

MICRO-ELEKTRONICA

door

Ir. A.J. Leenhouts

1. INLEIDING

Ofschoon het publiek gebruik van ruimtevaartuigen op zijn minst nog in het verre verschieft ligt is het wel interessant om zich eens af te vragen wat de kosten daarvan zouden zijn. Zonder enige pretentie van nauwkeurigheid mag het tarief voor het brengen van betalende lading in een baan om de aarde thans op ongeveer 150 gulden per gram gesteld worden. Afgezien van alle verdere overwegingen kunnen we daaruit de conclusie trekken dat de grootst mogelijke reductie van gewicht – en ook van volume – een dringende noodzaak is voor het gehele instrumentarium aan boord van een ruimtevaartuig. Daaronder valt ook de omvangrijke elektronische uitrusting, en het is begrijpelijk dat de drang tot miniaturisatie van dit toepassingsgebied uit een sterke impuls gekregen heeft, die tenslotte leidde tot het onderwerp van dit artikel: de micro-elektronica.

Het streven naar kleine afmetingen is op zichzelf geen nieuw verschijnsel, ook niet in de elektronica. Reeds vele jaren kennen we miniaturisaties van elektronische apparaten. Als voorbeeld kunnen we hierbij denken aan het hoorapparaat voor hardhorenden. Het was in de vijftiger jaren echter duidelijk geworden dat langs deze weg slechts in beperkte mate miniaturisatie mogelijk zou zijn. De drang tot verdergaande reductie van afmetingen was tegen 1960 zó groot geworden dat tot een radicaal andere aanpak moest worden overgegaan. Vermindering van gewicht en volume van de elektronische apparatuur was voor de ruimtevaart een eerste eis. Met energie diende ook spaarzaam omgegaan te worden. Bovenal gold echter de eis van betrouwbaarheid. Immers, een defect in de elektronische apparatuur kan de communicatie met de aarde of de bestuurbaarheid en de verrichtingen van het ruimtevaartuig belemmeren en daarmee de totale investering tot een kolossale verliespost maken, om nog niet te spreken van de mensenlevens die bij een bemande vlucht in gevaar kunnen komen.

Naar een voordracht gehouden voor de Koninklijke Maatschappij voor Natuurkunde "Diligentia" te 's-Gravenhage op 21 januari 1968.

Wat vóór 1960 op het gebied van de micro-elektronica gebeurde droeg een zuiver experimenteel karakter. Toen het bewijs van de praktische bruikbaarheid geleverd was kwamen omstreeks 1962 de eerste toepassingen. Als zodanig is het Amerikaanse ballistische projectiel "minuteman" algemeen bekend geworden. In die beginperiode waren er nog vrijwel geen micro-eenheden in de handel. Ze waren trouwens ook bijna onbetaalbaar. Sedertdien heeft zich deze techniek in een stormachtig tempo ontwikkeld. Het is een gelukkige omstandigheid dat de micro-elektronica de gewenste eigenschappen van betrouwbaarheid, gering volume en gewicht en bovendien lage kostprijs vrij volledig in zich verenigt. De hoge betrouwbaarheid wordt niet verkregen door het gebruik van componenten van bijzonder goede kwaliteit, doch door de geheel andere conceptie van de apparatuur. In een conventioneel uitgevoerd elektronisch apparaat met soms vele duizenden componenten zoals transistors, weerstanden, enzovoorts is een groot aantal soldeerpunten nodig voor de benodigde onderlinge verbindingen. Deze soldeerpunten vormen een gerenommeerde bron van storingen. Onder andere om deze reden is gezocht in de richting van verdergaande samenvoeging van elementaire componenten tot een eenheid van hogere orde, waaruit de discrete componenten niet meer afgezonderd kunnen worden. In plaats van "micro-elektronica" zou ons onderwerp daarom ook "geïntegreerde schakelingen" genoemd kunnen worden. Onder geïntegreerde schakeling wordt hierbij verstaan een samenstel van enige tientallen actieve en passieve elektronische componenten, dat functioneel een eenheid vormt. Gezien de geheel eigen aard van deze techniek wordt wel van een nieuwe generatie elektronica gesproken, namelijk de derde.

2. HISTORISCHE ONTWIKKELING VAN DE ELEKTRONICA

Bij het gebruik van het woord generatie ligt het voor de hand ook enige aandacht te besteden aan de voorgaande generaties.

Tot omstreeks 1900 kende men voor het ladingtransport door middel van elektronen geen ander praktisch beginsel dan de directe evenredigheid tussen de stroom door een geleider en daarop aangesloten spanning, zoals volgt uit de wet van Ohm. De elektronica verschafte de mogelijkheid om de stroomdoorgang door een daartoe geschikte component (actief element) op andere wijze te beïnvloeden dan door variatie van de aangelegde voedingsspanning. Hierdoor werd het begrip "versterking" realiseerbaar. De actieve elementen, waarover de elektronica gedurende zijn ca. 60-jarig bestaan de beschikking had, zijn in de loop van de tijd radicaal veranderd. Vandaar de typering door generaties, waarbij we kunnen stellen:

- eerste generatie : elektronenbuizen
- tweede generatie : transistors
- derde generatie : micro-elektronica

Hierbij moet meteen opgemerkt worden dat in de micro-elektronica de transistor als actief element gehandhaafd is.

