



Abb. 1 Großflächiges ESD-Ereignis, Palo Alto Observatorium

Lodevicus Hermans und Win Labuda

Elektrische Oberflächen- Ladungen

im Reinraum-Betrieb

Clear & Clean - Forschungslabor
überarbeitete Ausgabe 1-2018

Geringe Luftfeuchte und hohe Oberflächenwiderstände sind die Hauptursachen für die Entstehung unerwünschter, elektrischer Oberflächen-Ladungen im Fertigungsumfeld einer Halbleiter-Fertigung. Dieser Aufsatz beschreibt in seinem ersten Teil die negativen Auswirkungen solcher Ladungen auf die erforderliche Prozess-Reinheit der Silizium-Scheiben (Wafern). Außerdem werden die exponierten Orte aufgezeigt, an welchen Stellen im Fertigungs-Ablauf elektrische Entladungsvorgänge (ESD electro-static-discharge) die Ursache von Beschädigungen der gefertigten Halbleiter-Produkte sein können.

Gravierende Fertigungs-Probleme entstehen insbesondere dann, wenn infolge von ESD-Ereignissen die elektronischen Steuerungseinheiten der Fertigungsanlagen ausfallen oder schlimmer noch - Veränderungen der programmierten Prozess-Schritte auftreten. Die Auswirkungen korrekativer Maßnahmen, wie beispielsweise der Einsatz von Luftionisatoren in unmittelbarer Anlagenähe werden erläutert.

Der dritte Teil des Aufsatzes ist solchen elektrischen Ladungs- und ESD-Erscheinungen gewidmet, die in Verbindung mit dem Einsatz von Reinraum-Verbrauchsmaterial auftreten können. Dabei werden insbesondere die Produktgruppen Reinigungstücher und Reinraum-Papier berücksichtigt. Im ersten Teil werden für interessierte Leser die physikalischen Grundlagen der Entstehung von elektrischen Flächenladungen und Entladungen beschrieben.

Teil I - Physikalische Grundlagen der Triboelektrizität

Werden zwei elektrisch neutrale Flächen beliebiger Materialien bei normaler Umgebungstemperatur und Feuchte vollflächig aneinandergelegt, so erfolgt über deren Oberflächengrenzen hinweg ein Ladungsträger-Austausch, und zwar bis zum Eintreten des Potential-Gleichgewichts. Werden die beiden Oberflächen anschließend wieder getrennt, so verbleibt an jeder derselben ein Ladungsträger-Überschuss von gleicher Menge aber entgegengesetzter Polarität. Diese Veränderung wird gemeinhin als „elektrostatische Aufladung“ bezeichnet. Die Vorgänge betreffen prinzipiell sowohl elektrisch leitende als auch isolierende Materialien. Wie kommt es zu diesen Ladungs- und Entladungsvorgängen? Auf der Oberfläche eines Isolators (z. B. aus dem Material Polyester) finden sich elektrische Oberflächen-Zustände mit längeren Verweilzeiten von Elektronen. Solche Oberflächen-Zustände finden sich an Kunststoff-Oberflächen vornehmlich dort, wo Fehlstellen in deren Kristallgitter-Struktur existieren. Kunststoffe, die einem Prozess thermischer Verformung ausgesetzt waren, weisen sowohl kristalline als auch amorphe Zonen aus. An den Übergangsstellen vom Kristallinen zum Amorphen finden sich die Fehlstellen z. B. in Form von unvollendeten makro-molekularen Ketten, welche die elektrische Oberflächen-Homogenität beeinträchtigen, also kristalline Fehlstellen bilden und daher eine erhöhte Bereitschaft zu einem Ladungsaustausch haben. Die

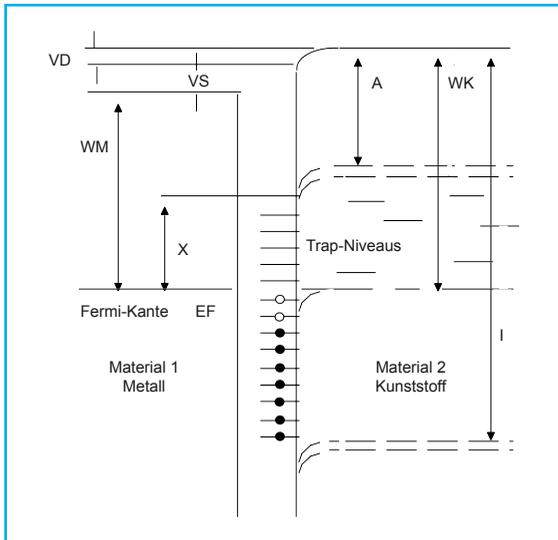


Abb. 2 Energieschema des Ladungsträger-Übergangs nach Bauser. Bedeutung der Indices: W1, W2 - Elektronen-Austrittsarbeit der beiden Materialien 1 und 2, I - Ionisationsenergie, A - Elektronen-Affinität von Material 2, EF - Fermi-Niveau.

Flächenladungs-Dichte ist dabei in 1. Näherung proportional der Differenz der Elektronen-Austrittsarbeiten zweier sich berührender Festkörper-Flächen. Die Elektronen-Austrittsarbeit ist eine materialspezifische Größe. Sie entspricht der Energie, welche nötig ist, um ein Elektron z. B. mit Hilfe elektrischer Felder oder Photonen aus dem Kristall-Gitter, in welches es eingegliedert ist, heraus zu lösen. Die Höhe einer triboelektrischen Aufladung ergibt sich jedoch nicht allein aus der Differenz der Flächenladung-Dichten sondern auch aus der Dichte und Verteilung der o. a. Oberflächen-Zustände pro Flächeneinheit. Damit sind wir bei der bekannten Triboelektrischen Reihe, welche eine Klassifizierung der verschiedenen Kunststoffe nach Aufladungs-Neigung durch einen bestimmten Reibpartner ermöglichen soll. Diese Reihe basiert theoretisch auf der Elektronen-Austrittsarbeit der verschiedenen Kunststoffe. Dabei muss jedoch beachtet werden, daß Theorie und Praxis hier weit auseinander liegen können. Dies ist so, weil das Maß der "elektrischen Verunreinigung" der Oberflächen-Zustands-Dichte weitgehend modifiziert und somit in der Praxis erhebliche Abweichungen von der Triboelektrischen Reihe bis hin zu Polaritätswechseln zu erwarten sind. Bauser hat für den Elektronen-Übergang zwischen zwei Oberflächen (hier Metall-Kunststoff-Übergang) ein interessantes Energieschema aufgestellt, welches in Abb. 2 abgebildet ist. Dabei wird der Kunststoff durch drei Größen beschrieben:

1. WK Elektronen-Austrittsarbeit
2. I Ionisationsenergie und
3. A Elektronenaffinität.

Das Metall wird durch die Elektronen-Austrittsarbeit WM gekennzeichnet. Die gestrichelten Doppellinien begrenzen die Energiezonen, innerhalb derer ein Leitfähigkeitsband besteht. Diese Leitfähigkeits-Bänder können je nach Material sehr unterschiedlich ausgeprägt sein. Die entweder schwarz ausgefüllten oder nicht gefüllten Kreise symbolisieren die verschiedenen Oberflächen-Zustände vor der Berührung (schwarz) und nach der Berührung (weiß) mit dem anderen Material. Das Potential VS wird von den besetzten Oberflächen-Zuständen erzeugt. Der Anteil der Raumladung wird durch den Besetzungsgrad dieser Zustände charakterisiert und ist durch die Energiehöhe zwischen Fermi-Niveau und Leitungsband gegeben. Die Bänder-Durchbiegung um den Betrag VD entspricht der sich unterhalb der Oberfläche bildenden Raumladung. Die Energiehöhe X kennzeichnet das Maß der Besetzung dieser Zustände. Die Ursache von Ladungsübertritten zwischen zwei Oberflächen ist darin zu sehen, daß alle Oberflächen-Zustände bis zur Höhe des Fermi-Niveaus besetzt werden und es so zu einer Umverteilung der Ladungsträger kommt.

In der Praxis entstehen elektrostatische Effekte zumeist durch zyklische Berührungen und Trennungen von Kunststoff-Oberflächen. Solche oszillierenden Kontakt- und Trennzyklen erfol-

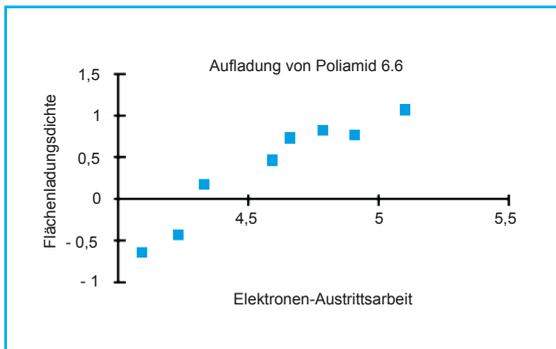


Abb. 3 R.G. Arridge hat 1967 dieses Diagramm der Flächenladungs-Dichte in Elementarladungen pro Flächeneinheit relativ zur Elektronen-Austrittsarbeit verschiedener Metalle WM aufgezeichnet. Daraus ergibt sich, daß z. B. die Elektronen-Austrittsarbeit für Poliamid 6.6 bei etwa 4,4 eV liegt.

gen z. B. beim Gehen mit Gummisohlen auf einem Kunststoff-Fußboden. Die Schuhsohlen berühren flächig den Fußboden, und es kommt zu einer Ladungsträger-Umverteilung. Beim nachfolgenden Abheben der Schuhsohle vom Boden entsteht ein Ladungsüberschuss sowohl an der Schuhsohle als auch am Fußboden. Zunächst wird sich die so entstehende Ladung über die verbleibende Kontaktfläche zwischen Boden und Schuhsohle ausgleichen. Dies erfolgt bis zum letzten Berührungspunkt derselben. Überschreitet der Übergangs-Widerstand an diesem Punkt etwa 1011 Ohm, so kann der Ladungs-Ausgleich nicht mehr vollendet werden und es verbleibt eine Flächenladung sowohl auf der Schuhsohle als auch am Boden. Ähnlich verhält es sich bei einem wischenden Reinigungsvorgang. Dabei ergeben sich jedoch wesentlich mehr Oberflächen-Kontaktstellen zwischen den Reibpartnern als bei einer bloßen Berührung derselben im ruhenden Kontaktzustand. Daher entsteht beim Reiben gemeinhin eine erheblich größere Ladung.

