

# Inhalt

<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Entstehung elektrostatischer Ladungen und Wirkungen auf elektrostatische Bauelemente und Baugruppen.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Klassische Entstehungsmechanismen .....</b>	<b>6</b>
1.2.1. Triboelektrizität – Reibungselektrizität .....	6
1.2.2. Ladungsentstehung durch Influenz – Einfluss von einem elektrischen Feld .....	8
1.2.3. Berechnung der elektrostatischen Aufladung.....	8
1.2.4. Mechanismen, die die elektrostatische Aufladung beeinflussen .....	13
1.2.4.1. Materialeigenschaften.....	13
1.2.4.2. Reibungselektrizität und Kontaktspannung.....	14
<b>1.3. Allgemeine Entlademechanismen.....</b>	<b>16</b>
<b>1.4. Fehlermodelle .....</b>	<b>18</b>
1.4.1. Human Body Model (HBM) – Körperentladungsmodell.....	18
1.4.2. Machine Model (MM) – Maschinenmodell .....	21
1.4.3. Charged Device Model (CDM) – Modell vom geladenen Objekt.....	23
1.4.4. Field Induced Model (FIM) – Feldbezogene Entstehung und Entladung von elektrostatischen Ladungen.....	28
1.4.5. Charged Board Model (CBM) und Field Induced Charged Board Model (FICBM) ...	28
<b>1.5. Allgemeine Fehlermodelle von elektronischen Bauelementen .....</b>	<b>29</b>
1.5.1. Thermischer Durchbruch.....	29
1.5.2. Dielektrischer Durchbruch.....	30
1.5.3. Aufschmelzen der Metallisierung.....	31
1.5.4. Unterschiede bei den verschiedenen Bauelementetecnologien .....	31
<b>1.6. Wirkungen von ESD auf MOS-Strukturen .....</b>	<b>32</b>
1.6.1. Aufbau und Wirkungsweise eines MOS-Transistors .....	32
1.6.2. Entladung an einem MOS-Transistor .....	33
1.6.3. Leistungs-MOS-Transistoren .....	34
1.6.4. Mehrfache ESD-Fehler – Überlagerung von Fehlern – Latente Fehler und Degradation .....	35
1.6.5. Wirkungen von ESD auf bipolare Bauelemente.....	37
1.6.5.1. Das Wunsch-Bell Modell zur Bestimmung von Fehlerpegeln .....	38
1.6.5.2. Berechnung der ESD Spannungsschwelle von pn-Übergängen .....	39

<b>2. ESD Normen (DIN EN 61340-5-1 und DIN EN 61340-5-2, ANSI ESD S20.20) .....</b>	<b>43</b>
<b>2.1. Übersicht über die Entwicklung der Normenfamilie IEC 61340.....</b>	<b>43</b>
<b>2.2. Grundspezifikation – Allgemeine Anforderungen für den Schutz elektronischer Bauelemente und Baugruppen vor elektrostatischen Entladungen.....</b>	<b>49</b>
<b>2.3. Definitionen .....</b>	<b>50</b>
2.3.1. Allgemeine Definitionen .....	50
2.3.2. Widerstandsdefinitionen.....	52
2.3.3. Materialeigenschaften .....	53
<b>2.4. Die Normen DIN EN 61340-5-1 (2001) und DIN EN 61340-5-2 (2002) .....</b>	<b>54</b>
<b>2.5. Vergleich DIN EN 61340-5-1 und ANSI/ESD S20.20 .....</b>	<b>56</b>
<b>2.6. Neue ESD-Norm DIN EN 61340-5-1 (2008) .....</b>	<b>57</b>
<b>2.7. Kennzeichnung von ESDS und ESD Arbeitsplätzen bzw. Bereichen .....</b>	<b>59</b>
<b>2.8. Bestandteile einer ESD Schutzzone (EPA) .....</b>	<b>61</b>
<b>3. ESD Control Plan .....</b>	<b>65</b>
<b>3.1. „ESD Control Plan“ – Einführung warum?.....</b>	<b>65</b>
<b>3.2. ESD Kontrollmaßnahmen.....</b>	<b>65</b>
3.2.1. Interne Schutzschaltungen des Halbleiterherstellers auf einem Chip .....	66
3.2.1.1. Widerstandsnetzwerk.....	66
3.2.1.2. Diodenkombination .....	67
3.2.1.3. Widerstands-Dioden-Kombination .....	67
3.2.1.4. Feldplattenelektrode.....	68
3.2.1.5. Punch-through-Transistor mit dünnem Gateoxid .....	69
3.2.1.6. Punch-through-Transistor mit dickem Gateoxid.....	70
3.2.1.7. Praktische Schutzschaltungsanordnungen .....	70
3.2.2. Technologische Maßnahmen des Halbleiterherstellers bei der Herstellung .....	72
<b>3.3. „ESD Control Plan“ – 5 Stufen Plan .....</b>	<b>73</b>
3.3.1. 1. Stufe – Analyse.....	74
3.3.2. 2. Stufe – Aufstellung des ESD Kontrollprogramms .....	75
3.3.3. 3. Stufe – Schulung der Mitarbeiter.....	75
3.3.4. 4. Stufe – Einführung der ESD Kontrollmaßnahmen.....	75
3.3.5. 5. Stufe – Überprüfung der ESD Maßnahmen und Inbetriebnahme.....	76
3.3.6. Zusammenfassung .....	76

