharge Association
7900 Turin 7900 Turin Road, Bldg 3
Rome, NY 13440*

**An American National Standard
Approved March 20, 2003**



ANSI/ESD STM5.1-2001

**Revision and redesignation of
ESD STM5.1-1998**

*ESD Association Standard Test Method
for electrostatic discharge
sensitivity testing –
Human Body Model (HBM)
Component Level*

Approved May 20, 2001
ESD Association



ANSI/ESD STM5.1-2001

(This foreword is not part of ESD Association Standard Test Method ANSI/ESD STM5.1-2001)

Foreword

To characterize a component's electrostatic discharge (ESD) susceptibility fully, it should be tested to the following three ESD test standards:

- Human Body Model (HBM)
- Charged Device Model (CDM)
- Machine Model (MM)

Requirements for MM and CDM testing are contained in ESD Association Standard Test Methods STM 5.1 and STM5.3.1 respectively.

Users of this standard test method should understand that the data obtained when classifying components does not necessarily mean that the components will be unaffected if subjected to a lower level of actual electrostatic discharge (ESD). ESD from a human being varies considerably, and depends on many factors. Some of these variable factors include: the characteristics of the individual human body; proximity to a ground plane or other objects; whether the discharge occurs from a finger or a hand-held metal object; and the coupling between the component and ground.

The waveform specified in this standard test method is similar to that of MIL-STD-883D Method 3015.7, but the characteristic and ESD stress test method is further defined. Existing data, generated with testers meeting the waveform specifications contained here, shall be considered valid ESD stress test data in accordance with this standard test method.

This updated standard test method contains non-technical changes and is an updated version of the ED-STM5.1-1998 that was originally approved on February 8, 1998. This standard test method was processed and approved for reaffirmation to the ESD Association Standards Committee (STDCOM). At the time that this standard test method was approved the working group had the following members:

	Mike Chaine, HBM Chairman Micron Technologies, Inc.	
John Barth Barth Electronics	Tilo Brodbeck Infineon Technologies AG	Bob Carey Agere Systems
Vaughn Gross IBM Microelectronics	Leo G. Henry Ion Systems	Hugh Hyatt Hyger Physics
Natahan Mahadeva Iyer IMEC	Mark Kelly Delphi Delco	Tom Meuse Thermokey Tek
John Mick Intel	Ian Morgan AMD	Larry Ting Texas Instruments
	Koen Verhaege Sarnoff Europe	

ANSI/ESD-STM5.1-2001

**Caution
Notice**

ESD Association standards and publications are designed to serve the public interest by eliminating misunderstandings between manufacturers and purchasers, facilitating the interchangeability and improvement of products and assisting the purchaser in selecting and obtaining the proper product for his particular needs. The existence of such standards and publications shall not in any respect preclude any member or non-member of the Association from manufacturing or selling products not conforming to such standards and publications. Nor shall the fact that a standard or publication is published by the Association preclude its voluntary use by non-members of the Association whether the document is to be used either domestically or internationally. Recommended standards and publications are adopted by the ESD Association in accordance with the ANSI Patent policy.

Interpretation of ESD Association Standards: The interpretation of standards in-so-far as it may relate to a specific product or manufacturer is a proper matter for the individual company concern and cannot be undertaken by any person acting for the ESD Association. The ESD Association Standards Chairman may make comments limited to an explanation or clarification of the technical language or provisions in a standard, but not related to its application to specific products and manufacturers. No other person is authorized to comment on behalf of the ESD Association on any ESD Association Standard.

Published by:

Electrostatic Discharge Association
7900 Turin Road, Building 3, Suite 2
Rome, NY 13440-2069

Copyright © 2001 by ESD Association
All rights reserved

No part of this publication may be reproduced in any form, in an electronic retrieval system or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

Printed in the United States of America

ISBN: 1-58537-036-3

TABLE OF CONTENTS

1.0 SCOPE AND PURPOSE	1
1.1 Scope.....	1
1.2 Purpose.....	1
2.0 REFERENCES	1
3.0 DEFINITIONS	1
3.1 Component.....	1
3.2 Component Failure.....	1
3.3 Data Sheet Parameters.....	1
3.4 Electrostatic Discharge Sensitivity (ESDS).....	1
3.5 ESD withstand Voltage.....	1
3.6 Human Body Model (HBM) ESD.....	1
3.7 Machine Model (MM) ESD.....	1
3.8 HBM ESD Tester.....	1
3.9 Ringing.....	2
3.10 Step Stress Test Hardening.....	2
4.0 HBM ESDS COMPONENT CLASSIFICATIONS	2
5.0 REQUIRED EQUIPMENT	2
5.1 HBM ESD Tester.....	2
5.2 Waveform Verification Equipment.....	2
5.2.1 Oscilloscope.....	2
5.2.2 Evaluation loads.....	2
5.2.3 Current transducer.....	2
6.0 EQUIPMENT AND WAVEFORM REQUIREMENTS	2
6.1 Equipment Calibration.....	2
6.2 Tester Qualification and Prequalification.....	3
6.3 Tester Waveform Records.....	3
6.3.1 Tester waveform records: new equipment.....	3
6.3.2 Tester waveform records: old equipment.....	3
7.0 QUALIFICATION AND VERIFICATION PROCEDURES	3
7.1 HBM ESD Tester and Test Fixture Board Qualification Procedure.....	3
7.1.1 Verify electrical continuity for all pins on the test fixture board.....	3
7.1.2 Qualification of new test fixture boards.....	3
7.1.3 Qualification of existing test fixture boards.....	3
7.2 Waveform Verification Procedure.....	4
7.3 Waveform Verification Following Servicing.....	4
8.0 ESDS TESTING REQUIREMENTS AND PROCEDURES	4
8.1 Test Requirements.....	4
8.1.1 Handling of components.....	4
8.1.2 Required waveform check.....	4
8.1.3 High voltage discharge path check.....	4
8.1.4 Component static and dynamic tests.....	4
8.1.5 Pin combinations.....	5
8.2 HBM Classification and ESD stress testing procedure.....	6
8.2.1 Test a minimum of three samples.....	6
8.2.2 Determine the starting stress voltage.....	6
8.2.3 Apply one positive and one negative.....	6
8.2.4 Component static and dynamic tests.....	6
8.2.5 If one or more components fail.....	6
9.0 FAILURE CRITERIA	6

ANSI/ESD STM5.1-2001

APPENDIX A: Example of Pin Combinations Using Table 2	11
APPENDIX B: HBM STM5.1 Procedure Flow	12
Bibliography	13
Table of Tables	
Table 1: HBM ESDS Component Classification	2
Table 2: Pin Combinations for all digital, Analog and Hybrid Integrated Circuits	5
Table 3: HBM ESD Stress Levels	6
Table of Figures	
Figure 1: ESD Stress Test (HBMM)	7
Figure 2a: Current pulse through a Shorting Wire	8
Figure 2b: Current Waveform Through a Short (TD)	9
Figure 3: Current Waveform Through a 500 OHM Resistor	10

ESD Association Standard Test Method for electrostatic discharge sensitivity testing.

HUMAN BODY MODEL (HBM) - Component Level

1. Scope and purpose

1.1 Scope

This standard establishes the procedure for testing, evaluating, and classifying the electrostatic discharge (ESD) sensitivity of components to the defined human body model (HBM).

1.1.1 Existing data

Data previously generated with testers meeting all waveform criteria of this standard shall be considered valid test data.

1.2 Purpose

The purpose of this standard is to establish a test method that will replicate HBM failures and provide reliable, repeatable results from tester to tester, regardless of component type. Repeatable data will allow accurate comparisons of HBM ESD sensitivity levels.

2. References

ESD ADV. 1.0 Glossary of Terms¹
EOS/ESD - S 5.1 (previous HBM issues)
EOS/ESD - S 5.2 Machine Model (MM)
ESD - S5.2 MM

3. Definitions

The following definitions are in addition to those in the EOS/ESD Glossary of Terms.

3.1 Component

An item such as a resistor, diode, transistor, integrated circuit or hybrid circuit.

3.2 Component failure

A condition in which a tested component does not meet one or more specified static or dynamic data sheet parameters.

3.3 Data sheet parameters

Static and dynamic component performance data supplied by the component manufacturer or user.