Der Ladungsträger-Überschuss gerade getrennter Oberflächen wird je nach Umgebungs-Bedingungen mehr oder weniger schnell entladen. Maßgebend für die Entladungszeit ist der Ableit-Widerstand. Dieser Begriff schließt die Gesamtheit aller elektrischer Widerstände zwischen geladener Oberfläche und Erde ein. In diesem Zusammenhang wird oftmals angenommen, dass die Umgebungsluft, je feuchter sie ist, ein endlicher elektrischer Widerstand ist und den Ableitwiderstand modifiziert. Dies trifft jedoch nur im begrenzten Maße zu. Selbst feuchte Luft hat einen elektrischen Widerstand nahe unendlich. Der Einfluss feuchter Luft auf den Oberflächen-Widerstand wird einerseits durch die Ein- und Anlagerung von Wassermolekülen in die Molekülstruktur der betreffenden Material-Oberfläche und z. T. auch durch eine Wasserstoffbrücken-Bildung bewirkt. Ferner kann durch die Lösung mineralischer Salze in einer feuchten Oberflächen-Schicht eine ionische Leitfähigkeit eintreten, insbesondere bei Papieren aber auch bei Reinigungstüchern mit zellulosischen Inhaltsstoffen. Die Hygroskopizität eines Materials bestimmt also in hohem Maße dessen Oberflächen-Widerstand.

Der Oberflächen-Widerstand

Auch eine andere Annahme aus der Vergangenheit hat sich als falsch erwiesen: Die Annahme einer Beziehung zwischen Oberflächen-Widerstand und Aufladbarkeit von Materialien. Malinverni hat in seinem Aufsatz "Surface Resistivity: Why?" [7] deutlich gemacht, daß es hier keine nachweisbare Beziehung gibt. Um deren Nichtvorhandensein nachzuweisen, wurde eine Reihe verschiedener Materialien (Quarz, Glas, Wolle, Seide, Aluminiumfolie, Stahl, Kupfer, Polyester, Siliziumscheibe (poliert), PTFE-Teflon, FPE-Teflon) mit Oberflächen-Widerständen von 1 Ohm/Quadrat bis zu 1013 Ohm/Quadrat mit Hilfe eines Prüfgerätes nach Baumgärtner [12,13] geprüft. Die Abb. 14 auf Seite 12 zeigt die Spitzenladungen in Volt beim Reiben der o. a. Ladungspartner mit vier ausgewählten Reibpartnern.

Teil II

ESD-Ereignisse zeigen sich uns beispielsweise als Blitzentladungen während eines Gewitters. Bei solchen Makro-Entladungsvorgängen entstehen sogar Leistungen von einigen tausend Kilowatt.

Elektrische Ladungen entstehen hauptsächlich durch Reibung (triboelektrische Ladung). Einige Beispiele aus dem täglichen Leben:

- Das Gehen über einen Teppich kann die elektrische Ladung der Person bewirken, welche sich dann bei Berührung von Metallteilen (Türdrücker) „schlagartig“ entlädt.
- Auch das Aussteigen aus einem Auto kann solche Ladungs- / Entladungsvorgänge bewirken.

Ab ca. 3.000 Volt Ladungs-Potential ist die Entladung für einen Menschen spürbar. Die Höhe einer elektrischen Flächenladung korreliert jedoch deutlich mit der Umgebungs-Luftfeuchte. In einer trockenen Umgebung können sich elektro-statische Felder hoher Potentiale bilden. Das Fertigungs-Umfeld einer Halbleiterproduktion, ist deshalb besonders gefährdet, weil die Luftfeuchte dort in der Regel unter 50 % liegt.

Eine andere Ursache für die Entstehung elektrischer Oberflächen-Ladungen ist die Influenz. Im Gegensatz zur reibungsverursachten triboelektrischen Ladung ist Influenz eine kontaktlose Ladungsübertragung.

Wir kennen alle das Phänomen der aufgerichteten Haare, wenn wir mit dem unbedeckten Arm in die Nähe eines Fernseh-Bildschirms geraten. (Vgl. auch Van der Waals-Generator). Aufgeladene Gegenstände haben in der Halbleiterfertigung oftmals unerwünschte Auswirkungen:

1. Sie ziehen Partikel an, welche die erforderliche Oberflächen-Reinheit beeinträchtigen.
2. Sie sind die Ursache von Funkenentladungen welche die gefertigten Produkte beschädigen.

Noch einmal zusammengefaßt sind die Hauptursachen der elektrostatischen Aufladung also:

- Aufladung durch Reibung (Triboelektrische Aufladung)
- Typische elektrostatische Aufladungen (Volt)
Ereignis / Tätigkeit (bei 40 % rel. Luftfeuchte)

Gehen über Teppichboden	15.000
Teflonhorde aus Reinstwasser herausnehmen	20.000
Trägerrahmen mit Folie bespannen	40.000
- Aufladung durch Influenz (Kontaktlose Ladungstrennung)
Beispiele: Aufrichten von Haaren am Fernsehbildschirm
Anziehen von Partikeln durch aufgeladene Gegenstände

Physikalische Grundlagen Experimente

Die Partikel-Kontamination der Silizium-Scheiben führt beim fertigen Chip zum Ausfall, insbesondere dann, wenn die Kontamination große Partikel, so genannte „Killerpartikel“ enthält. Durch das nachfolgend beschriebene Experiment wird der Einfluss der Ladungen auf die Partikel-Kontamination deutlich gemacht: Zwei Silizium-Prüfscheiben werden unter Umgebungs-Bedingungen der Reinraumklasse 1.000 auf unterschiedliche Wafer-Kassetten positioniert. Eine Wafer-Kassette besteht aus leitendem Polycarbonat; die andere aus nicht leitendem Teflon (PTFE) und ist elektrisch geladen. Ein Teil der elektrischen Ladung der Kassette hat sich automatisch auf die Scheibe übertragen (Influenz). Beide Kassetten stehen nebeneinander auf einem elektrisch leitenden Tisch. Das Ergebnis der Partikelzählung nach 2,5 Stunden Auslegezeit zeigt eine um den Faktor 10 höhere Partikel-Kontamination auf der geladenen Scheibe. PTFE-Kassetten sind für die Halbleiterfertigung, besonders bei den Nassätz- und nachfolgenden Reinigungsprozessen wegen ihrer Materialeigenschaften unentbehrlich. Nach Möglichkeit sollten jedoch entweder leitfähige Kassetten eingesetzt oder geeignete Ionisations-Systeme installiert werden.

Ein zweites Experiment: Diesmal werden unter Reinraumklasse 10-Bedingungen wiederum zwei Scheiben auf die beiden Wafer-Kassetten positioniert. Die Partikelquelle ist nun jedoch die typische Handbewegung einer Person im Reinraum. Durch die Handbewegung entsteht zwischen dem Bündchen des Reinraum-Overalls und dem Unterarm der Person ein gewisser Hautabrieb. Bei der nicht aufgeladenen Scheibe werden die Hautabrieb-Partikel durch die laminare Luftströmung vertikal, an der Scheibe vorbei, nach unten abgeführt. (Abstand Wafer – Hand ca. 10 cm). Die aufgeladene Scheibe auf der PTFE-Kassette hingegen zieht die Partikel an, und es zeigt sich auf der Scheibe eine deutlich erhöhte Partikel-Kontamination.

Elektrische Ladungen im Fertigungs-Prozess

Beispiel 1: Wie bereits erwähnt, sind besonders im Bereich der nass-chemischen Reinigungsprozesse oftmals Teflon-Kassetten im Einsatz. Diese Kassetten werden in speziellen Horden-Lagerplätzen in unmittelbarer Nähe der Reinigungsanlagen aufbewahrt. Durch die geringe Luftfeuchte und die laminare Luftströmung laden sich die Kassetten bis zu einem Potential

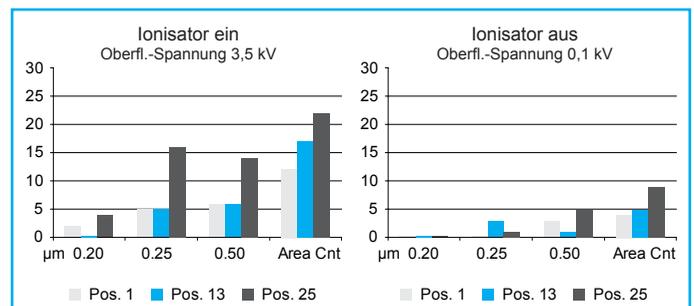


Abb. 4 Einfluss von Luftionisatoren auf die Partikel-Kontamination

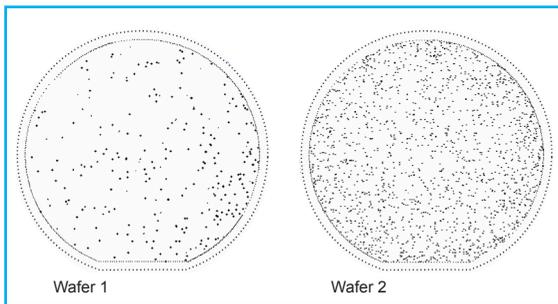


Abb. 5 Partikelkontamination von Si-Wafern durch elektrostatische Aufladung, Auslegezeit: 2,5 Std. im Wafertest, Reinraum-Klasse 1000. Deutlich erhöhte Partikelkontamination der Si-Wafer bei vorhandenem Oberflächen-Potential. Influenzwirkung von Wafer 2 auf Wafer 1 bewirkt eine inhomogene Partikelverteilung auf Wafer 1. Verstärkte Partikelablagerung auf Oberflächen im Nahbereich von aufgeladenen Gegenständen.

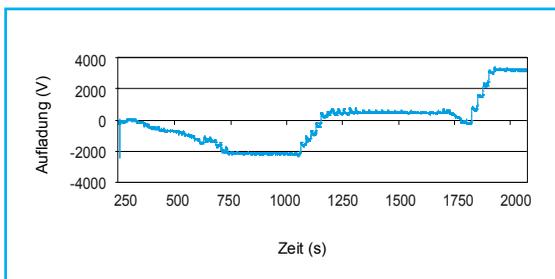


Abb. 6 Aufladung des Quarzbootes beim Beladen der Testwafer, ohne Ionisation

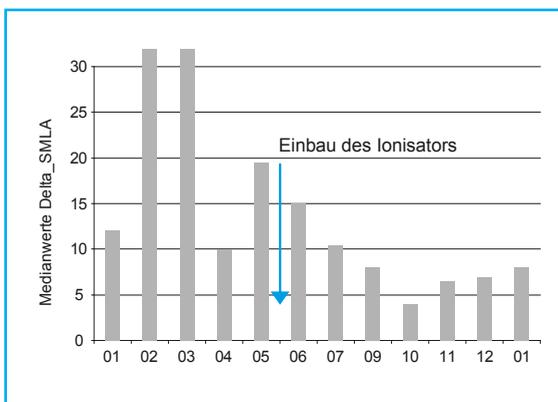


Abb. 7 Defektdichtetrend nach Ionisatoreneinbau treten keine Partikelbursts mehr auf

von 20.000 Volt auf und ziehen somit Partikel an. Dabei ist der Mensch, der im Bereich dieser Kassetten arbeitet die größte Partikelquelle. Von der Kassetten-Oberfläche werden die Partikel dann während des nachfolgenden Reinigungs-Prozesses in die Flüssigkeit abgegeben, wodurch es wiederum zur Kontamination der Wafer kommt.