<b>3.4. Anforderungen an die einzelnen Ausrüstungen und Stufen.....</b>	<b>76</b>
3.4.1. Anforderungen an die Person.....	77
3.4.2. Anforderungen an den ESD Arbeitsplatz.....	77
3.4.3. Anforderungen an den ESD Fußboden .....	78
3.4.4. Anforderungen an die EPA.....	79
3.4.5. Anforderungen an Maschinen und Ausrüstungen.....	80
3.4.6. Anforderungen an Verpackungsmaterialien.....	82
3.4.7. Testmethoden für die Maßnahmen des ESD Control Systems .....	82
<b>4. Anforderungen an „ESD Control“ Maßnahmen und Ausführungen.....</b>	<b>85</b>
<b>4.1. Allgemeine Anforderungen.....</b>	<b>87</b>
<b>4.2. Gestaltung der Arbeitsplätze, Arbeitsräume.....</b>	<b>89</b>
4.2.1. Grundsätzliche Ausrüstungen.....	92
4.2.1.1. <i>ESD Arbeitsplatzausstattung</i> .....	92
4.2.1.2. <i>ESD Arbeitsbereich</i> .....	92
4.2.2. Anforderungen an die Kennzeichnung.....	92
4.2.3. Anforderungen an PCB, Baugruppen.....	93
4.2.4. EPA, Einzel-Komplett EPA, Reinraumbereiche, Hochspannungsprüfplätze, Service-Arbeitsplätze.....	94
<b>4.3. Anforderungen an die ESD Kontrollmaßnahmen einer EPA.....</b>	<b>95</b>
4.3.1. Arbeitsplatzoberfläche, Wagen .....	95
4.3.2. Fußboden .....	97
4.3.2.1. <i>Ausführungen</i> .....	99
4.3.2.2. <i>Ableitfähiger Fußbodenbelag</i> .....	99
4.3.2.3. <i>Ableitfähiges Beschichtungssystem aus Epoxidharz (Dickschicht)</i> .....	101
4.3.2.4. <i>Ableitfähige Systeme auf der Basis von leitfähigen Epoxidharz- oder PU-Lacken (Dünnenschicht)</i> .....	103
4.3.2.5. <i>Andere Fußbodensysteme und Versiegelungen von Bodenbelägen und Beschichtungen</i> .....	104
4.3.3. Personenausrüstungen.....	104
4.3.3.1. <i>Bekleidung, Handschuhe, Arbeitskittel</i> .....	104
4.3.3.2. <i>Handgelenkbänder</i> .....	109
4.3.4. Tische, Stühle, Möbel, Wände.....	110
4.3.5. Erdungsmaßnahmen .....	112
4.3.5.1. <i>Erdung der Arbeitsoberfläche</i> .....	112
4.3.5.2. <i>Erdungsanschlüsse</i> .....	112

