

MINIATURISERING AF MIKROELEKTRONIK

- om videnskabeliggjort teknologi
og nytten af at lære fysik.

PROJEKTRAPPORT AF

Linda Szkotak Jensen og
Bodil Harder

VEJLEDERE:

Bent C. Jørgensen
Jens Højgaard Jensen

TEKSTER fra

IMFUFA

ROSKILDE UNIVERSITETS-CENTER
INSTITUT FOR STUDIET AF MATEMATIK OG FYSIK SAMT DERES
FUNKTIONER I UNDERVISNING, FORSKNING OG ANVENDELSER

IMFUFA, Roskilde Universitetscenter, Postbox 260, 4000 Roskilde

MINIATURISERING AF MIKROELEKTRONIK

- om videnskabeliggjort teknologi og nytten af at lære fysik

Projektrapport af Bodil Harder og Linda Szkotak Jensen

Vejledere: Jens Højgaard Jensen og Bent C. Jørgensen

IMFUFA tekst nr. 74/84, RUC. 128 sider. ISSN 0106-6242

Abstract

I projektet undersøges elektronikteknologiens historiske udvikling med henblik på at illustrere en ændring i den teknologiske udviklings karakter.

Et vigtigt karakteristika ved denne ændring er at videnskaben (fysik) indgår i et tættere samspil med teknologien nu end tidligere.

Derefter beskrives nogle fysiske overvejelser som er relevant i forbindelse med miniatureringen af mikroelektronikken med det formål at undersøge, om indsigt i fysik kan være nyttig når man ønsker at danne sig overblik over en teknologisk udvikling.

INDHOLD:

side:

INDLEDNING:..... 4

DEL 1:

HISTORISK AFSNIT: SAMSPILLET MELLEML FYSIK
OG TEKNOLOGI I DEN UDVIKLING, DER FØRTE
FREM TIL MIKROELEKTRONIKKEN I DAG.

Indledning: om elektronikteknologi..... 10

RØRTEKNOLOGIEN:

Baggrunden for udviklingen af rørteknologien... 11.
Radiotransmission/dioden/trioden..... 13.
Miniaturisering af rør 18.
Problemer vedr. fremstilling af små
billige og stabile rør:
elektronrørets effektforbrug..... 20.
elektronrørets vakuum..... 21.
mekanisk stabilitet..... 22.
opsummering..... 23.

FASTSTOFELEKTRONIKKENS BEGYNDELSE:

TRANSISTOREN.

Baggrunden for opfindelsen..... 25
kendskabet til halvledere..... 25
Bell-laboratorierne..... 28
Opfindelsen af transistoren..... 30
motivationen bag arbejdet..... 31
selve opfindelsen..... 32
Shockleys egen vurdering af forholdet
grundvidenskab og anvendelsesorientering
i transistoropfindelsen..... 34.
Faststofensretterens og forstærkerens
princielle virkemåde:
gennemgang af nødvendige begreber..... 35
halvlederensretteren..... 39
junktionstransistoren..... 42
felteffekt-transistoren..... 43
Udviklingen af transistoren i 50'erne:
forskning og udvikling i 50'erne..... 44
resultaterne af indsatsen..... 47
militærets betydning..... 48

MIKROELEKTRONIKKEN:

<u>Det integrerede kredsløb slår igennem.....</u>	50
<u>Planarprocessen/det integrerede kredsløb.....</u>	50
<u>Industriens udviklingsbetingelser i 60'erne.....</u>	57
<u>Miniaturiseringen.....</u>	58
<u>Forholdet mellem videnskab og teknologi belyst ved eksempler.....</u>	61

KONKLUSION 1.

<u>Rørteknologien.....</u>	68
<u>Transistoren.....</u>	69
<u>Mikroelektronikken.....</u>	70
<u>Hvad har vi vist, og hvad har vi ikke vist?.....</u>	73

DEL 2.

FYSIKKEN I MINIATURISERINGEN:

<u>Indledning.....</u>	77
------------------------	----

HVOR SMÅ KAN MAN LAVE DEM?

<u>Hvor nøjagtigt kan man definere den stråle, man tegner med? diffraktionsproblemer.....</u>	78
<u>Hvor godt kan billedet fastholdes, som strålingen tegner? spredningseffekter i underlaget.....</u>	84
<u>Hvor nøjagtigt kan man styre forurenin- gen af halvlederen? dopingsvariationer.....</u>	87

HVOR SMÅ KAN DE VÆRE HVIS DE SKAL VIRKE?

<u>Scalingslove.</u>	
scaling af aktive komponenter.....	92
scaling af forbindelseslinier.....	95
<u>Problemer, som opstår ved scalingen.</u>	
elektromigration.....	99
energidissipation.....	101
"short-channel-effect".....	103
"hot-electron-effect".....	103
mindste tærskelspænding.....	104
baggrundsstråling.....	105

MINIATURISERING PÅ CHIP-NIVEAU OG PÅ APPARAT-
NIVEAU.

"Pakkeproblemet".....107.
Designproblemer.....111.

KONKLUSION 2.

Hvordan indgår fysik i den teknologiske
udvikling?.....115.
Har indsigt i fysik en overbliksgivende
karakter?.....116.

LITTERATURLISTE.....120.

INLEDNING.

På IMFUFA hersker der nogle opfattelser/postulater om problemkomplekset fysik-teknologi-samfund. Disse postulater virker nærmest som en slags begrebsramme, der strukturerer de diskussioner om fysikkens samfundsmæssige placering, der føres her på stedet.

Da vi startede på overbygningen, var det med ønsket om at beskæftige os med fysik i en samfundsmæssige sammenhæng. Vi syntes, den opstillede forståelsesramme lød besnærende, og vi fik derfor lyst til, at vores projekt skulle yde et bidrag til den fælles diskussion omkring de opstillede postulater. Men på grund af deres abstrakte karakter, syntes vi ikke, vi umiddelbart kunne "forstå dem", eller tage stilling til dem. Dette fik os til at vælge, i stedet for at opstille vores "egne" teser, at tage udgangspunkt i de herskende, og forsøge at "afprøve dem på virkeligheden", ved at fylde noget konkret indhold i dem.

Vi vil derfor, i det følgende, præsentere de to hovedteser, som dette projekt har til formål at undersøge. De udgør den ramme projektet er tænkt ind i, og de er derfor nødvendige for at forstå fremstillingen og forløbet i resten af projektet.

TESE nr. 1:

I dette århundrede er der, indenfor visse områder, sket et skift i den teknologiske udviklings karakter. Dette skift kan karakteriseres ved, at hvor teknologien i forrige århundrede hovedsagelig var videnskabsbaseret, så er den i dag blevet videnskabeliggjort i stigende grad.

Videnskabsbaseret teknologi er karakteriseret ved, at teknologiske opfindelser i en eller anden forstand udspringer af videnskabeligt arbejde/forskning, men opfindelserne skyldes ikke et organiseret samarbejde mellem teknologi og videnskab. Teknologi og videnskab udvikler sig ret selvstændigt i forhold til hinanden med lejlighedsvis og tilfældig gensidig påvirkning og stimulans.

Videnskabeliggjort teknologi er karakteriseret ved, at videnskab og teknologi er smeltet sammen i langt højere grad end tidligere. Samspillet foregår ikke længere tilfældigt, men er blevet institutionaliseret. Institutionaliseringen foregår bl.a. ved, at videnskabeligt uddannet arbejdskraft beskæftiges i den industrielle produktion. Her laver de dels traditionelle ingeniøropgaver⁺, som før blev varetaget af folk med kortere uddannelser. Desuden arbejder de, der er ansat på forsknings og udviklingsafdelinger, med udvikling af ny videnskabelig viden med henblik på at udnytte den teknologisk.

Som eksempel på en videnskabsbaseret teknologi kan nævnes elektricitetsteknologien i forrige århundrede og begyndelsen af dette århundrede. Som eksempel på videnskabeliggjorte teknologier kan nævnes a-kraften eller mikroelektronikken.

Når vi fremstiller det på denne måde, kunne det tyde på, at påvirkningerne mellem videnskab og teknologi altid anses for at gå den ene vej: fra videnskab til teknologi. Dette er ikke tilfældet. Påvirkningerne går i ligeså høj grad den anden vej, og vi ønsker i øvrigt ikke at gå ind i nogle diskussioner af de kausale forhold i videnskabs-teknologidynamikken.

TESE nr. 2

En anden tese handler om "nyttens af at lære fysik".

Fysik er af stor betydning for samfundet bl.a. på den måde, som er beskrevet under tese 1. Dette betyder, at mange mennesker lærer fysik for at varetage de funktioner i samfun-

⁺ Vi er klar over, at der er uklarhed forbundet med, at bruge uddannelsen som kategori for, om arbejdet er "videnskabeligt" eller ej, bl.a. fordi uddannelsernes indhold er forskelligt fra land til land. Derfor er det også forskelligt, hvad man mener med en "ingeniør", og hvad man mener med en "fysiker".

Da vi i midlertid ikke er gået ind i en nærmere undersøgelse af disse uddannelseres indhold, er dette en uklarhed læseren må leve med i resten af projektet.

det, hvor fysik indgår som instrument. Postulatet går ud på, at fysik også er nyttigt at lære for de, der ikke skal indgå i disse funktioner p.gr.a. dets overbliksgivende og almentdannende funktion. Den teknologiske udviklings karakter bliver nemlig sværere og sværere at forstå, i takt med videnskabeliggørelsen, og det, der bl.a. skal til for at forstå den, er videnskabelig indsigt. Vigtigheden af, på en eller anden måde, at kunne overskue den teknologiske udvikling, understreges af dennes stadig mere dominerende indflydelse på samfundet, og dermed på livsbetingelserne for den enkelte.

Der er i midlertid vanskeligheder forbundet med at realisere denne almentdannende funktion i praksis. Vanskeligheder af en særlig ondsindet karakter, som på IMFUFA er blevet kaldt "den sorte dialektik". Den sorte dialektik består i, at efterhånden som teknologien videnskabeliggøres og får større og større samfundsmæssig betydning, bliver det stadig vigtigere at sørge for, at alle får mulighed for at forstå, hvad der foregår, - men samtidig bliver det sværere og sværere - netop p.gr.a. samme videnskabeliggørelse.

Man kan derfor, som underviser i fysik, stå med valget mellem enten at lave så tilpas mange forenklinger af den fysik, der anvendes i samfundet, at folk kan følge med. Der ved kan man evt. have held til at afmystificere fysikken. Men samtidig tilsløres dens funktion f. eks. i den videnskabeliggjorte produktion, fordi det bliver ubegribeligt, at så mange fysikere er nødvendige, hvis det, de laver, i principet kan forklares på tre timer.

Den anden mulighed er, at fremstille fysikken i dens uforfalskede samfundsmæssige/teknologiske sammenhæng. Men da kompleksiteten herved tager et spring opad, risikerer man meget nemt, at eleverne ikke forstår ret meget, og mystificeringen og fremmedgørelsen overfor faget bliver total.

De følgende afsnit er resultatet af vores forsøg på, at fylde indhold i de abstrakte formuleringer med elektronikteknologien som eksempel.

At vi valgte elektronikken skyldtes, at vi ønskede at vælge et oplagt eksempel, og ikke et, hvor man kunne diskutere,

hvorvidt det nu lige netop gjaldt for denne, eller om det var undtagelsen, der bekræftede reglen. Motivet var, at finde ud af "om der overhovedet er noget om snakken", og i den forbindelse gik vi ud fra, at der er undtagelser og nuancer, foruden de almindelige problemer, der altid er med at få en abstrakt begrebsramme til at passe på virkeligheden.

Projektet er delt op i to hovedafsnit. Det første er et historisk rids over elektronikteknologiens udvikling. Formålet med afsnittet er at belyse tese 1, om skiftet mellem videnskabsbaseret og videnskabeliggjort teknologi. Dette skift fandt sted med overgangen til faststofelektronikken i midten af dette århundrede. Skiftet markeredes med opfindelsen af transistoren i 1947. Da det bl.a. er skiftet, der interesserer os, har vi gjort en del ud af selve opfindelsen af transistoren. På den måde er afsnittet kommet til at bestå af tre dele: rørteknologiens udvikling (eksemplificeret ved den trådløse telegrafi), opfindelsen af transistoren i 1947 og dens udvikling i 50'erne, og endelig udviklingen af mikroelektronikken op til i dag.

Den historiske fremstilling forestiller ikke, at være en fyldestgørende beskrivelse af teknologiudviklingen. Vi har blot set det som opgaven, at indfange nogle af de træk som karakteriserer hhv. videnskabsbaseret og videnskabeliggjort teknologi.

I det andet hovedafsnit i projektet forsøger vi på følgende ting:

- 1) Vi vil dels gå tættere på samspillet mellem fysik og teknologi ved at fokusere på miniaturiseringsprocessen indenfor mikroelektronikken. Dette er stadig en uddybning af tese 1, idet vi forsøger at forstå, hvorfor fysikken egentlig er nødvendig i teknologiudviklingen, og dermed hvorfor den er videnskabeliggjort. Det historiske afsnit endte med at sandsynliggøre at fysik indgår, som en nødvendig ingrediens, i den teknologiske udvikling, men afsnittet havde kun ansatser til at forstå, hvad det er, fysikken er nødvendig til. Derfor kan

man sige, at formålet med dette afsnit er, at svare mere uddybende på spørgsmålet: "Hvordan indgår fysik i den teknologiske udvikling?".

