

Uit de schaduw : de ontwikkeling van de electronica van de veldeffecttransistor

Citation for published version (APA):

Klaassen, F. M. (1972). *Uit de schaduw : de ontwikkeling van de electronica van de veldeffecttransistor*. Technische Hogeschool Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1972

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Uit de schaduw

De ontwikkeling van de elektronica
van de veldeffecttransistor

Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van
buitengewoon hoogleraar in de halfgeleider-elektronica
aan de afdeling der elektrotechniek van de
Technische Hogeschool Eindhoven op 8 december 1972
door Dr. F.M. Klaassen

Deze maand is het vijftiende jaar geleden dat Brattain en Bardeen bij hun poging de sperstroom door een germanium puntcontact-diode te beïnvloeden met het reeds lang bekende veldeffect en zo dit effect te benutten voor elektrische versterking, een stroomverandering waarnaamen, die niet helemaal met hun verwachtingen overeen kwam. Dit resultaat bleek veroorzaakt door de omstandigheid dat de gouden veldeffect elektrode niet, zoals bedoeld, van het germanium gescheiden was door een dun oxide huidje, maar integendeel direct contact maakte met de halfgeleider. Men kwam tot de achteraf juiste – en zelfs met de Nobelprijs gehonoreerde – conclusie dat de stuur-elektrode extra beweeglijke lading in het germanium injecteerde, die door het puntcontact werd verzameld. De eerste bruikbare transistor was gerealiseerd. Hoewel het verrassend resultaat van een fysisch experiment, was deze transistor toch ook de vrucht van gericht onderzoek, dat toen reeds een tiental jaren aan de gang was in het kader van het zoeken naar een vastestof analogon van de elektronenbuis, een analogon onder andere begeerd door de telefonie-industrie, die door de uitbreiding van het netwerk problemen had met de vacuümbuis door diens energiehonger en beperkte levensduur.

Wanneer men een foto van de primitieve constructie van de eerste transistor beziet, die treffend een welhaast voorbijge experimenteelperiode weergeeft, is het begrijpelijk dat slechts weinigen inzagen dat deze vinding de elektronica nieuwe vleugels en daardoor mede de maatschappij een ander aanzien zou geven en dat nog in recordtijd. Voortgedreven door de beste en de slechtste eigenschappen, die de vrije onderneming kenmerken en door de persoonlijke ambitie der onderzoekers, steunend op de inzichten verkregen door langdurig met de weerbarstige materie worstelend vastestof onderzoek, heeft de halfgeleider-technologie in vijftiende jaar een ontwikkeling doorgemaakt, die haar weerga in de geschiedenis van de techniek nauwelijks heeft, en met welk een gevolg. Zonder transistor-technologie geen computer-industrie, geen maanwandeling, geen communicatie- of weersatelliet en vermoedelijk geen miljard radio's, geen kwart miljard telefoonaansluitingen, om enkele spectaculaire toepassingen maar eens te noemen. Brattain en Bardeen's vondst bleek een sleutel tot de 'all at once world', waarvan Marchall Mc. Luhan kort en bondig opmerkt: 'Electronic circuitry has overthrown the regime of time and space and pours upon us instantly and continuously concerns of all other men. It has reconstituted argue on a global scale. Ours is a brand new world of allatonceness. Time has ceased, space has vanished. We now live in a global village'.

Even groot intussen bleek de verandering in de elektronische professie. Met de komst van het geïntegreerde circuit kwam een eind aan de oude driedeling, die lang de elektronica beheerste. Voor de zelfstandige componentontwerper, de zelfstandige circuitontwikkelaar, of de zelfstandige systeemkundige is er niet langer plaats. Aangezien het aantal universele geesten, dat alle drie gebieden meester is, uiterst sporadisch is, zal alleen door samenwerking tussen de genoemde disciplines grensverleggend werk mogelijk zijn. Zulk een samenwerking vereist echter op zijn minst dat men elkaars taal enigszins spreekt, liever nog op de hoogte is van basiskennis, die de ander vaak onbewust hanteert.

In het licht van de geschetste, door sommigen wel als derde industriële revolutie aangeduide ontwikkeling, is het ietwat bevreemdend dat de loftrumpet voor dit vijftienvigjarig jubileum stom blijft. Is het de aard van de vaklieden, van nature toch al geen bespiegelende geesten, doch integendeel haastige ondernemers, die niet met een dergelijk gebeuren strookt? Of moet men de oorzaak zoeken in de huidige weinig florissante toestand van de halfgeleider-industrie, mede veroorzaakt door een op macro economische schaal gezien te snelle ontwikkeling? Of zit men met de gevolgen voor de maatschappij, die duidelijk in een crisissituatie verkeert doordat technische en sociale ontwikkeling uit fase zijn geraakt. Wij citeren Mc. Luhan wederom: 'The medium or proces of our time – electronic technology – is reshaping and restructuring patterns of social interdependence and every aspect of our personal life. It is forcing us to reconsider and reevaluate practically every thought, every action, and every institution formerly taken for granted. Everything is changing – you, your family, your neighbourhood, your education, your government, your relation to the others. And they are changing dramatically'.

Hoe het ook zij, duidelijk is dat na een grandioze technologische ontwikkeling van vijftienvig jaar het technisch vooruitgangsgeloof niet zo stellig meer is, zodat enige adempauze hoogst welkom is.

Gedurende de afgelopen periode heeft als logisch vervolg op de vinding uit 1947 binnen het halfgeleiderrijk vooral de bipolaire transistor gedomineerd, een bouwsteen, waarvan de werking principieel berust op injectie en diffusie van elektronen en gaten en daardoor in gedrag totaal afwijkt van de wet van Ohm. Veel minder op de voorgrond trad de veld-effecttransistor, ondanks het feit dat deze transistor reeds enkele decennia vóór 1947 werd uitgevonden, een eenvoudiger structuur bezit en qua gedrag meer verwant is aan de wet van Ohm. Pas sinds korte tijd gaat het er naar uitzien dat de bipolaire transistor een flink stuk terrein moet gaan prijsgeven. Deze late bloei van de veld-

effecttransistor na zo lange tijd in de schaduw van een soortgenoot verkeerd te hebben lijkt interessant genoeg om wat nader beschouwd te worden.

