



ESD

de ontzichtbare vijand

bliksem bij heldere hemel vernielt componenten

Figuur 1. Het tragische ongeval bij het afmeren van de Hindenburg in Lakehurst (foto: Sam Shere).

Peter Beil (Duitsland)

Naarmate de structuren op de nieuwste chips kleiner en kleiner worden, worden ze steeds kwetsbaarder voor beschadiging door elektrostatische ontlading. Laten we eens nader bekijken waar het allemaal om draait en hoe we dit potentiële gevaar kunnen verminderen.

De transatlantische reis van het luchtschip Hindenburg in 1937 eindigde in een catastrofe. Toen het de meermast in Lakehurst, Amerika, naderde, vloog 200.000 kubieke meter waterstof, gebruikt om de Hindenburg in de lucht te houden, in brand (**figuur 1**). Er is nooit een officiële oorzaak gevonden, maar veel experts vermoeden dat dit het gevolg was van een ontlading van statische elektriciteit tussen de constructie van het luchtschip en de stalen meermast. De juiste term voor dit soort gebeurtenissen is ESD (*electrostatic discharge*) – elektrostatische ontlading dus.

Wat is ESD?

Bij ESD gaat het om de plotselinge elektrische ontlading tussen twee objecten of lichamen met verschillende elektrische lading. Het ladingsverschil wordt geneutraliseerd wanneer de twee lichamen dicht genoeg bij elkaar komen om een ontlading te veroorzaken die vaak een vonk en een knetterend geluid produceert. Een veelgebruikte methode om een object een elektrische lading te geven, is wrijving met een ander materiaal, het zogenaamde 'tribo-elektrische effect'. Dit hebt u vast wel eens beleefd als de luchtvochtigheid laag is en u uw haar kamt of

borstelt. Lopen over een synthetisch tapijt of uitstappen uit uw auto zal ook een lading op uw lichaam veroorzaken. Wanneer u dan uw hand uitstrekt en een ander geleidend object of een deurklink aanraakt (**figuur 2**) met een ander ladingsniveau, kunt u de ontlading via uw vingers voelen wanneer de beide ladingsniveaus elkaar neutraliseren. De vonk die werd gegenereerd toen de Hindenburg aanmeerde, heeft vermoedelijk het licht ontvlambare gas ontstoken. Met zijn grote oppervlak en ten gevolge van wrijving met de lucht, had het spanningsverschil tussen het oppervlak van de zeppelin en de mast gemakkelijk een paar honderdduizend volt kunnen bedragen en met een behoorlijk sterke ontlad-piekstroom tot gevolg.

Op kleinere schaal kunt u dit verschijnsel elke dag opmerken wanneer u bijvoorbeeld een katoenen trui uittrekt die u over een synthetisch hemd draagt – u hoort een duidelijk knetterend geluid. De spanningsverschillen die hierdoor worden gegenereerd, kunnen gemakkelijk oplopen tot enkele kV. 's Nachts kunnen uw donker-geadapteerde ogen dit zien, zelfs bij een ontlading van 5 kV. Sneakers of trainingschoenen zijn bijna altijd gemaakt van synthetisch materiaal; wanneer u daarmee over een harde plastic vloer loopt, kan dat resulteren in een lading van 15 kV; een tapijt kan het niveau opvoeren tot 25 kV. Bij onze normale dagelijkse bezigheden zullen onze bewegingen een zekere hoeveelheid lading genereren. Dat is vooral lastig als de luchtvochtigheid laag is, bijvoorbeeld in ruimtes met airconditioning of in verwarmde omgevingen in de winter. Meestal merkt u het niet, maar door gewoon op te staan van en weer gaan zitten in een stoel kan al snel een spanningsverschil van 15 kV ontstaan. U merkt pas een ontlading vanaf één punt op uw lichaam als het potentiaalverschil groter is dan 2000 tot 3000 V. Ontladingen met een lagere spanning blijven meestal onopgemerkt.