Her var klart én måde fysik indgår i miniaturiseringen på, som straks sprang os i øjnene, nemlig til at fortælle, hvor man kan støde på grænser for fortsat miniaturisering. En stor del af afsnittet forsøger derfor at gøre rede for fysikkens funktion i den forbindelse.

Det er klart at fysikken er nødvendig i miniaturiseringen på andre måder, end til at sige hvilke grænser, man kan støde på. Den bruges fx, som omtalt i det historiske afsnit til at forudberegne virkninger af forskellige teknologiske nyskabelser. Men hvordan dette nærmere går for sig, er for indviklet til, at vi kan komme med illustrative eksempler på det i dette projekt. Dette accepterede vi i midlertid ikke fra starten, hvorfor projektet faktisk i lang tid var lammet af den sorte dialektik.

2) Det andet, vi forsøger på med dette afsnit, er, at afprøve tesen om, at indsigt i fysik har en overbliksgivende funktion, med os selv som eksempler. Den indsigt, vi har forsøgt at tilegne os, er indsigt i nogle af de overvejelser, som man kommer ind på i forbindelse med spørgsmålet om grænser for miniaturisering af mikroelektronik. Denne indsigt er holdt på et ret behersket niveau, bl.a. fordi vi endnu ikke i vores uddannelse har stiftet bekendskab med kvantemekanik eller halvlederfysik på andet end en overfladisk måde.

Det er klart, at når vi valgte at sætte os ind i den fysik, var det fordi, vi regnede med, at det ville bidrage til en forståelse af det, der er den røde tråd: fysikkens funktion i den teknologiske udvikling.

DEL 1

SAMSPILLET MEL-
LEM FYSIK OG
TEKNOLOGI I
DEN UDVIKLING
DER FØRTE FREM
TIL MIKRO-
ELEKTRONIKKEN
IDAG

HISTORISK AFSNIT:

SAMSPILLET MELLEM FYSIK OG TEKNOLOGI I DEN UDVIKLING, DER FØRTE FREM TIL MIKROELEKTRONIKKEN I DAG.

INDLEDNING: Om elektronik-teknologi.

Elektronikteknologi handler om information. Information i form af elektriske signaler. Ved hjælp af elektronik kan man omdanne, transportere, bearbejde og lagre information i form af elektriske signaler. Desuden kan man, ved at kombinere elektronisk udstyr med elektromekaniske apparater, udnytte en lagret information til styring og kontrol af f.eks. industrielle processer (robot-teknologien).

Man kan altså opdele elektronikens funktion i tre hovedområder, som også har forskellige perioder historisk set:

- 1) "Omdannelse og transport" af information.

Dette var det første, man brugte elektronik til, f.eks. i form af trådløs telegrafi. Omdannelsen af signaler fandt kun sted i det omfang, det var nødvendigt af hensyn til transporten. Her var det især forstærkning, ensretning og "udglatning", man havde brug for. Disse former for omdannelse klarede man v.hj.a. rør indtil faststofelektronikken kom ind i billedet.

- 2) "Bearbejdning og lagring" af information.

Denne side af elektronikken begyndte man først for alvor at udvikle i midten af dette århundrede med computere, EDB og ETB. De første computere blev lavet v.hj.a. rør. De største og berømteste rørkomputere var ENIAC og MANIAC, som bl.a. blev brugt i USAs atombombeprogram under krigen. Rørkomputere var i midlertid noget uhandige og upålidelige at have med at gøre, fordi der var så mange rør, at der hele tiden gik nogen i stykker. Der kom derfor først for alvor gang i computer og EDB teknologien med faststofelektronikken.

- 3) "Processtyring og kontrol" v.h.j.a. information

Denne funktion af elektronikken er først blevet udviklet for alvor inden for de sidste 10 år, og er endnu kun i sin vorden. Denne udvikling bygger naturligvis på elektronikkens informationsbearbejdende evner, de er bare udnyttet til andet end blot informationsbearbejdning. Grundenheden er stadig de integrerede kredse.

I projektets første afsnit, som handler om rørteknologien, er det informationsoverførselssiden af elektronikken, vi ser på. Som eksempel har vi valgt den trådløse telegrafi. Dette giver os mulighed for at forstå nødvendigheden af to grundlæggende komponenter i elektronikken: ensretteren og forstærkeren.

RØRTEKNOLGIEN: eks: trådløs telegrafi.

BAGGRUNDEN FOR UDVIKLINGEN AF RØRTEKNOLOGIEN:

Den videnskabelig baggrund for udnyttelsen af elektromagnetiske fænomener til at sende meddelelser med, blev skabt i forrige århundrede af fysikere som Faraday, Maxwell og Hertz.

I 1831 opdagede Faraday, at en magnet i bevægelse kunne inducere strømstød i en ledning: den såkaldte elektromagnetiske induktion. Hvis man bevægede magneten således, at strømstødenes længde og interval udgjorde en kode, kunne man altså sende en meddelelse gennem ledningen. Dette princip blev udnyttet i de første telegrafer.

I 1860'erne byggede Maxwell videre på Faradays resultater og gav en teoretisk fortolkning af fænomenet. Maxwell sammenfattede den daværende viden om elektromagnetiske fænomener i sine 4 berømte ligninger. De fire ligninger er en matematisk beskrivelse af de love, de elektromagnetiske fænomener følger. Da han opstillede ligningerne måtte han, for at ligningssystemet skulle være konsistent, tilføje et eks-

tra led til en af ligningerne. Dette led indikerede, at der fandtes "elektromagnetisk stråling", som udbredte sig med lysets hastighed.

Den praktiske eftervisning af, at de elektromagnetiske stråler fandtes, tog Hertz sig af i 1888. Elektromagnetiske stråler kunne skabes ved at lade elektriske ladninger svinge frem og tilbage i en ledning. Hertz fremstillede en såkaldt åben svingnings kredsløb ved hjælp af hvilken, han frembragte elektromagnetiske bølger. Disse var han i stand til at opfange et andet sted i rummet, idet bølgerne fik elektriske ladninger til at svinge frem og tilbage i et modtager system. Samtidig påviste han, at de elektromagnetiske bølger havde de samme egenskaber som lys (reflektion og brydning) og sandsynliggjorde på den måde, at lys var elektromagnetisk stråling.

Efter Hertz' forsøg var det videnskabelige grundlag for trådløs telegrafi sådan set tilstede, idet det var muligt at skabe og opfange elektromagnetiske signaler. I midlertid lod teknikken på den tid endnu meget tilbage at ønske, inden man kunne sende og modtage komplicerede signaler i en nogenlunde kvalitet. De svage punkter var i lang tid muligheden for forstærkning og ensretning af de elektriske signaler. (Kilder: 1,2,3)

I begyndelsen havde man ikke nogen forstærker, og man kunne derfor kun opfange og identificere signaler på meget korte afstande. Apparaterne var i øvrigt slet ikke fintmærkende nok til, at sende så komplicerede signaler som omdannede lydsvingninger. Dette hang sammen med at man i starten ikke rådede over ensrettere, som kunne ensrette det indkomne signal direkte. I starten var modtageren bare en indretning (kohærens), som blev ledende under påvirkning af de elektromagnetiske bølger, og som et batteri så kunne sende strøm i gennem.

Senere fremkom krystaldetektoren, som direkte kunne ensrette det indkomne vekselstrømssignal. Denne blev opfundet af en fysikprofessor, Braun, idet han opdagede, at kontakten mellem en metaltråd og mineralet galena (blyulfid) virkede

som en ensretter. Galena er en halvleder, og krystaldektoren var således den første halvlederelektroniske komponent. Dens fremkomst skyldtes, at fysikere (siden Faraday i 1833 havde opdaget, at i nogle materialer faldt modstanden med stigende temperatur) havde gået og rodet med forskellige materialers elektriske egenskaber. På det tidspunkt vidste man ikke, hvad det var, der frembragte den ensrettende virkning. Den begrænsede teknologiudvikling, der fulgte efter dens opdagelse, gik derfor ud på, at man efter "try and error"-metoden eksperimenterede sig frem til, hvordan man opnåede den bedste virkning.

Krystaldektoren var en ustabil indretning, og omkring århundredeskiftet blev den udkonkurreret af vakuumsdioden. Vakuumsdioden var ikke en fysisk opfindelse, men udsprang af glødelampeindustrien. (5, s. 67) Dioden var mere pålidelig end krystaldektoren, men mere strømforbrugende.

Omkring 1906 opdagede amerikaneren De Forest, at man ved at indføre en 3. elektrode i dioden kunne styre strømmen af elektroner fra gløde tråden (katoden) til den kolde elektrode (anoden). Det var en epokegørende opdagelse fordi man på den måde for første gang kunne opnå en egentlig forstærkervirkning. (Kilder: 4,5)

RADIOTRANSMISSION.

Radiotransmission er overførsel af signaler over store afstande via elektromagnetiske bølger. Hvis transmissionen skal have nogen mening, er det selvsagt ikke nok bare at sende en elektromagnetisk bølge gennem luften. Den må være indrettet sådan, at den indeholder en informationsmængde. Det kan f.eks. være den information, der er indeholdt i noget menneskelig tale. I stedet for, som ved den første form for telegrafi, hvor man var nød til at oversætte talen til en kode, der kunne transporteres i form af "strømstød" - "ikke-strømstød" alfabetet (morsekoden f.eks.), kan talens lydølger i luften omdannes til elektriske svingninger, som igen kan omdannes til

elektromagnetiske bølger. Talen går på den måde hel i gennem, og kommer ud af højtaleren hos modtageren. Det hele foregår på følgende måde:

Hos afsenderen omdanner en mikrofon talen til elektriske vekselstrømssignaler, der varierer ligesom lydsvingningerne. Dette sker ved at talen får en membran til at svinge frem og tilbage. På membranen er der fastgjort en magnet, som inducerer strøm i en spole, en strøm, som har bevaret lyd-signalernes form.

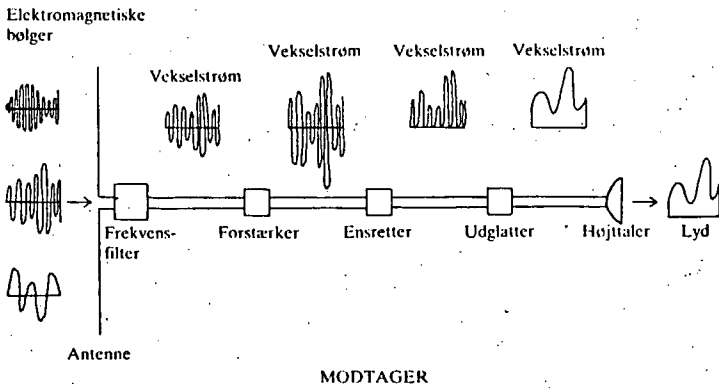
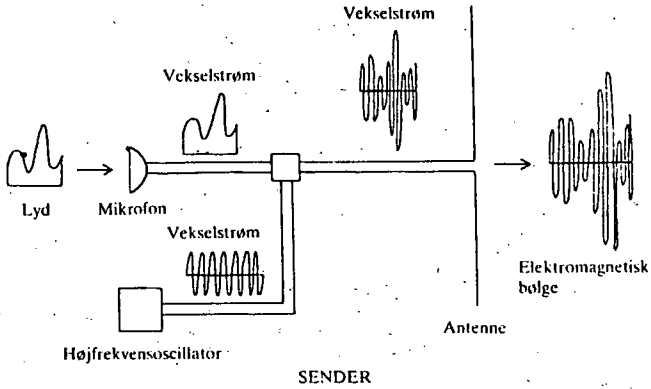
Nu har vi så omdannet talen til et vekselstrømssignal. Det skulle vi så gerne have sendt gennem luften i form af elektromagnetiske bølger. Men inden vi gør det, må vi lige sørge for, at vores modtager kan skille det ud fra resten af de signaler, der vælter gennem luften. Det gør vi ved at kombinere vekselstrømssignalet fra mikrofonen med en helt bestemt højfrekvent vekselstrøm. Vekselstrømmen har nu en helt bestemt frekvens, som modtageren kan indstilles til at modtage. Sammenlægningen af de to strømme bevirker, at vores oprindelige signal viser sig ved forskellig amplitude af det højfrekvente vekselstrømssignal. Denne form for transmission kaldes AM for amplitude-modulation. Der findes også en anden form,

hvor signalet viser sig i form af forskellig frekvens. Denne form kaldes FM efter frekvens-modulation.

Hvis vi holder os til AM, får det kombinerede vekselstrøms-signal elektronerne til at svinge i afsenderens antenne, og fra den forplanter sig elektromagnetiske bølger med en bestemt frekvens ("bærebølgefrequensen") og en amplitude, der svinger i takt med de oprindelige lydsvingninger. Princippet er skitseret på figur 1.

Men nu skal vi have reddet vores oprindelige signal ud af suppedasen igen hos modtageren. Her er det, vi kommer til ensretterens og forstærkerens funktion.

Forstærkeren er nødvendig fordi afsenderen udsendte bølgerne i alle mulige retninger, og det derfor kun er en lille del af signalet, der når frem til den enkelte modtager.



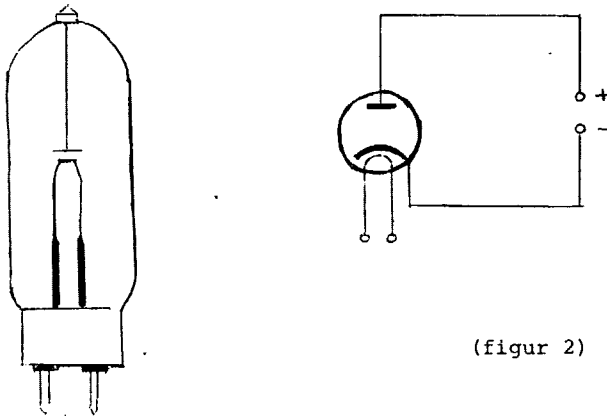
Principskitse for radiotransmission.