Het was in 1883 dat Edison bij de ontwikkeling van de gloeilamp een ontdekking deed die voor het ontstaan van de elektronica van principiële betekenis was. Hij bemerkte dat er stroomdoorgang optrad tussen de gloeidraad van zijn lamp en een metalen aansluiting in de lamp wanneer tussen beide een elektrisch spanningsverschil van de juiste polariteit aanwezig was. Fleming werkte deze ontdekking in 1905 uit tot de vacuümdiode. In 1907 werd door De Forest een buis geconstrueerd waarin tussen de gloeikathode en de anode een zogenaamd stuurrooster aangebracht was. Door variatie van het (negatief) spanningsverschil tussen rooster en kathode wordt bereikt dat de anodestroom op gelijkvormige wijze varieert. Op dit principe zijn alle verdere ontwikkelingen van de elektronenbuis gebaseerd.

Aanvankelijk was de toepassing van de elektronenbuis beperkt, en viel de elektronica vrijwel samen met de radiotechniek. In latere jaren, vooral na 1930, heeft de toepassing zich geleidelijk uitgebreid tot andere terreinen, zoals wetenschappelijke meetapparatuur, medische apparatuur, en dergelijke.

De betrouwbaarheid van een elektronisch apparaat, uitgevoerd met elektronenbuizen, wordt vrijwel volledig bepaald door de buizen. De gemiddelde uitvalskans van de passieve componenten is namelijk veel kleiner. In de radiotechniek voldoet de elektronenbuis qua levensduur uitstekend. Een ontvangtoestel kan immers vijf à tien jaar regelmatig in gebruik zijn voordat een elektronenbuis defect raakt. Dat is heel acceptabel. Werkelijk grote problemen ontstonden pas toen na 1945 de elektronische apparatuur een geweldige uitbreiding onderging. Een sprekend voorbeeld hiervan is de eerste digitale rekenautomaat of "computer", de ENIAC, die in 1945 voltooid werd. Dit apparaat bevatte in totaal 19000 elektronenbuizen; het benodigde elektrische vermogen, in hoofdzaak voor de kathodeverhitting van de buizen, bedroeg tientallen kilowatts. Bij een uitvalskans van 0,5% per 1000 uur voor een zeer goede kwaliteit elektronenbuizen volgt hieruit dat zich toch gemiddeld om de ca. 10 uur een defect voordoet!

De digitale rekenautomaat kwam desondanks tot stand en veroverde zijn plaats, maar het was voor zijn verdere ontwikkeling, en voor de ontwikkeling van de gehele professionele elektronica-sector, van groot belang dat intussen de transistor zijn intrede deed.

In 1948 werd door Bardeen, Brattain en Shockley de transistor geconcipieerd, daarbij steunend op voorbereidend werk van anderen. De

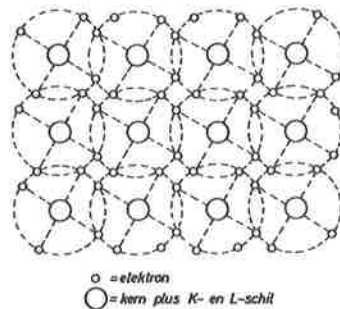
eerste versie, de puntcontact-transistor, verdween wegens verscheidene tekortkomingen weer van het toneel, plaats makend voor de in 1950 uitgevonden "junction"- of lagetransistor. De grote voordelen van de transistor boven de elektronenbuis zijn:

- grotere betrouwbaarheid (uitvalskans omstreeks 0,01% per 1000 uur)
- gering opgenomen vermogen (geen gloeispanning nodig; veel lagere voedingsspanningen. Het opgenomen vermogen bedraagt gemiddeld ongeveer 30 mW tegenover 3 W bij de elektronenbuis)
- veel minder verouderingsverschijnselen
- geringer volume en gewicht.

Omdat de eigenschappen van halfgeleiders (transistors en kristaldioden) van veel belang zijn voor de micro-elektronica zal hierop eerst nader ingegaan worden.

3. DE HALFGELEIDERS

Als uitgangsmateriaal voor de vervaardiging van een transistor of kristaldiode wordt germanium of silicium gebruikt. De atoomstructuur van beide elementen wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van vier elektronen in de onvolledig bezette buitenste schil. Aangezien in de moderne ontwikkelingen silicium sterk op de voorgrond gekomen is zullen we ons korthedshalve tot dit materiaal beperken. Het siliciumatoom bevat in de K-, L- en M-schil achtereenvolgens 2, 8 en 4 elektronen. Een schematisch, twee-dimensionaal model van de atoomstructuur van zuiver silicium is te zien in figuur 1.