4.3.5.3. <i>EPA Erdungskabel</i> .....	114
4.3.5.4. <i>EPA Erdungsanschlusspunkte (EBP)</i> .....	114
4.3.5.5. <i>Personenschutz in einer EPA</i> .....	114
4.3.5.6. <i>Ableitwiderstände zur Strombegrenzung, Ableitwiderstände</i> .....	115
4.3.6. <i>Nichtstationäre und Service-Arbeitsplätze</i> .....	115
4.3.7. <i>Anforderungen an Maschinen und Ausrüstungen, Transporteinrichtungen, Werkzeuge</i> .....	118
4.3.7.1. <i>Werkzeuge</i> .....	118
4.3.7.2. <i>Maschinen und Ausrüstungen, automatische Transporteinrichtungen</i> .....	119
4.3.7.3. <i>Lötkolben, Lötanlagen</i> .....	120
4.3.8. <i>Elektrostatische Felder in einer EPA</i> .....	121
4.3.9. <i>Umgebungsbedingungen, Luftfeuchtigkeit und Temperatur</i> .....	121
<b>4.4. Anforderungen an ESD Verpackungsmaterialien</b> .....	<b>122</b>
4.4.1. <i>Normgerechte Anforderungen</i> .....	122
4.4.2. <i>Praktische Ausführungen</i> .....	123
4.4.2.1. <i>Leitfähige und ableitfähige Verpackungen</i> .....	123
4.4.2.2. <i>Eigenschaften und Anforderungen an Folie</i> .....	125
4.4.3. <i>Lagerzeit von Verpackungen</i> .....	131
4.4.4. <i>Kennzeichnung von ESD Verpackungen</i> .....	131
4.4.5. <i>Anforderungen an Verpackungen nach den zukünftigen Normen „ANSI/ESD S541-2003 und IEC 61340-5-3</i> .....	133
4.4.5.1. <i>Anforderungen an Verpackungen nach ANSI/ESD S541-2003</i> .....	134
4.4.5.2. <i>Klassifikation von ESD Verpackungsmaterialien nach ANSI/ESD S541-2003</i> .....	135
<b>4.5. Verantwortung im ESD Bereich – Aufgaben eines ESD Koordinators</b> .....	<b>137</b>
4.5.1. <i>Betriebsleitung, Management</i> .....	138
4.5.2. <i>Verantwortung der Mitarbeiter</i> .....	138
4.5.3. <i>ESD Koordinator, ESD Manager</i> .....	138
<b>4.6. ESD Schulungen</b> .....	<b>139</b>
<b>4.7. Überprüfung der ESD Kontrollmaßnahmen</b> .....	<b>140</b>
<b>4.8. Ionisation</b> .....	<b>144</b>
4.8.1. <i>Induktion</i> .....	144
4.8.2. <i>Ionisation durch radioaktives Material</i> .....	144
4.8.3. <i>Elektrische Ionisation - Statische Ionisation</i> .....	145
4.8.4. <i>Realisierung der Ionisation am ESD Arbeitsplatz</i> .....	146
<b>4.9. Muster für ein ESD Kontrollprogramm, Prüf- und Kontrollplan</b> .....	<b>148</b>