Figur 1. (6, side 78)

Det første, der sker hos modtageren, er, at den bestemte frekvens vælges ud. Hvordan det sker, vil vi ikke komme nærmere ind på her. Derefter kommer forstærkningen. Efter forstærkningen omdanner en ensretter vekselstrømssignalet til et jævnstrømssignal. Dette sker af hensyn til den efterfølgende modulation (udglatning), som skal genskabe det oprindelige signal fra den skiftende amplitude. Hvis ensretteren ikke havde været der, ville modulationen have bevirket en fuldstændig udglatning af signalet, så amplituden var blevet nul.

DIODENS FUNKTION.

En diode består nærmest af en glødelampe, hvori der foruden glødetråden er anbragt en kold elektrode i form af en metalplade. En principskitse kan f.eks. se sådan ud:



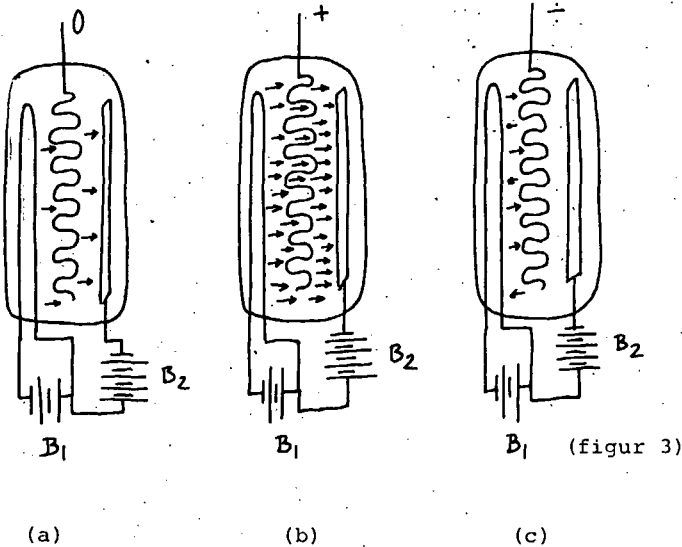
(figur 2)

Hvis den kolde elektrode bliver positivt ladet, vil der gå en strøm af elektroner, udsendt fra glødetråden, til den. Hvis den bliver negativt ladet, vil der ikke gå nogen strøm, fordi elektronerne ikke har energi nok til at løsrive sig fra den kolde plade. Dioden virker på den måde som en ensret-

ter. Denne virkemåde blev omkring århundredeskiftet forklaret af fysikerne Fleming og Thomson.

TRIODENS FUNKTION.

Triodens virkemåde kan forklares på følgende måde efter denne principskitse:



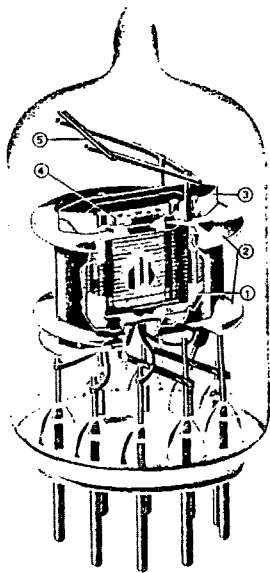
Spændigen over B_1 bevirker, at der går en strøm gennem glødetråden, som ophebes. Denne spænding er ret lille. Spændingen over B_2 er større og bevirker en spændingsforskel mellem glødetråden og anoden, som trækker elektroner fra katoden til anoden. I a) er der ikke nogen gitterspænding, og elektronernes bevægelser påvirkes derfor ikke synderligt af gitteret. I b) har gitteret positiv spænding, og medvirker derfor til at trække elektroner ud af katoden. Af disse vil nogen ramme gitteret på deres vej til anoden, men det er ikke ret mange, p.gr.a. gitterets ringe udstrækning. De fleste går uhindret i gennem, og en positiv spænding på gitteret medfører derfor en kraftig stigning i anodestrømmen. Modsat vil en negativ spænding på gitteret bevirke en fra-

stødning af elektronerne fra katoden, og dermed en mindre anodestrøm, som vist i c) på figur 3.

MINIATURISERING AF RØR.

I perioden 1900 til 1960 skete der en stærk udvikling i anvendelsen af elektroniske apparater, baseret på vakuumelektronrør, til brug ved måleprocesser og signaltransmission.

Fra opfindelsen af vakuumdioden i 1904 og trioden i 1906 udvikledes efterhånden et stort antal rørtyper, dels med mere kompliceret indretning (f.eks. flere gitre) og dels med specielle egenskaber: stor forstærkning, særlige udformninger af rørkarakteristikker, impedanseegenskaber osv.



Figur 4.

Dette er en pentode af en speciel kvalitet, med kontrolgitteret udført i en såkaldt "rammekonstruktion."

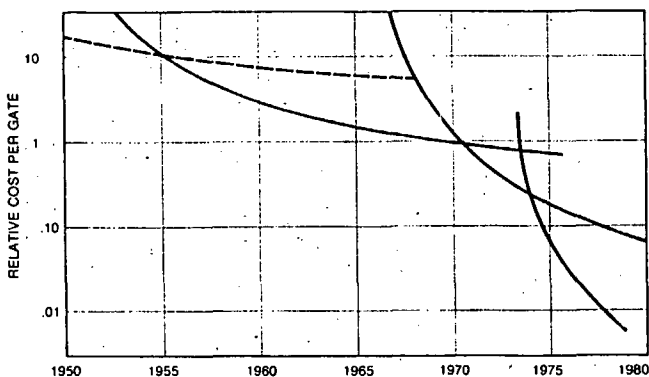
(3) er anoden og (4) er katoden.

Man ser, at det er en forholdsvis indviklet konstruktion, som er besværlig at miniaturisere bl.a. fordi visse dele af konstruktionen skulle udføres manuelt.

Efterhånden udvikledes stadig mindre og mere stabile rør, f.eks. små dobbeltrør til brug i logiske kredsløb. Fra begyndelsen af 1940'erne kunne man således fremstille såkaldte miniature og subminiature rør med største udvendige dimensioner fra nogle cm. og ned til 1 cm. (De første transistorer fyldte ca. det samme som de mindste rør).

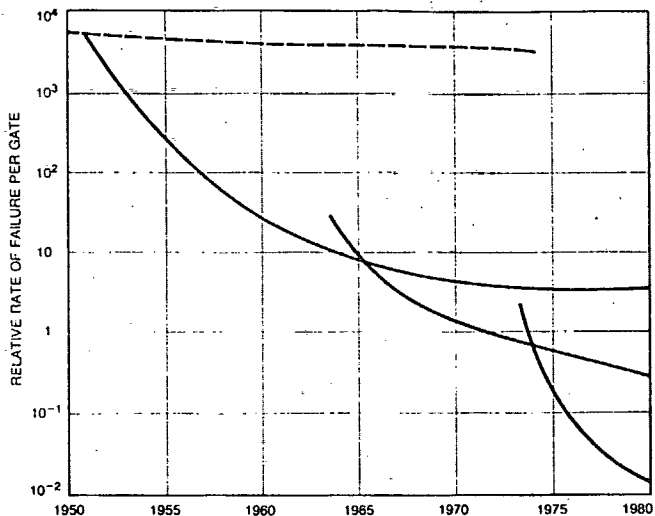
Udover selvsagt at være mindre pladskrævende, havde disse miniaturerør bedre egenskaber ved høje frekvenser, større modstandsdygtighed overfor rystelser samt et mindre effektforbrug.

De første digitalregnemaskiner blev bygget med vakuumelektronrør (ENIAC indeholdt ca. 18.000 rør), men var plaget af voldsomme problemer, især m.h.t. opretholdelse af en passende lav arbejdstemperatur og opnåelse af tilstrækkelig driftssikkerhed i de mange tusinde logiske kredsløb. Disse regnemaskiner var derfor dels meget dyre at bygge, og dels vanskelige og dyre at holde i drift.



Figur 5.

Figuren viser reduktionen i prisen for en logisk funktion udført med hhv. vakuumbør (den stiplede linie), med diskrete transistorer, med integrerede kredse på Small-Scale integration og Large-Scale integration niveauet. Man kan se, at prisen for rør ligger ret jævnt på et ret højt niveau. (Kilde: Scientific American, sep. 1977.)



Figur 6.

Figuren viser fejlraten for en logisk funktion. Igen repræsenterer kurverne hhv. vakuumrør, diskrete transistorer og SSI og LSI- integrerede kredse. Igen ligger vakuumrørene stabilt på et ret højt niveau sammenlignet med transistorer og integrerede kredse. (Kilde Scientific American, sep. 1977). (7, side 208)

Trods store anstrengelser opnåedes ikke noget gennembrud i retning af væsentlig billigere og (især) mere pålidelige elektronrør, som det illustreres af figur 5 og figur 6. Det fremgår af figur 6, at transistorerne hurtigt totalt udkonkurrerede elektronrøret hvad angår stabilitet.

Problemer vedr. fremstilling af små, billige og stabile rør.

Elektronrørets effektforbrug.

Elektronrørets katode skal opvarmes til en ret høj temperatur for at emittere elektroner. Den arbejder i praksis med temperaturer i intervallet 1000 - 2700 K, afhængigt af katode-

materialiet. Ved disse temperaturer afgives en stor effekt pr. cm^2 ved varmestråling til omgivelserne, herunder de andre dele af røret, såsom gitre og anode. Dette giver besvær med at holde temperaturen i de forskellige dele af røret nede (man må indføre kølefinner etc.), hvilket er nødvendigt for at undgå ændringer af overfladerne samt undgå ændringer i de geometriske forhold p.gr.a. varmeudvidelsen.

Fremgangsmåden til nedsættelse af varmeudstrålingen fra katoden er især at benytte overflader med stor emissionsevne (lavt løsrivelsesarbejde, ϕ). En wolfram katode ($\phi = 4,52$ eV) skal opvarmes til ca 2700°K . Derimod kan Th-belagte wolfram katoder ($\phi = 2,6$ eV) nøjes med ca. 1900°K , Ba-belagte katoder ($\phi = 1,7$ eV) med $1200 - 1500^\circ\text{K}$. De såkaldte oxidkatoder (belagt med Ba- eller Ca-oxid) med $\phi = 1$ eV kan nøjes med en temperatur på ca. 1000°K .

Imidlertid har disse "lav-temperatur"-katoder den ulempe, at de er mindre holdbare end en wolframkatode. Det skyldes, at deres overfladebelægning gradvis ødelægges af bombardement af de ioner, som opstår ved elektron-bombardement af restgassen i røret, og som accelereres i feltet mellem katode og anode hen mod katoden. Man siger, at røret bliver træt eller forgiftet.

Også elektronbombardementet af anoden bidrager væsentligt til varmeproduktionen i røret, og anoden må bl.a. udstyres med kølefinner for at øge det varmeafgivende areal.

For at undgå rumladningsproblemer og få veldefinerede elektronbaner, er det nødvendigt at arbejde med en vis minimal feltstyrke i røret. Når rørets dimensioner mindskes, reduceres den nødvendige anodes ænding, og anodestrømmen mindskes ligeledes. Den samlede afsatte effekt på anoden mindskes, men effekttheden (afsat varme/ cm^2) mindskes ikke. Tilsvarende gælder for varmeafgivelsen ved katoden.

Elektronrørets vakuum.

Det er nødvendigt at opretholde et godt vakuum i elektronrøret ($< 10^{-6}$ mmHg). Dels for at undgå, at der opstår en, af hensyn til rørets karakteristikker, uønsket ionstrøm i konkurrence med elektronstrømmen. Og dels for at undgå øde-

læggelse af katoden p.gr.a. ionbombardement og kemiske - reaktioner.

Når røret fungerer vil alle overflader i røret opvarmes kraftigt p.gr.a. de ovennævnte varmeafgivelser på katode og anode. Det får alle overflader til at afgive evt. absorberede gasser. Ligeledes kan gennemføringen gennem rørets glasindkapsling føre til forringelse af vakuumet i røret. Man imødegår dette problem ved at fordampe et lag barium på glasbeholderens inderside efter afsmeltningen af røret. Denne barium-film virker som "getter".

Ved formindskelsen af rørets dimensioner forøges problemerne med at opretholde et tilstrækkeligt godt vakuum, fordi volumenet er proportionalt med d^3 , mens overfladearealet er proportionalt med d^2 , hvor d er den lineære dimension.

Mekanisk stabilitet.

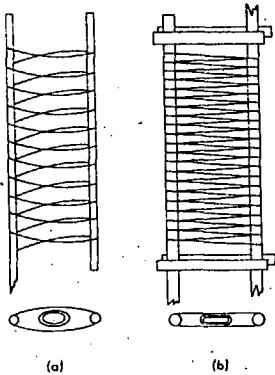
Det er meget væsentligt for rørets stabilitet m.h.t. dets elektriske parametre, at den rumlige konfiguration af katode, gitre og anode er konstant. Det stiller store krav til den mekaniske stabilitet, som flg. eksempel kan illustrere:

Det er bl.a. væsentligt, at afstanden mellem katoden og styre-gitteret er meget lille i forhold til afstanden mellem katoden og anoden. I miniaturerør er katode-gitterafstanden ofte mindre end 0,1 mm. For at holde rørparametrene indenfor rimelige grænser må variationerne i denne afstand kunne holdes indenfor få μ . Dette stiller krav til konstruktionens design, f.eks. kan man søge at løse ovennævnte problem ved, at vikle styregitteret på en stiv ramme, så gitterets tråde omslutter katoden. (Den såkaldte "rammekonstruktion", se figur 7). Desuden stiller det krav om stor stivhed og stabilitet af det mekaniske system, bestående af metalstænger og isolation, som bærer katode, anode og gitre. Det skal være stabilt både overfor rystelser og overfor opvarmning.