3.3.1 Static parameters are those measured with the component in a non-operating condition. These may include, but are not limited to: input leakage current, input breakdown voltage, output high and low voltages, output drive current, and supply current.

3.3.2 Dynamic parameters are those measured with the component in an operating condition. These may include, but are not limited to full functionality, output rise and fall times under a specified load condition, and dynamic current consumption.

3.4 Electrostatic discharge sensitivity (ESDS)

The ESD level that causes component failure.

3.5 ESD withstand voltage

The maximum ESD level that does not cause component failure.

3.6 Human body model (HBM) ESD

An ESD event meeting the waveform criteria specified in this standard, approximating the discharge from the fingertip of a typical human being.

3.7 Machine Model (MM) ESD

An ESD event meeting the criteria specified in the Machine Model standard S5.2.

3.8 HBM ESD tester

Equipment (referred to as "tester" in this standard) that applies Human Body Model ESD to a component.

¹ ESD Association, 7900 Turin Road, Bldg 3, Ste 2, Rome, NY 13440, 315-339-6937

ANSI/ESD STM5.1-2001

3.9 Ringing

High frequency oscillation superimposed on the waveform.

3.10 Step stress test hardening

This occurs when a component subjected to increasing ESD voltage stresses is able to withstand higher stress levels than a similar component stressed at a single lower voltage level. For example: a component may fail at 1000 volts if subjected to a single stress, but fail at 3000 volts if stressed incrementally from 250 volts.

4. HBM ESDS Component classifications

ESD sensitive components are classified according to their HBM ESD withstand voltage, regardless of polarity. The HBM ESDS component classification levels are shown in Table 1.

Table 1 HBM ESDS Component Classification

Class	Voltage Range
0	< 250
1A	250 to < 500
1B	500 to < 1000
1C	1000 to < 2000
2	2000 to < 4000
3A	4000 to < 8000
3B	≥ 8000

5. Required equipment

5.1 HBM ESD tester

An acceptable ESD tester is composed of equipment meeting the requirements of this standard. (Schematically represented in Figure 1, producing pulses meeting the waveform characteristics specified in Figures 2 and 3.)

5.2 Waveform verification equipment

Equipment capable of verifying the pulse waveforms defined in this standard include but is not limited to an oscilloscope, two evaluation loads, and a current transducer.

5.2.1 Oscilloscope requirements:

- Minimum sensitivity of 100 milliamperes per major division (typically one centimeter) when used in conjunction

with the current transducer specified in Section 5.2.3.

- Minimum single shot bandwidth of 350 megahertz.
- Minimum writing rate of one major division per nanosecond.

5.2.2 Evaluation loads. Two evaluation loads are necessary to verify tester functionality:

- Load 1: A solid 18-24 AWG (0.83 to 0.21 mm² cross-section) tinned copper shorting wire as short as practicable to span the distance between the two farthest pins in the socket while passing through the current probe.
- Load 2: A 500 ohm, ±1%, 1000 volt, low inductance, sputtered film resistor (Caddock Industries type MG 714 or equivalent).

5.2.3 Current transducer requirements:

- Minimum bandwidth of 350 megahertz.
- Peak pulse capability of 12 ampere.
- Rise time of less than 1 nanosecond.
- Capable of accepting a solid conductor of 1.5 millimeters in diameter.
- Provide an output voltage per milliamperes as required in section 5.2.1.a. (Usually between one and five millivolt per milliamperes.)

A Tektronix CT-1 or equivalent with a maximum cable length of 1 meter meets these requirements.

6. Equipment and waveform requirements

6.1 Equipment calibration

All equipment used to evaluate the tester shall be periodically calibrated in accordance with the manufacturer's recommendation. This includes the oscilloscope, current transducer, and high voltage resistor load. Maximum time between calibrations is one year. Calibration shall be traceable to national standards, such as the National Institute of Standards and Technology (NIST) in the United States, or comparable international standards.

6.2 Tester qualification and requalification

HBM ESD tester initial qualification in accordance with Section 7 shall be performed as part of the acceptance testing when the ESD tester is delivered or first used.

Perform the HBM ESD tester requalification described in Section 7.1 in accordance with the manufacturer's recommendation. Maximum time between full requalification tests is one year. Perform tester verification in accordance with

Section 7.3 following repairs or servicing that could affect the waveform. Use the highest pin count test fixture board with a positive clamp socket for the waveform verification. All other test fixture boards shall be checked routinely when they are used in accordance with Section 8.1.2.

Note 1: A positive clamp test socket is a zero insertion force (ZIF) socket with a clamping mechanism. It allows the shorting wire to be easily clamped into the socket. Examples are dual in-line package (DIP) and pin grid array (PGA) ZIF sockets.

6.3 Tester waveform records

6.3.1 Tester waveform records: new equipment

Record positive and negative waveforms (using either photographs or digitized waveforms) during the tester initial qualification procedures. Test each socket in accordance with Section 7.1. Use the voltage levels defined in Section 7.2. Retain the waveform records until the next calibration or for the duration specified by the internal record keeping procedures.

6.3.2 Tester waveform records: old equipment. Record positive and negative using both the short circuit wire and the 500 ohm load resistor as defined in Section 7.1. Use the highest pin count test fixture with a positive clamp socket. Perform these tests as recommended by the equipment manufacturer or during the yearly calibration cycle. Retain the waveform records until the next calibration or for the duration specified by the internal record keeping procedures.

7. Qualification and verification procedures

7.1 HBM ESD tester and test fixture board qualification procedure

HBM ESD tester qualification shall ensure waveform integrity of the peak current into a short (Ips) as specified in Figures 2a, 2b and 3. For initial qualification, qualify each socket on the test fixture board.

For tester requalification, it is only necessary to use the highest pin count test fixture board with a positive clamp socket. All other positive clamp test fixture boards shall be checked when they are used in accordance with Section 8.1.2.

7.1.1 Verify electrical continuity for all pins on the test fixture board.

7.1.2 Qualification of new test fixture boards

7.1.2.1 For each socket identify the socket pin with the shortest wiring path to the pulse generation circuit. Connect this pin to Terminal B. Connect each of the other pins in turn to Terminal A. Apply a ± 1000 volt pulse using the shorting wire. All waveform parameters shall be within the limits specified in Figure 2a and Figure 3.

7.1.3 Qualification of existing test fixture boards

7.1.3.1 Define the reference pin pair for each test socket on the test fixture board. Identify the socket pin with the shortest wiring path from the pulse generation circuit to the test socket. Connect this pin to Terminal B. Identify the pin with the longest wiring path from the pulse generator circuit to the ESD stress socket. Connect this pin to Terminal A.

Alternatively, the reference pin pair previously identified during MM testing may be used. (Refer to ESD-S5.2)

7.1.3.2 Attach the shorting wire between the reference pin pair connected to Terminal A and Terminal B. Place the current transducer around the shorting wire, as close to Terminal B as practical, observing the polarity shown in Figure 1.

- a. For positive clamp sockets, insert the shorting wire between the socket pins connected to Terminals A and B.
- b. For non-positive clamp sockets, attach the shorting wire to the wiring of the test

ANSI/ESD STM5.1-2001

fixture between the socket pins connected to Terminals A and B. The connection points shall be as close as possible to the test socket pins.

7.1.3.3 Apply 5 positive and 5 negative pulses. Observe waveforms at 1000 volts, 2000 volts, and 4000 volts. Verify that the waveforms meet all parameters specified in Figure 2a.

7.1.3.4 Replace the shorting wire with the 500 ohm resistor. Pass the wire end of the resistor that will be connected to Terminal B through the current transducer observing the polarity shown in Figure 1.

7.1.3.5 Observe waveforms at 1000 and 4000 volts, both positive and negative polarities. Verify that the waveforms meet all parameters specified in Figure 3.

7.1.3.6 Set the horizontal time scale of the oscilloscope to one millisecond per division. Using the shorting wire, initiate a pulse and verify that any spurious pulse is less than 15% of the amplitude of the main pulse.

7.2 Waveform verification procedure

Use the following procedure to verify the waveforms.

7.2.1 Verify electrical continuity for all pins on the test socket fixture board.

7.2.2 Attach the shorting wire between the reference pin pair. Place the current transducer around the shorting wire, as close to Terminal B as practical, observing the polarity shown in Figure 1.