Reeds in 1925 en 1928 vroeg Lilienfeld, hoogleraar in Leipzig, patent aan op de twee typische basisstructuren die ook heden ten dage de veldeffecttransistor kenmerken. Aan de eerste structuur (fig. 1) lag de ervaring ten grondslag dat een Al-Cu₂S contact gelijkrichtende werking vertoonde, zodat door een spanning van geschikte polariteit in het Cu₂S een niet geleidend gebied gevormd kan worden. Loopt er een stroom door de dunne halfgeleidende laag onder de aluminium-elektrode, dan zal men door een variatie van de spanning op de laatste elektrode deze stroom kunnen moduleren. Dit principe, de beïnvloeding van de dikte van een stroomkanaal met behulp van een zijdelingse stuur-elektrode is ook thans nog het kenmerk van de FET. Omdat de stroom door de stuur-elektrode zeer klein is ten opzichte van de kanaalstroom, is voorts de ingang van de veldeffecttransistor hoogohmig – in tegenstelling tot de bipolaire transistor – en is zeer grote stroomversterking mogelijk.

Even modern van opzet was Lilienfelds tweede idee. Dit berust op de veronderstelling dat een spanning van goede polariteit op een condensator, gevormd door Al – Al₂O₃ – Cu₂S extra beweeglijke lading induceert in de Cu₂S laag, zodat bij stroomdoorgang tussen twee goudcontacten (fig. 2) eveneens stroommodulatie mogelijk is. Een aangebrachte inkeping diende deze modulatie extra te versterken. Het vergroten van de beweeglijke lading aan het oppervlak van een halfgeleider en de daarmee gepaard gaande stroomtoename met behulp van een zijdelingse stuur-elektrode is ook thans nog kenmerkend voor de MOST. Het staat min of meer vast dat Lilienfeld zijn ideeën niet heeft kunnen realiseren door onvoldoende materiaal-beheersing. Hij leefde bovendien in een tijdperk, waarin de aan niemand minder dan Schottky toegeschreven uitspraak 'Semiconductor physics is the study of the physics of dirt', algemeen weerklink vond.

Pas in 1952 toonde Bardeen aan waarom de veldeffecttransistor tot dan toe niet goed werkte. De abrupte onderbreking van de periodieke kristalstructuur aan het oppervlak en de invloed van de buitenwereld op de kristalhuid introduceert vangplaatsen voor de beweeglijke lading, zodat in de MOST alle additionele lading wordt weggevangen terwijl in de FET de uitbreiding van het niet-geleidende gebied wordt verhinderd. Daarom stelde Shockley een verbeterde uitvoering voor: de FET met een stuur-elektrode gevormd door een p-n overgang, zodat het oppervlak wordt uitgeschakeld door de modulatie te doen plaatsvinden onder de p-n overgang, d.w.z. enkele microns in de halfgeleider.

Hoewel met de legeertechniek, die destijds de bipolaire transistor-technologie beheerste, werkende FET's gemaakt zijn, was de opbouw te grof voor een zinvol elektronisch gebruik. Pas de planaire techniek, die in 1960 de jonge transistorindustrie een nieuw, en naar het schijnt, definitief fundament bracht, maakte ook silicium FET's met zulk verfijnde opbouw mogelijk dat de elektronici deze bouwsteen welwillend als bruikbaar gingen beschouwen.

Omstreeks dezelfde tijd werd ook voor de MOST een belangrijke doorbraak bereikt. Atalla slaagde er voor het Si oppervlak in, de atomen met onvolledige binding, die aanleiding geven tot een aantal vangplaatsen van $10^{15}/\text{cm}^2$, te passiveren. Door het Si te bedekken met een onder hoge temperatuur gegroeide SiO_2 huid, blijkt het aantal boosdoeners minstens tienduizend maal te verminderen. Tot dusver is dit kunststuk alleen met Si mogelijk, zodat op industriële schaal alleen met dit materiaal MOS-transistoren vervaardigd worden. Ideaal bleek echter ook dit type niet door de aanwezigheid van een tijdens de groei in het oxide ingebouwde positieve ionenlading. Vooral in de begintijd werd daardoor de MOST danig geplaagd door driftverschijnselen, ter definitieve betugeling waarvan eigenlijk nog steeds geëxperimenteerd wordt met isolerende dubbellaagen.

Toch is op zichzelf de ingebouwde oxidelading, mits reproduceerbaar, heel wel bruikbaar voor digitale signaalverwerking door de inherente positieve drempelspanning. Dit is de voornaamste reden, waarom p-kanaal MOS-transistoren met gatengeleiding vaak voorkeur genieten boven de snellere n-kanaals met elektronengeleiding. Aanvankelijk was deze drempelspanning veel te hoog voor massale toepassing, maar dank zij aan de alchemie rakende technieken, is men tenslotte erin geslaagd de drempel tot een aanvaardbaar niveau van enkele volts terug te brengen. Omdat de contactpotentiaal tussen het Si en Al, het tot dan toe meest gangbare materiaal voor de stuur-elektrode, hiervan een redelijk groot deel uitmaakte, bleek het zinvol ook een Si stuur-elektrode te gaan gebruiken. Met deze laatste techniek, ogenschijnlijk niet spectaculair, maar in feite een radicale proceswijziging vergend, is enkele jaren geleden de snelle opmars van de MOST begonnen. Daartoe heeft zeker ook bijgedragen de omstandigheid dat een betrouwbare dubbellaags bedrading vrij natuurlijk in dit proces past en dat de transistoren dichter op elkaar gepakt kunnen worden. Naast de geschetste, thans gangbare MOS-diffusietechnologie treft men ook pleitbezorgers aan van de ionenimplantatie-techniek. Zoals bekend is het mogelijk met behulp van versnelde ionen zeer dunne lagen van het voorgeschreven geleidingstype in het Si oppervlak in te planten, waardoor de drempelspanning manipuleerbaar wordt. Transistoren met positieve en negatieve drempel kunnen dan op één plak tegelijk gemaakt worden, terwijl ook millivolt-logica realiseerbaar

schijnt. Hiermee komt men dan al een grote stap in de richting van het uiterst geringe energieverbruik, dat ons menselijk brein voor logische processen nodig heeft.