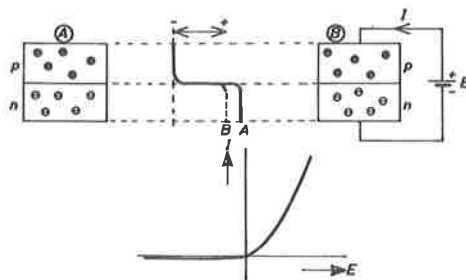
(Fig. 1. Schematische voorstelling van een Si-kristalrooster)

We zien een goed gesloten rooster, waarin de elektronen vrij sterk ge-

bonden zijn. Slechts weinig elektronen zullen door de warmtebeweging voldoende vrijmakingsenergie kunnen krijgen om zich uit het rooster los te maken. Dus: weinig vrije elektronen en daardoor vrij slechte elektrische geleiding. Vandaar de naam halfgeleider.

De geleiding kan verbeterd worden door het vervangen van een aantal Si- atomen door atomen van een ander element met 3 elektronen in de buitenste schil (borium, aluminium, indium) of 5 elektronen (arseen, fosfor, antimoon). Bevindt zich een atoom van de eerstgenoemde groep, met 3 elektronen in de buitenste schil, in het patroon van figuur 1, dan betekent dit dat de afwezigheid van het vierde elektron als het ware een gat vormt in de structuur. Een dergelijk gat wordt gemakkelijk bezet door een elektron van een naburig Si- atoom. Met andere woorden: het gat verplaatst zich. De afwezigheid van een elektron, dus van een drager van negatieve lading, kan voor de beschouwing van transistors en dioden opgevat worden als de aanwezigheid van positieve lading. Verplaatsing van een gat betekent dus: transport van positieve lading, en dus: stroom. We spreken in dit geval van "verontreiniging" met een acceptor, en we krijgen daardoor silicium van het p- type (in hoofdzaak positieve ladingdragers). Het zal zonder meer duidelijk zijn dat, bij toevoeging van atomen met 5 elektronen in de buitenste schil, hiervan gemakkelijk een elektron afgestaan wordt dat als vrij elektron door het materiaal bewegen kan. We spreken dan van "verontreiniging" met een donor, waardoor n- type silicium ontstaat.

In figuur 2 is een deel van een siliciumkristal afgebeeld, waarvan het bovenste deel met acceptors verontreinigd is, en het onderste deel met donors. In de twee gebieden zijn enige positieve en negatieve (meerderheids-) ladingdragers symbolisch aangegeven.

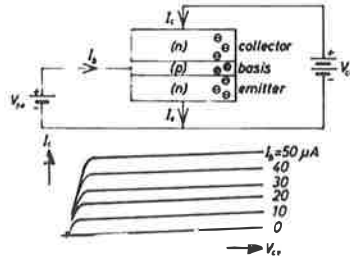


(Fig. 2. Lagen-diode)

Door de temperatuurbeweging diffundeert een aantal positieve ladingdragers over de grenslaag heen. Al spoedig recombineren deze gaten met vrije elektronen. Intussen blijft een toename van positieve lading in het

n- gebied over. Op overeenkomstige wijze diffunderen negatieve ladingdragers het p- gebied binnen. Zodoende ontstaat een potentiaalsprong bij de grenslaag. Door deze potentiaalbarrière wordt verdere diffusie belet, voor zover deze niet gecompenseerd wordt door de beweging van een klein aantal minderheidsladingdragers (elektronen uit het p- gebied en gaten uit het n- gebied). Wordt tussen p- en n- gebied een elektrisch spanningsverschil aangebracht volgens figuur 2B, dan wordt de potentiaalbarrière verlaagd en er kunnen meer meerderheidsladingdragers de grenslaag passeren. Met andere woorden: er gaat een stroom lopen. Aansluiting van een spanning met omgekeerde polariteit verhoogt de potentiaalbarrière, en er loopt slechts een zeer geringe, uit minderheidsladingdragers bestaande, lekstroom. Het blokje silicium blijkt dus als diode te fungeren.

In figuur 3 is het siliciumkristal uitgebreid met een tweede n- gebied, en we hebben nu een transistor. Een kleine elektrische spanning V_{be} , aangesloten tussen emitter en basis, levert een bepaalde stroomdoorgang door de basis/emitter- grenslaag. Aangezien de emitter veel sterker verontreinigd is dan de basis bestaat het overgrote deel van het totale aantal ladingdragers uit elektronen, afkomstig uit de emitter. Tussen emitter en collector is ook een elektrische spanning V_{ce} aanwezig, aanzienlijk



(Fig. 3. De transistor)

groter dan V_{be} . Als diode gezien bevindt de basis/collector- grenslaag zich in niet- geleidende toestand. De elektronen, komende uit de emitter, worden versneld in het elektrische veld bij de basis/collector- grenslaag en gaan het collectorgebied binnen. Dit te meer daar het basisgebied zeer dun is, hetgeen een korte looptijd van de elektronen in het basisgebied tot gevolg heeft en dus ook een kleine recombinatiekans. Het aantal elektronen dat in de basis recombineert bedraagt dan ook bijvoorbeeld slechts 1% van alle uit de emitter komende elektronen. De toename van negatieve lading in de basis, die het gevolg is van de recombinatie

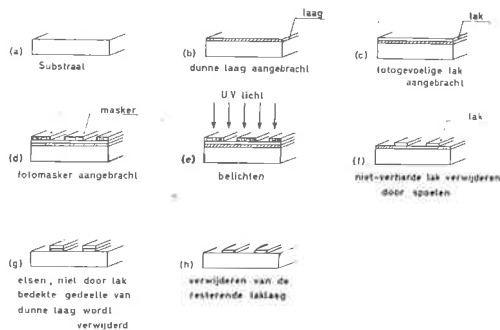
rende elektronen, wordt gecompenseerd door de (kleine) basisstroom I_b . Is $I_b = 0,01 I_c$ dan is $I_c = 0,99 I_e$.