7.2.3 Use the shorting wire to verify the waveforms at 1000 and 4000 volts (or for the stress level to be tested), for both positive and negative polarities. Verify the waveforms at 8000V if testing will be performed above 4000V. Verify that the waveforms meet all parameters specified in Figure 2a.

7.2.4 Set the horizontal time scale of the oscilloscope to one millisecond per division. Initiate a pulse and verify that any spurious pulse is less than 15% of the amplitude of the main pulse.

7.3 Waveform verification following servicing

Verify the waveforms meet all parameters specified in Figure 2a after any repairs or

servicing of the tester following manufacturer's recommendations and Section 7.1.

8. ESDS testing requirements and procedures

8.1 Test requirements

8.1.1 Handling of components. Use ESD damage prevention procedures when handling components before, during and after testing.

8.1.2 Required waveform check. Verify waveform integrity (described in Section 7.2) using the shorting wire at ± 1000 volts, or the stress level to be tested. Waveform integrity shall be checked for the reference pin pair as designated in Section 7.1.3.

The waveform check is required for positive clamp sockets each time the test fixture board is changed. The waveform check is recommended for all other socket types.

Verify the waveform at least once per shift. If necessary, remove the test fixture board being used and replace with a positive clamp socket test fixture board to facilitate waveform measurements. Longer periods between waveform checks may be used if no changes in waveforms are observed for several consecutive checks. However, if the waveforms no longer meet the specified limits, all ESD stress tests subsequent to the previous satisfactory waveform check shall be considered invalid.

If ESD stress testing is performed in consecutive shifts, waveform checks at the end of one shift may also serve as the initial check for the following shift.

8.1.3 High voltage discharge path check. Test the high voltage discharge path and all associated circuitry at the beginning of each day during which ESD stress testing is performed. Use the tester manufacturer's recommended procedure. If any failure is detected, do not perform testing with the sockets that use the defective discharge paths. Repair the tester and then requalify it in accordance with Section 7.3.

8.1.4 Component static and dynamic tests. To determine whether components have failed, perform static and dynamic testing to all data sheet parameters before and after ESD testing. Pin leakage current may only be used as guides in determining the component ESD withstand

ANSI/ESD-STM5.1-2001

voltage. It is not sufficient, especially for complex integrated circuits, to use pin leakage as the only criterion for component failure.

8.1.5 Pin combinations.

The pin combinations to be used for ESD stressing of all integrated circuit components are given in Table 2 and Section 8.1.5.1. Pin combination (n) is the total number of pin combinations. This varies from component to component depending on the number of power pin groups with the same name. Vps(i) in table 2, is any set of like named power supply or ground pins (e.g., Vcc, Vss, Vdd, analog GND, digital GND, etc.) which are metalically connected (within 2 ohms) on the chip or within the package. Like named pins that are resistively connected via the chip substrate or wells, or are electrically isolated from each other (more than 2 ohms), are considered separate sets for the purpose of these tests. (i.e., if two pins are labeled Vcc, but are not metalically connected within 2 ohms within the chip/package, they shall be treated as distinct and separate Vps(i) sets.) Only those pins that supply current to or interface to other pins shall be considered to be power pins. Pins such as Vcc, Vdd, GND, Vss, Vee, +Vs and -Vs are considered power supply pins. These pins

supply current to input and output buffers in such a way as to interface closely with the environment through other pins.

Pins such as offset adjust, compensation, clocks, controls, address, data, Vref, no connects (NC), output and input pins are considered non-power supply pins. For example, a programming power pin, usually called Vpp, shall be considered to be a non-power supply pin because it does not supply current to or interface with any other pins, and is not a diode drop away from any non-power pins.

For further clarification on pin combinations, see example in Appendix A.

Pin combinations to be used for ESD stressing of all active and passive discrete components and component arrays are given in Section 8.1.5.1.

8.1.5.1 Pin combinations for all discrete components and component arrays (including both passive and active components).

All possible pin pair combinations (one pin to terminal A, another to terminal B) regardless of pin function.

Table 2-Pin combinations for all digital, analog and hybrid integrated circuits

Pin Combination Set	Connect Individually to Terminal A	Connect to Terminal B (Ground)	Floating Pins (unconnected)
1	All pins one at a time, except the pin(s) connected to terminal B	Vps(1) [First power pin(s)]	All pins except pin under test (PUT) and Vps(1) [First power pin]
2	All pins one at a time, except the pin(s) connected to terminal B	Vps(2) [Second power pin(s)]	All pins except PUT and Vps(2)[Second power pin]
i	All pins one at a time, except the pin(s) connected to terminal B	Vps(i) [ith power pin(s)] [1,2, ...,i]	All pins except PUT and Vps(i)
n-1	All pins one at a time, except the pin(s) connected to terminal B	Vps(n-1)	All pins except PUT and Vps(n-1)
n	All non-Vps(i) pins one at a time.	All other non-Vps(i) pins, except the pin connected to terminal A.	All Vps(i) pins

ANSI/ESD STM5.1-2001

8.2 HBM classification and ESD stress testing procedure

Classify components according to their HBM ESD withstand voltage. Perform ESD stress testing at room temperature in accordance with the procedure below. It is permissible to use any voltage level in Table 3 as the starting stress level. Three new components may be used at each voltage level or pin combination if desired. This will eliminate any step stress hardening effects, and reduce the possibility of early failure due to cumulative stress on power pins. However, if a single set of three components is stressed at each level, then to avoid missing possible ESD vulnerability windows, it is recommended not to miss any stress step.

ESD classification testing shall be considered destructive to the component, even if no component failure occurs.

Table 3 HBM ESD Stress Levels

Stress Level	Equivalent Charging (\pm) voltage Vp (volt)
1	250
2	500
3	1000
4	2000
5	4000
6	8000 (optional)

Note 2: A component may pass at 4000V but fail at 2000V; this is called a component fail window. To avoid this fail window, it is recommended that components are tested at each classification level defined in Table 3.

Use the following procedure to classify components:

8.2.1 Test a minimum of three samples of the component to all specified static and dynamic data sheet parameters.

8.2.2 Determine the starting stress voltage level from Table 3. Select the first pin combination to be tested as stated in Section 8.1.5.

8.2.3 Apply one positive and one negative pulse to the component. Allow at least a 0.3 second interval between pulses. Repeat this process using all other pin combinations specified in Section 8.1.5.

Note 3: One pulse per polarity is a significant change from previous 5.1 HBM standards (1991, 1993), which were three pulses per polarity.

8.2.4 Test the components to full static and dynamic data sheet parameters and record the results for each component. Parametric and functional testing shall be performed at room temperature. If testing is required at multiple temperatures, testing shall be performed at the lowest temperature first.

If all three components pass the specified data sheet parameters, repeat steps 8.2.3 through 8.2.4, using the next higher stress level of Table 3. Three new components may be used at each voltage level or pin combination if desired.

8.2.5 If one or more components fail, repeat the ESD stress test using three new components starting at the next lower stress level. If the components continue to fail, decrease the stress voltage until level 1 is reached in Table 3. If any additional failures are observed at level 1, stop all testing at this level.

9. Failure criteria

A component is considered an ESD failure if it fails the data sheet parameters as specified in section 8.2.4.