Når rørets dimensioner mindskes skærpes kravene til tolerancegrænserne, dvs at kravene til det mekaniske system bliver relativt større, hvilket alt andet lige medfører, at det

mekaniske ophængssystem ikke kan formindskes i tilstrækkelig grad.

Selv om systemet er tilstrækkeligt mekanisk stabilt, kan man alligevel løbe ind i kvaler. Feks. kan fordampet materiale fra katoden slå sig ned på gitteret og ændre katode-gitter afstanden udover tolerancegrænserne. Det kan også få gitteret (som jo bliver varmt) til at udsende elektroner og derved øge den samlede strøm i røret, hvilket atter øger gitterets emission osv. Denne "run-away" effekt er især et problem ved meget små rør.



Figur 7.

- (a) er et normalt gitter
- (b) er et rammegitter

Opsummering.

De problemer, som man står overfor i forbindelse med miniaturiseringen af rør, kan forstås og i princippet løses ved hjælp af kendt fysisk viden. Eksempelvis kan elektriske felter og elektronbaner beregnes i alle tænkelige konfigurationer. Man kan også rent begrebsmæssigt forestille sig en sådan rumlig struktur af elektroder og gitre formindsket yderligere, men det er oplagt et problem af mekanisk/teknisk art at fremstille tilstrækkeligt nøjagtige dele, og sammenføje disse i et tredimensionelt mønster med tolerancegrænser i μ -området.

Tilsvarende er problemerne med at lave holdbare katoder

og opretholde tilstrækkeligt godt vakuum af teknisk-praktisk karakter.

Dette betyder, at der ikke ville være særligt behov for at fremskaffe ny grundviden for at komme videre med en miniaturisering, og altså ikke behov for at inddrage f.eks. fysikere i arbejdet. Det betyder desuden, at man har mulighed for at sige med ret stor sikkerhed, at der næppe ville være mulighed for at nå væsentlig videre i retning af mindre rør med lavere effektforbrug og større stabilitet til lavere pris. Det ville også være vanskeligt, at komme udenom en opbygning af diskrete komponenter. Heri ligger i sig selv en begrænsning vedrørende miniaturisering.

Kurvernes forløb på figur 5 og 6 bekræfter også denne stagnation.

FASTSTOFELEKTRONIKKENS BEGYNDELSE.

TRANSISTOREN.

BAGGRUNDEN FOR OPFINDELSEN.

Når man ser tilbage på transistoropfindelsen, kan man se, at der var flere forskellige forudsætninger, der i hvert fald skulle være opfyldt, for at opfindelsen kunne lade sig gøre. Det var nødvendigt med et vist kendskab til halvledere og deres elektriske egenskaber.

Der måtte være et behov for eller et ønske om, at videreudvikle rørteknologien ind i nye områder - f.eks. erstatte trioden med en faststofforstærker. Og endelig måtte der være et sted, som kunne etablere de rette omstændigheder for opfindelsen.

Disse tre faktorer var opfyldt - for transistoren blev jo opfundet. Hvordan de var det, vil vi fortælle i det følgende, inden vi behandler selve opfindelsen af transistoren. Fremstillingen bygger især på 2 artikler: G.L. Pearson & W.H. Brattain: "History of Semiconductor Research", og W. Shockley: "The path to the conception of the junction Transistor". Citaterne stammer fra disse to artikler. (8, 9).

Kendskabet til halvledere.

Halvlederforskningens historie begynder i 1800-tallet, hvor forskellige fysikere uafhængigt af hinanden undersøgte forskellige materialers elektriske egenskaber. Under dette arbejde, stødte de engang i mellem på stoffer, som havde andre egenskaber end f.eks. metaller. Disse egenskaber var:

- 1) Negativ temperaturkoefficient for modstand (Faraday 1833)
- 2) Ensretning (Braun 1874)
- 3) Fotoledning (Smith 1873)
- 4) Fotoelektromotorisk kraft (Becquerel 1839)

Disse egenskaber (som karakteriserer halvledere) blev fundet af forskellige personer på forskellige tidspunkter, og blev derfor ikke i begyndelsen sat i forbindelse med hinanden. Selv om de blev fundet af fysikere, havde disse ikke

nogen teoretisk forståelse af, hvad der forårsagede disse fænomener. Men eksistensen af f.eks. krystaldektoren inspirerede fysikerne til at prøve at finde en videnskabelig forklaring. Da vakuümørret blev opfundet og erstattede krystaldektorerne, betød dette en formindskelse i den videnskabelige interesse for at forklare, hvordan de virkede:

"It was G.W. Pierce, by the way, who went to a great deal of efforts at this time to show that these devices did not operate on a thermal basis. With the advent of the vacuumtube at about this time, interest in the point-contact detector lagged and a little of scientific interest was contributed on such detectors for a number of years."

(8, s. 1794)

I 1920'erne genopstod faststofensrettere og fotoceller som kommercielle komponenter, men man vidste stadig ikke hvorfor de virkede.

"Some good science and a large amount of art was involved"....."Commercial use of these devices as rectifiers, battery chargers, photographic exposure meters.....created demand for a better scientific understanding of underlying phenomena."

(8, s. 1795)

I 1920'erne var kvantemekanikken i hurtig udvikling, og gav indput til den mangelfulde teoretiske forståelse af halvledernes ensrettende virkning. Disse bidrag havde ikke til formål at forbedre komponenterne. De var udelukkende et forsøg på, at rette op på den manglende forståelse, som selve eksistensen af ensrettere gjorde opmærksom på. Da Wilson i 1931 præsenterede den første kvantemekaniske model af en halvleder, blev den grundlaget for al senere forståelse af halvledere videnskabeligt set, men dens forklaringer var ikke særlig anvendelige for de folk, som arbejdede med at forbed-

re komponenterne. Den mangelfulde forbindelse mellem det videnskabelige og det teknologisk orienterede arbejde, var en medvirkende årsag til, at visse opdagelser af stor betydning for halvledernes virkemåde blev ved at være en "blind plet" for de teknologisk orienterede lang tid efter, at de sådan set var opdaget videnskabeligt.

Besværlighederne i at anvende videnskabens resultater teknologisk, skyldtes også, at videnskaben i dette tilfælde var yderst abstrakt, og det var meget svært at regne på konkrete tilfælde matematisk. Videnskabens resultater forelå ikke i en form, hvor andre end videnskabsmændene kunne bruge dem til noget.

Videnskabens interesse for faststofkomponenter, som var brugbare, steg i 30'erne, da man ønskede at undersøge mere kortbølget elektromagnetisk stråling. Hertil egnede vakuumsdioden sig ikke så godt som ensretter, fordi de tit var for langsomme til at følge med til den hurtige frekvens af den kortbølgede stråling. Man vendte derfor interessen mod den forældede krystal-detektor, men denne gang gik man mere systematisk til værks med at forbedre den.:

"The next step, initiated by R.S. Ohl about 1935, was a very significant one. In attempting to improve these old detectors he turned to the chemists and metallurgists to obtain pure silicon.... Improvements came rapidly. Not only did silicon detectors become practical devices (far removed from the old catwhisker type), thus making radar feasible in World War II, but important scientific discoveries were made." (8, s. 1799)

Anden verdenskrig medførte det første institutionaliserede samarbejde mellem videnskab og teknologi, med det formål at forbedre de eksisterende detektortyper. Et kæmpe forskningsprogram blev sat i værk af den amerikanske regering og inddrog både universiteter og industrielle forskningslaboratorier:

"In the United States most of this war work was done at Massachusetts Institute of technology, Purdue University, University of Pennsylvania, General Electric Company, and Bell Telephone laboratories." (8, s. 1800)

Efter krigen var situationen den, at halvlederne silicium og germanium var temmelig godt kendt og undersøgt videnskabeligt. Krigen havde desuden givet "gode" erfaringer med et intensivt samarbejde mellem videnskab og teknologi -A-bomben og radar var eksempler på resultaterne af det samarbejde.

Bell laboratorierne.

Den første faststof-forstærker - transistoren - blev opfundet omkring jul 1947 på Bell laboratoriernes forskningsafdeling. Opfindelsen foregik i to afdelinger: først opfindelsen af punkt-kontakt- transistoren i december af Bardeen og Brattain, og derefter Shockleys opfindelse af "junction transistoren" i januar.

Forud for disse opfindelser var gået et mangeårigt arbejde med mange involverede, både fysikere, kemikere og teknikere. Dette arbejde-og forskningsorienteringen på Bell i det hele taget, betød meget for opfindelsen af transistoren, og vi vil der-for lige kort se på, hvad Bell i det hele taget er for noget.

I 1876 opfandt Graham Bell telefonen og startede virksomheden, som til at begynde med var en telefonfabrik, men som senere udviklede sig til en kæmpekonzern, som beskæftiger sig med alle mulige former for kommunikation.

I starten var der ingen videnskabelige medarbejdere. Forbedringer af telefonen foregik ved "try and error"- metoden.

I 1885 blev en fysiker ansat som leder af teknisk afdeling, men det var sandsynligvis ikke ud fra nogle ideer om, at fysisk indsigt ville gavne udviklingen af telefonen.

Omkring 1900 blev en del fysikere ansat i teknisk afdeling. De arbejdede med forskellige tekniske vanskeligheder - f.eks. støj og dæmpningsfænomener. Der var nok en tanke bag, at ansætte fysikere til det job, men i det store og hele arbejdede de som teknikere - i hvert fald ikke med grundfysiske problemer.

Efterhånden blev det mest presserende problem for transmissionen, den manglende mulighed for forstærkning over lange afstande. Da man omkring 1910 ønskede at lave en transkontinental forbindelseslinie, prøvede Bells præsident (Vail) at gøre noget ved det problem, ved, foruden teknisk afdeling, at etablere en forskningsafdeling og ansætte nogle unge lovende fysikere. Problemet blev løst med vakuumstrioden i første omgang - en opfindelse Bell var en af hovedkræfterne bag.

Forskningsafdelingens betydning voksede, og man indså, at den bl.a. kunne spare Bell for at skulle købe patenter andre steder.

I 1920'erne koncentrerede man sig mest om vakuumsforskningen. Et par hundrede mand var ansat på forskningsafdelingen, og blandt de grundfysiske problemer, man undersøgte, var termisk elektronemission og elektronersinteraktion med faste stoffer. Sidst i 1920'erne begyndte man at interessere sig for kvantemekanik, som der var godt gang i i universitetsverdenen. Man etablerede et vist samarbejde med universitetsfolk ved at inddrage dem i løbende kollokvier på Bell om den nyeste udvikling indenfor fysikken.

I disse kollokvier deltog foruden amerikanske fysikere også fremtrædende europæiske videnskabsmænd, som Sommerfeld og Schrödinger, med emner som "atomstruktur", "den fotoelektriske effekt", og "bølgeteori for elektroner".

Man kan altså konstatere, at man på Bell meget tidligt var grundfysisk orienteret, selv om der på det tidspunkt var langt til evt. nyskabelser med baggrund i kvantemekanikken.

I begyndelsen af 30'erne var arbejdsugen på Bell p.gr.a. depressionen kun på 4 dage, hvilket gav fremadstræbende fysikere tid til at studere kvantemekanikken på egen hånd. Brattain deltog desuden i sommersymposier på universiteterne og videreformidle derefter sin viden om elektronteori i metaller til Bells ansatte.

Interessen for den grundvidenskabelige udvikling i industrien gav genklang i universitetsverdenen, som begyndte at invitere industriforskere til at holde foredrag om forbindelsen mellem grundvidenskab og ingeniørmæssige spørgsmål.

I 1936 blev Kelly leder af forskningsafdelingen. Han interesserede sig for udviklingen indenfor faststoffysik, og havde desuden den idé, at telefoncentralernes mekaniske relæer på et tidspunkt måtte kunne erstattes med elektroniske forbindelser. Den ide kan man med bagklogskaben i behold, sige pegede frem mod faststofelektronikken, sikkert er det i hvert fald, at Kelly gjorde sit til at sætte skub i den udvikling, ved at lægge stor vægt på grundforskningen i faststoffysik og etablere et faststoffysisk forskningsteam bestående af bl.a. Shockley, og Brattain som medvirkede til opfindelsen af transistoren senere. Denne gruppe fik forholdsvis frie hænder til selv at tilrettelægge deres forskning, og de mødtes ugentligt i mere end 4 år for at diskutere kvantemekaniske og faststoffysiske problemer. (11)

I slutningen af 40'erne, da transistoren blev opfundet, var der ca. 5700 beskæftigede på Bell laboratorierne, heraf over 2000 teknisk-videnskabelige medarbejdere. Nu om dage er antallet af teknisk-videnskabelige medarbejdere på omkring 20.000. Bell indtager således klar pladsen som verdens største industrielle forskningsorganisation. (6, s 124)

OPFINDELSEN AF TRANSISTOREN.

J. Bardeen, W. Brattain og W. Shockley var alle tre fysikere. Bardeen og Shockley teoretikere og Brattain eksperimentel fysiker.