Op de vraag naar de toepasbaarheid van de veldeffecttransistor in de elektronica, moet allereerst geantwoord worden dat het gebruik gedurende de eerste tien jaar weinig opzienbarend is gegroeid. Op zichzelf is dit niet zo uitzonderlijk; immers vaak ligt er tussen de structurele conceptie van een idee en de applicatie een aanzienlijk tijdsverschil. Men kan wel in het algemeen de toepasbaarheid van een idee aantonen, maar een brede applicatie stukt nogal eens omdat veel achtergrondinformatie ontbreekt; zoals een volledig begrijpen van de fysische werking, kennis van de materiaaleigenschappen en last but not least procesbeheersing. Een voortgang met quantsprongen is zo eerder regel dan uitzondering. Toch zijn er voor de trage groei van de veldeffecttransistor elektronica ook triviale, zo men wil concrete oorzaken aan te wijzen. De kostprijs beperkte lange tijd het gebruik tot de strict professionele sfeer, de desastreuze overgevoeligheid van de MOST voor elektrostatische ladingen was berucht en vooral het feit dat de bipolaire transistor via een voorsprong van tien jaar het elektronisch ontwerpen een wending had gegeven veroorzaakte dat de veldeffecttransistor vrijwel nooit als puur substituuat van de vacuumbuis ging fungeren. Het best deed het nog de FET, die in tien jaar gestaag groeide naar een verbruik van vijftig miljoen thans. Door de gunstige combinatie van een redelijk ruisarme versterking met behoud van een vrij grote bandbreedte bleek het device uitermate geschikt als voorversterker van signalen afkomstig van hoogohmige bronnen en kon zodoende een vacuüm vullen, waartoe de bipolaire transistor onmachtig was. Dit specifiek lage ruisniveau hangt ten nauwste samen met de afwezigheid van reële ingangsstroomruis bij de FET, dit in tegenstelling tot de gewone transistor. Uiteraard zijn nog niet alle wensen vervuld. Zo wordt uit de kring van ontwerpers van voorversterkers voor camera's, stralingsdetectoren en operationele versterkers voortdurend druk uitgeoefend om tot een lager ruisgedrag te geraken. Een respons op deze druk vraagt enerzijds een grotere procesbeheersing ter controle van de eigenlijk slecht begrepen laag frequente ruis, anderzijds verfijnde maskeringstechnieken ter vervaardiging van kortere devices voor een lagere middenfrequent ruis. De hooggespannen verwachtingen van toepasbaarheid als eerste trap in telecommunicatie-ontvangers bleven merendeels onvervuld. De op grond van de kwadratische karakteristiek verwachte en met de gewone transistor vergeleken zeer lage distorsie blijkt praktisch onhaalbaar door de noodzaak het signaal van de laagohmige antenne omhoog te transformeren tot een niveau passend bij de hoogohmige FET-ingang.

Ook zijn er aanwijzingen dat snelheidsverzachiging van elektronen in transistoren met grote steilheid een ongunstige invloed heeft op de storing. Alleen in Japan, waar men tot een redelijke produktie gekomen is, schijnt men de marginaal betere FET-tuner te willen benutten.

Zeer moeilijk bleek het de FET te integreren door haast niet te verzoenen wensen. Immers, voor een goede FET met hoge steilheid wil men graag een dun laagohmig kanaal, maar deze voorwaarde is ronduit desastreus voor de doorslagspanning van een medegeïntegreerde bipolaire transistor. Er zijn nog slechts enkele fabrikanten in geslaagd geïntegreerde operationele versterkers te maken met een FET-ingang. Het hierbij gebruikelijke paar treft men dan in het streven naar zo goed mogelijke gelijkheid, binnen het i.c. aan als twee – althans in de microtechniek – reusachtige in elkaar gerolde mastodonten.

Een climax in de ontwikkeling van de FET werd kortgeleden bereikt bij het overtreffen van de bipolaire transistor in vermogensversterking in het microgolfgebied. Een interessante bijzonderheid bij het bereiken van dit record is wel dat het in de transistorfabricage dominerende materiaal silicium hier vervangen werd door gallium arsenide dank zij het feit dat dit materiaal een hogere elektronen beweeglijkheid en dus een kortere looptijd bezit. Terwijl enkele andere minder gunstige eigenschappen dit materiaal minder geschikt maken voor de vervaardiging van gewone transistors, tellen deze bezwaren voor FET's minder. Of deze ontwikkeling tot toepassing op grote schaal zal leiden, kan echter worden betwijfeld, mede op grond van de zo ongunstige verhouding tussen steilheid en stroom.