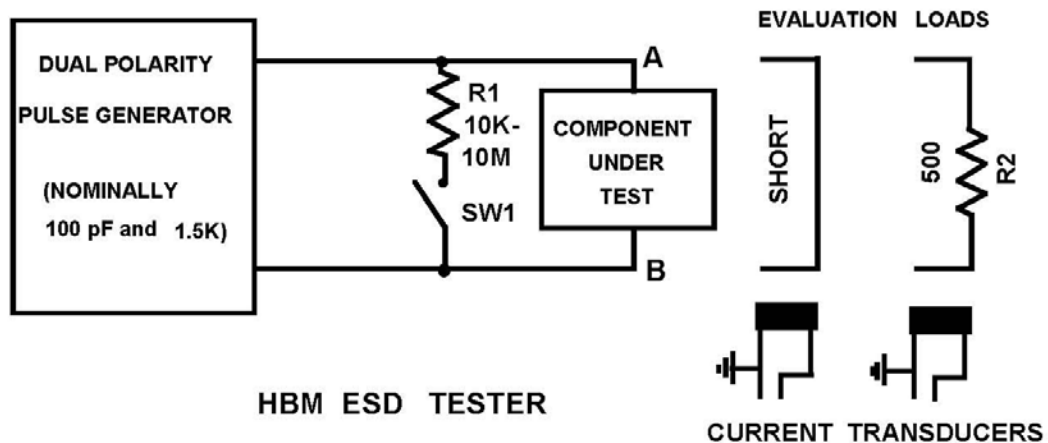


Figure 1-ESD stress test (HBM)

Requirements:

1. The current transducers are specified in 5.2.3
2. The shorting wire and 500 ohm resistor R2 are specified in 5.2.2
3. Reversal of Terminals A and B to achieve dual polarity performance is not permitted.
4. SW1 is closed 10 to 100 milliseconds after the pulse delivery period to ensure the socket is not left in a charged state. It should be opened at least 10 milliseconds prior to the delivery of the next pulse. The resistance R1 in series with the switch ensures a slow discharge of the device, thus avoiding the possibility of a charged device model discharge.
5. The Dual Polarity Pulse Generator shall be designed to avoid recharge transients and double pulses.
6. Piggybacking of test sockets (the insertion of secondary sockets into the main test socket) is allowed only if the secondary socket waveform meets the requirements of this standard.
7. Measure the current waveform as described in Section 7.2.

ANSI/ESD STM5.1-2001

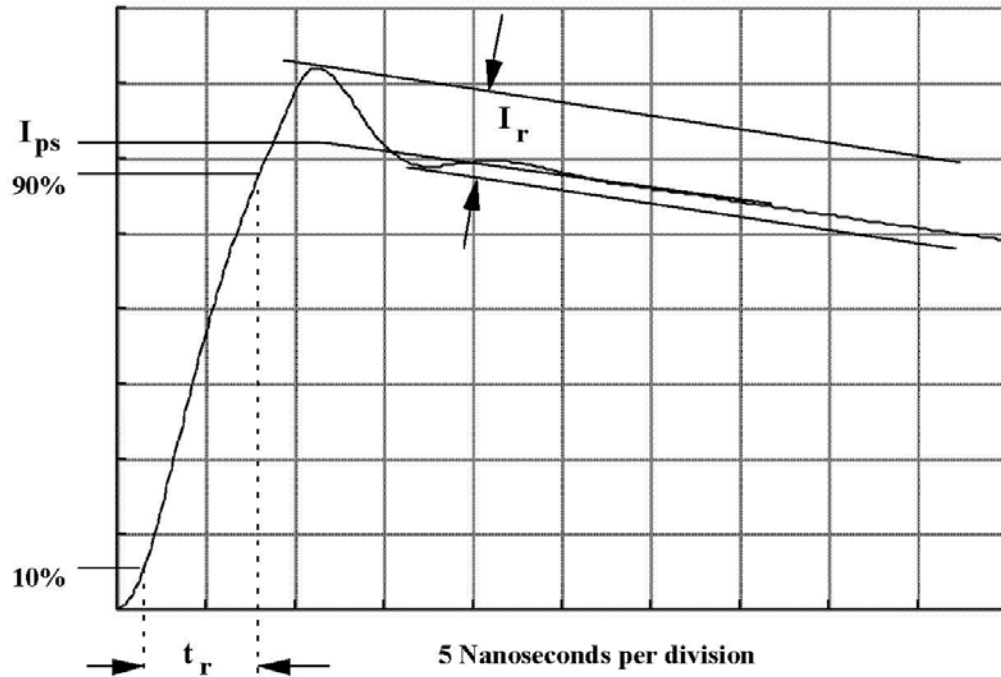


Figure 2a-Current pulse through a shorting wire

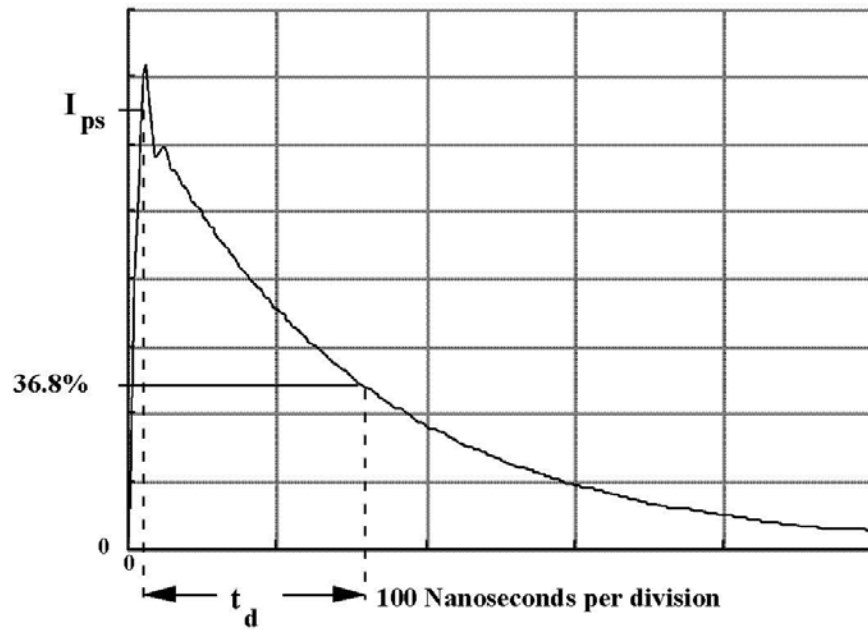
Parameter	Value
I_{PS} for 250V stress (ampere)	0.17 ($\pm 10\%$)
I_{PS} for 500V stress (ampere)	0.33 ($\pm 10\%$)
I_{PS} for 1000V stress (ampere)	0.67 ($\pm 10\%$)
I_{PS} for 2000V stress (ampere)	1.33 ($\pm 10\%$)
I_{PS} for 4000V stress (ampere)	2.67 ($\pm 10\%$)
I_{PS} for 8000V stress (ampere) (4)	5.33 ($\pm 10\%$)
t_r (pulse rise time)	2 to 10 nanoseconds
I_r (peak to peak ringing)	< 15% of I_{ps} . No ringing 100 nanoseconds after start of pulse

Note 4: Optional, only needed if testing performed above 4000V.

Requirement:

8. I_r The maximum allowable peak-to-peak ringing must be less than 15% of I_{ps} , when measured parallel to the current waveform, with no observable ringing 100 nanoseconds after the start of the pulse.

ANSI/ESD-STM5.1-2001

Figure 2b-Current waveform through a shorting wire (t_d)

Parameter	Value
t_d (pulse duration)	150 nanoseconds \pm 20 nanoseconds

ANSI/ESD STM5.1-2001

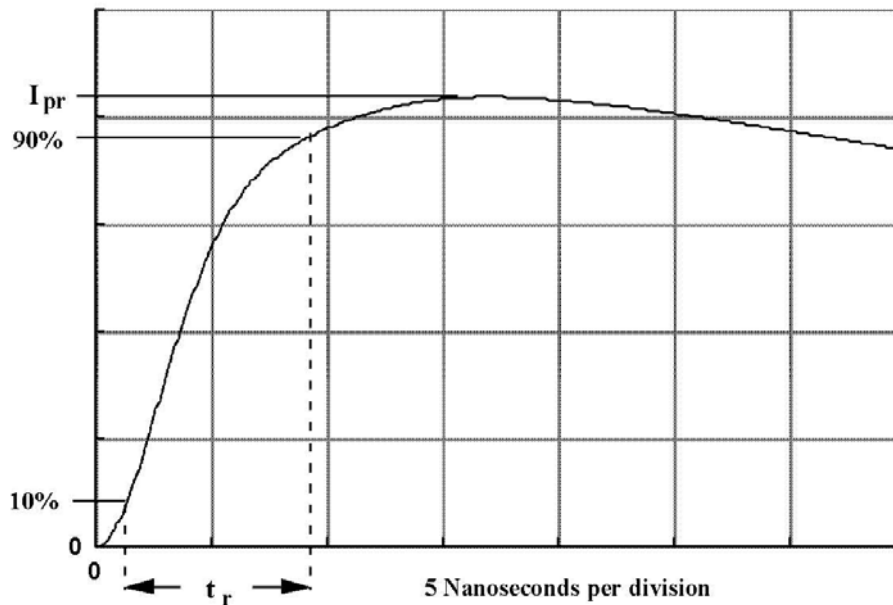


Figure 3- Current waveform through a 500 ohm resistor

Parameter	Value
I_{PR} (ampere)	375 mA – 550mA for 1000 volt pre-charge
I_{PR} (ampere)	1.5 A – 2.2 A for 4000 volt pre-charge
I_{PR}/I_{PS}	$\geq 63\%$