Brattain kom til Bell i 1929 og tilknyttedes radorørsaf-

delingen, hvor han arbejdede med metallers overfladeegenskaber. Senere blev han sat til at studere kobberoxids ensrettende virkning.

Shockley kom til Bell i 1936 fra Massachusetts Institute of Technology, hvor han havde taget sin PhD under professor Slater, hvis hovedinteresse elektroners egenskaber i krystaller. Han blev også først anbragt i radiatorafdelingen under Davisson og Germer (de der først påviste elektroners bølgenatur eksperimentelt). Senere gik han over til faststof-fysikken og blev tilknyttet den faststoffysiske gruppe.

Bardeen kom først til Bell i 1945, samtidig med at Brattain og Shockley vendte tilbage efter krigen. Bardeens hovedområde var metalteori - et område han havde forsket i, inden krigen gav ham 5 års arbejde for flådens ammunitionslaboratorier. Det var Shockley, der overtalte ham til at arbejde på Bell fremfor på universitetet.

Motivationen bag arbejdet.

Motivationen bag arbejdet beskriver Shockley i "The path to the conception of the junction transistor" (9), som det, at opnå prestige, enten ved at skaffe sig patenter eller ved at kaste lys over fundamentale fysiske problemer:

"What motivated the will to think through the logical sometimes mathematical, relationships needed for the invention of the junction transistor was finally provided chiefly by two factors; first, my own motivation to play a more significant personal, rather than managerial, role in what was obviously a development of enormous potential importance, and second, the challenge to resolve some of the puzzles about the operation of the point-contact transistor - and chance also played a role." (side 599).

Senere beskriver han motivationen som "both practical and scientific". Gennem teksten beskriver han flere gange

den stærke trang, han havde til at være manden bag en vigtig opfindelse:

"The birth of the point-contact transistor was a magnificent Christmas present for the group as a whole. I shared in the rejoicing. But my emotions were somewhat conflicted. My elation with the group's success was tempered by not being one of the inventors. I experienced some frustration that my personal efforts, started more than eight years before, had not resulted in a significant inventive contribution of my own. In response to this frustration, for the next fine years, I did my best to put the Labs - and myself - in the lead for transistor patents." (side 612)

Samtidig skriver han, at meget af det arbejde, der gik forud for opfindelsen af junktion transistoren var motiveret af spørgsmål af ren grundvidenskabelig art:

"The focus of interest...was on the physical phenomena and not on device applications. My interest was in using electrical measurements to obtain fundamental scientific information about basic processes." (side 606)

Selve opfindelsen.

I 1945 arbejdede Shockley bl.a. med felteffekt transistor-ideen. Han beregnede teoretisk dens virkning ud fra den viden, man havde på det tidspunkt og sammenlignede det med de eksperimentelle resultater. Den målte effekt var 1500 gange mindre end forventet teoretisk. Denne uoverensstemmelse tydede på, at der var noget galt med det teoretiske grundlag. Det var Bardeen, der løste problemet i 46 ved hjælp af en teori for ladningstilstandene i overfladen af halvlederen.

I 1947 begyndte Shockley at arbejde med p-n-overgange ud fra ren grundvidenskabelig interesse:

"12 March 1947, the date when I considered a p-n junction from the point of view of relating its electrical properties to fundamental physical mechanisms." (side 606).

Senere på året gik han over til at tænke på p-n overganges praktiske anvendelighed:

"16 september 1947. On this date I returned again to thinking about n-p-n structures....My idea was to build a negative resistance device having high frequency response through the thermistor action." (side 607)

Den 17. november skete der et gennembrud i Bardeen og Brattains arbejde med overfladeladningstilstande, som bragte dem på sporet af en forstærkervirkning. Dette medførte en kraftig intensitetsøgning i arbejdet bl.a. på grund af fornyet tro på, at det nyttede noget at arbejde videnskabeligt på den måde.:

"The stepped up tempo of November 1947 compared to earlier times is easy to explain. At those earlier dates, We were doubtful that thinking would produce worthwhile action." (side 608)

Bardeen og Brattains arbejde gik nu i forøget tempo li-frem mod opfindelsen af punkt-kontakt transistoren lige før jul 1947.

Shockley arbejdede videre med sine p-n overgange i håb om at de ville kunne bruges til noget, men stadig uden decideret at arbejde frem mod junctiontransistoren. Under dette arbejde med at få teorien til at falde på plads, kom han faktisk til at stå med alle nøglebegreberne, som kunne forklare, hvordan man kunne få en transistoreffekt - uden at opdage det med det samme. Dette forklarer han selv med, at han på det tidspunkt var ude i et andet ærinde, nemlig at forbedre den videnskabelige forståelse af punkt-kontakt transisto-

rens virkemåde. Selv om teorien altså i princippet var udviklet, fik nøglebegreberne dog først deres endelige form efter opfindelsen af junction transistoren. Shockley skriver om dette:

"I was aware of the general considerations needed to develop the theory of the junction transistor. But I did not formulate several key concepts until after the junction transistor was invented. Before that, my analysis went only far enough to show how eksperiment and theory on p-n junctions might interact so as to add scientific knowledge about the basic physical phenomena. Also I found that I had speculated about several uses of p-n junctions in practical devices. But none of these speculations were analytically developed." (side 599).

Shockleys egen vurdering af forholdet mellem videnskabelig grundforskning og anvedelsesorientering i transistoropfindelsen.

I konklusionen tager Shockley selv stilling til problemet om karakteren af det arbejde, der førte frem til transistoren:

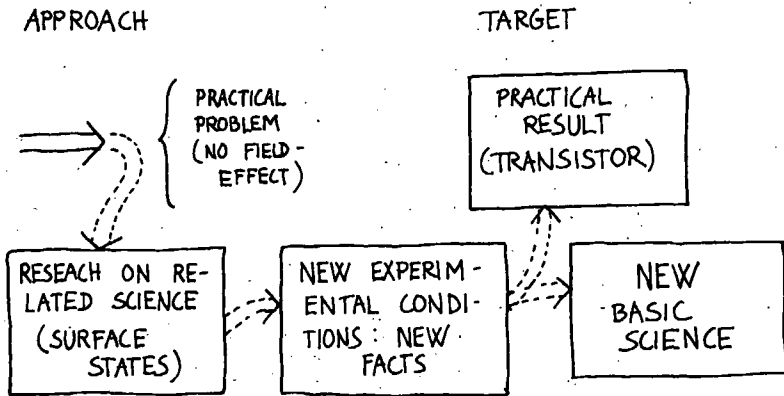
"Was the transistor a product of an engineering program focused on a practical goal? Or was the transistor a by-product of pure research unsullied by any motivation other than a search for knowledge?

I liken these queations to the old bromide: "Have you ceased beating your Wife?" answer yes or no.

What actually went on was a mixtured which fits into the pattern of "creative failure methology" which was what we intuitively put into action when frustrated by the failure of the field effect experiments." (side 618)

"We intuitively applied a feature of creative-failure methology that some years later I analyzed and defined as "respect for the scientific aspects of practical problems."

Shockley ledsager sine overvejelser med denne figur:



Figur 8.

CREATIVE PRINCIPLE: RESPECT FOR SCIENTIFIC ASPECTS OF PRACTICAL PROBLEMS.

FASTSTOF ENSRETTERENS OG FORSTÆRKERENS PRINCIPIELLE VIRKEMÅDE.

Gennemgang af nødvendige begreber:

Ladningsbærere: Der er to slags ladningsbærere: negative, elektroner, og positive, huller. Hullerne kan forstås som "fraværet af en elektron på dens plads i et atoms kvanteskaller". Et hul kan bevæge sig i materialet, ved at en elektron "falder ned" i hullet samtidig med, at der opstår et nyt hul, der hvor elektronen kom fra. På den måde skyldes al ladningstransport sådan set elektronbevægelser, men det har vist sig praktisk at betragte hullerne som positive ladningsbærere. Elektronerne som ladningsbærere (dvs. de, der befinder sig i ledningsbåndet) er mere mobile end hullerne.

Ledningsbånd: Er et begreb, der stammer fra den teori for elektroners opførsel i faste stoffer, som kaldes båndteorien. En af hensigterne med båndteorien er at forklare et stofs ledningsevne ud fra elektronernes energitilstande. Der findes et bestemt antal "tilladte" energitilstande, en elektron kan befinde sig i. Der kan kun være en elektron i hver til-

stand, mens der godt kan være flere elektroner, der har samme energi, dvs. befinder sig på samme energiniveau. På de laveste energiniveauer er elektronerne fastsiddende og ikke i stand til at bevæge sig rundt i stoffet. De elektroner, der befinder sig på de højeste energiniveauer, er i stand til at flytte sig (f.eks. p.gr.a. et elektrisk felt), hvis der er ledige energitilstande, de kan bevæge sig over i. De elektroner, som er hoppet over i eller befinder sig i energitilstande, hvor de kan bevæge sig, siges at befinde sig i ledningsbåndet.

Forbudt gab: Nogle energitilstande er ikke tilladte for elektronerne at befinde sig i. Disse forbudte tilstande gør, at der bliver et energigab mellem nogle af de tilladte energiniveauer. Hvis en elektron skal flytte sig fra en energitilstand under gabet til én over gabet, skal den altså have tilført meget energi på en gang. Det vil forholdsvis sjældent ske. Tilstedeværelsen af et forbudt gab, kan forklares med stoffets opbygning - f.eks. afstanden mellem atomerne i krystalstrukturen - som udelukker nogle bestemte energitilstande. Hvis det skal forklares skal elektronerne beskrives som bølger, med hver sin bølgelængde, og hvor bølger med bestemte bølgelængder bliver forstyrret af atomerne i krystallen.

Fermienerginiveau: Fermienerginiveauet er det øverste fyldte niveau for et atoms elektroner, når de ikke er blevet tilført nogen energi udefra (det vil i princippet sige ved 0 K).

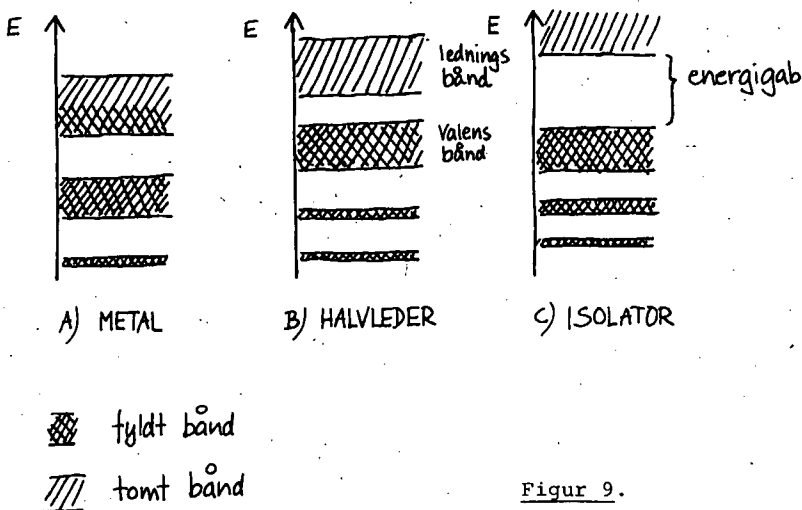
Klassifikation af materialer : Ved hjælp af begreberne ledningsbånd, fermienergi, og forbudt gab, kan båndteorien forklare, hvorfor forskellige materialer leder elektrisk strøm forskelligt. På den måde kan stoffer klassificeres efter deres ledningsevne i tre grupper: ledere, halvleder og isolatorer.

Ledere: Ledere leder elektrisk strøm godt. Dette skyldes enten, at energigabet er lille ($< 0,2\text{eV}$), eller at energigabet ligger langt over fermienerginiveauet eller langt under. I begge disse tilfælde er der ledige energitilstande for e-

lektronerne "lige i nærheden" af deres "normale" energitilstand.

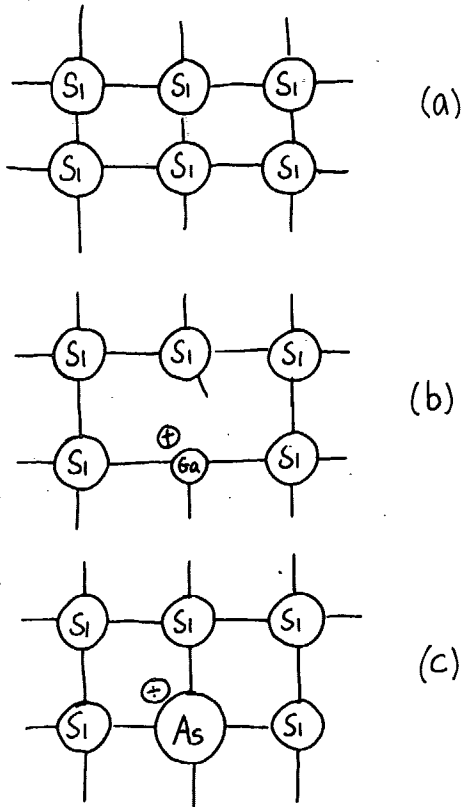
I halvledere ligger fermienerginiveaet lige i underkanten af et energigab, som er af en størrelsesorden på 0,2 til 2 eV. Det betyder, at elektronerne skal have et godt spark for at komme op i ledningsbåndet og blive påvirkelige af et elektrisk felt, men det kan de også få under særlige omstændigheder, f.eks. hvis de bliver udsat for bestråling eller opvarmning.