Grotendeels op een mislukking uitgelopen is het gebruik van de MOS-transistor in de analoge elektronica, op één uitzondering na: de ideale isolatie tussen stuur-elektrode en kanaal maken de MOST schier onovertreffbaar als elektrometer. De pure vervanging van elektronenbuisenschakelingen door MOST i.c.'s is uitgebleven. Dit is zeer wel verklaarbaar. Weliswaar vormt de combinatie van één MOST als actief element in serie met een andere MOST als belasting een ideale versterker, die in principe minder kristaloppervlak inneemt dan zijn bipolaire tegenhanger, maar een moeilijkheid leveren begin en eind van het circuit, waar alleen transistoren van zeer grote afmetingen kunnen functioneren. Wat de ingang betreft hangt deze noodzakelijkheid samen met de signaal-ruis verhouding, de drift én het incasseringsvermogen voor elektrostatische stoorladingen, voor de uitgang daarentegen met het verkrijgen van een hoge steilheid voor een grotere belastbaarheid. In dit laatste geval gaat dan ook nog de zoveel slechtere verhouding tussen steilheid en stroom – 1 à 2 ten opzichte van 40 voor de bipolaire transistor – parten spelen. Alleen voor zeer

omvangrijke schakelingen met veel interne trappen zal een all-MOST-circuit aantrekkelijk zijn, maar dat is doorgaans met lineaire schakelingen niet het geval.

Tenslotte nog een enkele woord over de ruis van de MOST, die relatief nogal hoog is, vooral bij lage frequenties – doorgaans een orde hoger dan voor de FET. Hoewel dit verschijnsel onvolledig tot klaarheid gebracht is, zijn er toch nogal wat aanwijzingen dat een langzame interactie tussen de vrije ladingen in het kanaal en vangplaatsen, gelegen in het grensgebied van silicium en het bedekkende oxide verantwoordelijk is voor de ruis. Weliswaar is met de voortgang op het gebied van de passivering ook de ruis geleidelijk lager geworden, maar de bijbehorende halveringstijd heeft de rij van supporters in de loop van de tijd danig gedund.

Na deze sombere toon kan men gelukkig ook nog wat optimistischer geluiden laten horen. Sinds kort ziet het er naar uit dat op het gebied van de grote logische schakelingen MOST-i.c.'s een grote toekomst tegemoet gaat.

Vanwaar deze late doorbraak? Het antwoord op deze vraag spreekt voor zich; het gebruik van MOST-technologie leidt in vele gevallen tot lagere systeemkosten, terwijl in de tweede plaats de toelaatbare dissipatie minder een begrenzing vormt voor het aantal te integreren transistoren. Deze feiten zijn voldoende belangrijk op een aantal aspecten wat dieper in te gaan.

Een van de bouwstenen, waarmee alle logische bewerkingen mogelijk zijn, bestaat uit de MOST-inverter, twee zeer kleine, in serie geschakelde transistoren, waarvan één fungeert als actief schakelend element, het ander als passief belastend element. Vergeleken met bipolaire schakelingen, die vaak niet meer zijn dan i.c.-vertalingen van discrete oplossingen, is een dergelijke combinatie niet louter gekenmerkt als een hogere vorm van integratie, maar bovendien kleiner van afmeting doordat in de hele schakeling geen weerstand nodig is. Juist weerstanden vormen bij bipolaire i.c.'s een kostbaar element, omdat zij vooral bij schakelingen met een geringe dissipatie per poort – een eerste vereiste bij L.S.I. – een hoge waarde dienen te bezitten en dan veel kristaloppervlak vragen. Daar komt nog bij dat de MOST in tegenstelling tot de gewone transistor geen volledige elektrische isolatie ten opzichte van het substraat behoeft en dat het aantal processtappen iets kleiner is. Weliswaar zijn de lilliput MOST-schakelaars niet direct toegankelijk vanuit de buitenwereld, zodat als overgang altijd een reusachtige, veel oppervlakte vragende buffer nodig is, maar vooral in grote logische circuits met veel interne bewerkingen of repeterende functies, zoals schuifregisters en ge-

heugens, telt dit bezwaar nauwelijks en kan men de interne ruimtewinst ten volle uitbuiten. Afhankelijk van hun grootte vindt men in de praktijk dat MOST-circuits een factor anderhalf tot drie maal kleiner uitvallen; echter niet, zoals vaak wordt beweerd, een orde van grootte kleiner.

Op zichzelf vormt een hoge pakkingsdichtheid – waarvoor men vaak het aantal poorten per cm^2 als maat neemt – nog nauwelijks een doorslaggevende reden onmiddellijk voor MOST-systemen te kiezen. Een tweede belangrijke, kostenbepalende gewichtsfactor mag zeker niet over het hoofd worden gezien, namelijk de opbrengst van het gebruikte proces, het resultaat van moeizaam laveren tussen allerlei technologische klippen, zoals de onderbreking van smalle metaal-sporen, het optreden van parasitaire kanalen of diode lekstromen, defecten in epitaxiale lagen en fouten in maskers, waarvan opsporing, diagnose en eliminatie maar al te vaak veel geduld en inspanning vraagt. Voorts zal duidelijk zijn dat de opbrengst op zichzelf ook weer een functie is van de nagestreefde pakkingsdichtheid, hetgeen een optimale kostprijsberekening sterk compliceert.

Tenslotte mag men ook een derde aspect niet vergeten. Is de opbrengst van een bepaald proces eenmaal redelijk hoog, dan zal men, ten einde uitwendige verbindingen te sparen, er vaak toe over willen gaan meerdere functies te integreren, liever nog, men zal trachten subsystemen van grotere functionele complexiteit op één plak te combineren tot een compleet systeem. Hoewel dan ook sprake is van een reductie van looptijdvertragingen binnen het systeem, betekent een minimum aan verbindingen vooral verlaging van de kosten. Immers alle concentratie van vernuft en inventiviteit de i.c.-technologie in snel tempo vorm te geven, heeft geleid tot de ironievolle situatie dat zelfs bij een groot circuit de kosten van omhulling en doorverbindingen in dezelfde orde van grootte liggen als de geteste en goed bevonden inhoud. Toch is aan de maximale grootte van zo'n i.c. een grens gesteld, doordat, onafhankelijk van triviale oorzaken voor een slechte opbrengst, de silicium-technologie in een stadium verkeert, waarin boven een bepaalde oppervlakte de opbrengst snel achteruit loopt. De door de economie gedicteerde grens ligt thans tussen de 10 en 20 mm^2 , maar loopt slechts zeer langzaam omhoog, zodat men voor complexer i.c.'s meer verwacht van minimalisering van de componenten dan van maximalisering van de plak. Mede hierdoor is de hogere pakkingsdichtheid van de MOST soms van beslissende betekenis.