Requirement:

9. The current pulse shall meet the following characteristics:
 - t_r Pulse rise time 5 nanoseconds to 25 nanoseconds.
 - I_r The maximum allowable peak-to-peak ringing must be less than 15% of I_{pr} , when measured parallel to the current waveform, with no observable ringing 100 nanoseconds after the start of the pulse.
 - I_{pr} Peak current through the 500 ohm resistor shall be between 375mA and 550mA for a pre-charge voltage of 1000 Volts and between 1.5A and 2.2A for a pre-charge voltage of 4000V. I_{pr} shall not be less than 63% of the previously measured I_{ps} value for the same stress level.

Notes:

5. The peak current and risetime into the 500 ohm resistor will vary, depending upon the capacitive loading of the socket and peripheral wiring.
6. It is not necessary to measure t_d , pulse decay time of the current through the 500 ohm resistor, as this will vary, depending upon how the tester forms the pulse.
7. The 500 ohm waveform standard is intended to assure that socket capacitance is limited. But for a given component, socket capacitance within those limits could still influence ESD withstand voltage.

Appendix A: Example of pin combinations using Table 2.

The following example is intended to clarify the pin combinations given in Table 2. The example is for a 10 pin device with 2-Vdd, 2-Vss, 2-Vcc, 2-input and 2-output pins. It is assumed that the like-named power supply pins are metalically connected. If not, each should be treated as an individual supply pin.

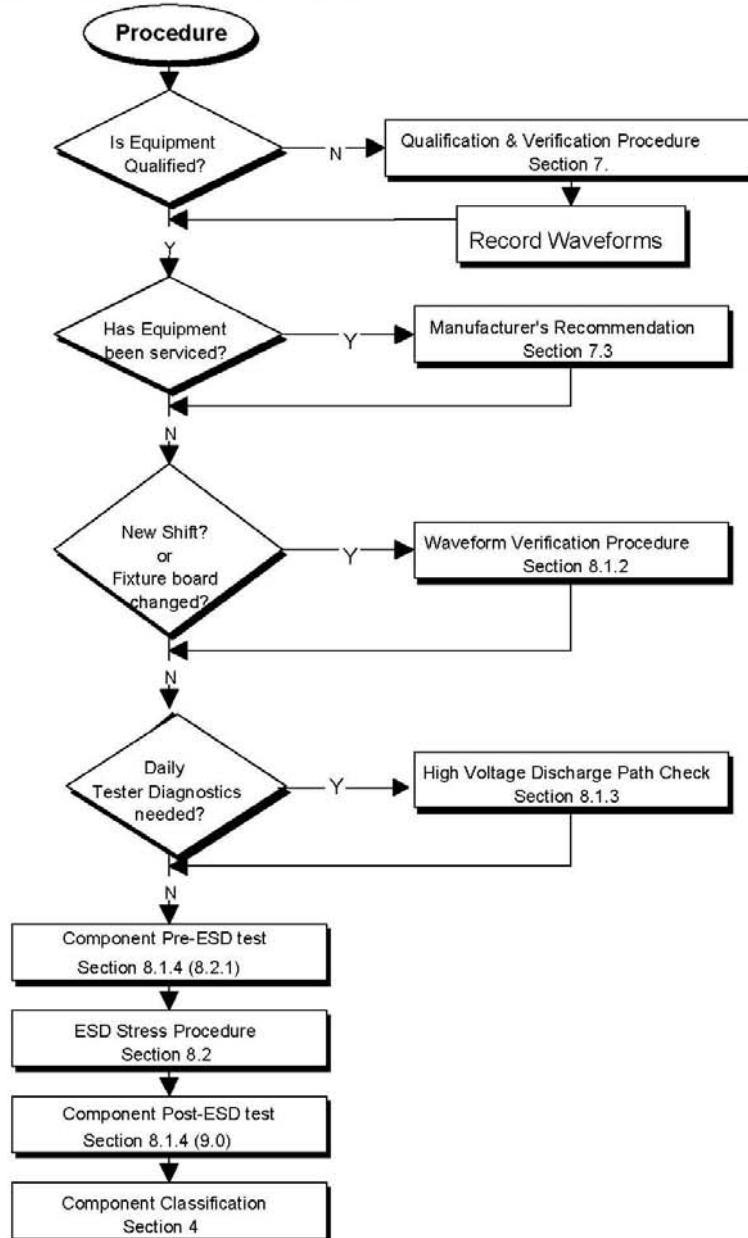
Sequence #	Pin comb.	Connect to A	Connect to B	Float Pins
1	1	1st input pin	2-Vdd	all other 7 pins
2	1	2nd input pin	2-Vdd	all other 7 pins
3	1	1st output pin	2-Vdd	all other 7 pins
4	1	2nd output pin	2-Vdd	all other 7 pins
5	1	1st Vcc pin	2-Vdd	all other 7 pins
6	1	2nd Vcc pin	2-Vdd	all other 7 pins
7	1	1st Vss pin	2-Vdd	all other 7 pins
8	1	2nd Vss pin	2-Vdd	all other 7 pins
9	2	Repeat 1-8	but swap	Vdd and Vss
10	3	Repeat 1-8	but swap	Vdd and Vcc
11	4	1st input pin	output 1,2 and input 2	all Vdd, Vss and Vcc pins
12	4	2nd input pin	output 1,2 and input 1	all Vdd, Vss and Vcc pins
13	4	1st output pin	input 1,2 and output 2	all Vdd, Vss and Vcc pins
14	4	2nd output pin	input 1,2 and output 1	all Vdd, Vss and Vcc pins

Notes:

8. Power supply and ground pins include Vdd, Vcc, Vss, GND, Grd, +Vs, -Vs, etc. as defined in 8.1.5. Pins such as offset adjust, compensation, clocks, controls, address, data and input shall be considered non-power supply pins. For each combination sequence, follow the procedure established in Section 8.2.
9. The sequence # noted, refers to the sequence of pin combinations for stressing.

ANSI/ESD STM5.1-2001

Appendix B: HBM STM5.1 Procedure Flow



ANSI/ESD-STM5.1-2001

Bibliography

MIL-STD-883D: Test Methods and Procedures for Microelectronics: Method 3015.7 Electrostatic Discharge Sensitivity Classification.

MIL-STD-750C Notice 4: Test Methods for Semiconductor Devices: Method 1020: Electrostatic Discharge Sensitivity Classification.

ภาคผนวก ข

Data Sheet

SURFACE RESISTANCE CHECKER

Model: SURPA-385



SURFACE RESISTANCE CHECKER

Model: SURPA-385

Product Description

The pocket resistivity Meter, with specifications from 10^3 Ohms per square to 10^{12} Ohms per square, with accuracy $\pm 1/2$ Decade. The meter can be supplied with a certificate of Calibration upon request. The meter measures both surface resistivity and resistance to ground. To measure surface resistivity, simply place the meter on the material that requires measuring, and press the green test button. The meter will then light the appropriate LED from 10^3 - 10^{12} Ohms per square or insulative. To measure resistance to ground, repeat this process and insert the earth leakage lead in the earth socket attaching the croc clip to your ground point.

SIZE: 130mm x 70mm x 25mm

POWER: 9 volt PP3 Battery

Used in anti-static workshop, testing room.

Test voltage: 10v

Test range: $10e3$ - $10e12$

Packing: Shielding bag and leather bag

Model 520 Series

Hand-Held Electrostatic Voltmeters



The Trek Model 520 series Hand-Held Electrostatic Voltmeters provide accurate, noncontacting measurements of electrostatic surface voltage for ESD applications in either ionized or non-ionized environments. Industrial applications include measuring charge accumulation in the LCD manufacturing process or measuring static charge in semiconductor production. The Model 520 series voltmeters utilize a new measurement technique that overcomes the disadvantage of the typical hand-held fieldmeter by providing surface voltage measurements which are essentially independent of the sensor probe-to-measured surface spacing.