I isolatorer ligger fermienerginiveaet ved kanten af et energigab, der er større end 2 eV. Elektronerne skal altså virkelig have tilført meget energi for at komme op i ledningsbåndet. Dette sker sjældent, så isolatorer leder praktisk taget ikke elektrisk strøm.



Figur 9.

Forurenede halvledere. Halvlederes ledningsevne kan ændres ved at forurene dem med urenhedsatomer. Grundstofhalvledere, som silicium eller germanium, befinder sig i hovedgruppe 4 i det periodiske system, og har således 4 elektroner i den yderste skal. Deres krystalstruktur kan derfor med kovalente bindinger tegnes som på figur 10.



Figur 10.

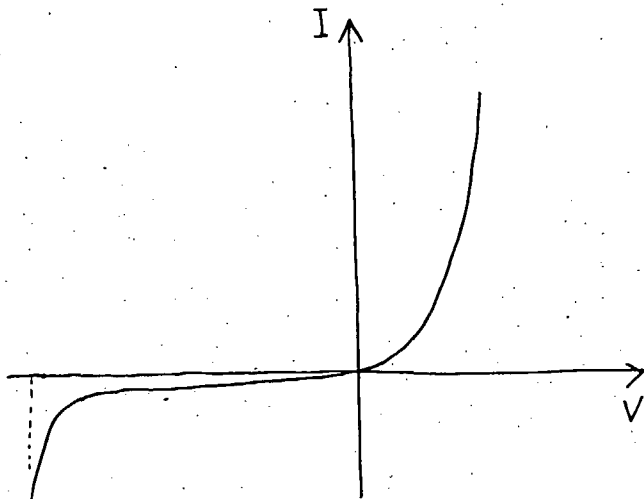
Hver streg i gitteret repræsenterer to elektroner. På figur 10 (a) er krystallen helt fri for fremmedatomer, hver elektron sidder på sin plads i en kovalent binding. Ved at indføre atomer fra hovedgruppe tre eller fem i gitteret, putter man enten for få eller for mange elektroner ind, end der er plads til i gitterets kovalente bindinger. Resultatet ses på figur (b) og (c). På figur (b) ses en p - dopet Si-krystal. Her har man indført nogle Ga-atomer fra hovedgruppe 3 i det periodiske system. Ga-atomer har derfor kun tre elektroner i yderste skal, og der kommer derfor til at mangle en elektron i gitteret. Denne manglende elektron opfører sig som et hul, altså en positiv ladningsbærer. Figur (c) forestiller en n-dopet siliciumkrystal. Her har man indført et

As-atom fra hovedgruppe 5, og resultatet er en overskydende elektron, og dermed en ekstra negativ ladningsbærer.

(Kilde: 12)

Halvlederensretteren.

En ensretters virkning fremkommer som en asymmetrisk strøm-spændings karakteristisk som kan tegnes som vist på figur 11.



Figur 11.

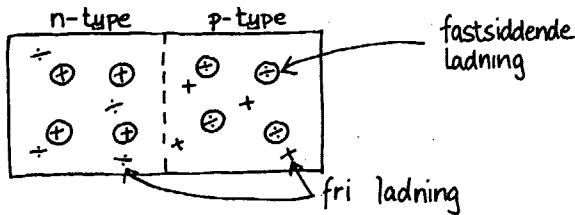
I de første faststofensrettere, man havde, fremkom den asymmetriske egenskab ved kontakten mellem 2 typer metaller ved kontakten mellem en halvleder og et metal. Man kan også lave ensrettere ved kontakt mellem 2 typer halvledere, den såkaldte p-n overgang. Denne vil vi se lidt nærmere på i det følgende.

P-N ensretteren består, som navnet siger, af to forskelligt dopede halvledere. I p-delen vil de frie ladningsbærere hovedsagelig være huller, mens de frie ladningsbærere i n-delen hovedsagelig er elektroner.

Forudsætningen for at der kan gå en strøm gennem dioden,

er tilstedeværelsen af ladningsbærere, og mulighed for at de kan overskride barrieren. Elektroner kan f.eks. overskride grænselaget, hvis der er huller, dvs. ledige energitilstande, de kan rekombinere med på den anden side.

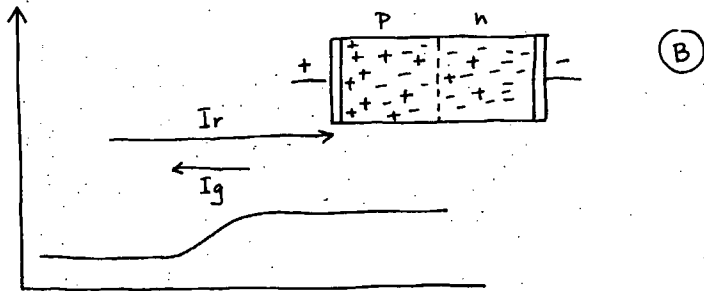
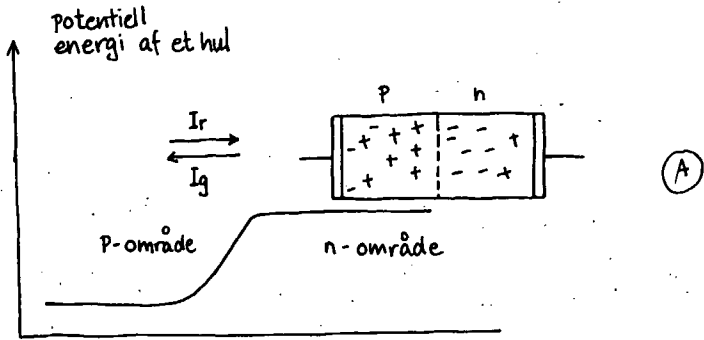
Hvis der ikke er nogen ydre spænding over grænsen vil huller fra p-delen diffundere over grænsen til n-delen og rekombinere med elektroner der. Tilsvarende vil elektroner fra n-delen diffundere over grænsen og rekombinere med huller. Ved rekombinationen bliver ladningsbærerne "fanget" i lokaliserede tilstande, og resultatet bliver en spændingsforskel over grænselaget. Denne spændingsforskel tenderer til at trække ladningsbærerne den modsatte vej. Ved ligevægt er strømmen lige stor i begge retninger, og antallet af rekombinationer modsvares af dannelsen af nye hul-elektronpar.



Figur 12.

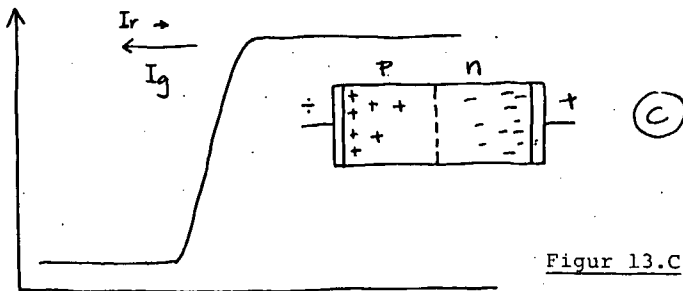
Ligevægtssituationen er vist på figur 13.A. I_r og I_g er h.h.v. rekombinationsstrømmen (fra p til n) og generationsstrømmen (fra n til p) af huller. Dvs. at forskellen mellem dem er den strøm, man vil observere over grænsen.

Når p-n overgangen forspændes i "forlæns" retning, bliver n-delen mere negativ, og masser af elektroner vil diffundere fra n-delen til p-delen, hvor huller, som følge af feltet, nærmer sig fra den anden side og "tager imod" elektronerne. Resultatet er vist på figur 13.B, og viser stadig den samme generationsstrøm, men en meget større rekombinationsstrøm. (13).



Figur 13.A, og B.

Hvis p-n overgangen er forspændt i "spærre" retningen, bliver ladningsbærerne trukket væk fra grænselaget og I_R bliver kraftigt hæmmet. I den retning vil der altså ikke gå nogen strøm. Situationen er vist på figur 13.C.

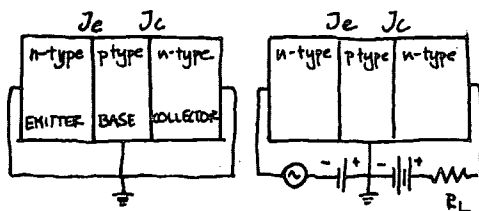


Figur 13.C

Junktion transistoren.

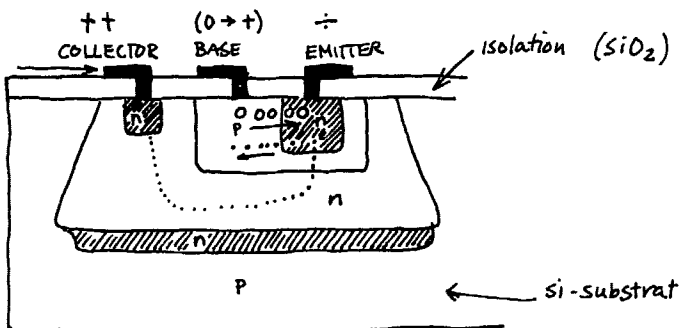
Der findes tre principielt forskellige transistortyper: punktkontakt transistoren, junction transistoren, som også kaldes fladetransistoren eller den bipolære transistor, og felteffekt transistoren, som også kaldes den unipolære transistor. Som eksempler vil vi kort omtale junction transistoren og felteffekttransistoren.

En junction transistor af npn-typen kan skematisk tegnes således (figur 14):



Figur 14.

eller sådan (figur 15):



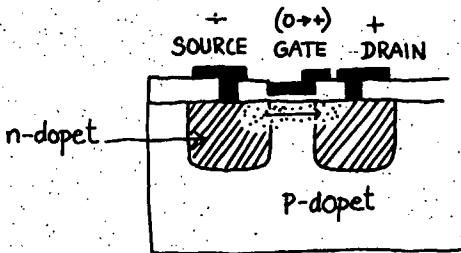
Figur 15.

Den består af tre, forskelligt dopedede, halvlederområder. Når npn-transistoren bruges som forstærker, er pn-overgangen fra basen til collectoren forspændt i spærre-retningen. Derfor diffunderer der ingen elektroner ind i basen fra collectoren, og hullerne i den p-dopede base forbliver ligeledes, hvor de er.

Uden spænding over emitter-base overgangen vil der derimod let diffundere elektroner ind over denne np-overgang. Hvis emitter-base overgangen nu bliver forspændt i forlæns retning (basen gøres positiv i forhold til emitteren), vil et stort antal elektroner bevæge sig fra emitteren til basen. Her vil nogle af dem rekombinere med huller, men da baselaget er tyndt (under en diffusionslængde) vil de fleste fortsætte til collectoren, tiltrukket af dennes endnu mere positive ladning. På denne måde kan base spændingen styre hvor mange elektroner, der bliver trukket ud af emitteren, og dermed strømmen gennem transistoren. Små spændingsændringer over basen kan forårsage store ændringer i strømmen gennem transistoren. Der findes også pnp transistorer.

Felteffekt transistoren.

Som eksempel på en felteffekttransistor vil vi se på en type, som er meget almindelig i mikroelektronikken, nemlig MOSFET (Metal-Oxid-Semiconductor-Field-Effect-Transistor). Den kan skematisk tegnes således: (figur 16)



Figur 16.

Figur 16 forestiller en NMOS transistor, fordi de aktive ladningsbærere er elektroner. I modsætning til junctiontransistoren er der i en felleffekttransistor kun én slags ladningsbærere. Derfor kaldes felleffekttransistorerne også for unipolære transistorer.

Den tegnede NMOS er en forstærkningstransistor, fordi der ved 0 spænding over gaten ikke går nogen strøm mellem source og drain. Hvis gaten nu gøres positiv, vil elektronerne p. gr.a. feltet blive tiltrukket, og koncentrationen af dem vil blive stor lige oppe under gaten. I denne situation, hvor der er mange elektroner i et område, sådan, at de ikke kan nå at rekombinere med huller i det p-dopede silicium, kan der gå en strøm fra source til drain (som er h.h.v. positivt og negativt ladet).

Situationen er her den samme som ved bipolære transistorer, at en forholdsvis lille ændring af ladningen på gaten, vil bevirke en stor ændring af strømmen mellem source og drain.

Man kan naturligvis også lave PMOS transistorer, hvor de aktiveladningsbærere er huller. Man kan ligeledes lave "dæmpningstransistorer", hvor der "normalt" går en strøm mellem source og drain, som så blive hæmmet af en ladning på gaten. (Kilde: 13, 14)

UDVIKLINGEN AF TRANSISTOREN I 50'ERNE:

Forskning og udvikling i 50'erne.

Efter opfindelsen af transistoren fulgte en årrække med et møjsommeligt forsknings- og udviklingsarbejde, inden transistoren havde forladt laboratoriestadiet, og var blevet en kommercielt levedygtig vare.

De første transistorer var meget besværlige at have med at gøre sammenlignet med radiorørene, og selv på Bell tog det lang tid at få en produktion igang.

Selv om det hurtigt blev klart, at junctiontransistoren havde de mest revolutionerende muligheder i sig, var den endnu sværere at fremstille i pålidelig udgave end punkt-kon-

takttransistoren. Den første pålidelige juktiontransistor blev således først fremstillet i 1951 - tre år efter, at teorien for den var udviklet. "Elektronik Revolutionen" skriver om startvanskelighederne bl.a.: (15, s. 76)

"Måske er det ikke helt sædvanligt, at forskerne eskorterer deres opfindelser helt frem til markedsførelsen. Men de vanskeligheder, som den første transistor mødte, var af en sådan art, at både ingeniører og videnskabsmænd måtte være med helt til produktionsfasen....Problemerne med de uønskede og ufuldstændige oxidlag på halvlederne kunne f.eks. nu og da undgås ved hjælp af teknologiske kunstgreb - "tommelfingerregler" - men der krævedes mere grundlæggende videnskabelig teori, hvis de skulle løses permanent."