Naast de dichtheid speelt ook de toelaatbare dissipatie een rol in de controverserige MOST of bipolair. Doordat binnen de conventionele bipolaire techniek nauwelijks hoogohmige weerstanden van kleine

afmetingen te maken zijn, wordt het maximaal te integreren aantal transistoren daar al gauw tot een duizendtal beperkt. Voor MOST-systemen is dit minder het geval, dank zij de tijdelijke geheugenwerking van het stuurrooster, een unieke MOST-eigenschap, die varianten op de eenvoudige omkeerschakeling mogelijk maakt, waarin gelijkstroom is uitgebannen door toepassing van pulstechnieken. Weliswaar zijn hierbij extra schakelingen noodzakelijk, die de door parasitaire lekstromen verzwakte logische informatie regelmatig herstellen, maar voor grote i.c.'s is dit aantal relatief klein. Dergelijke dynamische logische schakelingen verbruiken alleen energie voor het periodiek op- of ontladen van de minuscule interne capaciteiten, waardoor afhankelijk van de klokperiode een verlaging in dissipatie van enkele orden van grootte mogelijk is vergeleken met statische systemen. Wanneer bij het voortschrijden van de technologie meer dan tienduizend componenten binnen één i.c. geconcentreerd kunnen worden zal vooral dit feit doorslaggevend worden ten gunste van de MOST.

Omstreeks 1970 was de p-kanaals MOST-techniek, mede door de geschikte ligging van de logische drempels zo ver gevorderd dat met succes een aanval op het bastion van de bipolaire transistor plaatsvond. Hierbij speelde de eerder genoemde silicium gate techniek een beslissende rol, o.a. omdat dank zij de lage drempelspanning en de hieraan gekoppelde voedingsspanning, een lage dissipatie per poort bereikt kan worden, terwijl tevens de logische niveaus goed passen bij die van de bipolaire systemen. Gedurende het afgelopen jaar verschenen ook enkele n-kanaals-systemen, die ondanks de moeilijker liggende drempelspanning en de grotere kans op parasitaire kanalen aantrekkelijker zijn, omdat dank zij de hogere elektronensnelheid de gemiddelde vertragingstijd een factor drie geringer is. Leidt deze technologie dus primair tot snellere systemen, een alternatieve keuze dient zich tevens aan. Indien men de grotere snelheid niet wenst, kan men tot verlaging van de voedingsspanning besluiten, waarop men bij het ontwerp mag anticiperen door de transistoren nog weer dichter opeen te pakken. Een geringer energieverbruik per poort en een grotere pakkingsdichtheid is dan het resultaat.

Overigens vormt juist de vertragingstijd de Achilleshiel van de MOST-systemen. Voor een inverter is deze tijd ruwweg bepaald door de lading aan de uitgang, die toe- of afgevoerd moet worden door de stroom door één van beide MOS-transistoren. Deze te verplaatsen lading is uiteraard gelijk aan het produkt van de uitgangscapaciteit en ΔV , het verschil tussen beide logische niveaus. Vergelijkt men nu de MOST-inverter met zijn bipolaire equivalent, dan blijkt dat, terwijl de MOST-capaciteit doorgaans kleiner is dan bij de bipolaire transistor, daarentegen het quotiënt van spanningsprong en stroom voor de

MOST zoveel hoger ligt dat het uiteindelijke resultaat voor de MOST-vertragingstijd een stuk ongunstiger uitvalt, voor de simpele p-kanaals inverter zelfs al gauw een factor 20. Hierbij dient echter opgemerkt dat dit zoveel slechtere resultaat niet uitsluitend wordt veroorzaakt door de omstandigheid dat de MOST een minder effectieve schakelaar is, maar voor een deel door het feit dat uit het oogpunt van storingsmarge de weerstands-MOST veel hoogohmiger moet zijn dan de actieve schakelaar. Het valt daarom te voorspellen dat door gebruik van enkele alternatieven MOST-logica nog een flink stuk aan snelheid kan winnen.

Een van deze alternatieven is misschien de complementaire inverter, die bijvoorbeeld bestaat uit een n-kanaals-schakeltransistor en een p-kanaals-weerstandstransistor. Naast het voordeel dat deze combinatie van nature geen gelijkstroom doorlaat, verloopt ook het schakelen sneller, doordat het op- of ontladen van de uitgang feitelijk geschiedt door twee tegen elkaar inwerkende stroomgeneratoren.

De thans zoveel grotere traagheid verhindert intussen echter niet dat grote stukken elektronica reeds potentieel in MOST-technologie uitvoerbaar zijn. Te denken valt hier aan onderwerpen als computertelefoniecentrales, opto-elektronica, horloges en industriële controleapparatuur.

Een spectaculair voorbeeld van MOST-schakelingen biedt de ontwikkeling van het halfgeleider random-access-geheugen, waar men uitgaande van de statische cel met zes MOST-transistoren, via een dynamische cel met drie transistoren, nu zelfs tot een dynamisch geheugen met één MOST per cel is gekomen. De enorme winst aan kristaloppervlak, die men met het laatste systeem verwerft, overtreft verre de extra ruimte voor de suppletiecircuits, zodat een monolithisch 4096-bit-geheugen thans in een ver stadium van ontwikkeling verkeert. Met dit laatste voorbeeld is de MOST-technologie ruimschoots de wereld van de integratie op grote schaal binnengedrongen. Ter illustratie: op een oppervlak van tien mm² zijn hier zo'n tienduizend componenten samengeperst.