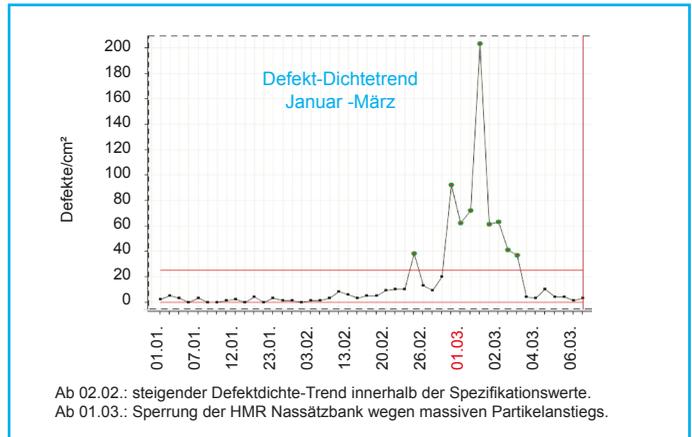
Zur Verhinderung solcher Aufladungen werden von mehreren Herstellern Luftionisatoren angeboten. Wie solche Systeme funktionieren, zeigt Abb. 4. Die Partikel-Kontamination der Kassetten wird indirekt mit Hilfe von drei Siliziumscheiben gemessen, welche in diesen Kassetten 24 Stunden lang gelagert werden. Der Einfluss von Luftionisatoren auf die Partikel-Kontamination ist durch die gewählte Anordnung deutlich messbar. Insbesondere die Anzahl von Partikeln $> 2 \mu\text{m}$, also echter Killerpartikel, sind bei eingeschaltetem Ionisator deutlich reduziert. Als Ergebnis lässt sich feststellen: Ionisations-systeme welche über den Kassetten-Lagerplätzen der Reinigungs-Prozesse montiert sind, reduzieren die Partikel-Kontamination deutlich.

Beispiel 2: Eine weitere Partikelquelle, welche durch den Einbau eines Ionisators beseitigt wurde, zeigt Abb. 6. Bei einem Vertikal-Diffusionsofen treten auf der Scheiben-Oberfläche immer wieder Domänen hoher Partikelkonzentration auf. Die Ursache hierfür wurde im Rahmen der Defekt-Analyse entdeckt: Elektrostatische Aufladung der Scheiben. Der Waferhandler, welcher die Scheiben aus der Kassette entnimmt und in das Quarzboot befördert war in diesem Falle nicht-leitend ausgeführt. Durch die Reibung zwischen Waferhandler und Scheiben-Rückseite entsteht eine Ladung, welche beim Abgeben des Wafers an das Quarzboot weitergegeben wird.

Bei einer Prüfsequenz mit 100 Scheiben konnten in Abhängigkeit von der Waferbeschaffenheit der Rückseiten (Poly – Silizium, Nitrid, ...) sowohl positive als auch negative Ladungen dieses Boots festgestellt werden. Nach der Installation eines Ionisators über der I/O-Station des Diffusionsofens wurde die Ladung des Waferhandlers und somit auch des Quarzbootes eliminiert. Dies ergibt sich eindeutig aus den Defektdichte-Daten nach Einbau des Ionisators (Abb. 7).

Beispiel 3: Die Auswirkungen eines defekten Ionisationsgerätes werden in der Abb. 8 gezeigt. Aus der Abb. ist der Defektdichtetrend der Siliziumscheiben innerhalb eines bestimmten Zeitraums bei einem Nassätzmodul ersichtlich. Wegen der hohen Partikel-Kontamination musste dieses Modul aus der Fertigung genommen werden. Durch Prüfen der einzelnen Ätz- bzw. Reinigungsmodule wurde der darin befindliche Trockner als Partikelquelle lokalisiert. Die Identifizierung dieses Ionisators als Partikelquelle gelang durch Partikel-Messungen vor und nach dem Ionisator.

Abb. 8 Partikelkontamination durch einen defekten Ionisator beim Nassätzen



Auch die durchgeführten EDX-Analysen der Partikel deuten eindeutig in Richtung Ionisator. Bei genauer Betrachtung wurden kaum sichtbare Funkenüberschläge zwischen den Ionisatornadeln sichtbar. Nach Austausch des defekten Ionisators erreichte der Defektdichte-Wert wieder den vorgeschriebenen Wert (s. o.).

Es sind verschiedene Typen von Ionisatoren erhältlich. In einer Halbleiterfabrik müssen solche Ionisatoren nicht flächendeckend montiert sein, sondern lediglich dort, wo unerwünschte Ladungen festgestellt werden. Diese Systeme können sowohl unter der Filterdecke, innerhalb von Minienvironments oder direkt im Halbleiter-Equipment installiert werden.

Sonderfälle gibt es in Stickstoff-Leitungen, bei Trocknungs-Anlagen oder mit Ventilator-Ausführung, bei denen keine Luftströmung zum Ionentransport zur Verfügung steht.

Beispiel 4: Eine weitere Auswirkung elektrostatischer Ladungen auf die Halbleiter-Produktion ist eine direkte Schädigung

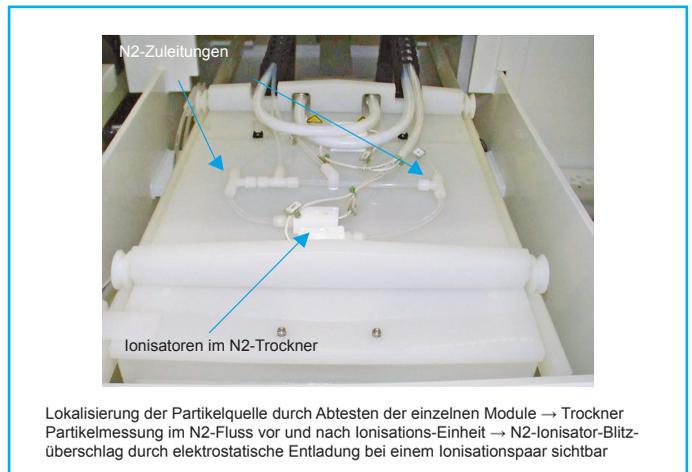


Abb. 9 Partikelkontamination durch einen defekten Ionisator beim Nassätzen

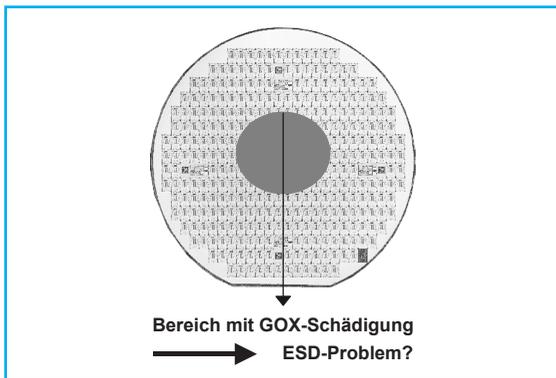


Abb. 10 Gate Oxid-Schädigung in der Mitte des Wafers, Funktionstestprobleme in der Scheibenmitte; Physikalische Analyse führt zu GOX Problemen; 1 Wafer von 25 zeigt dieses Problem; nur Technologien, mit floating Aluminium-Strukturierung auf Oxid sind betroffen, Ursachenforschung im Prozessablauf führt zum Rinserdryer als Quelle für dieses Problem

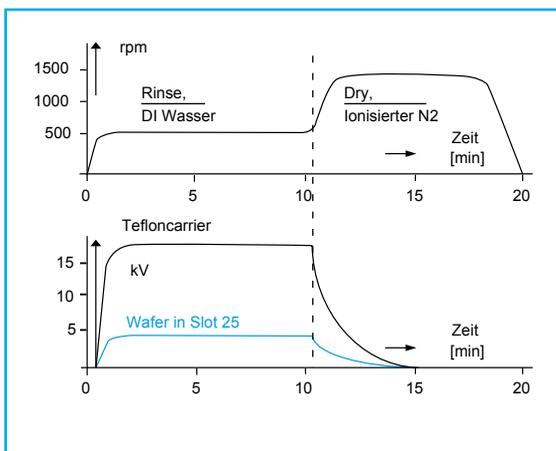


Abb. 11 Elektrostatische Aufladung während „Rinse and Dry“ von Wafer und Teflon-Carrier

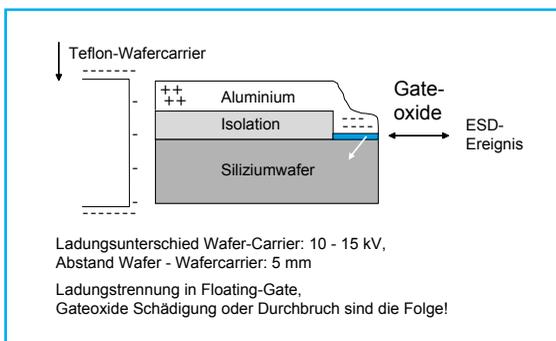


Abb. 12 Schema Ablauf eines ESD-Ereignisses durch Gate-Oxyd-Schädigung

von Mikrostrukturen durch Entladungs-Erscheinungen (ESD-Ereignisse) (Abb. 10). Bei bestimmten Technologien mit einer Floating-Aluminium-Strukturierung auf Gate-Oxyd, zeigte jeweils einer von 25 Wafern Ausfälle bei der Waferprüfung. Das Problem war eine Gate-Oxyd-Schädigung in der Mitte des Wafers. Die Ursachen-Forschung im Prozessablauf führte zu einer bestimmten Anlage, in der Wafer mit Reinstwasser gespült und anschließend mit Stickstoff getrocknet wurden; einem sogenannten Rinser-Dryer.

Aus Abb. 11 ist der Prozess-Ablauf ersichtlich. Die Wafer wurden in einer PTFE-Kassette bei 500 Upm mit Reinstwasser gespült und anschließend bei 1.400 Upm mit ionisiertem Stickstoff getrocknet. Die PTFE-Kassetten wurden unterhalb eines Luftionisators gelagert und waren somit aufladungsfrei. Aufladungsmessungen am Anfang bzw. am Ende des Rinser-Dryer-Prozesses zeigten keinerlei Aufladung sowohl der Scheiben als auch der PTFE-Kassette. Erst bei einer Prozess-Pause während des Wasser-Spülens konnte eine hohe Potentialdifferenz von ca. 10 kV zwischen Wafer-Kassette und Scheibe gemessen werden. Die Kassette lud sich durch das Spülen mit Reinstwasser auf und genau dort lag die Ursache für die Gate-Oxide-Schädigung.

Abb. 12 zeigt den schematischen Ablauf dieses ESD-Ereignisses: Eine Ladungs-Trennung durch Influenz (Antenneneffekt) schädigt das sehr dünne Gate-Oxyd. Jetzt war erklärt, warum stets nur eine Scheibe und nur die Scheibe in Position 25 der Kassette dieses Problem aufwies. Diese Scheibe stand in unmittelbarer Nähe der großen Fläche der Teflonhorde. Hier war das höchste Aufladungspotential vorhanden.