Model 520

Over a spacing range of 5 mm to 25 mm, the 520 voltmeter provides better than a 5% voltage measurement accuracy, while the typical fieldmeter provides a voltage measurement error in excess of 50%. An optional voltage monitor output is available.

Model 523

Over a spacing range of 30 mm to 60 mm, the 523 voltmeter provides greater than a 5% voltage measurement accuracy, while the typical fieldmeter provides a voltage measurement error in excess of 50%.

The 520 series provides a measurement system which complies with standardized calibration equipment traceable to the National Institute of Standards and Technology. The 520 series hand-held voltmeters employ a slender sensor probe design that provides flexibility to make measurements in many locations which are impossible to reach using the large, bulky sensing surfaces of the typical hand-held fieldmeter. The slender design also allows for higher spatial resolution capability by allowing the measurement of small surface areas. A "hold" pushbutton retains the displayed measured voltage value for recording purposes.

**Model 520 Measurement
Range: 0 to ± 2 kV DC**

**Model 523 Measurement
Range: 0 to ± 20 kV DC**

**Accurately measures
surface voltage at a wide
range of spacings**

**No need to maintain a
fixed spacing**

**Inspect small spots for
charge accumulation**

**Measure charge
accumulation in difficult-
to-reach locations**

**Chopper stabilized for
drift-free operation in
ionized environments**

Low cost

CE compliant

CONTROL WITHOUT COMPROMISE

Model 520 Series General Specifications

All Model 520 specifications are with a probe-to-surface separation of 15 mm, ± 10 mm.

All Model 523 specifications are with a probe-to-surface separation of 45 mm, ± 15 mm.

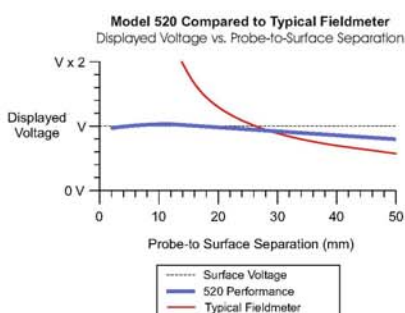
Model 520 Performance

Measurement Range

0 to ± 2 kV DC.

Accuracy

Better than $\pm 5\%$ of full scale over the entire recommended probe-to-surface separation range of 5 mm to 25 mm.



Dimensions

31 mm H x 59 mm W x 173 mm D
(1.2" H x 2.3" W x 6.8" D).

Weight

200 g (7 oz), with battery.

Model 520-2 Voltage Monitor Output

A 1.3 mm jack provides a low-voltage replica of the measured voltage.

Ratio

1/1000th of the measured voltage.

Speed of Response (10% to 90%)

Less than 25 ms for an input step change of 2 kV.

Output Impedance

47 Ω .

For more information about these or other products, contact TREK, INC.

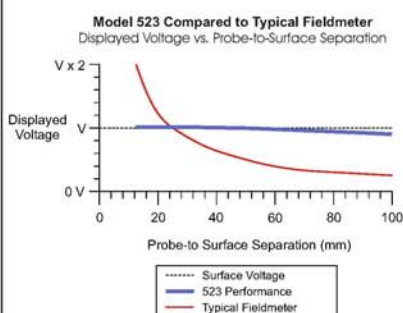
Model 523 Performance

Measurement Range

0 to ± 20 kV DC.

Accuracy

Better than $\pm 5\%$ of full scale over the entire recommended probe-to-surface separation range of 30 mm to 60 mm.



Dimensions

31 mm H x 59 mm W x 183 mm D
(1.2" H x 2.3" W x 7.2" D).

Weight

200 g (7 oz), with battery.

Common Features

Power On/Off

A push-button switch.

Stability

Drift with Time

Less than 600 ppm/hour, noncumulative.

Drift with Temperature

Less than 600 ppm/ $^{\circ}$ C.

Common Features (cont.)

Operating Time

8 hours with a new battery.

Hold

A push-button switch that, when pressed, commands the voltage display to hold the value displayed until the switch is released.

Voltage Display

3 $\frac{1}{2}$ digit liquid crystal display.

Range (Model 520)

0 to ± 1999 V.

Range (Model 523)

0 to ± 19.99 kV.

Resolution (Model 520)

1 V.

Resolution (Model 523)

10 V.

Sampling Rate

2.5 readings per second.

Zero Offset

Less than ± 4 counts.

Power Requirements

One (1) 9-volt NEDA 1604 battery, IEC 6R61 battery, or equivalent.

Ground Receptacle

Snap-on connector.

Operating Conditions

Temperature

15 $^{\circ}$ C to 35 $^{\circ}$ C.

Relative Humidity

To 85%, noncondensing.

Copyright © 2003 TREK, INC. All specifications are subject to change. 0042/JNC

Ordering Information

Model 520 Series

Accessories Supplied

Item	Part No.	Item	Part No.
Hand-held Electrostatic Voltmeter (0 to ± 2 kV DC).....	520-1-CE	Operating Instructions (Model 520).....	23100
Hand-held Electrostatic Voltmeter with Voltage Monitor Output (0 to ± 2 kV DC).....	520-2-CE	Operating Instructions (Model 523).....	23099
Hand-held Electrostatic Voltmeter (0 to ± 20 kV DC)..	523-1-CE	Voltage Monitor Output Cable Assembly (Model 520-2)	B6005
		Ground Reference Cable Assembly.....	N9079
		9-volt NEDA 1604 Battery, IEC 6R61 Battery, or equivalent.....	F1003



TREK, INC. 11601 Maple Ridge Road • Medina, NY 14103 • 800-F-585-798-3140 • 585-798-3106 (fax) • www.trekinc.com • sales@trek



created with nitro PDF professional
download the free trial online at nitropdf.com/professional

AC Current Probes

CT1 • CT2 • CT6 Data Sheet



CT6. Current Probe

Features & Benefits

- High Bandwidth
- Ultra-low Inductance
- Very Small Form Factor
- Characterize Current Waveforms up to <200 ps Rise Times
- Very Low Loading of Circuit Under Test
- Fits Into Dense, Closely-spaced Circuit Designs

Applications

- Data Storage Read Channel Design
- Silicon Characterization
- High-frequency Analog Design
- ESD Testing
- Signal Injection
- Differential Current Measurements
- Single-shot Low Rep-rate Pulse Measurements
- Propagation Delay Measurement

Data Sheet



CT1/CT2. Current Probes with P6041 BNC Probe Cable.

CT6 Current Probe

The CT6 is the newest addition to the Tektronix portfolio of high-frequency current probes. It is designed to meet the needs of high-speed circuit design and test applications which require ultra-high bandwidth, low inductance, and extremely small form factor. The CT6 provides up to 2 GHz bandwidth when used with high-bandwidth oscilloscopes such as the Tektronix TDS694C, TDS794D, and TDS7000 Series oscilloscopes or with other compatible 50 Ω input measuring instruments. Low inductance (<3 nH) assures that the loading effect of the CT6 on the circuit-under-test will be negligible, which is especially important for today's low-amplitude, high-speed circuit designs such as disk drive read/write preamplifiers. The probe is a closed-circuit design which will accept uninsulated wire sized up to 20 gauge. This product is exempt from CE mark by virtue of its 30 V voltage limit.

CT1/CT2 Current Probes

The CT1 and CT2 Current Probes are designed for permanent or semi-permanent in-circuit installation. Each probe consists of a current transformer and an interconnecting cable. The current transformers have a small hole through which a current carrying conductor is passed during circuit assembly.

The P6041 Probe Cable provides the connection between the CT1 and CT2 Current Transformers and a BNC oscilloscope input. A 50 Ω termination is required to terminate the cable when connected to a high-impedance (1 M Ω) oscilloscope input. One probe cable can be used to monitor several current transformers that have been wired into a circuit.

Miniature Construction

The CT1 and CT2 detachable cable design enables one or more probes to be located on circuit boards or in other limited space areas.