In dit complexe gebied is de MOST-technologie thans duidelijk dominerend, waardoor MOST-circuits nu reeds een aandeel van 20% van de 400 miljoen dollar grote digitale halfgeleidermarkt hebben veroverd. Er zijn optimisten, die schatten dat dit percentage over enkele jaren zelfs zal zijn opgelopen tot 60%.

Moet men nu concluderen dat binnen het gebied van de L.S.I. de MOST-technologie de dominerende plaats zal behouden met misschien alleen een klein part voorbehouden aan de bipolaire transistor in toepassingen waar snelheid essentieel is? Dit is zeer de vraag,

want er zijn nieuwe ontwikkelingen gaande, die de bipolaire technologie mogelijkwerijs terug kunnen brengen. Een tweetal van deze evoluties wil ik hier noemen.

Eén ontwikkelingslijn loopt via het gebied van de isolatietechnieken. Dat is verklaarbaar, want juist de noodzaak van elektrische isolatie van een bipolaire transistor binnen het monolitische circuit is één van de oorzaken, waarom deze transistor een groter oppervlak inneemt dan de MOST, die immers een dergelijke isolatie niet behoeft. Zoals bekend, wordt deze isolatie veelal tot stand gebracht door middel van verticale p-n-overgangen, die mits aangebracht volgens de gangbare diffusiemethoden echter een behoorlijke zijdelingse spreiding hebben. Het is gebleken dat de isolerende taak veel beter door bijvoorbeeld smalle banen van siliciumoxide kan worden overgenomen. Het aanbrengen van deze banen berust op een plaatselijke oxidatietechniek, die bekend staat onder de naam LOCOS (local oxydation of silicon) of isoplanair. Tevens biedt deze methode extra ruimtewinst doordat de positie van de transistoren onderling automatisch is vastgelegd en doordat weerstanden van kleinere afmetingen mogelijk zijn. Een dichtheid van vijftigduizend poorten komt hiermee in het nabije verschieft, getuige een snel 1024 bit statisch geheugen dat enige maanden geleden gerealiseerd is, zij het nog niet tegen dezelfde kostprijs als het dynamisch MOST-equivalent.

Niet minder belangwekkend is een tweede ontwikkeling die een andere tekortkoming van het conventionele bipolaire i.c. wil corrigeren: de relatief grote omvang van hoge weerstanden, die noodzakelijk zijn om een aanvaardbare dissipatie te bewerkstelligen voor omvangrijke circuits. Nu was het wel bekend dat een complementaire transistor de rol van weerstand kon overnemen, maar dit leidt nog niet tot een compactere schakeling. Het is verrassend dat er na een decennium ontwikkeling van digitale i.c.'s nog plaats was voor een nieuwe elementaire bouwsteen. Ik doel hier op de zogenaamde geïntegreerde injectie-logica, waarbij een simpele complementaire transistor gecombineerd met een in de inverse richting werkende bipolaire schakelaar iedere gewenste logische schakeling kan vormen. Dit systeem is zo compact dat het ruimschoots kan wedijveren met MOST-technologie, al ziet het er vooralsnog niet naar uit dat de grote MOST-geheugens er door bedreigd worden.

Met deze opmerking is feitelijk al aangeduid dat hoewel op dit ogenblik de bipolaire en de MOST-technologie in een fel gevecht zijn gewikkeld om de gunst van de systeembouwer, er uiteindelijk plaats zal zijn voor beide systemen met elk een eigen toepassingsgebied. Maar juist in een groot gebied, waar de verschillen in eigenschappen marginaal zijn, wordt het de elektronicus niet gemakkelijk gemaakt een keuze te doen.

Uiteraard wordt het ontwerpen van L.S.I.-circuits een steeds gecompliceerder opgave, zodat inschakeling van de computer uiterst gewenst is. Ook om economische redenen moet men dit hulpmiddel te baat nemen. Immers, veelal zal een specifieke L.S.I.-schakeling niet tot massale toepassing en productie leiden, zodat de ontwerp- en testfase een aanzienlijk deel van de totaalkosten zal opleveren. Tijden en arbeidsbesparing zijn daarbij dus dringend gewenst. Omdat de meeste onderdelen of knooppunten van een circuit zich niet langer lenen voor elektrische metingen of nabootsing met plankjesmodellen, zoals nog wel gebruikelijk is, moet men in de ontwerpfase gebruik maken van de mogelijkheden het functioneren van het ontworpen systeem te simuleren met behulp van een computermodel. Voor een dergelijk model dienen enerzijds zo nauwkeurig mogelijke, anderzijds zo beknopt mogelijke elektrische modellen voor de bouwstenen beschikbaar te zijn. Helaas kan men met de huidige modellen alleen op zeer grote computers terecht. Voor de testfase zijn inmiddels test generatie programma's ontwikkeld, waarin getracht wordt een gespecificeerde lijst van fouten en hun plaats in het netwerk te localiseren. In hoeverre deze simulatietechnieken uitgebouwd kunnen worden tot een automatische optimalisering van het systeem is nog een vraag; wel zal duidelijk zijn dat een vertrouwensrelatie en bereidheid tot nauwgezette samenwerking reeds in een pril stadium aanwezig moeten zijn tussen opdrachtgever en fabrikant. Om deze reden zal men ook steeds meer i.c.-experts gaan aantreffen bij pure systeembouwers.