Die Abb. 13 zeigt einige korrektive Maßnahmen zur Vermeidung dieses Gate-Oxide-Problems. Maßnahme drei ist vielleicht die Eleganteste. Eine Wafer-Kassette mit 26 Slots war standardgemäß am Markt erhältlich. In Slot 26 wurde dabei ein fester Wafer installiert, der das elektrostatische Feld der Teflonhorde abschirmte.

Gravierende Probleme entstehen dann, wenn die Fertigungs-Anlagen infolge von ESD-Ereignissen ausfallen oder Veränderungen der Programmabläufe auftreten. Und hier zeigt sich die dritte Auswirkung elektrischer Ladungen: EMI. Die Abkürzung EMI steht für elektro-magnetischer Impuls und entsteht durch schnelle Entladungen oder Ladungs-Änderungen. Solche Impulse können die Funktion von Mikroprozessoren beeinträchtigen und Computer zum Absturz bringen. Dieses Phänomen erklärt z. B. das Handyverbot in Flugzeugen und auch in einigen Halbleiter-Fabriken.

Beispiel 5: In einer Halbleiter-Produktion hat eine Entladung (ESD) zu einer Anlagen-Störung geführt. Der Wafercarrier-Indexer eines Partikel-Messgerätes war nicht geerdet. Die

Maßnahmen zur Vermeidung von Gateoxid-Schädigung durch den Rinserdryer

1. Dummy-Scheiben auf Position 25. Zusätzliches Handling und extra Rinseprozess.
2. Einsatz von leitfähigen Carriern im Rinserdryer; nur bei H₂O-Spülung möglich.
3. Tefloncarrier (nicht leitfähig), mit 26 slots. Dummywaver auf Position 26 → ESD-Abschirmung.

Abb. 13 Maßnahmen zur Vermeidung von GOX-Schädigung

Ionisatoren-Wartung

Wafer und Carrier wurden beim Aufsetzen auf den Indexer bis zu 2 kV aufgeladen. Während des Kontakts Wafer/Waferhandler wurde ein ESD-Ereignis festgestellt (EMI). Pro Schicht war dann das Partikel-Messgerät für einige Minuten down (reset). Durch eine Erdung des Carrier-Indexers wurde dieses Problem beseitigt.

Fazit: Die Überwachung und Entladung aller Indexer ist in einer Wafer-Fab eine absolut notwendige Maßnahme. Elektrische Ladungen durch Erdung zu vermeiden ist natürlich einfacher und kostengünstiger als durch die Installation von Ionisatoren. Erdungsmaßnahmen sind jedoch nur bei leitenden Materialien sinnvoll. Nichtleiter wie Teflon, PVC, PFA, PC, usw. lassen sich nur durch Ionisatoren entladen.

Die Möglichkeit der Reduzierung der Defektdichte durch den Einsatz von Luftionisatoren ist unumstritten. Sehr wichtig ist es jedoch darauf zu achten, dass die Funktion der Ionisatoren auch dauerhaft gewährleistet ist. Dies bedeutet die Sicherstellung einer turnusmäßigen, vorbeugenden Wartung und eine eventuelle Funktionskontrolle über das Fertigungs-Überwachungs-Zentrum. Bei der vorbeugenden Wartung werden die Entladezeiten gemessen und eventuell neu eingestellt. Auch die Reinigung der Ionisatornadeln wird hier durchgeführt. Ionisator-Überwachungs-System: Der Ionisator + Controller ist mittels eines FMS-Interface an Fertigungs-Leitsystemen angeschlossen.

Nur die turnusgemäße, vorbeugende Wartung im Zusammenhang mit einer Online-Überwachung garantieren eine optimale Funktionalität der Ionisationsgeräte.

Zusammenfassung

Elektrische Ladungs- und Entladungs-Phänomene während der Halbleiterfertigung führen zu:

- Partikel-Kontamination der Siliziumscheiben und des Produktions-Umfeldes.
- Verlust an Produktions-Ausbeute.
- Qualitäts-Verringerung der Halbleiterstrukturen.
- Zuverlässigkeits-Problemen aller Art.
- Störungen und Ausfällen der Fertigungsanlagen.

Korrektive Maßnahmen zur Vermeidung elektrischer Ladungen sind:

- Einbau von Ionisatoren und deren kontinuierliche oder diskontinuierliche Überwachung.
- Erdung der Fertigungsanlagen.
- Einsatz von leitfähigen Materialien wo möglich.

Teil III - Triboelektrische Ladungen des Reinraum-Verbrauchs-Materials

In einem Reinraum-Betrieb der Halbleiter-Produktion sind elektrische Oberflächen-Ladungen deswegen eine besondere Gefahr, weil die gefertigten Halbleiter-Produkte bereits bei relativ geringen Entladungs-Spannungen Schaden nehmen können. Aber auch viele Fertigungs-Vorgänge, die nicht in unmittelbarer Produktnähe ablaufen, werden durch Oberflächen-Ladungen beeinträchtigt. Es ist also sinnvoll, nach solchen Vorgängen zu suchen, bei denen es im Rahmen der Produktion zur Flächenreibung kommt, um hier die Entstehung von Ladungen zu verhindern oder dieselben abzuleiten. Triboelektrische Ladungen entstehen insbesondere beim Umgang mit dem Verbrauchs-Material und der Reinraum-Bekleidung und folgen stets dem in Abb. 18 abgebildeten Impuls-Schema:

1. bei den Prozeduren des wischenden Reinigens (Reinigungstücher)
2. beim Drucken von Formularen, Betriebsanweisungen etc. mit Hilfe von Laserdruckern (Reinraum-Papier)
3. im Rahmen der Bewegungs-Reibung beim Tragen von Arbeitskleidung aus Kunststoffgarnen (Overalls, Kittel)
4. beim Gehen über Kunststoffböden (Arbeitsschuhe)

In diesem 3. Teil des Aufsatzes soll erstens auf die unerwünschten Effekte von triboelektrischen Ladungen im Rahmen des wischenden Reinigens und zweitens der Drucksachen-Herstellung mit Laserdruckern eingegangen werden. Maßnahmen zur Abhilfe werden erläutert. Außerdem werden zwei geeignete Methoden zur Messung elektrischer Ladungen beschrieben und gegenübergestellt. Diese Methoden erleichtern es sowohl Herstellern, als auch Anwendern von Reinraum-Verbrauchsmaterial eine optimierte Auswahl geeigneter Materialien zu treffen.

1. Reinigungstücher

Triboelektrische Ladungen durch den Wischvorgang.

Wie wir der Abb. 15 entnehmen können, lässt sich die Höhe der zu erwartenden triboelektrischen Ladung zwischen zwei Reibepartnern nicht genau vorhersagen. Das gilt auch für wischende Reinigungs-Vorgänge mit einem trockenem Reinigungstuch auf trockenen Oberflächen. Man kann jedoch mit Sicherheit davon ausgehen, dass beim Wischvorgang mit einem durchgehend gefeuchteten Tuch keine Ladung auftreten wird (Abb. 16 und 19). Es lassen sich jedoch nicht alle Reinigungs-Vorgänge mit durchgehend feuchten Tüchern durchführen. Beim Einsatz trockener oder nur teilweise gefeuchteter Tücher oder z. B. bei solchen mit einer Paraffin-Ausrüstung besteht jedoch die Gefahr der triboelektrischen Ladung. Die folgenden Beispiele zeigen Probleme auf, die immer wieder auftreten.

Beispiel 1: Wenn etwa die Aufgabe besteht, öl- und fetthaltige Verunreinigungen von Oberflächen zu entfernen, so wird in der Praxis als Reinigungshilfe zumeist ein brennbares Lösungsmittel wie Aceton, Benzin, Isopropylalkohol etc. Einsatz finden. Dieses Vorgehen ist z. B. typisch für die Reinigung von

Drucksieben im Hybrid-Schaltungs-Siebdruck. Dabei besteht die folgende Gefahr: Die Benetzung eines Reinigungstuchs mit einem der o. a. brennbaren Lösungsmittel erfolgt oftmals mit Hilfe einer Spritzflasche in die Mitte des einfach oder doppelt gefalteten oder geknüllten Reinigungstuchs hinein, welches in der freien Hand gehalten wird. Zum Einsatzzeitpunkt des Reinigungstuchs ist dies also teilweise mit einem brennbaren Lösungsmittel getränkt und zum anderen Teil trocken. Wenn beim Reinigen trockene Teile des Reinigungstuchs über die zum Teil trockenen Flächen der Drucksiebe gerieben werden, so ist es vorgekommen, dass die lösungsmittel-getränkten Flächenanteile durch elektrische Funkenentladung der trockenen Teile entzündet wurden und auf diese Weise ein Brand entsteht. Für solche Einsatzfälle ist es also sinnvoll, Reinigungstücher im feuchten Anlieferungs-Zustand oder solche mit reduzierter Aufladbarkeit (Baumwolle) oder nicht entflammbare Lösungsmittel einzusetzen.

Beispiel 2: Optische Gläser aber auch andere sehr glatte Oberflächen werden oftmals mit Reinigungs-Tüchern gereinigt, welche aus extrem feinen Garnen bestehen (Mikrofilament-Garn). Die einzelnen Filamente haben dabei einen Durchmesser von $< 10 \mu\text{m}$. Mit solchen Tüchern lassen sich auch dünnste Verunreinigungs-Schichten aus Öl und Fett bis hinunter zu einer Dicke von einigen Nanometern mühelos und schnell entfernen. Je geringer jedoch die Oberflächenrauigkeit zweier Reibpartner ist, desto höher wird tendenziell die beim Wischvorgang entstehende triboelektrische Ladung sein. Derart geladene Oberflächen ziehen bis zu ihrer Entladung die Partikel der Umgebungsluft in besonderem Maße an und somit ist die durch den Wischvorgang erzielte Oberflächen-Reinheit oftmals von begrenzter Dauer. Dem kann entgegengewirkt werden, indem die Reinigungs-Tücher zuvor mit DI-Wasser angefeuchtet werden. Dabei darf das Tuch niemals nass sein. Es soll in einem Zustand sein, welcher sich als nebelfeucht bezeichnen lässt. Das ist weniger als feucht aber mehr als

Ladungsparameter	Reibungsparameter für die aufgeführten Ladungsparameter (triboelektrische Ladungen in Volt)			
	Aluminium-Folie < 1 Ohm/Qadr.	Graphit-Handschuh < 10 ⁶ Ohm/Qadr.	Kunststoff-Film < 10 ⁹ Ohm/Qadr.	PE-Handschuh < 10 ¹¹ Ohm/Qadr.
Ouarz	1500	3000	290	3000
Glas	1100	3000	500	900
Wolle	200	3000	70	3000
Seide	400	300	70	3000
Aluminium	10	20	50	100
Stahl	10	15	20	200
Kupfer	10	15	35	150
Polyester	200	3000	70	750
Silizium	10	10	20	30
PTFE-Teflon	1700	3000	3000	3000
FPE-Teflon	3000	3000	3000	3000

Abb. 14 Ladungen durch Reibpartner mit verschiedenen Oberflächenwiderständen [Lit. 7]

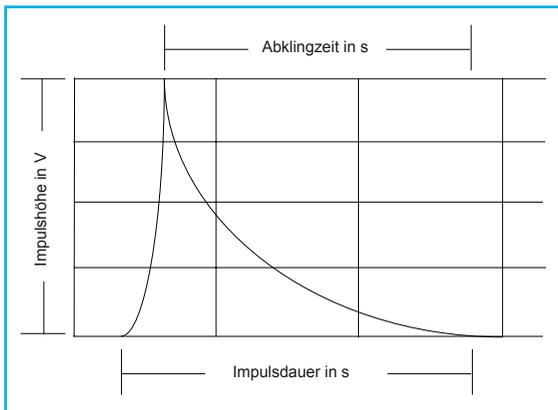


Abb. 15 Impulsschema für triboelektrische Ladungsvorgänge, Methode Fallschlitten nach Ehrler und Corona-Ladegerät nach Chubb.

trocken. Dieser geringe Feuchtegrad ist in der Praxis nur durch eine Sprüh-Befeuchtung (nicht durch eine Spritz-Befeuchtung) erreichbar.