Bij de toepassing van de transistor vormt V_{be} , of liever I_b , het sturende signaal. De gestuurde grootte, de collectorstroom, is dus veel groter dan het sturende signaal. Hiermee is in principe de werking van de transistor als versterker getypeerd. De eenvoud van de transistor, in vergelijking met de elektronenbuis, is evident. De structuur leent zich er toe dat de vereiste p- en n- gebieden van het oppervlak uit aangebracht worden. Deze zogenaamde planaire techniek is ook van groot belang voor de micro-elektronica.

4. DE FOTO-ETSTECHNIEK

Bij de overgang naar het eigenlijke terrein van de micro-elektronica moet eerst nog even stil gestaan worden bij een werkwijze, die vóór de opkomst van de micro-elektronica ook al toegepast werd voor de vervaardiging van zogenaamde gedrukte bedrading. Dat deze naam feitelijk onjuist is blijkt uit het volgende.

Wanneer een aantal geleidende verbindingen tussen elektronische componenten in een plat vlak ondergebracht kan worden, dan kan men hiervoor, in plaats van een aantal losse stukjes montage draad, ook een montageplaat gebruiken, waarop het gewenste totale geleiderpatroon als "gedrukte bedrading" is aangebracht. Het uitgangsmateriaal bestaat uit een plaat van elektrisch isolerend materiaal ter dikte van bijvoorbeeld 0,8 mm, waarop aan één of twee zijden een dunne koperlaag is aangebracht. Het gewenste geleiderpatroon wordt veelal eerst getekend en vervolgens fotografisch op film overgebracht. Het geleiderpatroon is op het negatief zichtbaar als een aantal transparante lijnen; de rest is zwart. Het koperoppervlak wordt bestreken met een lichtgevoelige laklaag. Zie figuur 4.



(Fig. 4. Het foto-etsproces)

Het negatief wordt op de met lak bestreken plaat gelegd en gedurende enkele minuten met een sterke lichtbron belicht. Onder de transparante gedeelten van het negatief vindt een omzetting in de laklaag plaats, waardoor de lak op die plaatsen blijft staan in het nu volgende ontwikkelbad. Van de niet-belichte delen van de plaat wordt de laklaag door het ontwikkelbad verwijderd. Volledigheidshalve zij opgemerkt dat er ook laksoorten gebruikt worden waarbij juist de belichte delen in het ontwikkelbad oplossen. De aldus voorbereide plaat wordt in een etsbad gebracht, waarin de niet-beschermde kopergedeelten tot op het dragermateriaal weggeëtsd worden. Het beschermde geleiderpatroon blijft onaangetast, en komt na een laatste bad, waarin de beschermende laklaag op de geleiders weggenomen wordt, te voorschijn.

De beschreven werkwijze, met enige varianten daarop, vormt een van de grondslagen voor de realisatie van micro-elektronica.

5. INDELING GEÏNTEGREERDE SCHAKELINGEN

In de micro-elektronica treffen we twee soorten geïntegreerde schakelingen aan, die naar hun uitvoeringsvorm worden onderscheiden in:

- a dunne-film schakelingen
- b monolithische schakelingen

In de dunne-film techniek gaat men uit van een vlak plaatje (substraat) met afmetingen van bijvoorbeeld 30×20 mm, waarop de condensatoren, weerstanden en geleidende verbindingen in de vorm van een vlak geometrisch patroon aangebracht worden. De benodigde transistors en dioden worden, althans tot dusver, als discrete losse componenten op het substraat geplaatst en door lassen of solderen met de rest van de schakeling verbonden.

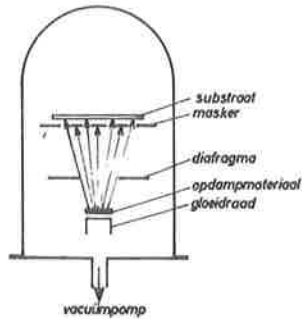
De monolithische geïntegreerde schakeling bestaat uit een blokje halfgeleidermateriaal (vrijwel altijd silicium) van omstreeks $1 \times 1 \times 0,3$ mm, waarin plaatselijk p- en n- gebieden aangebracht zijn die transistors en dioden, maar ook weerstanden en condensatoren vormen. Bij de monolithische schakeling zijn de elementaire componenten honderd procent geïntegreerd tot een ondeelbaar geheel.

De spoel, in de conventionele techniek een gangbare component, is in de micro-elektronica taboe, omdat hij in dunne-film uitvoering heel moeilijk en in de monolithische techniek in het geheel niet te maken is. In veel gevallen is het gebruik echter te vermijden.