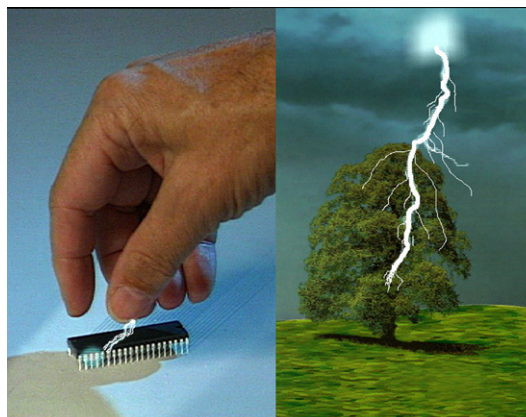
Wanneer we een paar van die waarden in het standaard HBM (**H**uman **B**ody **M**odel) [1] invullen, zien we dat het elektrisch equivalente model van een menselijk lichaam een capaciteit heeft die ergens tussen 100 en 300 pF ligt. Uitgaande van een gemiddelde huid-contactweerstand van ongeveer 1,5 kΩ kunnen we bij ontlading een spanningsverschil van 15 kV verwachten die gedurende enkele tientallen nanoseconden een piekstroom tot 10 A kan genereren.

De impact op elektronica

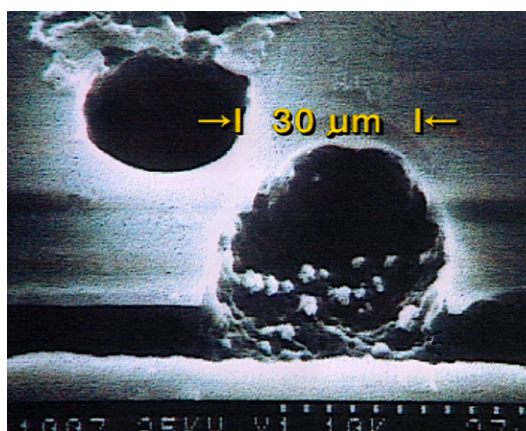
Al deze ongewenste ontladingen zijn natuurlijk relevant voor elke engineer of maker die met elektronische laagspanningscomponenten werkt. Hoewel we ons er misschien niet van bewust zijn, kunnen ontladingen die we zelf niet of nauwelijks waarnemen een catastrofaal effect hebben op kleine elektronische structuren. Onzorgvuldige omgang heeft al ontelbare chips ter dood veroordeeld. Het met blote handen aanraken van een modern IC kan resulteren in een destructieve ontlading van statische elektriciteit in de component. Opgeschaald komt dit overeen met een bliksem die in een boom inslaat (**figuur 3**). Het is natuurlijk niet alleen het spanningsniveau dat relevant is; we moeten kijken naar de elektrische energie die vrijkomt tijdens de ladingsvereffening. Een elektrostatische ontlading duurt slechts een paar nanoseconden, maar de kleine structuren aan de ingangen van een IC zijn slechts enkele micrometer groot. Bij 15 kV en 150 pF komt dit neer op een energie van ongeveer 17 mW die is opgeslagen in de menselijke condensator, conform de formule $E = \frac{1}{2} C \times V^2$. Hoewel dit niet veel is, resulteert de hoge ontladingssnelheid in een zeer hoog



Figuur 2. Ladingsdissipatie kan pijnlijk zijn. Raak die klink niet aan! (Deze en andere foto's: Beil & Kaiser)



Figuur 3. Een geladen vinger kan hetzelfde effect hebben op een IC als een geladen wolk op een boom.