Met de komst van de large scale integration beleeft de elektronica weer een stormachtige ontwikkeling, waarbij merkwaardig genoeg de enorme evolutie van nieuwe technologieën, nieuwe principeschakelingen en nieuwe systeemconcepten schril afsteekt tegen het economisch rendement van dit ondernemen op wat langere termijn. Men zou kunnen stellen dat dit te maken heeft met een toenemende kans op instabiliteiten in de middelpuntvliedende werking van het Westers vernieuwingsmotief 'If you can do it, do it'. Aan de periode, waarin basisideeën, voor het merendeel afkomstig van enkele grote industriële laboratoria, door ambitieuze, zeer mobiele, liefst naar eigen ondernemerschap strevende, voor het merendeel in de Verenigde Staten werkende ingenieurs onbekommerd in zeer snel tempo in reële producten konden worden omgezet, lijkt een eind te komen. De door het monolithische circuit ontketende productiecapaciteit brengt zo'n enorme schaalvergroting teweeg - het aantal jaarlijks geproduceerde circuitfuncties vertwintigvoudigde in vijf jaar tijds van een kwart tot vijf miljard - dat begrijpelijkerwijs de maatschappij het aanbod niet meer kan verwerken. Een grondige heroriëntatie op maatschappelijke behoeften en verlangens en de daaruit voort-

vloeiende aanpassing van ontwikkeling en productie, zullen nodig zijn om uit deze impasse te raken.

De somberheid van het moment betekent intussen niet dat de halfgeleider-techniek zichzelf aan het overleven is en op een dood spoor terecht is gekomen. Op wat langere termijn zijn de perspectieven voor met name de large scale integration uitstekend. Strikt formeel gesproken, kan men er op wijzen dat door de gestage groei van de elektronische techniek, waarvan de halfgeleiders dank zij de integratie technieken qua produktenomvang en kosten een steeds stijgend deel uitmaken, juist de halfgeleidertechnologie extra zal groeien. Maar hiermee is lang niet alles gezegd. Er zijn namelijk nogal wat projecten, die alleen dank zij de door L.S.I. ingezette verlaging van de systeem-prijs uitvoerbaar zijn. Enkele hiervan willen wij met name noemen. In de eerste plaats de verdere penetratie van de computer, nu de grootste i.c.-klant, in het dagelijks leven. Er is in dit verband eens opgemerkt dat een nieuwe techniek in het algemeen drie stadia van ontwikkeling te zien geeft. Eerst doet men er dingen mee, die men reeds eerder placht te doen, maar alleen nu beter. Vervolgens gaat men iets nieuws ermee ondernemen, dat niet eerder mogelijk was. Tenslotte gaat men zijn levenspatroon veranderen en zich aanpassen aan de nieuwe mogelijkheden, die de techniek biedt. Welnu, het lijdt geen twijfel dat wij met de computer nog lang niet in de laatste fase verkeren. Wil het zover komen dan zal eerst de toegankelijkheid tot en de communicatie met de computer sterk verbeterd moeten worden en de prijs ervan dalen. Een belangwekkende stap in die richting bieden de door de L.S.I.-techniek voortgebrachte vernieuwingen bij de bouw van computersystemen, zoals de door Van der Weg in zijn oratie 'Van elektronische verschijning tot maatschappelijk verschijnsel' besproken cellulaire logica, programmeerbare logica en de vervanging van stukken software door L.S.I.-hardware.

Een belangrijke rol ook zal de computer in samenhang met de beeld-techniek gaan spelen in het onderwijs, waarbij men meer moet denken aan een verhoging van de efficiency van het leerproces en de mogelijkheid ingewikkelde problemen te simuleren dan – en ik besef dat ik hier niet volkomen onbaatzuchtig redeneer – aan pure vervanging van de docent.

Nauwelijks minder zijn de mogelijkheden op het gebied van het betalingsverkeer, de sturing van het meerwielige verkeer, bewakings- en besturingsystemen en al dan niet preventieve gezondheidszorg. De Goliath onder de systemen, de informatiecentrale met daaraan gekoppeld een verbruikersnet voor bibliotheken, rechtspraak, geneeskunde en politie roept naast de algemeen erkende enorme maatschappelijke baat, ongetwijfeld zoveel problematiek op dat de defini-

tieve vorm een enorme complexiteit te zien zal geven. Voorts lijken de onlangs geïntroduceerde nieuwe concepten van all solid state camera's grote mogelijkheden te bieden voor de twee-richtingstelecommunicatie.

In tegenstelling tot de in sommige vakbladen geuite prognoses en door sommige actiegroepen gewenste ontwikkeling dat de entertainment en consumer elektronica sectoren slechts weinig zullen groeien, menen wij dat juist deze gebieden door de L.S.I.-technieken nieuwe stimulansen zullen krijgen. Waar tot voor kort de kostprijs voor elektronische onderdelen moeizame compromissen dicteerde, komt nu technische perfectie, tegen geringere kosten en geringer energieverbruik, binnen het bereik van de massa. Hetzelfde geldt trouwens voor de auto elektronica, mits daar de problemen op het gebied van de sensoren opgelost kunnen worden.

Tenslotte wil ik nog wijzen op de perspectieven van grotendeels onontgonnen nieuwe takken van publieke dienstverlening zoals de elektronische post en de elektronische krant.

Vele van de genoemde toepassingsgebieden zijn in feite zo complex dat men niet meer van een multidisciplinair maar liever van een multi-institutioneel samenwerkingsverband moet gaan spreken, omdat de innovatie niet meer binnen één instituut kan plaatsvinden. Juist hier zal de elektronisch ingenieur door de centrale plaats, die hij inneemt in de keten fysisch-chemische technologie, elektronica, systeemkunde, het geheel in tact moeten houden.

Intussen is de huidige halfgeleider technologie reeds ver genoeg gevorderd om het merendeel van de elektronische problematiek op te lossen, hetgeen sommigen er wel toe verleid te concluderen dat deze technologie een grote mate van stabiliteit heeft bereikt. Dat deze conclusie te voorbarig is, moet ieder duidelijk zijn, die gedurende de laatste twee jaar de ontwikkelingen op het gebied van de monolitische halfgeleidergeheugens heeft gevolgd. Het gedrang van nieuwe concepten is hier zo groot, dat men wel van het 'geheugen van de maand' spreekt. In het algemeen vragen qua kostprijs, energieverbruik, betrouwbaarheid en optimaal functioneren, alle genoemde applicaties blijvend om nieuwe waarlijk geïntegreerde functies en verdere verfijningen in de halfgeleider technologie zoals een reductie in de grootte van actieve en passieve bouwstenen en betrouwbare verbindingen. Principieel is er trouwens alleszins ruimte voor deze verfijningen, daar bijvoorbeeld de huidige afmetingen in laterale richting nog flink verwijderd zijn van de fysische limieten, die naar onlangs is aangetoond het aantal poorten beperken tot 10^6 à 10^7 per cm^2

Tenslotte zal misschien zelfs door volledige sturing van ontwerpfase,

lay-out, processing, testen en afmontage een perfect geïntegreerd circuit kunnen ontstaan, een afspiegeling van het finale stadium van de halfgeleiderstechniek, namelijk dat van een geperfectioneerde service- of druktechniek.