De beide grondvormen komen soms gemengd voor. Men spreekt dan van hybride schakelingen.

6. DUNNE-FILM TECHNIEK

Als werkwijze voor het aanbrengen van de passieve componenten op het substraat wordt meestal een opdamproces toegepast. Dit gebeurt in hoogvacuüm (10^{-4} à 10^{-6} mm kwikdruk). Zie figuur 5.



(Fig. 5. Opdampinrichting)

Voor het opdammen van een weerstand op het substraat wordt het weerstandsmateriaal, bijvoorbeeld nikkel-chroom, verhit door middel van een gloeidraad om een enigszins redelijke dampspanning te verkrijgen (bijvoorbeeld 10^{-3} mm kwikdruk). Het substraat wordt afgedekt door een masker, dat voorzien is van uitsparingen in de vorm van het gewenste weerstandspatroon. De gasstroom slaat neer op de niet-afgedekte delen van het substraat. Een gangbare dikte is 50 \AA tot 500 \AA . Het is gebruikelijk om bij opgedampte weerstanden van vierkantweerstand te spreken. Dit is namelijk voor een bepaald soort weerstandsmateriaal met specifieke weerstand een maat voor de laagdikte. Voor een vierkant vlakje weerstandsmateriaal geldt immers: $R = l / ld \rho = \rho / d$. Hierin is l de zijde van het vierkant en d de dikte van het vlakje. In de praktijk is $R = 100$ à 1000 ohm.

Voor het opdammen van geleiders gebruikt men een zuiver metaal, bijvoorbeeld nikkel of aluminium.

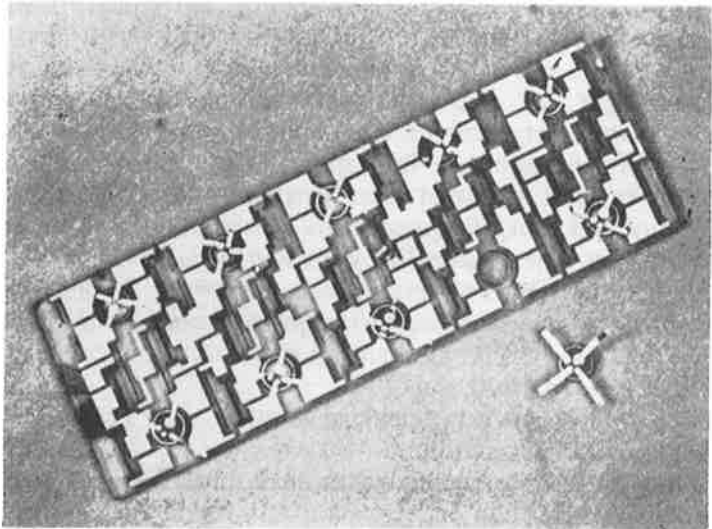
De fabricage van een condensator in dunne-film uitvoering is wat meer problematisch. Een redelijke capaciteitswaarde bij kleine afmetingen vereist een diëlektricum met grote ϵ_r . Geringe verliezen en een goede doorslagvastheid zijn eveneens gewenst. Dit leidt tot een compromis. Meestal wordt SiO als diëlektricum gebruikt, dat een capaciteit van ca. 50 pF per mm^2 kan opleveren. De condensator wordt op het substraat aangebracht door achtereenvolgens een metallisch oppervlak op te dampen dat één van de beide condensator-elektroden vormt. Vervolgens wordt een iets groter oppervlak bedekt met diëlektricum, waar-

na weer een metaallaag als tweede elektrode opgedampt wordt. De praktisch voorkomende waarden voor opgedampte condensatoren liggen voor SiO in het gebied van 20 tot 5000 pF.

Men is er geleidelijk toe overgegaan om, in plaats van maskers, ook hier de foto-etstechniek te gebruiken. Voor het aanbrengen van een weerstand wordt dan eerst het gehele substraatoppervlak met een laagje weerstandsmateriaal bedekt, waarna de overtollige gedeelten worden weggeëtsd.

Zoals reeds eerder is opgemerkt worden de benodigde transistors en dioden als losse componenten aan het geheel toegevoegd. In figuur 6 is een dunne-film circuit afgebeeld. Op een substraat van bijvoorbeeld 30×20 mm kan op deze wijze een complete 3-traps versterker aangebracht worden.

Er zijn onderzoeken gaande naar de mogelijkheid om ook de transistors en dioden in dunne-film techniek te realiseren. Deze ontwikkeling bevindt zich nog in een experimenteel stadium. Een variant op de gebruikelijke transistor, namelijk de zogenaamde veld-effect transistor, schijnt hier goede perspectieven te bieden.