Figuur 4. Elektronenmicroscop-opname van de schade die is aangericht door een ESD.

instantaan elektrisch vermogen in het kW-bereik, wat neerkomt op een zeer hoge vermogensdichtheid door de kleine structuren. Als u door een elektronenmicroscop de ESD-schade bekijkt, ziet u doorgebrande verbindingen, kraters en verkoolde restanten van de kleine explosie die op het silicium plaatsvond (**figuur 4**), wat doet denken aan een miniatuur-blikseminslag. Overigens vormen deze gevaren niet alleen een bedreiging voor sterk geïntegreerde IC's, waar we nu structuren in het nanometerbereik fabriceren, maar ook voor diodes, LED's, MOSFET's en zelfs vermogenshalfgeleiders. Veel actieve elektronische componenten kunnen vernield worden door 'kleinere' spanningsontladingen rond 1 kV die we zelf niet kunnen waarnemen. Dat is de reden waarom dergelijke schade



Figuur 5. Een ESD-veilige werkplek met alle beschermingsmaatregelen.



Figuur 6. Het officiële ESD-logo.

vaak onopgemerkt blijft... De gevolgen zijn vrij duidelijk wanneer een compleet onderdeel defect raakt, maar als slechts een deel van een IC of een bepaalde functie wordt aangetast, kan de schade langer verborgen blijven. Dit kan later ernstige levensbedreigende gevolgen hebben wanneer het beschadigde onderdeel in gebruik is, bijvoorbeeld in veiligheidskritische toepassingen zoals lasermonitoring-apparatuur die wordt gebruikt tijdens delicate hartprocedures of om de activering van airbags te sturen wanneer uw auto betrokken is bij een botsing.

Pas op voor ESD

Om de schade te verminderen die ESD-events bij elektronische apparaten kunnen veroorzaken, is het belangrijk dat iedereen die met componenten werkt zich bewust is van de gevaren, en passende maatregelen neemt om het probleem tegen te gaan. In een chipfabriek is elke stap in het fabricageproces, van waferproductie tot back-end tot en met het testen van componenten, zo opgezet dat elke kans op schade aan componenten door ladingsophoping wordt uitgesloten. De uiteindelijke chip kan worden gebruikt in een veiligheidskritisch controlesysteem waar de betrouwbaarheid van het apparaat van vitaal belang is. Zelfs thuis in het hobbylab kan een goed besef van het ESD-fenomeen frustratie en onverwachte chip-uitval helpen reduceren.

Omdat het probleem zo belangrijk is, nemen fabrikanten en ontwerpers van halfgeleiders passende maatregelen om enige bescherming in het chipontwerp in te bouwen. Dit staat bekend als 'ESD-hardening' en maakt gebruik van beschermingsschakelingen die in het chipontwerp zijn geïntegreerd. U kunt echter alleen bescherming bieden tegen bepaalde ESD-gebeurtenissen. Naarmate het aantal componenten op de chip toeneemt en de structuren bij elke nieuwe chipgeneratie kleiner worden, worden de afstanden tussen de structuren op de chip kleiner en gevoeliger voor ESD-schade. In het geval van microcontrollers worden ook externe klemschakelingen op basis van suppressordiodes gebruikt. Net als zenerdiodes beginnen deze te geleiden wanneer een ingangssignaal het gespecificeerde bovenste of onderste ingangsniveau nadert. Ze reageren snel en kunnen relatief hoge ladingsniveaus veilig afvoeren. Helaas garanderen zelfs die oplossingen geen honderd procent bescherming. In Elektor is hierover al een uitgebreid artikel verschenen [2].

Een basisvereiste bij het werken met hooggeïntegreerde IC's is een

speciale ESD-beschermde zone. In deze omgeving worden maatregelen genomen om het ontstaan van statische ladingen te voorkomen en ervoor te zorgen dat deze veilig en gecontroleerd naar het aardpotentiaal worden afgevoerd (**figuur 5**). Deze zone mag alleen worden betreden door naar behoren opgeleid en uitgerust gespecialiseerd personeel en is gemarkeerd met het logo van **figuur 6**.