The CT6 offers the smallest form factor available, for measurement on ever-shrinking circuit boards and components. It is designed for temporary installation and does not incorporate removable cables, as the CT1 and CT2 do.

Extendible Probe Length

Specified rise time and bandwidth are obtained when using the probe cables provided: The P6041 cable used with the CT1 and CT2 is 42 inches nominal. If additional length is required, the cables can be extended by using high-quality 50 Ω cable and suitable interface connectors. (Also see Special Probe Cables, Optional Accessories.) Long cables may degrade high-frequency response.

High Sensitivity

The CT1 and CT6 provide an output of 5 mV for each milliamp of input current when terminated in 50 Ω . The CT2 provides 1 mV per milliamp when terminated in 50 Ω .

Typical Systems

The CT1, CT2, and CT6 high-frequency current transformers are dynamic (i.e., non-DC) current measuring devices. They are typically used in conjunction with compatible high-bandwidth oscilloscopes and other instruments to observe and/or record high-frequency current waveforms. The CT1, CT2, and CT6 normally operate directly into 50 Ω scopes and other measuring device inputs.

The CT1 or CT2 can be used with 1 M Ω input systems; use the P6041 probe cable and terminate the output with a 50 Ω feed-through termination (see Optional Accessories).

In all cases, the CT1, CT2, and CT6 must work into 50 Ω s to obtain specified performance and sensitivity.

Typical Measurement Applications

Differential Current Measurements

Most true-differential voltage amplifiers have a maximum bandwidth of about 100 MHz. The CT1 or CT6 can make differential current measurements to 1 GHz and 2 GHz, respectively, by passing two wires carrying opposing currents through the same core. The displayed result is the difference current. The CT2 can perform the same function to 200 MHz.

In all cases, Derating with Frequency and Amp-second Product (Current-time Product) guidelines should not be exceeded. (See Characteristics.)

Single-shot and Low Rep-rate Pulse Measurements

These common measurements are easy to make with the CT1, CT2, or CT6 provided that your signal fits within the Max Pulse Current and Amp-second Product (Current-time Product) guidelines for the specific current probe characteristics.

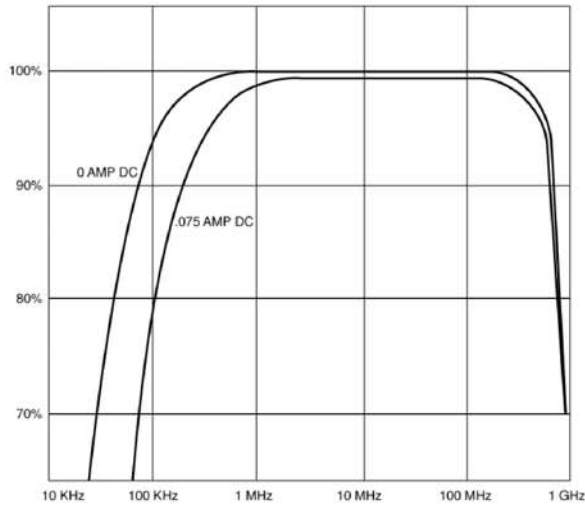
For example, the CT2 is rated at 36 A peak, with an Amp-second Product of 50×10^{-6} seconds (50 Amp-microseconds), therefore the CT2 can safely handle a 36 A peak pulse with a maximum width of 1.39 microseconds or lower amplitude pulses for longer pulse widths. The CT1, CT2, and CT6 all have low-frequency roll-off characteristics. Low-frequency "droop" will exhibit itself when the pulse width approaches the L/R time constant of the specific transformer.

Propagation Delay Measurements

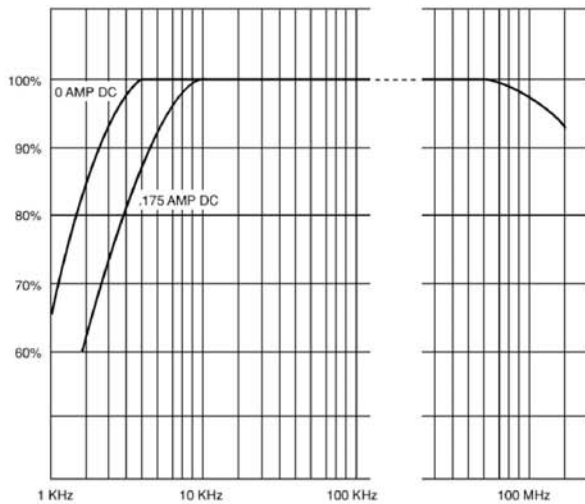
Two CT1 or CT2 Current Transformers with matching probe cables can be used to measure propagation delay (transit time) between the input and output currents of high-frequency devices. The probe outputs are connected to the inputs of dual-channel real-time or sampling scopes.

Verification of any Probe/Cable/Scope System mismatch can be obtained by passing the same signal current through both probes and observing total system delay difference, if any.

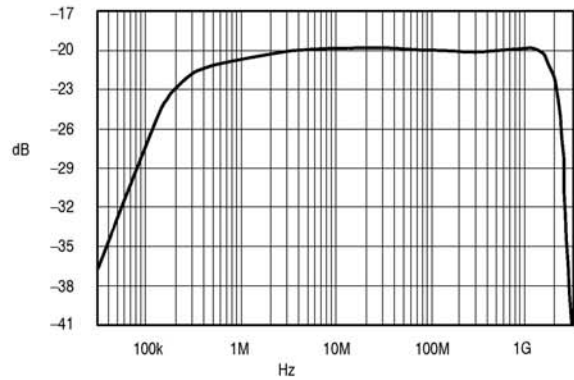
Data Sheet



CT1 Typical Frequency Response.



CT2 Typical Frequency Response.



CT6 Typical Frequency Response.

Characteristics

CT1, CT2, and CT6 Characteristics

Characteristic	CT1	CT2	CT6
Bandwidth (typical)	25 kHz to 1 GHz	1.2 kHz to 200 MHz	250 kHz to 2 GHz
Rise Time	350 ps	500 ps	200 ps
Sensitivity (into 50 Ω)	5 mV/mA	1 mV/mA	5 mV/mA
Accuracy	±3%	±3%	±3%
Magnetizing Inductance	6 μH	7 μH	1 μH
Leakage Inductance	2.4 nH	1 nH	1.5 nH
Insertion Impedance:			
at 10 MHz	<1 Ω	0.1 Ω	1.1 Ω
at 100 MHz	2 Ω	0.5 Ω	1.3 Ω
at 1 GHz			11.9 Ω
Max. Bare Wire Size	#14 wire 1.78 mm (0.070 in.)	#16 wire 1.32 mm (0.052 in.)	#20 wire 0.8 mm (0.032 in.)
Max. Bare Wire Voltage:			
RMS	175 V _{RMS} CAT I	175 V _{RMS} CAT I	30 V _{RMS} CAT I
Peak	1000 V*1	1000 V*1	30 V
DC	175 V	175 V	30 V
Max. Peak Pulse Current	12 A	36 A	6 A
Max. Continuous Current (RMS)	450 mA	2.5 A	120 mA
Amp-second Product	1 × 10 ⁻⁶ A*Sec	50 × 10 ⁻⁶ A*Sec	0.25 × 10 ⁻⁶ A*Sec
L/R Time Constant (droop)	>6.35 μs	>160 μs	0.4 μs
Propagation Delay	3.25 ns	6.1 ns	5.2 ns
Safety	UL3111-2-032, CSA1010.2-032, EN61010-2-032, IEC61010-2-032	UL3111-2-032, CSA1010.2-032, EN61010-2-032, IEC61010-2-032	NA

*1 (<3.25% Duty Factor).

Ordering Information

CT1

High-frequency Current Probe.

Includes: Manual and P6041 Interconnect Cable.

CT2

High-frequency Current Probe.

Includes: Manual and P6041 Interconnect Cable.

CT6

High-frequency Current Probe.

CT1 or CT2 Recommended Accessories

Feed-through 50 Ω Termination – Order 011-0049-02.

Service

Opt. C3 – Calibration Service 3 Years

Opt. C5 – Calibration Service 5 Years

Opt. D1 – Calibration Data Report (CT6 only)

Opt. D3 – Calibration Data Report 3 Years (with Opt. C3)

Opt. D5 – Calibration Data Report 5 Years (with Opt. C5)

Opt. R3 – Repair Service 3 Years

Opt. R5 – Repair Service 5 Years

CT6 Standard Accessories

SMA to BNC Adapter – Order 015-0572-xx.