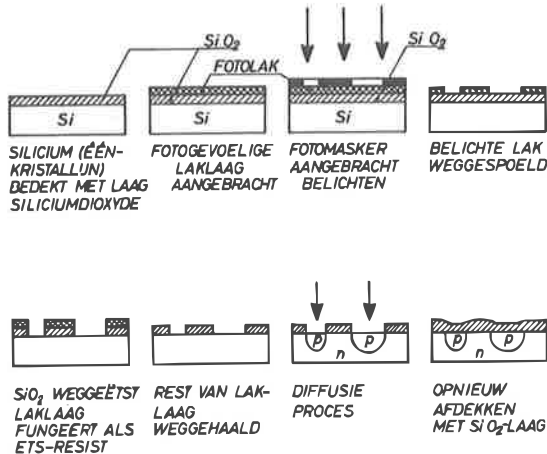


(Fig. 6. Dunne-film circuit)

7. DE MONOLITHISCHE GEÏNTEGREERDE SCHAKELING

De monolithische geïntegreerde schakeling wordt op overeenkomstige

wijze vervaardigd als de enkelvoudige transistor. Het uitgangsmateriaal is monokristallijn silicium in de vorm van een ronde staaf met een diameter van 2 à 3 cm. Hiervan wordt een schijfje met een dikte van enkele tiende millimeters afgezaagd, waaruit vele honderden, soms zelfs meer dan duizend transistors of vele tientallen geïntegreerde schakelingen tegelijk gemaakt kunnen worden. Dit geschiedt door van het oppervlak uit herhaald plaatselijke diffusies in het silicium uit te voeren. Zie figuur 7. De gewenste geometrie wordt verkregen door het silicium in eerste



(Fig. 7. Diffusie techniek voor monolithische schakelingen)

instantie door oxydatie te bedekken met een laagje SiO_2 van ongeveer 1 micron dikte. Dit dient ter bescherming van het oppervlak en tevens voor het vormen van een masker. Het oppervlak wordt dan met lichtgevoelige lak bedekt en op de reeds beschreven wijze worden in de laklaag uitsparingen van de gewenste vorm verkregen. Aansluitend wordt het schijfje silicium in een etsbad gebracht, waardoor ter plaatse van de uitsparingen gaten in het SiO_2 ontstaan tot op het siliciumoppervlak. Dan wordt de nog aanwezige fotolak in een ander bad verwijderd, en het schijfje is nu gereed voor diffusie. Deze vindt plaats door verhitting van het silicium in een atmosfeer van donor- of acceptor-atomen, naar gelang men n- of p- type gebieden wenst aan te brengen. De indringdiepte kan men bepalen door de tijdsduur gedurende welke de diffusie plaats vindt.

Voor de vervaardiging van een n-p-n- transistor gaat men uit van een

schijfje n- type silicium. Het uitgangsmateriaal vormt dan de collector van de transistor. Op de zojuist beschreven wijze wordt hierin dan een basisgebied van het p- type gediffundeerd. Het proces wordt nogmaals herhaald, maar nu met donors als diffusiemateriaal, zodat binnen het p- gebied weer een kleiner en minder diep n- gebied ontstaat, de emitter. De overblijvende dikte van de basis bedraagt slechts enige microns. Daarna wordt het gehele siliciumoppervlak weer afgedekt met SiO_2 . Tenslotte worden de aansluitingen aangebracht. Daartoe worden in de SiO_2 -laag weer gaatjes geëtst, die uitkomen in de emitter-, basis- en collectorgebieden van de transistors. Op het gehele oppervlak wordt vervolgens een geleidend materiaal opgedampt, meestal aluminium. Dit wordt vervolgens weer weggeëtst, met uitzondering van de gewenste geleiders.

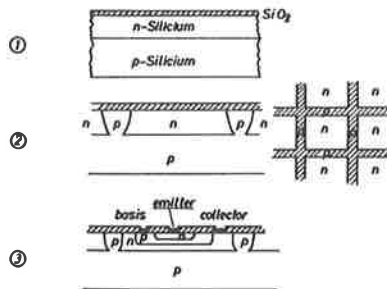
Bij de transistorfabricage wordt de schijf silicium dan in honderden stukjes gesneden, die elk één transistor bevatten. Denkende in termen van geïntegreerde schakelingen ligt het voor de hand om groepen van meer transistors en dioden, en zo mogelijk ook weerstanden en condensatoren, in één blokje silicium onder te brengen. Hierbij komen drie vragen naar voren:

- hoe worden de geïntegreerde componenten elektrisch van elkaar gescheiden?
- hoe vormt men passieve componenten in het silicium, die deel moeten uitmaken van de samengestelde eenheden?
- hoe komen de wél gewenste verbindingen tot stand?

Deze vragen zullen we achtereenvolgens nagaan.

8. ISOLATIE BINNEN DE GEÏNTEGREERDE SCHAKELING

De transistors die in éénzelfde geïntegreerde schakeling voorkomen zullen elektrisch van elkaar gescheiden moeten worden. Men gaat bij de fabricage daarom uit van een schijfje p- silicium. Daarop wordt dan over het gehele oppervlak een laag n- silicium gevormd. Zie figuur 8. Van het

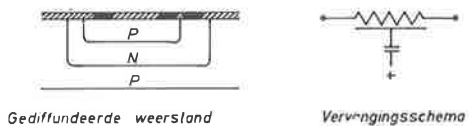


(Fig. 8. Isolatie-diffusie)

oppervlak uit wordt een diepe p- isolatiediffusie uitgevoerd, die tot in het onderste p- gebied reikt. Op deze wijze wordt in het silicium een aantal “eilanden” van n-materiaal gevormd. We zagen bij de diode dat de p/n- grenslaag als isolatie fungeert wanneer in de schakeling het p- gebied op een lagere potentiaal gehouden wordt dan het n- gebied. Door toepassing hiervan kunnen de “n- eilanden” als elektrisch van elkaar gescheiden beschouwd worden.