Beispiel 3: Paraffinierte Reinigungstücher, welche auch in der Leiterplattenindustrie zur Beseitigung von Partikeln auf Oberflächen eingesetzt werden, können die Leiterplatten triboelektrisch sehr hoch aufladen - besonders, wenn die Tücher aus Polyester-Vliesen oder -Geweben bestehen. Es wurden an solchen Oberflächen beim Einsatz von Polyester-Tüchern Impulshöhen von knapp 900 V und Abklingzeiten bis zur Halbwertszeit von max. 200 s gemessen. Dabei besteht die Gefahr der Partikelanziehung aus der Umgebungsluft und einer nachfolgenden Kontamination. Hier ist es sinnvoll, grobmaschige, paraffinierte Baumwoll-Tücher einzusetzen.

Beispiel 4: „Antistatik-Tücher“ sind zumeist mit filmbildenden Polymerdispersionen getränkt. Beim Wischvorgang kommt es dann zu einer Übertragung der chemischen Substanzen im Tuch auf die Objekt-Oberfläche. Hier schaffen die übertragenen Substanzen ein feuchtes Mikroklima, welches die Aufladbarkeit derart ausgerüsteter Oberflächen verringern soll. Leider kommt es beim Austrocknen der Substanz manchmal zur Kristallbildung und die Kristallpartikel gehen in die Atmosphäre über. Solche Tücher sind auch wegen der mit ihnen verbundenen molekularen Kontamination (AMC) für den Reinraumeinsatz bedenklich.

Um festzustellen ob die Bewegungs-Geschwindigkeit bei den Wischvorgängen oder die Geschwindigkeit des Papiervorschubs im Drucker einen Einfluss auf die Höhe der Oberflächen-Ladung hat, wurde ein Reinigungstuch mit Hilfe eines pneumatisch angetriebenen Linearmotors über eine zuvor entladene Plexiglas-Fläche bewegt. Die Ergebnisse waren wie folgt:

Geschwindigkeit (cm / s)	Oberflächen-Ladung (V)
10	1830
25	751
50	335

Abb. 16 Oberflächen-Ladung in Abhängigkeit von der Reibungsgeschwindigkeit

Daraus ergibt sich, dass langsames Reiben eine höhere Aufladung bewirkt als schnelles.

Zusammenfassung Reinigungstücher im trockenen Anlieferungs-Zustand

- Gestricke haben im Trockenzustand allgemein gesehen eine etwas geringere triboelektrische Ladungsneigung als Vliesstoffe (Abb. 33 - 36).
- Die fertigungsgemäße chemische Ausrüstung der Tücher mit einem Tensid und anderen Chemikalien kann deren Ladungseigenschaften stark beeinflussen. Sie kann sogar zur Umkehrung der Ladungs-Polarität führen (Abb. 21). Dabei muss stets beachtet werden, dass ein Überschuss an Tensid

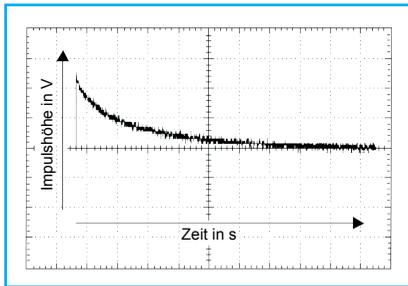


Abb. 17 Ladungsdiagramm eines Reinraum-Reinigungstuchs im Trocken-Zustand (Methode Fallschlitten nach Ehrler).

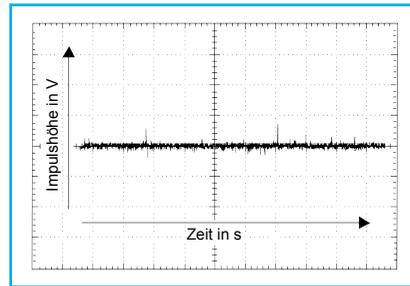


Abb. 18 Ladungsdiagramm des gleichen Reinraum-Reinigungstuchs wie bei Abb. 17 jedoch im Feuchtzustand (Methode Fallschlitten nach Ehrler).

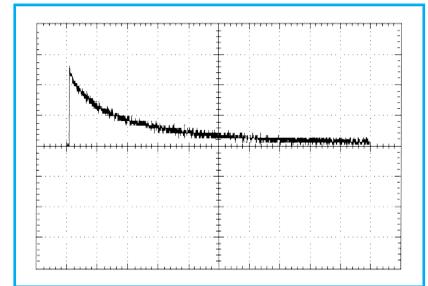


Abb. 19 PES-Gestricke ohne jede chemische Ausrüstung, (+8636 V : 195 s).

im Tuch auf den zu reinigenden Oberflächen unerwünschte Rückstände hinterlassen kann, welche die erwünschte Oberflächen-Reinheit beeinträchtigen.

- Die Ladungs-Eigenschaften der weltweit am Markt angebotenen Reinigungstücher für den Einsatz in der Reintechnik variieren untereinander erheblich (Abb. 33, 34, 35 und 36).
- Ein höherer Reinheitsgrad bzw. besserer Auswaschzustand führt bei Gestricke offenbar zu einer höheren Ladungsneigung des Reinigungstuchs. Dies ist jedoch abhängig vom eingesetzten Basis-Material (Polyester mehr oder Polyamid weniger).
- Reinigungstücher für Reinraum-Einsatz können im Trockenzustand bereits bei einer Wischweglänge von nur 100 mm Spitzenladungen von über 6000 Volt erreichen. Es ist daher sinnvoll, besonders geeignete Tücher auszuwählen, wenn ein gelegentlicher oder dauernder Einsatz derselben im trockenen Zustand vorgesehen ist oder aber durch Verdunstung während der Arbeitsphase ein Trockenzustand eintreten kann.
- Reinraum-Reinigungstücher, welche im lösungsmittelgetränkten Zustand eingesetzt werden, sind oft nur teilweise getränkt. Die trockenen Flächenanteile der Tücher haben die Ladungseigenschaften trockener Tücher (Abb. 23). Diese Tatsache sollte in jedem Operator-Training vermittelt werden.

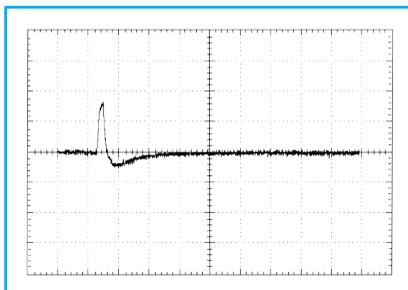


Abb. 20 PES-Gestricke, gewaschen und hydrophil ausgerüstet (+530 V : 0,19 s).

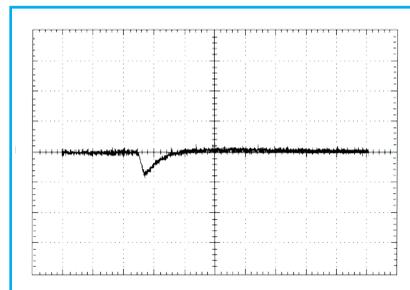


Abb. 21 PES-Gestricke, gewaschen und hydrophil ausgerüstet, anderes Tensid als Abb. 20 (-241 V : 0,8 s).

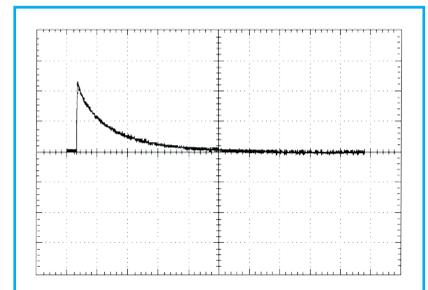


Abb. 22 Vliesstoff aus PES-Cellulose-Gemisch (+3876 V : 62 s).

- So genannte Antistatik-Tücher, welche mit filmbildenden Polymerdispersionen ausgerüstet sind, sollen im Reinraumbetrieb nicht eingesetzt werden.
- Langsames Wischen ergibt höhere Ladungs-Spannungen als schnelles und nicht umgekehrt (Abb. 16).
- Triboelektrisch geladene Oberflächen lassen sich oftmals mit einem Isopropylalkohol-Di-Wasser-getränkten Tuch entladen.

2. Reinraum-Papier

Gelegentlich kommt es vor, dass die Betreiber von Kopiergeräten oder Druckern aufgrund elektrischer Ladungen des Papiers Probleme mit dem einwandfreien Papiertransport im Drucker haben. Das Phänomen zeigt sich insbesondere in den Wintermonaten, wenn die Räume beheizt werden und die Luftfeuchtigkeit gering ist. Doppel- oder Mehrfacheinzüge und Staus beim Druckvorgang sind die unangenehmen Folgen der Trockenheit. In reinraumgebundenen Fertigungsräumen werden die Kopierer oder Drucker auch manchmal im klimatisierten Umfeld bei nur etwa 38 % rel. Feuchte eingesetzt. Dort wird in den Druckern ausschließlich Reinraum-Papier verarbeitet. Es gibt bedeutsame Unterschiede zwischen Standard-Kopierpapier und Reinraum-Papier. Diese machen Reinraum-Papiere prinzipiell anfälliger für Papierstaus in trockener Umgebung. Wenn man die technischen Zusammenhänge kennt, kann man jedoch sinnvolle Gegenmaßnahmen treffen.