ESD-beschermde zones zijn doorgaans uitgerust met een geleidende, 'geaarde' vloerbedekking. Stellingen en werkoppervlakken hebben allemaal lekweerstand <100 kΩ om plotselinge veranderingen in laadniveaus af te zwakken en ervoor te zorgen dat eventuele lading langzaam wordt afgebouwd. Materialen met een lage oppervlakteweerstand helpen de opbouw van statische elektriciteit te minimaliseren en de aardingsmaatregelen zorgen ervoor dat de lading weglekt naar het aardpotentiaal.

Verplaatsbare rekken, trolleys en stoelen hebben geleidende oppervlakken en geleidende zwenkwielen. Hetzelfde geldt voor gereedschappen zoals soldeerbouten en dergelijke. Geïsoleerde kunststof handgrepen op handgereedschap kunnen grote potentiaalverschillen veroorzaken. Hier worden daarom elektrostatisch geleidende materialen aanbevolen, deze zorgen voor een goed gedefinieerd ladingsvereffeningsproces tussen hand, gereedschap en component.

Waar we op moeten letten is dat deze geleidende gereedschappen niet geschikt zijn voor gebruik met spanningen >25 V, wat betekent dat ze in Duitsland niet VDE-compatibel zijn!

Pincetten en ander puntig gereedschap verdienen speciale aandacht; de vorm van de punt veroorzaakt een concentratie van elektrische ladingsdragers op een klein oppervlak die zelfs bij relatief lage spanningsniveaus kan leiden tot ontladingen en vonken. Bij het werken met gevoelige componenten is een polsband (**figuur 7**) die is verbonden met een gespecificeerd aardpunt essentieel.

In sommige omgevingen, zoals cleanrooms, is het gebruik van bepaalde materialen die elektrische lading kunnen verzamelen, om procestechnische redenen onvermijdelijk. Elke lading die zich op deze niet-geleidende oppervlakken opbouwt, kan worden geneutraliseerd door ionisatoren in het airconditioningsysteem; de lading kan niet worden verwijderd met behulp van conventionele aardingsmethoden (**figuur 8**). Het gebruik van geïoniseerde lucht is alleen een aanvulling op en nooit een vervanging van conventionele ESD-beschermingsmaatregelen!



GERELATEERDE PRODUCTEN

- > **Bernstein 4-620 ESD Screwdriver set (6 pieces)**
www.elektor.nl/bernstein-4-620-esd-schroevendraaierset-6-stuks
- > **Bernstein 2100 ESD Tool Holder VARIO (holds 6 tools)**
www.elektor.nl/bernstein-2100-esd-tool-holder-vario-6-tools

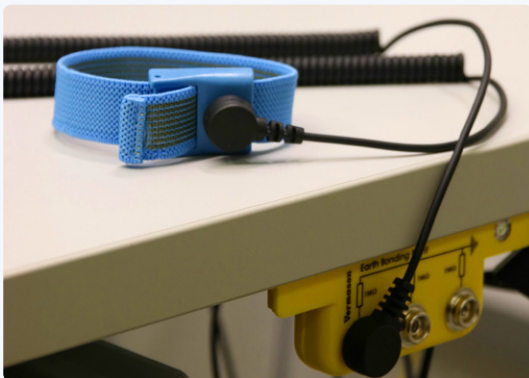
Beveiligen van PCB-assemblage

Bij geautomatiseerde PCB-productie zullen componentenplaatsingsmachines elke onnodige beweging of verschuiving van componenten vermijden die een lading op het component kan veroorzaken. Tegenwoordig worden voornamelijk machines gebruikt die zijn gebaseerd op de 'pick-and-place'-montagemethode: hier wordt de component met een gripper opgepakt en op de print gemonteerd. Sensoren in de gripper kunnen de componenteigenschappen daarbij meten en alle die buiten de specificaties vallen, afwijzen.