<b>5. Messtechnik, Grundlagen und praktische Erfahrungen .....</b>	<b>159</b>
5.1. Beziehungen zwischen elektrostatischer Ladung und elektrostatischem Feld ...	159
5.2. Messung elektrostatischer Ladungen .....	167
5.3. Messung der elektrischen Feldstärke in einem elektrostatischen Feld .....	172
5.4. Messung von Widerständen – Oberfläch- und Ableitwiderständen .....	178
5.4.1. Widerstandsdefinitionen .....	178
5.4.2. Hinweise für den Einsatz der beschriebenen Messverfahren und Messprinzipien..	181
5.4.3. Messung von Oberflächenwiderständen .....	183
5.4.3.1. Oberflächenwiderstand nach DIN EN 61340-4-1 Ed.2 .....	183
5.4.3.2. Oberflächenwiderstand nach DIN EN 1081 .....	186
5.4.3.3. Oberflächenwiderstand nach DIN EN 61340-2-3.....	188
5.4.3.4. Oberflächenwiderstand nach DIN IEC 60093.....	189
5.4.3.5. Oberflächenwiderstand nach ANSI/ESD S7.1 .....	191
5.4.3.6. Oberflächenwiderstand nach ANSI/ESD STM11.11-2001.....	192
5.4.3.7. Oberflächenwiderstand mit der Mikro-Ringelektrode nach ESD STM11.11-2001 .....	192
5.4.3.8. Oberflächenwiderstand mit der Mikro-Zweipunktelektrode nach ASTM/ESD STM 11.13-2004 .....	193
5.4.3.9. Zusammenfassung – Messung des Oberflächenwiderstandes $R_O$ .....	193
5.4.4. Messung von Ableitwiderständen.....	193
5.4.4.1. Ableitwiderstand nach DIN EN 61340-4-1 Ed.2.....	194
5.4.4.2. Ableitwiderstand nach DIN EN 1081.....	195
5.4.4.3. Ableitwiderstand nach DIN EN 61340-2-3 .....	196
5.4.4.4. Ableitwiderstand nach DIN IEC 60093.....	197
5.4.4.5. Ableitwiderstand nach ANSI/ESD S7.1-2005 .....	197
5.4.4.6. Zusammenfassung – Messung des Ableitwiderstandes nach $R_A$ .....	198
5.4.5. Messung von Durchgangs- und Volumenwiderständen.....	198
5.4.5.1. Durchgangswiderstand nach DIN EN 61340-4-1 Ed.2 .....	199
5.4.5.2. Durchgangswiderstand nach DIN EN 61340-2-3.....	200
5.4.5.3. Durchgangswiderstand nach DIN IEC 60093 .....	201
5.4.6. Weitere Widerstandsmessverfahren.....	202
<b>5.5. Praktische Messungen und Messvorschriften für Widerstände und weiterer Parameter (Entladezeit, Personenaufladung) zur Ermittlung der Wirksamkeit der ESD Kontrollmaßnahmen .....</b>	<b>206</b>
5.5.1. ESD Arbeitsoberflächen, Regale .....	206
5.5.1.1. Ableitwiderstand von ESD Arbeitsoberflächen .....	206
5.5.1.2. Oberflächenwiderstand von ESD Arbeitsoberflächen und Materialien für ESD	

<i>Arbeitsoberflächen</i> .....	207
5.5.1.3. <i>Praktische Messergebnisse für Widerstandsmessungen an ESD Materialien für Arbeitsoberflächen</i> .....	209
5.5.1.4. <i>Aufladbarkeit und Entladezeitmessung von ESD Arbeitsoberflächen</i> .....	210
5.5.1.5. <i>Regaloberflächen</i> .....	211
5.5.2. <i>ESD Fußböden</i> .....	212
5.5.2.1. <i>Ableitwiderstand von ESD Fußböden</i> .....	212
5.5.2.2. <i>Oberflächen-, Durchgangs- und Volumenwiderstand von verlegten ESD Fußböden und von Materialien</i> .....	213
5.5.2.3. <i>Praktische Messergebnisse für Widerstandsmessungen an Materialien für ESD Fußböden</i> .....	215
5.5.2.4. <i>Systemwiderstand und Personenaufladung</i> .....	218
5.5.3. <i>Prüfung von ESD Transportwagen</i> .....	223
5.5.4. <i>Prüfung von ESD Stühlen</i> .....	224
5.5.5. <i>Prüfung von ESD Bekleidung und ESD Schuhen</i> .....	226
5.5.5.1. <i>ESD Schuhe</i> .....	226
5.5.5.2. <i>ESD Bekleidung</i> .....	228
5.5.5.3. <i>Handschuhe und Fingerlinge</i> .....	233
5.5.6. <i>Prüfung von ESD Werkzeugen</i> .....	234
5.5.7. <i>Messverfahren für ESD Verpackungsmaterialien</i> .....	235
5.5.7.1. <i>Oberflächenwiderstand von ESD Verpackungsmaterialien</i> .....	236
5.5.7.2. <i>Volumenwiderstand von ESD Verpackungsmaterialien</i> .....	238
5.5.7.3. <i>Ermittlung des Abschirmverhaltens von ESD Verpackungsmaterialien</i> .....	238
5.5.7.4. <i>Messverfahren für die Ableitzeit oder Static Decay time</i> .....	240
5.5.7.5. <i>Praktische Messungen an ESD Verpackungsmaterialien</i> .....	242
5.6. <i>Überprüfung von Ionisatoren</i> .....	249
5.7. <i>Einfluss der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur</i> .....	252

## **Literaturverzeichnis**

## **Stichwortverzeichnis**