Absoluten Vorrang im Anforderungsprofil von Reinraum-Papier haben für den Reinraum-Ingenieur einer Halbleiter-Fertigung die folgenden Parameter:

- geringe Partikelfreisetzung und damit automatisch
- geringe Ionenfreisetzung

Es muss in diesem Zusammenhang stets beachtet werden, dass für die Bestimmung der Gebrauchsgüte von Reinraum-Verbrauchsmaterial nicht dessen Inhaltsstoffe wesentlich sind, sondern das Maß seiner gebrauchsbedingten Freisetzung [Lit 8].

Das bedeutet in der Praxis: Nicht der Ionengehalt eines Reinraum-Papiers ist kritisch für die Anwendungspraxis,

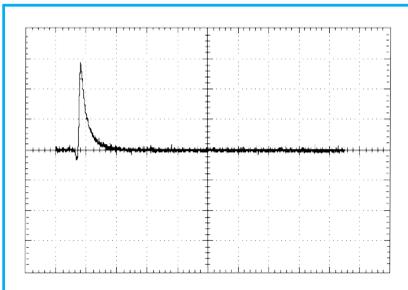


Abb. 23 Vliesstoff-Tuch wie Abb. 22 aber die Hälfte des Prüflings mit Lösungsmittel angefeuchtet (+938 V : 0,75 s).

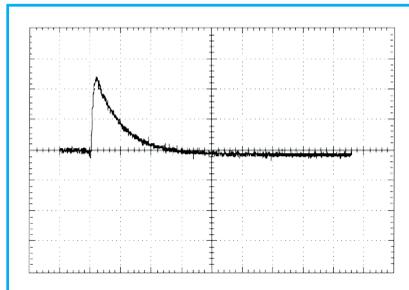


Abb. 24 Reinraum-Papier mit Polymer-Beschichtung (+796 V : 1,4 s).

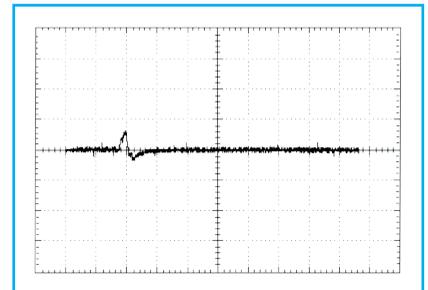


Abb. 25 Reinraum-Papier wie Abb. 24 aber nach Tauchen in 0,1 % NaCl-Lösung und anschließender Trocknung.

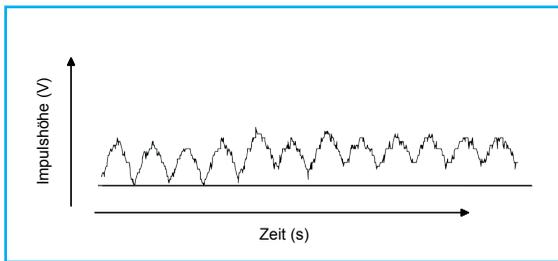


Abb. 26 Ladungs-Impulse beim Papier-Transport: Reinraum-Papiere mit Polyvinylalkohol beschichtet

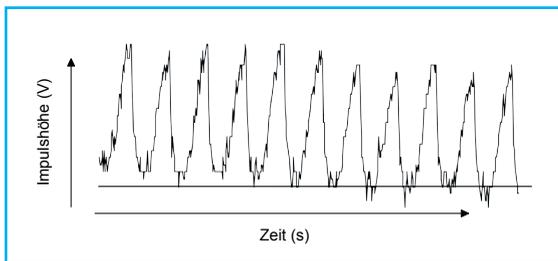


Abb. 27 Ladungs-Impulse beim Papier-Transport: Reinraum-Papiere mit Latex beschichtet

sondern die Freisetzung von Ionen beim Einsatz desselben. Diese erfolgt jedoch fast ausschließlich im Rahmen der Partikelfreisetzung. Von größter Bedeutung ist es also bei Produktions-Prozessen, welche durch ionische Kontamination negativ beeinflusst werden können, schnittkanten-dekontaminiertes Reinraum-Papier einzusetzen. Die nachstehenden Merkmale sind normalerweise untergeordnet aber nicht unwichtig:

- geringe Triboelektrizität
- hohes Maß an Tonerhaftung
- hohe Reißfestigkeit
- gute Laufeigenschaften in Druckern

Um die beiden erstgenannten Anforderungen zu erfüllen, wird die Oberfläche von Reinraum-Papieren bei einigen Hersteller mit einem Polyelastomer beschichtet, welches die Partikel auf der Papier-Oberfläche bindet und so die Partikelfreisetzung stark reduziert. Unseres Wissens bietet lediglich ein Hersteller Papier an, dessen Schnittkanten zusätzlich dekontaminiert sind. Dort befinden sich normalerweise jedoch die größten Partikelmengen. Je mehr Polyelastomer auf die Oberfläche aufgetragen wird, desto geringer wird der Partikelabrieb durch die Flächenreibung im Einsatz sein und somit auch die Partikelfreisetzung bei der Handhabung. Andererseits kommt es durch das Polyelastomer stets zu einer gewissen Erhöhung der triboelektrischen Aufladbarkeit und dadurch auch zu elektrostatisch bedingter Gleithemmung beim Papiertransport.

Die Beschichtung von Reinraum-Papieren hat deutliche Auswirkungen auf die triboelektrische Oberflächen-Ladung derselben beim Druckvorgang. Um den Nachweis dafür zu erbringen, wurde in einem Laser-Drucker oberhalb des Papierstapels ein Gerät zur Messung von Oberflächen-Ladungen nach dem Prinzip der Feldmühle befestigt. Beim Druckerbetrieb ergaben sich die Diagramme der Abbildungen 26 und 27. Dabei zeigt sich, dass z. B. Reinraum-Papiere mit einer Latex-Beschichtung durch die Bewegung im Drucker erheblich höher aufgeladen werden, als solche mit einer PVA-Beschichtung.

Die Gleithemmung

Die Ursache für Probleme mit dem ungehinderten Papierlauf im Drucker oder Kopierer ist zumeist eine zu hohe Gleithemmung zwischen den im Papierstapel eng übereinander liegenden Blättern. Für eine zu hohe Gleithemmung gibt es generell mehrere mögliche Ursachen:

- zu hohe Oberflächenhaftung infolge triboelektrischer Flächenladung, insbesondere bei geringer relativer Feuchte der Umgebung.
- zu geringe Entladung der verfahrensbedingten Corona-Ladung des Papiers im Drucker während des Papiertransports.
- zu hoch eingestellter Anpressdruck des Papier-Vorschubs am Drucker oder Kopierer.

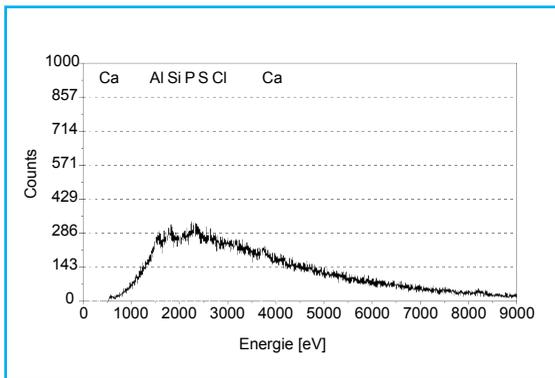


Abb. 28 Ionenarmes Reinraum-Papier (EDX-Analyse).

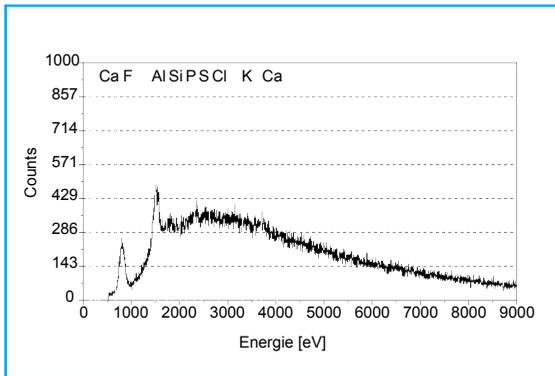


Abb. 29 Reinraum-Papier mit zwei deutlichen Peaks (Al und F) (EDX-Analyse).

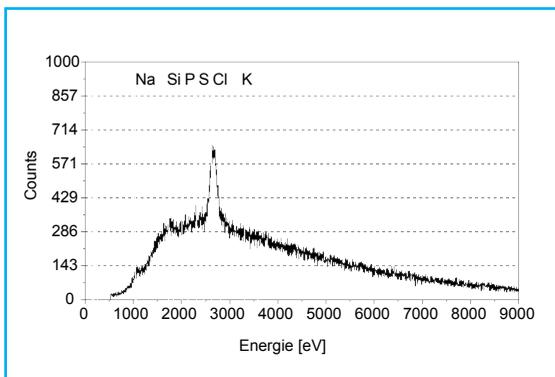


Abb. 30 Reinraum-Papier in 2 % NaCl-Lösung getaucht und getrocknet (EDX-Analyse).

- zu hoher Reibungskoeffizient zwischen den einzelnen Blättern (Oberflächenrauigkeit).
- zu geringe Aushärtung der auf das Papier aufgetragenen Polyelastomerschicht (sehr selten).

Folgende Materialeigenschaften des Papiers als auch die Prozessparameter sind für einen einwandfreien Papierlauf im Drucker oder Kopierer bestimmend:

- Oberflächenrauigkeit
- Reibungsgeschwindigkeit
- Anpressdruck
- Adhäsion
- Materialfeuchte
- Dichte
- Temperatur
- triboelektrische Aufladbarkeit
- prozessbedingte Vorladung
- elektrische Entladung des Papiers beim Papiertransport.

Die triboelektrische Aufladbarkeit des Papiers ist also nur eine von vielen Einflussgrößen, welche den Parameter Gleit-hemmungen bestimmen. Es reicht zur Analyse zu hoher Gleit-hemmungen nicht aus, das Problem z. B. durch Messung des Oberflächenwiderstands der Papiere erklären zu wollen. Viel öfter als die triboelektrischen sind es nämlich erfahrungsgemäß gerätespezifische Probleme, welche zu Störungen im Papierlauf führen.

Es ist jedoch wahrscheinlich, dass bei triboelektrisch geladenen Papieren zwischen Oberflächenwiderstand und Abklingzeit des Ladungsimpulses durchaus eine deutliche Beziehung besteht. Sowohl der Aufsatz von Malinverni [Lit. 7] als auch die Ergebnisse diverser Prüfungen im Clear & Clean - Forschungslabor, aber auch die Arbeit von Curt Raschke [Lit. 3], bestätigen dieses Phänomen. Dabei zeigt sich, dass z. B. die Aufladbarkeit von Papieren mit zunehmendem Bestand an Chloranteilen im Papier deutlich abnimmt (siehe Abb. 24 und 25).