User Manual – Order 071-0453-xx.

Color Cable Marker Bands –

Probe Holder – Order 015-0682-xx.

Certificate of Traceable Calibration –

Warranty – One Year.



Product(s) are manufactured in ISO registered facilities.



Data Sheet

Contact Tektronix:

ASEAN / Australasia (65) 6356 3900
Austria +41 52 675 3777
Balkans, Israel, South Africa and other ISE Countries +41 52 675 3777
Belgium 07 81 60166
Brazil +55 (11) 40669400
Canada 1 (800) 661-5625
Central East Europe, Ukraine, and the Baltics +41 52 675 3777
Central Europe & Greece +41 52 675 3777
Denmark +45 80 88 1401
Finland +41 52 675 3777
France +33 (0) 1 69 86 81 81
Germany +49 (221) 94 77 400
Hong Kong (852) 2585-6688
India (91) 80-42922600
Italy +39 (02) 25086 1
Japan 81 (3) 6714-3010
Luxembourg +44 (0) 1344 392400
Mexico, Central/South America & Caribbean 52 (56) 54247900
Middle East, Asia, and North Africa +41 52 675 3777
The Netherlands 090 02 021797
Norway 800 16098
People's Republic of China 86 (10) 6235 1230
Poland +41 52 675 3777
Portugal 80 08 12370
Republic of Korea 82 (2) 6917-5000
Russia & CIS +7 (495) 7484900
South Africa +27 11 206 8360
Spain (+34) 901 988 054
Sweden 020 08 80371
Switzerland +41 52 675 3777
Taiwan 886 (2) 2722-9622
United Kingdom & Ireland +44 (0) 1344 392400
USA 1 (800) 426-2200

For other areas contact Tektronix, Inc at: 1 (503) 627-7111

Updated 30 October 2008

For Further Information. Tektronix maintains a comprehensive, constantly expanding collection of application notes, technical briefs and other resources to help engineers working on the cutting edge of technology. Please visit www.tektronix.com



Copyright © Tektronix, Inc. All rights reserved. Tektronix products are covered by U.S. and foreign patents, issued and pending. Information in this publication supersedes that in all previously published material. Specification and price change privileges reserved. TEKTRONIX and TEK are registered trademarks of Tektronix, Inc. All other trade names referenced are the service marks, trademarks, or registered trademarks of their respective companies.

03 Jun 2009

60W-12572-1

www.tektronix.com

Tektronix[®]





April 2001

LM321

Low Power Single Op Amp

General Description

The LM321 brings performance and economy to low power systems. With a high unity gain frequency and a guaranteed 0.4V/μs slew rate, the quiescent current is only 430μA/amplifier (5V). The input common mode range includes ground and therefore the device is able to operate in single supply applications as well as in dual supply applications. It is also capable of comfortably driving large capacitive loads.

The LM321 is available in the SOT23-5 package. Overall the LM321 is a low power, wide supply range performance op amp that can be designed into a wide range of applications at an economical price without sacrificing valuable board space.

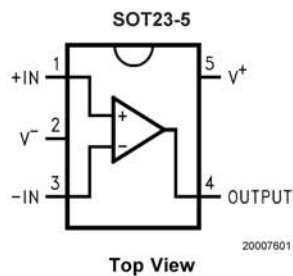
Features

- (V_{CC} = 5V, T_A = 25°C. Typical values unless specified).
- Gain-Bandwidth product 1MHz
 - Low supply current 430μA
 - Low input bias current 45nA
 - Wide supply voltage range +3V to +32V
 - Stable with high capacitive loads
 - Single version of LM324

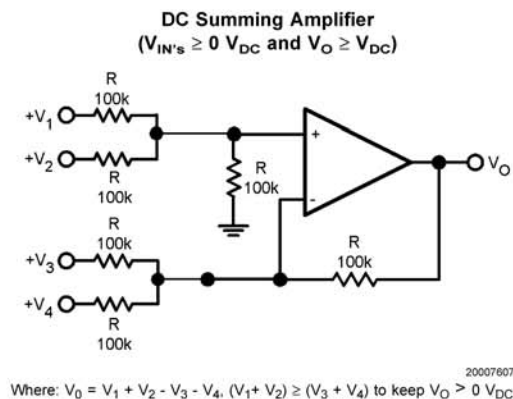
Applications

- Chargers
- Power supplies
- Industrial: controls, instruments
- Desktops
- Communications infrastructure

Connection Diagram



Application Circuit



Ordering Information

Package	Part Number	Package Marking	Transport Media	NSC Drawing
5-Pin SOT-23	LM321MF	A63A	1k Units Tape and Reel	MF05A
	LM321MFX		3k Units Tape and Reel	

Absolute Maximum Ratings (Note 1)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/ Distributors for availability and specifications.

Differential Input Voltage	\pm Supply Voltage
Input Current ($V_{IN} < -0.3V$) (Note 6)	50mA
Supply Voltage ($V^+ - V^-$)	32V
Input Voltage	-0.3V to +32V
Output Short Circuit to GND, $V^+ \leq 15V$ and $T_A = 25^\circ C$ (Note 2)	Continuous
Storage Temperature Range	-65°C to 150°C

Junction Temperature (Note 3)	150°C
Mounting Temperature	
Lead Temp (Soldering, 10 sec)	260°C
Infrared (10 sec)	215°C
Thermal Resistance to Ambient (θ_{JA})	265°C/W
ESD Tolerance (Note 10)	300V

Operating Ratings (Note 1)

Temperature Range	-40°C to 85°C
Supply Voltage	3V to 30V

Electrical Characteristics Unless otherwise specified, all limits guaranteed for at $T_A = 25^\circ C$; $V^+ = 5V$, $V^- = 0V$, $V_O = 1.4V$. **Boldface** limits apply at temperature extremes.

Symbol	Parameter	Conditions	Min (Note 5)	Typ (Note 4)	Max (Note 5)	Units
V_{OS}	Input Offset Voltage	(Note 7)		2	7 9	mV
I_{OS}	Input Offset Current			5	50 150	nA
I_B	Input Bias Current (Note 8)			45	250 500	nA
V_{CM}	Input Common-Mode Voltage Range	$V^+ = 30V$ (Note 9) For CMRR $> = 50dB$	0		$V^+ - 1.5$ $V^+ - 2$	V
A_V	Large Signal Voltage Gain	($V^+ = 15V$, $R_L = 2k\Omega$ $V_O = 1.4V$ to 11.4V)	25 15	100		V/mV
PSRR	Power Supply Rejection Ratio	$R_S \leq 10k\Omega$, $V^+ \leq 5V$ to 30V	65	100		dB
CMRR	Common Mode Rejection Ratio	$R_S \leq 10k\Omega$	65	85		dB
V_O	Output Swing	V_{OH} $V^+ = 30V$, $R_L = 2k\Omega$	26			V
		$V^+ = 30V$, $R_L = 10k\Omega$	27	28		
I_S	Supply Current, No Load	$V^+ = 5V$		0.430 0.7	1.15 1.2	mA
		$V^+ = 30V$		0.660 1.5	2.85 3	
I_{SOURCE}	Output Current Sourcing	$V_{ID} = +1V$, $V^+ = 15V$, $V_O = 2V$	20 10	40 20		mA
I_{SINK}	Output Current Sinking	$V_{ID} = -1V$ $V^+ = 15V$, $V_O = 2V$	10 5	20 8		mA
		$V_{ID} = -1V$ $V^+ = 15V$, $V_O = 0.2V$	12	100		μA
I_O	Output Short Circuit to Ground (Note 2)	$V^+ = 15V$		40	85	mA
SR	Slew Rate	$V^+ = 15V$, $R_L = 2k\Omega$, $V_{IN} = 0.5$ to 3V $C_L = 100pF$, Unity Gain		0.4		V/ μs
GBW	Gain Bandwidth Product	$V^+ = 30V$, $f = 100kHz$, $V_{IN} = 10mV$, $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$		1		MHz
ϕ_m	Phase Margin			60		deg