9. PASSIEVE COMPONENTEN IN MONOLITHISCHE GEÏNTEGREERDE SCHAKELINGEN

De weerstand in de monolithische schakeling komt in zeker opzicht overeen met de dunne-film weerstand. Hij bestaat uit een smal en zeer ondiep gebied met een bepaalde verontreiniging, onmiddellijk onder het siliciumoppervlak. Zie figuur 9. De weerstandswaarde wordt bepaald door de afmetingen en door de mate van verontreiniging. Aangezien diepte en breedte praktisch aan minimumgrenzen van enige, respectievelijk enige tientallen microns gebonden zijn moet voor grotere weerstandswaarden een relatief groot oppervlak gereserveerd worden. De praktisch voorkomende waarden liggen tussen ca. 10^2 en 10^4 ohm. Een bijkomende moeilijkheid is de isolatie. Die bereikt men ook hier door de isolerende werking van een p/n- grenslaag. Daartoe wordt in een omgeving van p- silicium de weerstand met donor-verontreiniging gemaakt, en omgekeerd. Ten behoeve van de isolatie van de weerstand ten opzichte van zijn omgeving moet over de p/n- grenslaag een spanningsverschil van de juiste polariteit staan. Hierop moet bij het ontwerp van de schakeling nauwkeurig gelet worden. De toleranties in de weerstandswaarden kunnen 20% of meer bedragen. De temperatuurcoëfficiënt is vrij hoog. Bovendien vormt de p/n- isolatiegrenslaag een parasitaire capaciteit. De diffusie van de weerstandsgebieden vindt meestal tegelijk met de basis plaats.



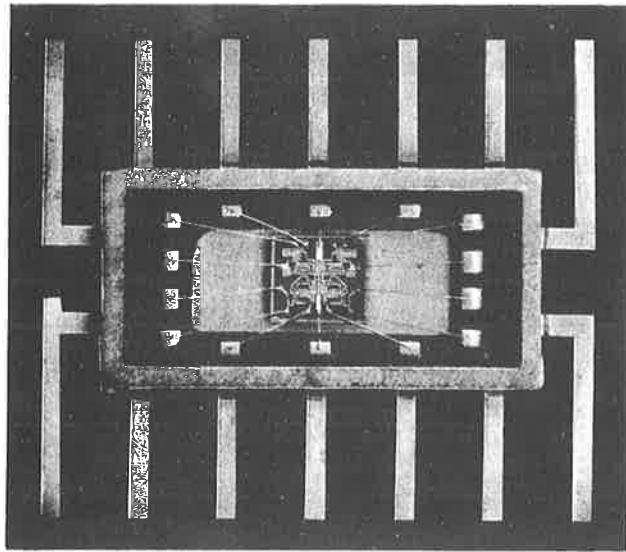
(Fig. 9. Weerstand in monolithische schakelingen)

Als condensator kan een nietgeleidende p/n- grenslaag gebruikt worden. De op deze grenslaag aanwezige capaciteit is afhankelijk van de spanning over de grenslaag. De bereikbare capaciteitswaarde is 100 à 1000 pF per mm^2 ; de toleranties kunnen 20% of meer bedragen. Aangezien het beschikbare oppervlak in een geïntegreerde schakeling zeer klein is zal de condensator, vooral voor grotere waarden, een “duur” element zijn. De eis dat de p/n- grenslaag in nietgeleidende toestand moet verkeren legt ook hier restricties op aan het ontwerp.

10. DE AFWERKING VAN DE MONOLITHISCHE GEÏNTEGREERDE SCHAKELING

Wanneer in een aantal diffusiestappen transistors, dioden, weerstanden en condensatoren op de beschreven wijze gevormd zijn worden de onderlinge verbindingen aangebracht door opdampen van aluminium.

De siliciumschijf wordt nu in kleine stukjes gesneden die elk een complete geïntegreerde schakeling bevatten op een oppervlak van omstreeks 1 mm^2 . De schakeling wordt in een metalen of plastic huisje geplaatst en van een aantal aansluitpunten af op het geleiderspatroon worden door middel van zeer dunne gouddraadjes verbindingen gemaakt met de uitgaande aansluitdraden; meestal 10 à 14 stuks. Figuur 10 toont een afbeelding van een dergelijk gemonteerd geheel.