Um Reinraum-Papiere auf ihre ionische Reinheit hin grob zu prüfen, eignet sich besonders die Energiedispersive Röntgenanalyse (EDX) am Raster-Elektronen-Mikroskop. Dies wird deutlich durch die Abb. 28 bis 30. Während bei dem Papier der Abb. 28 keine Elementen-Peaks sichtbar werden, finden sich bei dem in der Abb. 29 gezeigten Papier aus einer außer-europäischen Fertigung ein deutlicher Aluminium- und auch Fluor-Peak. Wird ein Papier der Qualität wie Abb. 28 einige Minuten lang in einer 1-prozentigen NaCl-Lösung gebadet, anschließend getrocknet und dann mittels EDX analysiert, so findet sich im Diagramm ein markanter Chlor-Peak (Abb. 30). Die Ladungshöhe und Abklingzeit fallen dann erheblich

geringer aus als bei dem in Abb. 28 gezeigten Papier (siehe das Ladungsdiagramm in der Abb. 25 relativ zum Diagramm Abb. 24). Man muss bei Reinraumpapieren also möglicherweise die Alternative:

- höherer Ionengehalt oder
- höhere triboelektrische Ladbarkeit akzeptieren.

In den offenen Reinräumen der Halbleiter-Produktion bevorzugen viele Reinraum- Ingenieure aus den o. g. Gründen eher solche Papiere, die weniger ionenarm, jedoch an den Schnittkanten dekontaminiert sind.

Farbige Reinraum-Papiere

Reinraum-Papiere werden hauptsächlich als Laufprotokolle bei der Herstellung von Halbleitern oder Pharmazeutika eingesetzt. Eine weitere Anwendung ist die Anfertigung reinraumtauglicher Kopien von Betriebshandbüchern für im Reinraum aufgestellte Maschinen und Apparate. Manche Anwender bevorzugen die farbliche Markierung einzelner Seiten oder Kapitel innerhalb der Protokolle und setzen daher verschiedenfarbige Papiere ein. Solche Papiere müssen bei der Papier-Herstellung in der Bütte angefärbt werden. Für das Anfärben gibt es Farben, welche Metallionen enthalten und relativ lichtecht sind und solche die weniger Ionen enthalten und weniger lichtecht sind.

Wie bereits aufgeführt, ist der Ionengehalt von Papieren für den Einsatz in der Halbleiterfertigung prinzipiell unkritisch, solange sich von dem Papier keine Partikel lösen, welche dann die Metall-Ionen in die Fertigungs-Umgebung hinein transportieren. Allgemein betrachtet sollte der Einsatz verschiedenfarbiger Papiere jedoch schon deswegen vermieden werden, weil er zur Vermehrung von Lagerpositionen führt und eigentlich nicht nötig ist. Die Auffindbarkeit bestimmter Seiten im Laufprotokoll funktioniert auch ohne farblich markierte Seiten.

Zusammenfassung Reinraum-Papier

- Bei gleichen klimatischen Bedingungen konnten innerhalb der verschiedenen Fabrikate erhebliche Unterschiede der Impuls-Abklingzeit festgestellt werden. Gründe dafür sind unterschiedliche Dichte, Oberflächen - Beschaffenheit, Polymerauftrag und ionische Papier-Bestandteile.
- Wird ein Standard-Reinraum-Papier kurzzeitig in einer 0,1%igen NaCl-Lösung gebadet und anschließend getrocknet, so sind Ladungshöhe und Abklingzeit erheblich geringer als bei dem ungebäderten Standard-Reinraum-Papier. (Abb. 26 und 27)
- Die Ladungseigenschaften der wichtigsten, weltweit am Markt befindlichen Reinraum-Papiere variieren untereinander deutlich, aber in geringerem Maße als bei Reinigungstüchern. Die Ladungshöhe, gemessen mit Fallschlitten nach Ehrler, variiert zwischen dem Papier mit der größten im Verhältnis zu dem mit der geringsten Ladungsneigung im Verhältnis 1:3. Für die Impuls-Abklingzeit ist das Verhältnis etwa 1:5.

Vergleichende Prüfungen

Wir wollten die Aufladbarkeit von Reinraum-Reinigungstüchern und Papieren zunächst durch Flächenreibung einer praxisnahen Prüfung unterziehen. Der Versuch sollte in etwa die Ladungsverhältnisse beim reinigenden Wischvorgang oder beim Papiertransport simulieren. Daher war es nötig, ein Instrumentarium zu schaffen, mit dem es möglich ist, unter stets gleichen physikalischen und Umgebungs-Bedingungen eine triboelektrische Ladung herbeizuführen und diese zu messen. In diesem Zusammenhang erschien uns der beim Institut für Textil- und Verfahrenstechnik in Denkendorf entwickelte Triboelektrik-Fallschlitten nach Ehrler (Abb. 32) das geeignete Instrument. Wir bauten das Gerät nach Angaben von Herrn Dr. Peter Ehrler und seinen Mitarbeitern, Frau Schmeer-Lioe und Herrn Mavely, denen wir wertvolle Hinweise verdanken. Außerdem schafften wir ein Gerät der englischen Firma JCI an (siehe Abb. 30) welches flexible Flächengebilde aufnehmen kann und diese mit einer Corona-Ladung versieht. Das Abklingen dieser Ladung wird anschließend mit Hilfe einer Feldmühle gemessen und als Diagramm aufgezeichnet. Dieses Gerät zeichnet sich durch seine einfache Handhabung und gute Wiederholgenauigkeit aus.

Beschreibung der Abklingzeit - Messplatz JCI-155

(Abb. 31) In einem Metallgehäuse, bestehend aus einem oberen und einem unteren Teil, befindet sich eine Ausnehmung der Abmessungen 55 x 65 mm. Der Prüfling (6) wird so zwischen den oberen und unteren Teil des Metallgehäuses eingeklemmt, dass er membranartig aber ungespannt befestigt ist. Nach Inbetriebsetzen der Anordnung bewegt sich eine horizontal gelagerte Corona-Platte, welche in der Mitte mit einem Emitter (Drahtbündel) versehen ist, oberhalb des Prüflings und bewirkt dessen elektrische Ladung. Nach vollzogener Ladung des Prüflings schnellt die Corona-Platte innerhalb von 0,02 sec in ihre Ausgangsposition zurück und die abklingende Flächenladung wird mit Hilfe der Feldmühle oberhalb des Prüflings gemessen und auf der Speicherkarte eines Computers gespeichert.

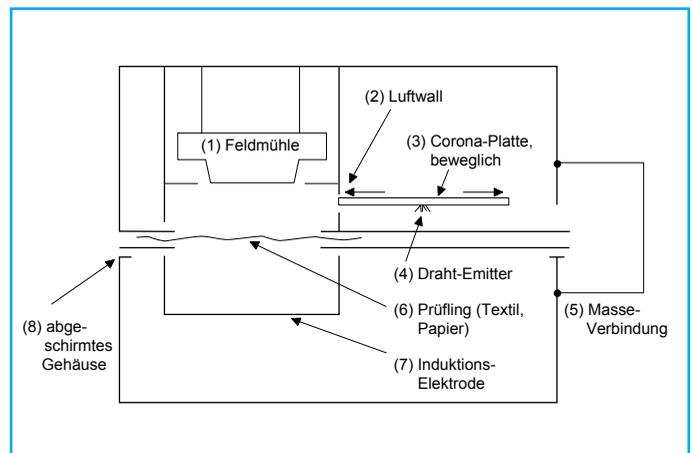
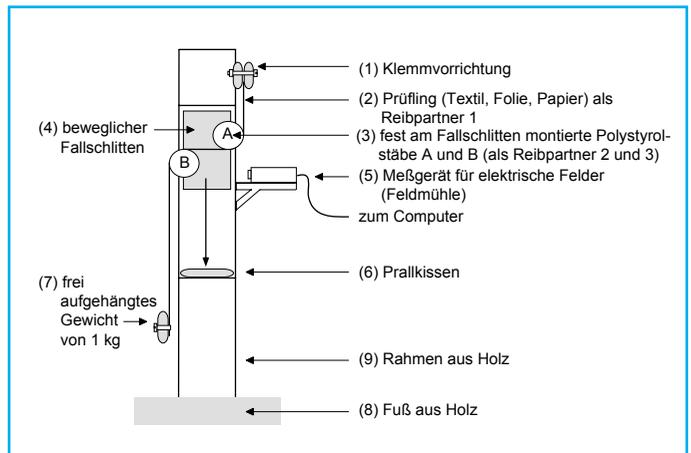


Abb. 31 Schema: Abklingzeit-Meßplatz JCI-155, Gerät zur Messung der elektrischen Ladungs-Kapazität nach Chubb.

Abb. 32 Schema: Fallschlitten nach Ehrler, Gerät zur Messung der triboelektrischen Ladung von flexiblen Flächengebilden.

Beschreibung des Fallschlittens nach Ehrler



Der Fallschlitten nach Ehrler (Abb. 32) besteht wegen der geringen elektrischen Aufladbarkeit des Materials Holz aus einem vertikal aufgebauten Holzrahmen, in welchem sich - ebenfalls aus Holz - ein vertikal geführter Fallschlitten (4) befindet. Fest mit dem Fallschlitten verbunden sind zwei Polystyrolstäbe (3) A und B mit einem Durchmesser von 15 mm. Anstelle von Polystyrol könnte hier auch ein anderes Polymer Einsatz finden. Der Fallschlitten ist in seiner Ausgangsstellung im oberen Teil des Holzrahmens gesichert. Zum Betrieb desselben kann er elektrisch entschult werden und fällt dann hinunter auf das Prallkissen (6). Das zu analysierende Reinigungstuch oder Papier (2) wird in einer Klemmvorrichtung (1) befestigt, welche sich am Kopfteil des Holzrahmens befindet. Anschließend wird das Papier vorsichtig um die Polystyrolstäbe gelegt, ohne dabei eine Reibung zu bewirken, welche unerwünschte elektrische Ladungen erzeugen könnte. An das freie Papierende wird ein Gewicht (7) geklemmt, welches allein mit Hilfe der Gravitationskräfte den innigen Kontakt zwischen Papier und den beiden Polystyrolstäben sicherstellt. Nachdem das Einlegen des Prüflings in den Fallschlitten abgeschlossen ist und die Feldmühle (5) sowie das nachgeschaltete Instrumentarium eingeschaltet wurden, beginnt die eigentliche Prüfung.