Den nødvendige forskning til løsning af de første startvanskeligheder var det hovedsagelig Bell, der tog sig af p.gr.a. patentrettighederne, og fordi fremstillingsmetoderne endnu ikke var offentliggjort. Men i 1952 valgte Bell at offentliggøre den eksisterende viden om transistorerne, formodentlig i håb om at en mere omfattende produktion af transistorer, ville øge dens chancer for for alvor at slå igennem som kommercielt produkt. For Bell var dette desuden en måde at undgå monopollobbyens indgriben.

På den måde kom en del firmaer igang med at producere transistorer i første halvdel af 50'erne. I 1951 var der således 4 selskaber, der producerede transistorer, i 52 var der 8, i 53, 15 og i 56, 26 selskaber. (15 s.85)

De fleste firmaer havde - understøttet af reklamer fra Bell - en fornemmelse af, at transistoren, trods dens besværligheder, ville kunne få stor betydning, og det derfor gjaldt om at være med i udviklingen.

Efterhånden som de nye firmaer kom med i udviklingen, begyndte andre metoder end Bells "videnskabelige" at gøre sig gældende. Det er meget forståeligt, at de nye firmaer ikke

med det samme kunne hamle op med Bells forsknings og udviklings tradition, som det havde taget mange år at bygge op. For de nye firmaer gjaldt det mere om at udnytte den eksisterende viden og prøve sig frem med nye metoder uden at bruge alt for mange penge på forskning.

I "Elektronik Revolutionen" nævnes et eksempel på et empirisk arbejdende firmas fremstilling af halvlederdiodes:

"Et af firmaerne plejede i sin halvlederdiodefremstilling at smelte temmelig uren silicium i en kvartsdigel, tilføje messing, afkøle hele historien lnagsomt, brække den fra hinanden, fjerne kvartsen, save det polykrystallinske silicium ud i klumper, sætte tråde på dem, hamre på dem, indtil de viste de ønskede elektriske egenskaber, og sluttelig skrue ledningerne fast." (15, s. 95)

Men selv om de nye firmaer ikke (med den slags metoder!) kunne hamle op med de gamle, hvad angik patenter, så kunne de producere og afsætte halvlederprodukter ligeså godt som de gamle. I 1957 havde de nye firmaer således 64% af markedet, mens de kun stod for ca. 20% af de nye patenter på årsbasis. (15, s. 87)

Men mens teknologiudviklingen i 50'erne altså blev mere "empirisk" igen virkede halvlederkomponenternes fremtrængen på markedet inspirerende på dele af den videnskabelige verden, som arbejdede med at forbedre den grundvidenskabelige forståelse af halvledernes egenskaber. Alene i 1956 offentliggjordes f.eks. 1000 arbejder om egenskaberne ved forskellige halvledermaterialer. (15, s. 77)

Halvleder og faststoffysikken var også et oplagt område at tage op for f.eks. Massachusetts Institute of Technology, som både grundvidenskabeligt og anvendelsesorienteret uddannelsesinstitution. I 1950 dannede professor Slater (som tidligere havde uddannet Shockley) den såkaldte "Solid-State and Molecular Theory Group" (SSMTG), som en selvstændig forskningsenhed på MIT. (16)

Denne gruppe fungerede under Slater til 1964, og fortsatte efter at Slater på det tidspunkt flyttede til University of California og startede en lignende gruppe der.

Gruppens arbejde bestod bl.a. i at udvikle metoder til, ud fra kvantemekanik, at beregne elektrontilstandene i molekyler og i krystallinske stoffer, og dermed forudsige og forklare stoffernes elektriske egenskaber. Arbejdet var i begyndelsen hæmmet af den manglende adgang til computere, som kunne udføre beregningerne i fornødent omfang.

Resultaterne af indsatsen.

Resultatet af udviklingsindsatsen i 50'erne var store fremskridt, især hvad angik fremstillingsmetoder, som kunne sikre gode og ensartede produkter.

Ved det første Bell-symposium i 1952 præsenterede Bell de metoder, de på det tidspunkt anvendte ved transistorfremstillingen. Det var krystal dyrkningsmetoder, hvor man, idet man trak halvleder krystallet op af en smelte, forurenede smelten med skiftevis n- og p- forurenende stoffer. N-P overgange fremkom så, når man der efter skar krystallen over i skiver på tværs.

Efter dette symposium gik flere andre firmaer igang med at udvikle nye fremstillingsmetoder. General Electric udviklede en legeringsteknik, og Philco.co en stråleåtsnings- teknik, som gjorde det muligt at kontrollere lagtykkelserne mere nøjagtigt. I 54 lykkedes det Texas Instruments ved hjælp af en tidligere Bell-medarbejder (Gordan Teal), at fremstille en siliciumtransistor. Hidtil havde man mest arbejdet med germanium.

På Bell og på General Electric udviklede man nye forureningsmetoder, hvor man lod urenhederne diffundere ind i halvlederen. Desuden udviklede man nye fortoGRAFISKE teknikker, hvor man fremstillede et mønster i oxid på halvlederens overflade, og brugte det som maske ved diffusionsprocesserne.

Fremstilling af tilstrækkeligt rene krystaller, var et felt, man vedblev at udvikle. Et afgørende skridt fremaf var Pfanns zoneraffineringssteknik, hvor man lader en smeltet zo-

ne bevæge sig gennem krystallen. Urenhederne har større tendens til at befindelig i den smeltede zone end i den faste del, og man kan derfor "trække dem ud" af krystallen. Metoden var lettere at bruge med germanium end med silicium, da germanium har et lavere smeltepunkt, men det lykkedes da også med silicium.

Militærets betydning.

Den forsknings- og udviklingsindsats, som var nødvendig for at sikre transistorens gennembrud, var især muliggjort af én faktor: militæret.

På grund af transistorens uberegnelighed var der i starten kun få fordele forbundet med den sammenlignet med rørene, og af dem var den lille størrelse den vigtigste. Der var to aftagere, for hvem lille størrelse spillede en afgørende rolle, nemlig militæret og høreapparatfabrikanterne, og de var derfor også de største aftagere af transistorerne i begyndelsen. Denne kurve viser militærets betydning som kunde i halvlederindustrien: (figur 17) (15, s. 114)

Procentdel af USA's halvlederproduktion bestemt for militær anvendelse.

	Efter mængde	Efter værdi
1955	22,0	35,0
1956	22,2	35,6
1957	21,3	35,8
1958	21,5	38,5
1959	25,8	45,5
1960	28,6	47,7
1961	25,0	39,3
1962	22,0	38,4
1963	17,0	33,0
1964	14,9	24,7
1965	11,8	23,6

Kilde: Jerome Kraus: An Economic Study of the US semiconductor Industry,⁶ p. 80.

Figur 17.

Op gennem 50'erne blev transistorerne alt i alt mere pålidelige, mere ensartede og mere modstandsdygtige overfor

temperatursvingninger. Der kom også flere og flere forskellige typer transistorer på markedet. I 1953 var der 60 typer og i 1957, 600 forskellige typer. (15 s. 82)

De forbedrede fremstillingsteknikker kulminerede i slutningen af 50'erne med fremkomsten af planarprocessen, som kombinerede nogle af de diffusions- og oxidafvaskningsmetoder, som man havde udviklet tidligere. Med denne teknik, blev det også muligt at fremstille integrerede kredsløb, hvor man lavede hele kredsløb på en siliciumskive i en procesgang.

Planarprocessen og de integrerede kredsløb markerer overgangen til mikroelektronikken.

MIKROELEKTRONIKKEN.

DET INTEGREREDE KREDSLØB SLÅR I GENNEM.

Det integrerede kredsløb var en af flere miniaturiseringsideer, som konkurrerede i slutningen af halvtredserne og begyndelsen af tredserne.

Enkeltkomponenterne havde i begyndelsen af 60'erne næsten nået deres fuldkommenhedsgrænse m.h.t. pålidelighed, og det kunne ikke betale sig at gøre dem mindre, da de jo skulle forbindes i hånden. Upålideligheden ved komplicerede elektroniske systemer lå mere i forbindelseslinierne end i de aktive komponenter.

Det, der fik de integrerede kredse til at slå i gennem, var, at man med dem i højere grad end med andre miniaturiseringsideer opnåede følgende fordele:

- mindre plads til de samme funktioner
- øget pålidelighed
- mindre energiforbrug
- øget integration
- mulighed for mere komplekse systemer
- reducerede omkostninger, fordi flere komponenter blev lavet i den samme arbejdsgang.

Udviklingen af planarprocessen slog samtidig silicium fast som nærmest enerådende halvledermateriale, fordi dets oxidlag kunne bruges som maske og isolationsmateriale i planarprocessen, denne fordel havde germanium ikke.

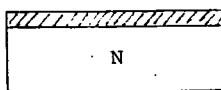
PLANARPROCESSEN

De integrerede kredsløb kan man v.h.j.a. planarprocessen opbygge på overfladen af en wafer, der er en tynd siliciumskive af yderst ren form, dvs. med et forsvindende antal fremmedatomer og fejl i gitterstrukturen. På disse wafere kan man konstruere kredse af enkeltkomponenter ved, i udvalgte områder, at ændre stoffets ledningsevne ved at forurene med bestemte fremmedatomer.

Man opbygger de elektroniske kredse lag for lag, hvor hvert lag får et mønster fra en maske, der foreskrives i kredsdesignet. Ved brug af fotolitografiske metoder og dopingsteknikker overføres mønstret på hver af waferens - måske flere hundrede chips - i en såkaldt "step-and-repeat"-proces.

Figur 18. Fremstilling af pn-overgang med planarprocessen.

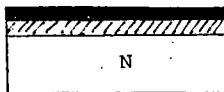
1) Oxidering af siliciumoverflåden.



siliciumoxid
n-silicium

2) Pålægning af mønster i oxidlaget.

a) Resistbelægning

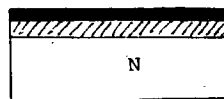


fotoresist

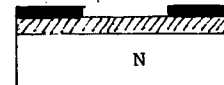
b) Exponering af fotoresisten



uv-lys
fotooriginal

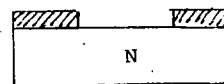


c) Fremkaldelse af resist



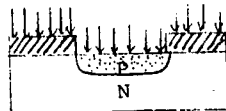
resistmaske

d) Ætsning af oxid og opløsning af resisten



diffusionsmaske
p-forureningsstof

3) Diffusion af forureningsstof.



Princippet i planarteknikken består altså i en gentagelse af tre grundprocesser:

- 1) Man lægger en afskærmende "hinde" på siliciumoverfladen med en oxidationsproces.
- 2) Med fotolithografiske metoder laves et mønster i oxydhinden, hvorved noget af siliciumet blotlægges.
- 3) Et forurenings diffunderes ned i den blotlagte siliciumoverflade.

Ved at gentage disse tre grundprocesser (figur 18), kan man opbygge de forskellige komponentstrukturer med varierende n- og p-doterede områder. De enkelte procestrin gennemgås nu lidt mere uddybende:

1) I fremstillingsprocessen af det rene monokrystalinske silicium, udvindes stoffet først af dets oxid, der udgør hovedbestandelen af almindeligt sand. Dette "rå-silicium" bliver derefter rengjort fra urenhedsatomer, så disse kun udgør en forsvindende lille del af stoffet, nemlig mindre end $10^{-6}\%$. Dette polykrystalinske silicium omdannes til et monokrystalinsk stof, samtidigt med at man doper med det ønskede forureningsstof: Man opvarmer det kemisk rene silicium i en smelte og tilsætter dopingsstoffet deri. Herfra kan man trække monokrystaller ud af ved brug af et kim. De fremdyrkede krystaller produceres i cylindre med en standartstørrelse på 20-50 cm's længde og 20-100 mm i diameter. Af disse udskæres de 0,2-0,4 mm tynde wafers, der derefter ætzes og poleres for at udbedre beskadigelser i snitfladen.

Oxidationen af siliciumoverfladen foretages ved at udsætte waferoverfladerne for en opvarmet oxiderende atmosfære, og man er i stand til ret præcist at kontrollere lagets tykkelse ved at styre temperatur og procestid. Siliciumoxidet anvendes som maske i den selektive dopingsproces, til isolation mellem metaliske ledere og endelig som beskyttende lag over den færdige chip.

2) Over oxidationslaget lægges en fotoresist, der er et lysfølsomt materiale, som polymineres ved påvirkning af elektromagnetisk stråling. På den måde kan man ved at bely-

se gennem en maske, overføre et mønster på fotoresisten, og ved æstningsprocesser aftegnes mønsteret ned i siliciumdi-oxidet i form af blotlagte områder af waferoverfladen.

Exponeringen af fotoresisten kan foregå på flere måder, alt efter fotooriginalens placering i forhold til waferoverfladen, og hvilken form for bestråling der benyttes. Ved proximitetstryk holdes masken et lille stykke fra waferoverfladen, mens kontaktryk foretages ved - evt under højt tryk - at presse masken ned på waferen. Proximitetstryk har den fordel, at den ikke kan medføre skader på maske eller waferen, men til gengæld giver kontaktaftryk mere præcis billedoverførsel, da der ikke vil være så stor spredning på strålingen efter den har passeret masken. Denne spredning er også afhængig af strålingens bølgelængde, og i meget små dimensioner anvender man derfor stråling med mindre bølgelængde end i ultraviolet lys, det kan være elektron- eller røngtenstråling.