Hoewel de ontwikkelingen in de vastestof-elektronica stellig ook consequenties hebben voor het onderwijs en het onderzoek aan een Technische Hogeschool, is de concretisering in het studieprogramma al vele jaren een omstreden punt. Een van de belangrijkste oorzaken hiervan is ongetwijfeld dat het hoger onderwijs de technologische grensverlegging niet in de hand heeft gehad, maar al vele jaren door de industrie voor voldongen feiten is geplaatst. Gezien de factoren, die een grote rol in de ontwikkeling van het door ons besproken vakgebied spelen, zoals het multidisciplinaire teamwork, het doelgerichte management, de waar nodig snelle budgetaire maatregelen en – het zij nog eens herhaald – de grote mobiliteit onder de topmensen, zonder dat dit nochtans tot een verlies aan continuïteit leidt bij de toonaangevende laboratoria, viel deze ontwikkeling ook te verwachten.

Nauwelijks een punt van discussie lijkt mij de noodzaak de moderne halfgeleiderstelektronica te onderwijzen. In de toekomst zal vrijwel ieder elektrotechnisch ingenieur met geïntegreerde circuits te maken krijgen, de meerderheid als gebruiker of opdrachtgever, een minderheid als ontwerper, maar daar tussenin een pas recent bestaande, doch snel groeiende categorie, die in dienst van overheid of bedrijfsleven een bemiddelende positie inneemt tussen systeemontwerpers en halfgeleiderfabrikant.

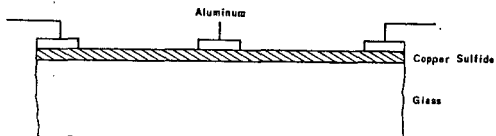
Gelet op de multidisciplinaire aspecten bij heel de i.c.-ontwikkeling zal dit onderwijs vooral de nadruk moeten leggen op een brede basis-kennis van de relevante gebieden. Dit betekent in de praktijk inzicht in de fysica van de vaste stof en daarop gebaseerde bouwelementen, inzicht in de vervaardigingstechnieken, inzicht in de principes van de belangrijkste i.c.-functies, het gebruik hiervan in systemen en kennis-making met computersimulatie van schakelingen.

Gelet op het feit dat in de toekomst de technische ontwikkeling alleen tot stand zal komen door nauwe samenwerking van vele disciplines, lijkt het mij noodzakelijk ook elkaars terrein enigszins te leren kennen en waarderen. Dat betekent voor de elektrotechnische afdeling dat zij een technologische afdeling als vreemde eend in de bijt incorporeert, die zich in eerste instantie met een voortgezet practicum en onderwijs researchprojecten bezighoudt. Er zijn de laatste tijd aanwijzingen genoeg dat de kosten voor de inrichting van zo'n laboratorium minder excessief hoog zijn dan enkele jaren geleden werd aangenomen, al zal men stellig de continue lasten niet kunnen verwaarlozen. Na alle

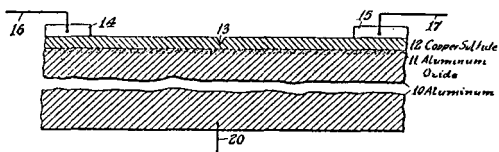
droogtraining door middel van colleges en studieboeken moet het voor menig student niet alleen een nuttige maar ook een verfrissende bezigheid zijn enige tijd te besteden aan het ontwerpen, simuleren, realiseren en testen van een elektronische bouwsteen of functie.

Meer reserves heb ik – en ik deel hier volledig de mening van mijn voorganger Tummers in zijn oratie 'Elektronica en integratie' – ten aanzien van de mogelijkheden binnen de muren van een Technische Hogeschool geïntegreerde circuits te maken, ten dienste van de elektronische systeemgroepen. Om hiertoe een zinvolle bijdrage te kunnen leveren is de aanwezigheid van een gespecialiseerde en geavanceerde technologie absoluut noodzakelijk. In die gevallen, waar binnen het hoger onderwijs stoutmoedige pogingen zijn gedaan deze onmogelijke opgave vorm te geven, zijn de resultaten tot nu toe niet bemoedigend geweest. Het is waarschijnlijk zeker zo effectief de steun van de industrie voor dit soort projecten te vragen. Wanneer men trouwens bedenkt dat de halfgeleiderontwikkeling steeds meer koerst in de richting van speciale, in kleine serie geïntegreerde circuits, dan houdt dit in dat deze industrie ook veel beter ingespeeld raakt op de daaruit voortvloeiende problematiek en dus het hoger onderwijs snellere service zal kunnen verlenen.

Opdat echter de samenwerking tussen elektrotechnici en technologen vrucht zal dragen, is het – het zij bij herhaling gezegd – noodzakelijk elkaars taal zo goed mogelijk te verstaan. Het is voor mij een inspirerende gedachte dat mijn beperkte onderwijstaak aan deze Hogeschool in voortdurende respons met studenten en staf vooral tot een communicatieverbreding zal mogen bijdragen.



Figuur 1. Veldeffecttransistor volgens Lilienfeld.



Figuur 2. Alternatieve veldeffecttransistor volgens Lilienfeld.