Durchführung der Prüfungen

Von jedem Reinigungstuch und Papier wurden 5 Prüflinge geschnitten und für die Dauer von 12 Stunden bei einem Prüfklima von 40% relH bei + 22° C gelagert. Anschließend wurden die Prüflinge nacheinander in den Fallschlitten oder den JCI-Messplatz eingelegt, aufgeladen und gemessen. Die Geräte befanden sich dabei in der Klimakammer. Die beim Betrieb der Geräte am Reinigungstuch oder Papier entstehenden Ladungen und nachfolgenden Abklingphasen wurden oszillographisch oder datentechnisch registriert (Abb. 33 bis 36). Die Daten wurden ausgewertet und tabellarisch erfasst. Auf diese Weise entstand eine Übersicht über die mögliche elektrostatische Aufladbarkeit sowohl der Reinraum-Reinigungstücher

Prüfergebnisse für Reinraum-Reinigungstücher (Gestricke)

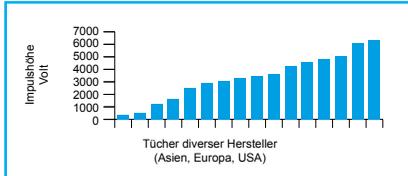


Abb. 33 Impulshöhe Gestricke

Prüfergebnisse für Reinraum-Reinigungstücher (Vliesstoffe)

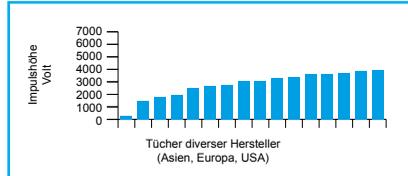


Abb. 35 Impulshöhe Vliesstoffe

Prüfergebnisse für Reinraum-Papiere

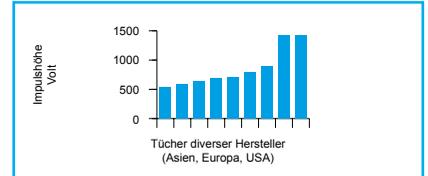


Abb. 37 Impulshöhe Papiere

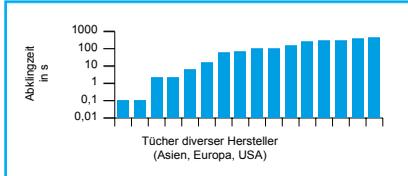


Abb. 34 Abklingzeit Gestricke

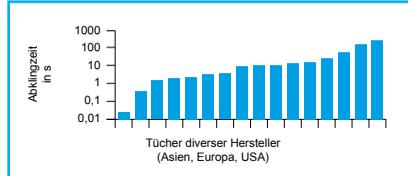


Abb. 36 Abklingzeit Vliesstoffe

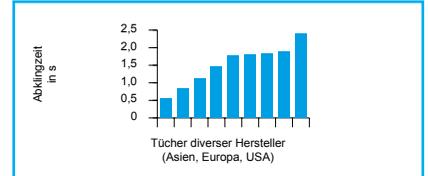


Abb. 38 Abklingzeit Papiere

als auch der Reinraum-Papiere verschiedener Hersteller unter in Reinräumen üblichen Feuchtebedingungen.

Zwischen dem Fallschlitten nach Ehrler und dem Corona-Ladegerät nach Chubb bestehen einige grundsätzliche konstruktive Unterschiede, sodass sich bei den Messungen auch unterschiedliche Impulshöhen und Abklingzeiten ergeben (Abb. 39). Die Unterschiede erklären sich möglicherweise daraus, dass bei dem Fallschlitten nach Ehrler der Prüfling von beiden Seiten geladen wird und bei dem Corona-Ladegerät nach Chubb nur einseitig. Wohl unterscheiden sich die Prüfdaten für gleiche Materialien zwischen den beiden Systemen Ehrler und Chubb voneinander, aber wir müssen bei triboelektrischen Ladungs- und Entladungs-Phänomenen und Zeiten stets berücksichtigen, dass wir niemals an physikalisch-chemisch reinen Oberflächen messen, sondern jedes Textil und Papier bereits im molekularen Sinne „vorbeschichtet“ ist. Der Vorteil des Corona-Ladegerätes nach Chubb sind seine leichte Bedienbarkeit und die unkomplizierte und schnelle elektronische Datenverarbeitung.

Anmerkungen zu den Ladungs-Diagrammen

In den Abb. 33 bis 38 sind eine Reihe der interessantesten Ladungsdiagramme abgebildet, welche die in der Zusammenfassung gebrachten Schlussfolgerungen unterstützen. Das

	System - Ehrler		System - Chubb		Ehrler / Chubb	
	Impulshöhe in kV	Abklingzeit bis 0 kV in sec.	Impulshöhe in kV	Abklingzeit bis 0 kV in sec.	Quotient Impulshöhe	Quotient Abklingzeit
Mikrofasergestricke	3,4	479	2,4	> 1000	1,41	0,47
Polyestergestricke	3,5	251	2,2	45	1,59	5,57
PES / Cellulose-Vliesstoff	3,7	78	1,8	3,5	2,05	22,30
Viskose Vliesstoff	3,7	1,2	1,1	0,9	3,36	1,33

Abb. 39 Impulshöhen und Abklingzeiten im Vergleich: Systeme Ehrler und Chubb

Diagramm Abb. 15 zeigt den prinzipiellen Ablauf aller folgenden Diagramme (Abb. 19 bis 25):

Beim Hinabfallen des Fallschlittens kommt es zur spontanen Ladung des Prüflings mit nachfolgender Abklingphase. Die verschiedenen, am Markt befindlichen Reinigungstücher und Papiere für Reinraum-Einsatz unterscheiden sich voneinander durch erhebliche Unterschiede sowohl in der gemessenen Impulshöhe als auch in der Abklingzeit. Je höher diese beiden Werte sind, desto geringer ist die „triboelektrische Güte“ des betreffenden Produktes. In der Abb. 22 wird gewissermaßen ein „Standard“-Ladungsdiagramm von einem Polyester-Gestricke abgebildet, aus dem alle Chemikalien entfernt wurden, welche normalerweise dort eingebracht sind, um das Reinigungstuch wasseraufnahmefähig zu machen. Dabei zeigte sich im Fallschlittentest ein Ladungsimpuls von 8636 V bei einer Abklingzeit von 195 s.

Aus der Abb. 21 geht deutlich hervor, dass eine veränderte Ausrüstung des Reinigungstuchs der Abb. 20 mit einem anderen Tensid nicht nur eine Verringerung der Ladungsimpulshöhe sondern sogar eine Umkehr der Ladungspolarität bewirken kann. Auf diese Weise ist es bei der Herstellung von Hightech-Tüchern möglich, die Tensid-Ausrüstung so zu wählen, dass die Höhe der Ladungsimpulse erheblich vermindert oder sogar auf null reduziert wird. Dabei gilt es zu beachten, dass Tensideinträge zumeist auch Ionen in das Reinigungstuch hineinbringen, welche dort unerwünscht sind. Das gilt auch für sog. nichtionische Tenside. Der Auswahl geeigneter Tenside und Eintragsmengen kommt also eine große Bedeutung zu.

In Abb. 18 wurde bereits gezeigt, dass ein feuchtes Reinigungstuch beim Wischen keine Ladung erzeugt. Diese Tatsache führt jedoch gelegentlich zum lässigen Umgang mit solchen Reinigungstüchern, die zwar vor dem Reinigungsvorgang angefeuchtet werden, danach jedoch nicht über die ganze Fläche homogen getränkt sind. Die trocken gebliebenen Stellen haben eine verbleibende triboelektrische Wirkung. Diese Tatsache ergibt sich aus den Diagrammen der Abb. 22 und 23. Die Abb. 22 zeigt das Ladungsdiagramm eines trockenen Vliesstoff-Reinigungstuchs aus Polyester- und Zellstofffasern etwa zu gleichen Teilen. Bei Abb. 23 handelt es sich um das Ladungs-Diagramm des gleichen Reinigungstuchs, jedoch im teilgefeuchteten Zustand.

Die Autoren

Lodevicus Hermans ist Diplom-Physiker und beratender Ingenieur für Reinraum-Technik.

Win Labuda ist Gründungs-Gesellschafter und technischer Geschäftsführer der Clear & Clean GmbH in Lübeck.

Literatur

- [1] Meß- und Überwachungstechnik zur Elektrostatik im Rahmen der Qualitätssicherung in Reinen Arbeitsbereichen. Thomas Sebald, VDI-Berichte Nr 1095 – aus 1994
- [2] Test method to assess the suitability of materials and surfaces to avoid problems from static electricity by measurement of capacitance loading, J.N.Chubb, JCI – 10//2001
- [3] Tribo-Electricity, "Background" toner deposition and the surface chemistry of some papers. Curt R. Raschke, Adressograph Corp. Warrensville Heights, Ohio, USA
- [4] Elektrostatische Ladungen – Ursachen und Beseitigung. Günter Lüttgens, Pierre Boschung - expert Verlag Grafenau, Württ.
- [5] British Journal of Applied Physics, 18-1967, R.G. Arridge
- [6] Dechema-Monographien Band 72, H. Bauser, Verlag Chemie Weinheim -1974
- [7] Surface Resistivity: why? - Grace Italiana Spa. Tagungsband 2 – ESD-Forum 1991 - Pierpaolo Malinverni, VP-Verlag Herrenberg
- [8] Evaluating wiping materials used in cleanrooms and other controlled environments, T. Textor, T. Bahners, E. Schollmeyer, Deutsches Textil-forschungszentrum Nord-West e.V., Krefeld, Germany - Institute of Essen-Duisburg University, 41st WFK Detergency Conference, Düsseldorf, May 2003
- [9] Elektrostatik, ein häufig unterschätzter Qualitätsfaktor in der Reinraumtechnik. Thomas Sebald, VDI- Berichte Nr 919 - aus 1992
- [10] Untersuchung der triboelektrischen Eigenschaften von Verpackungsfolien Tagungsband 2 -ESD Forum 1991 -R. Gärtner, H. Schmeer, VP-Verlag Herrenberg
- [11] Ladungsverteilung auf Isolierstoff Oberflächen bei elektrostatischer Aufladung in Luft. - Dietrich Königstein, Dissertation bei der Bundeswehr-Hochschule in Hamburg.
- [12] Electrostatic measurement for Processcontrol, H. Baumgärtner, EOS-ESD Symposium, EOS-6, Oct 1984
- [13] ESD-analysis of masking tape operations, H. Baumgärtner, EOS-ESD Symposium, EOS-7, Sept 1985
- [14] Das elektrostatische Verhalten als funktionale Eigenschaft und als Qualitätsmerkmal textiler Flächengebilde, Ehrler, P., Schmeer-Lioe, G., Textil-Praxis International 46 (1991)
- [15] Maßnahmen zur Einhaltung eines unkritischen elektrostatischen Verhaltens bei technischen und funktionalen Mehrweg-Textilien, Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf, Forschungsbericht, AIF-Forschungsvorhaben Nr.10580, 1998

Anmerkung und Dank

Der 1. und 3. Teil dieses Aufsatzes sind Neubearbeitungen der Arbeit „Triboelektrische Effekte beim Einsatz von Reinraum-Tüchern und Papier“ von Win Labuda, erschienen im VDI-Tagungsband der VDI-Tagung „Reinraumtechnik 1997 – Qualifizierung und Überwachung – Reinraum und Reinstmedien“ in Fulda.

Diese Arbeit ist Herrn Dr. Peter Ehrler in Dankbarkeit für seinen Beitrag zur Reintechnik gewidmet.

Herrn Sven Siegmann vom Clear & Clean-Forschungslabor sei Dank für die Durchführung einiger der für diesen Aufsatz notwendigen physikalischen Prüfungen.