(Fig. 10. Monolithische geïntegreerde schakeling)
(9 maal vergroot)

11. NABESCHOUWING

Het zojuist besproken fabricageproces overziende komen we tot de conclusie dat de produktievoorbereiding aanzienlijk is. Het maken van de benodigde maskers, de talrijke stappen in de totale produktiecyclus en de nauwkeurigheid waarmee dit alles uitgevoerd moet worden zijn kostbare produktiefactoren. Om die reden zal, voor kleine aantallen, integratie volgens de dunne-film methode eerder in aanmerking komen. Bij de vervaardiging van een groot aantal identieke schakelingen vallen deze aanloopkosten weg tegenover de omvangrijke produktie-opbrengst, die uit één schijfje silicium verkregen wordt. Om die reden zijn digitale geïntegreerde schakelingen, die in grote aantallen in digitale rekenautomaten toegepast worden, thans reeds goedkoper dan de conventioneel gebouwde. Frappant is de vergelijking in componentbezetting, die in onderstaande tabel als voorbeeld voor de bekende „flip-flop”-schakeling is vermeld.

	uitvoeringsvorm		
	elektronenbuizen	transistors	monolithische geïntegreerde schakeling
trioden/transistors	2	2	27
dioden	—	6	8
weerstanden	9	13	21
condensatoren	2	6	—
totaal	13	27	56

De betrouwbaarheid, vooral van monolithische schakelingen, is uitstekend. De uitvalskans mag ongeveer gelijk gesteld worden aan die van de discrete transistor. Aangezien de geïntegreerde schakeling echter het equivalent vormt van vele discrete transistors en andere componenten, inclusief de bedrading, mag de betrouwbaarheid van de complete schakeling in de monolithische techniek zeker een orde van grootte beter geacht worden.

Het opgenomen vermogen zal in het algemeen iets kleiner zijn dan bij een gelijkwaardige schakeling in conventionele uitvoeringsvorm. Deze reductie is echter verhoudingsgewijs veel kleiner dan die van het volume. Dat beperkt de mogelijkheid om grote aantallen geïntegreerde schake-

lingen compact te monteren, omdat dan de temperatuur tot ontoelaatbaar hoge waarden zou oplopen.

12. TEGENWOORDIGE EN TOEKOMSTIGE TOEPASSINGEN

Zoals in het begin reeds is gezegd is de toepassing van geïntegreerde schakelingen in lucht- en ruimtevaart evident. De geringe afmetingen zijn ook voor sommige medische toepassingen van groot belang. De hoorapparaat-versterker kan binnen één enkele monolithische geïntegreerde schakeling ondergebracht worden. Indien een passend omhulsel gebruikt wordt zou dit zonder moeite in de gehoorgang zelf ondergebracht kunnen worden. Dit heeft natuurlijk alleen zin wanneer miniaturisatie van de oortelefoon hiermee gelijke tred houdt.

Een geheel nieuwe mogelijkheid is de insertie van geïntegreerde schakelingen, in speciaal gevormde inkapseling, in het menselijk lichaam voor registratie van interne lichaamsfuncties of voor het gebruik als stimulator.

Ook voor het administratief en industrieel gebied is de micro-elektronica een belangrijke ontwikkeling. Hierbij moet vooral gedacht worden aan de digitale rekenautomaten. Om redenen van hoge betrouwbaarheid en lage prijs mag verwacht worden dat voor deze categorie van toepassingen de overgang naar geïntegreerde schakelingen na 1970 volledig zal zijn.

Is met de geschetste ontwikkeling een eindpunt bereikt? Waarschijnlijk niet. Op bepaalde gebieden kondigt zich namelijk alweer duidelijk een nieuwe ontwikkeling aan die we de vierde generatie elektronica zouden kunnen noemen. Gedacht wordt hierbij aan de siliciumschijf, waarop volgens de beschreven methode een groot aantal geïntegreerde schakelingen aangebracht is. In plaats van verdeling van deze schijf in kleine stukjes, die elk één geïntegreerde schakeling omvatten, kunnen deze schakelingen op de schijf zelf weer verder met elkaar doorverbonden worden tot een eenheid van de tweede orde. Op die wijze zouden tientallen, of zelfs honderden digitale schakelingen in één enkele siliciumschijf ondergebracht kunnen worden. Zo'n schijf omvat dan bijvoorbeeld het complete rekenorgaan van een digitale rekenautomaat. Enige van deze schijven, elk ter grootte van omstreeks een gulden, vormen dan tezamen een complete rekenmachine. Of de grote problemen, die zich bij deze fantasie nog voordoen, overwonnen kunnen worden zal de – wellicht nabije – toekomst leren.

Literatuur:

1. Vakantieleergang Elektrotechniek 1966, Koninklijk Instituut van Ingenieurs. Diverse auteurs. "Micro-elektronica". De Ingenieur, nrs. 4, 10, 12, 32 en 36, 1967
2. L.P.J. Veelenturf, "Micro-elektronica", Tijdschrift van het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap. Deel 31, nrs. 10, 11 en 12, 1966.
3. G. Hanke, "Mikroelektronik, Probleme und Möglichkeiten einer neuen Technik". Der Fernmelde-Ingenieur. 21. Jahrgang/Heft 11. 15 November 1967.
4. Agardograph 57. Proceedings of the Agard Conference Oslo 1961. Edited by G.W.A. Dummer. "Microminiaturisation". Pergamon Press 1962.
5. Agardograph 77. Edited by E. Keonjian. "Micropower electronics". Pergamon Press 1964.
6. R.M. Warner, "Integrated circuits". Mc Graw-Hill, New York 1965.