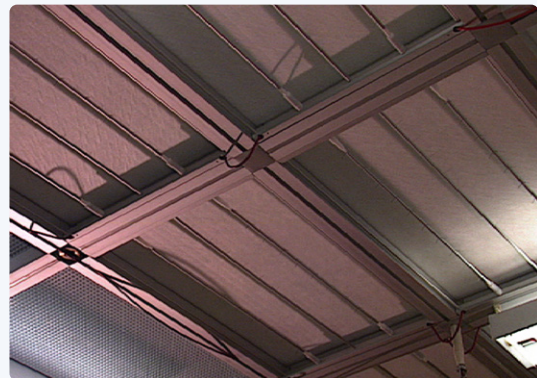
Iedereen die een ESD-veilige zone wil betreden, wordt alleen toegelaten als hij geschikt schoeisel en speciale werkkleding draagt. Om ervoor te zorgen dat alle werknemers daaraan voldoen, is er meestal een toegangscontrole. Toegang is pas mogelijk nadat de geleidbaarheid van de persoon is gemeten. Door op een vloerplaat te stappen en een hand op een paneel te plaatsen (**figuur 9**), wordt deze geleidbaarheid gemeten en en krijgt men al dan niet toegang. Bezoekers van het gebied kunnen worden voorzien van een afvoerband voor hun schoenen en een katoenen werkjasje. Deze jas dient overigens helemaal gesloten te zijn. Statische elektriciteit kan als het ware worden opgesloten: elke lading zal aan de binnenkant van de overall worden vastgehouden.

Er gelden speciale beperkingen in productieruimtes voor halfgeleiders in een cleanroom-omgeving. Hier moet men een pak dragen dat het hele lichaam bedekt (behalve ogen en handen). Geleidende koolstofvezels zijn in het materiaal geweven waaruit deze pakken zijn gemaakt (**figuur 10**). Het kan ook nodig zijn om dissipatieve (lading-afvoerende) vingerkapjes of handschoenen te dragen.

Er zijn andere situaties waar ongewenste ESD-events zichtbaar of zelfs hoorbaar kunnen worden: kleinbeeldfilm bestaat uit een opgewikkelde plastic drager die bedekt is met een lichtgevoelige emulsie. In droge omstandigheden kunnen er kleine ontladingen op het oppervlak optreden als de film wordt afgewikkeld en de oppervlakken van elkaar loskomen. Deze lichtflitsjes zullen op de afdruk verschijnen wanneer de film wordt ontwikkeld. Iets soortgelijks kan gebeuren bij het opnemen van geluid op magnetische band, vooral bij gebruik van



Figuur 7. Geaarde polsband.



Figuur 8: Ioniserende ventilatoren in het plafond van een chipfabriek.



Figuur 9. Geleidbaarheidscontrole bij het toegangspoortje van een EPA.



Figuur 10. Een cleanroom-omgeving.

hoge bandsnelheden en breed bandmateriaal. Dit kan resulteren in een krakerig geluid op de opname dat kan worden verwijderd met een laagdoorlaatfilter in het audiopad. Terug naar de elektronica... ESD-events zijn van voorbijgaande aard en het is pas echt mogelijk geworden om hun stroom- en spanningsprofielen met de komst van snelle geheugen-oscilloscopen met bemonsteringsfrequenties >1 GHz. Bemonsteringsintervallen van <1 ns zijn vereist omdat de gebeurtenissen zo kort duren. Veldsterktes kunnen onder andere worden gemeten met een elektrostatische veldmeter. Al deze metingen worden beschreven in de specificatie [3].

ESD en kleine labs

Makers en andere gebruikers van kleinere elektronicalabs zullen zich afvragen of ze dit onderwerp echt zo serieus moeten nemen. Laten we duidelijk zijn: thuis gelden dezelfde natuurkundige wetten als in de productiehallen van de grote industrie. Beknibbel daarom niet op uw ESD-beschermingsmaatregelen. Wees u bewust van de gevaren. U hoeft niet dezelfde technische en financiële investeringen te doen als de 'grote jongens', maar door deze gouden regels te volgen, verkleint u in ieder geval de kans op schade:

- Zelfs in een klein elektronicalab kunt u de vloer 'onschadelijk' maken met een geaarde geleidende vloermat.
- Hetzelfde geldt voor het werkblad, waarop u een redelijk goedkope geleidende mat kunt leggen.
- Een polsband is een levensverzekering voor gevoelige componenten en moet worden aangesloten op een gemeenschappelijk aardpunt.
- Elke degelijke soldeerbout (zelfs een goed hobby-exemplaar) moet een aardverbinding hebben; ook zijn er gereedschappen verkrijgbaar met handvatten die statische lading afvoeren.
- Wees extra voorzichtig bij het gebruik van scherpe pincetten.
- Alles wat beweegt (krukken, stoelen, rolkasten of verplaatstbare stellingen) moeten zijn voorzien van geleidende ESD-zwenkwielen.
- Gevoelige componenten worden geleverd in een geleidende verpakking en dienen daarin te blijven tot ze worden gemonteerd.
- Zorg ervoor dat er geen gaten of scheuren in de ESD-beschermzakken of opbergdozen zitten.

Een veilige ESD-strategie is ervoor te zorgen dat zodra een onderdeel uit de beschermende verpakking is gehaald, het zo min mogelijk wordt verplaatst en er natuurlijk geen contact wordt gemaakt met de aansluitdraden, -pootjes of -pads. Alleen al door componenten op een niet-geleidend oppervlak te leggen, kan er – in het ergste geval – een potentieel schadelijk ladingsniveau worden gegenereerd. Er zijn geschikte pincetten en tangen beschikbaar voor het hanteren en

Belangrijkste begrippen

ESD	elektrostatische ontlading.
ESA	ESD-beveiligde zone.
ESDS	Gevoelig voor elektrostatische ontlading.
Cleanroom	Een gecontroleerde omgeving met een laag gehalte aan verontreinigingen zoals stof en microben in de lucht. Gebruikt voor de fabricage van halfgeleiderchips.
Wafer	Ronde schijf van silicium, het substraat waarop chips worden aangebracht.
Front End	Productiestap van een chip; doping van de halfgeleiderwafer om geleidende gebieden te produceren.
Back End	Productiestap van een chip; testen van de wafer, in afzonderlijke <i>dies</i> snijden en laatste test van de componenten.
HBM	Elektrisch model van het menselijk lichaam (Human Body Model).

monteren van componenten. U zult de investering in deze tools doet op termijn ruimschoots terugverdienen. Ook al ziet die er misschien cool uit, het is het beste om geen sportkleding te dragen; deze zijn stevast gemaakt van synthetisch materiaal. Kies overalls of jassen die zijn ontworpen om de opbouw van elektrische lading te voorkomen en zorg ervoor dat ze dichtgeknoopt zijn en bij het lopen niet wapperen. Houd uw werkplek schoon; maak werkden schoon, verwijder soldeerklodders, metaalspanen en maak regelmatig de wielen van uw stoel en de vloer schoon (niet poetsen).

Het gebruik van zeer complexe en miniatuurcomponenten in kleine elektronicalabs kan bijzonder frustrerend en onbevredigend zijn zonder de nodige hulpmiddelen om te helpen bij het hanteren ervan en het bouwen van schakelingen. Met een beetje geluk kan de hier gegeven informatie de levensduur van ten minste een of twee dure IC's helpen verlengen en de noodzaak van tijdrovend en irritant foutzoeken verminderen. ◀

200607-03

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de redactie van Elektor, via redactie@elektor.com.

Een bijdrage van

Tekst: **Peter Beil**

Redactie: **Dr. Thomas Scherer**

Vertaling: **Eric Bogers**

Layout: **Harmen Heida**

WEBLINKS

[1] **HBM**: https://en.wikipedia.org/wiki/Human-body_model

[2] **P. Krüger, "Actieve ESD-beveiliging", Elektor 1/2014**: www.elektormagazine.nl/magazine/elektor-201401/24271

[3] **ESD Association-standaarden**: www.esda.org/about-esd/esd-fundamentals/part-6-esd-standards/