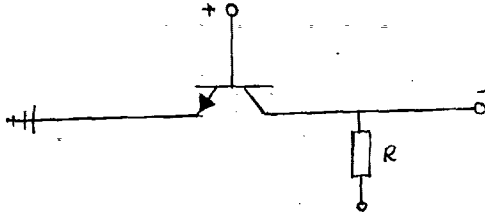
3) Man anvender forskellige metoder til dotering af halvledermaterialerne: Legering, diffusion eller ionimplantation. Herudover kan man med en særlig teknik - epitaxialprocessen - opbygge et krystallag på en siliciumoverfladen med den ønskede forureningskoncentration.

Legeringsmetoden: En simpel legeringsproces, hvor man anbringer det ønskede doteringsstof på halvlederoverfladen. Dette vil ved opvarmning lægges ned i et grænselag. Metoden anvendes til kontaktering af metaliske ledere på siliciumoverfladen.

Diffusionsdotering: Waferne placeres i en ovn med en gasformig atmosfære af doteringsstoffet i et passende tidsrum. Derved kan man opnå, at koncentrationen af fremmedatomer er konstant ved overfladen. Ved at styre ovntemperatur og proces-tid kan man få den ønskede dotering, der vil være aftagende fra overfladen og nedefter.

Ionimplantation: Forureningsatomerne accelereres op som ioner og skydes ind i halvledermaterialet. Ionimplantationen er den doteringsmetode, der giver den bedste kontrol over forureningsgraden, doteringsprofilen og geometrien. En ulempe ved metoden er, at den skader gitterstrukturen, men dette kan afhjælpes ved en efterfølgende opvarmning af stoffet.

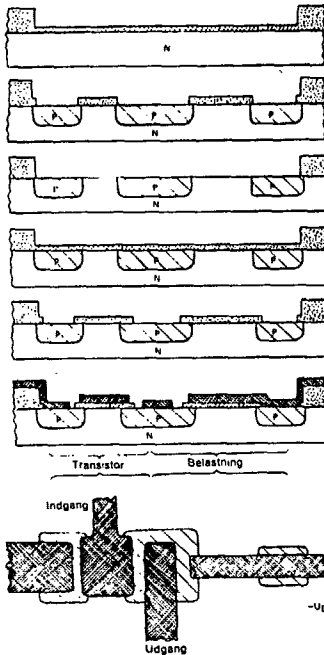
Herunder viser vi skematisk den samlede fremstilling af en simpel unipolar kreds ved brug af planarprocessen. Kredsen er en inverter som vist i figur 19.



Figur 19.

Gangen i fremstillingen af den, i unipolar kredsteknik, er vist i figur 20. Den er opbygget af to p-MOS transistorer, hvor den ene fungerer som en switch og den anden som en belastning.

- 1) Pålægning af tyk oxyd, dannelse af vindue i oxydlaget, samt inoxydning af tyndt oxydlag
- 2) Dannelse af vindue i oxyden for source- og drain diffusion. Diffusion af P-forureningsstof.
- 3) Bortrensning af tyndt oxyd
- 4) Pålægning af ren, tyndt oxyd
- 5) Dannelse af vindue i den tynde oxyd for source- og drain slutninger
- 6) Metallisering og afsning af kontakt- og forbindelsesmønstre
- 7) Færdig simpel unipolar inverter, bestående af en MOS-switch og en MOS-belastning.



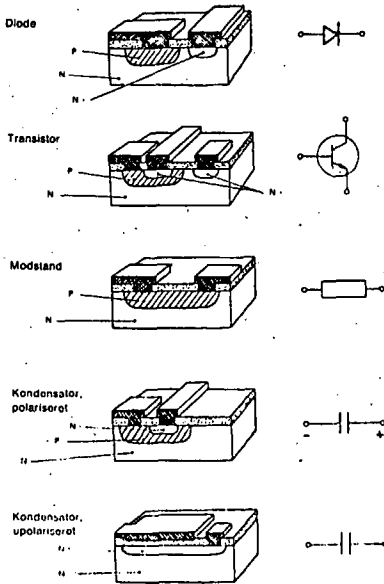
Figur 20.

Fremstilling af en simpel unipolar kreds.

DET INTEGREREDE KREDSLØB.

Den integrerede halvlederkræds er opbygget på et enkelt stykke halvlederkrystal, der indeholder alle kredsens funktionselementer eller komponenter. Dette gælder de aktive, der kan ændre deres tilstand som reaktion på et ydre signal (transistorer og dioder), som de passive (modstande og kapacitorer). Induktive komponenter forekommer ikke i halvlederkræds. Det er lettest og billigst at fremstille de aktive komponenter, mens modstande og kapacitorer bliver dyrere, da de kræver et forholdsmæssigt større areal på chippen.

De integrerede kredsløb inddeles i to grupper: De bipolære- og de unipolære integrerede kredse. I de bipolære kredse indgår flere typer halvlederkomponenter, nemlig planartransistorer og -dioder, modstande og kapacitorer. Derimod indeholder de unipolære kun én type kredselement: MOS-transistoren. Fremstillingsteknikken er dog baseret på planarprocessen i begge kredstyper.



Figur 21.

Byggelementer i bipolære integrerede halvlederkræds i form af aktive og passive komponenter.

Anmærkning: N⁺ betegner et siliciumråde med kraftig N-dotering

Ud over at de bipolære kredse er opbygget af både aktive og passive komponenter, adskiller de sig fra de unipolære, ved at have to slags ladningsbærere i transistoren, dvs både huller og elektroner. De forskellige bipolære komponenter fremgår af figur 21. (Se om opbygning og virkemåde af planar transistoren på side 42. Som kondensator anvendes Spærrelagskapaciteten i en pn-overgang, eller de fremstilles som tyndfilmskondensatorer med siliciumdioxid som dielektrikum. De bipolære komponenter skal isoleres fra hinanden, og dette gøres ved at placere det lag, eks. n-lag, som komponenterne opbygges på, i et substrat af p-silicium. Substratet og n-væggene forspændes ved anvendelse kraftigt i spærretningen, og man får en spærret pn-overgang mellem komponenterne og substratet.

I de unipolære kredse anvendes somst kun én type byggeelement: MOS-transistoren, der er karakteriseret ved kun at have én type ladningsbærere. (Se opbygning og virkemåde på side 43). Alt efter hvilken type ladningsbærere der anvendes kaldes transistoren n-MOS eller p-MOS. Man fremstiller også kredse, der indeholder begge transistorer, og disse kaldes C-MOS kredse (komplementær-MOS). I de unipolære kredse behøver de enkelte elementer ikke at være isole-ret i forhold til hinanden. Sammen med MOS-transistorens ukomplicerede struktur bevirker dette, at fremstillingen af de unipolære kredse er simplere og dermed billigere end fremstillingen af de bipolære. Det har også betydning for pakningsdensiteten, idet der groft sagt kan være fire gange så mange MOS-transistorer, som bipolære på et givent areal. De unipolære kredse har altså større komponenttæthed, og egner sig derfor bedre til storintegration (LSI- og VLSI-teknik.) Fordelen ved de bipolære kredse er, at de har større operationshastighed, men dette modsvares af, at de er mere energiforbrugende end de unipolære. Vi kan altså konkludere, at såfremt man ikke stiller for store krav til operationshastigheden, må det være en fordel at anvende aktive komponenter da de er billigere, og kan laves mindre.

INDUSTRIENS UDVIKLINGSBETINGELSER I 60'ERNE.

Efter de integrerede kredses gennemslag fulgte en periode, som på mange måder mindede om udviklingen i 50'erne, med hurtige teknologiske landvinder, udvikling af nye former for integrerede kredsløb, og fremkomst af endnu flere nye firmaer.

For at forstå den teknologiske udvikling, som fandt sted i 60'erne, er det nødvendigt at kende lidt til udviklingsbetingelserne for industrien.

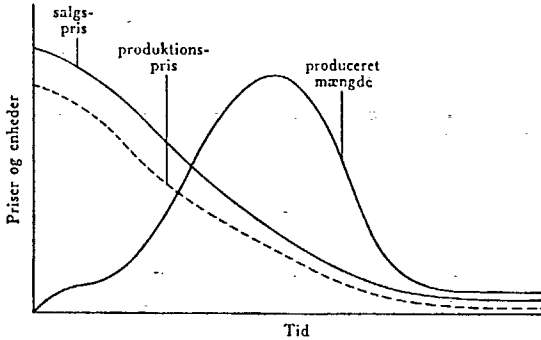
Halvlederprodukterne er karakteriseret ved enormt store udviklingsomkostninger, med gode masseproduktions muligheder og lave råstofomkostninger.

Som i 50'erne var det i høj grad militæret, der finansierede de første integrerede kredsløb og dermed satte produktionen i gang. Men op gennem 60'erne blev militærets betydning mindre. Da masseproduktion var nødvendig for at gøre udviklingsomkostningerne rentable, slog halvlederindustrien efterhånden ind på det private forbrugsmarked, hvor der jo netop i 60'erne var penge at hente. Resultatet blev et væld af nye forbrugsgoder såsom lommeregner, computere, programmerbare vaskemaskiner osv. som afsattes i store mængder.

Konkurrencebetingelserne var præget af, at informationer om nyudviklinger og nye teknikker flød rundt mellem firmaerne, i form af at de ansatte skiftede job i stor stil. Så snart de havde lært noget et sted, var der andre firmaer, der var villige til at betale store penge for deres ekspertise, i håb om på den måde at aflure andre firmaer deres fiduser.

Den hårde konkurrence mellem mange nye firmaer og den hurtige informationsudveksling, var medvirkende årsager til, en meget hurtig teknologiudvikling. Det er almindeligt, at nye produkter, som lanceres på markedet, gennemløber en "lærecyklus", som kan karakteriseres som på figur 22.

Den hurtige udvikling indenfor halvlederindustrien be-



Den typiske produkt-cyklus for halvledere. (Efter A. M. Golding: The Semiconductor industry in Britain and the United States,⁸ p. 92).

Figur 22. (15, s 118)

tød, at halvlederprodukternes lærekurver ofte kom hele cyklusen i gennem indenfor meget få år. Disse udviklingsbetingelser betød også, at der kunne opstå "døgnfluefirmaer" med en kæmpe omsætning i få år, for derefter at gå ned ligeså hurtigt som de var opstået.

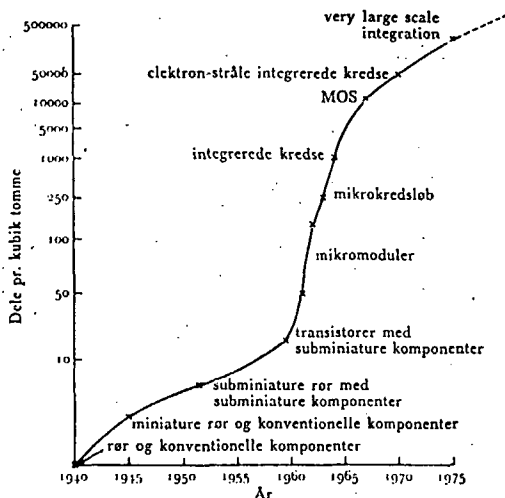
MINIATURISERING.

Det mest iøjnefaldende kendetegn ved den teknologiske udvikling, elektronikteknologien har gennemløbet, er miniaturiseringen.

Miniaturiseringen har to sider: dels en formindskelse af de enkeltdele, de integrerede kredse består af, dvs. lagtykkelser og liniebredder, og dels en forøgelse af antallet af komponenter på chippen, integrationsgraden.

Forud for miniaturiseringen af mikroelektronikken fandt der også en miniaturisering af rør og enkeltkomponenter sted. Denne udvikling plejer man at illustrere med kurver som den vist på figur 23.

Der eksisterer en udbredt forvirring over, hvad det er mest praktisk at måle integrationsgraden med. Nogle bruger "dele" pr. arealenhed, som kurven på figuren, men det er uklart, hvad ordet "dele" egentlig dækker over. Andre måler



Den elektroniske miniaturisering 1940—75. (Efter G. W. A. Dummer: Integrated Electronics og S. H. Hollingdale og G. C. Toothill: Electronic Computers⁸³).

(Figur 23)

integrationsgraden i "bits" eller "portfunktioner" pr. arealenhed, hvor en bit eller en portfunktion er et kredsløb, der kan udføre en logisk funktion. Endelig kan man også bruge antallet af komponenter pr. arealenhed eller pr. chip som mål. Hvis man bruger antallet af komponenter pr. chip som mål, kan man sige at dette antal har fordoblet sig hvert år siden 1960. Dette kaldes Moores lov, efter Fairchilds forskningschef G.E. Moore, der i 1964 forudså at den tendens ville vare ved.

Men uanset hvad man måler det i, har miniaturiseringen medført forbløffende resultater. Robert Noyce (direktør for Fairchild) illustrerer det sådan i et temanummer af Scientific American om mikroelektronik, fra 1977: (17, s. 65)

"En mikrokomputer i dag, som koster omkring 300 dollars, har mere computerkapacitet end den store elektroniske computer ENIAC. Den er 20 gan-

ge hurtigere, har en større hukommelse, bruger strøm som en elektrisk pære snarere end som et lokomotiv, fylder 30.000 gange mindre og koster 10.000 gange mindre. Du kan købe den i postordre eller i din lokale hobbyforretning." (vores oversættelse)

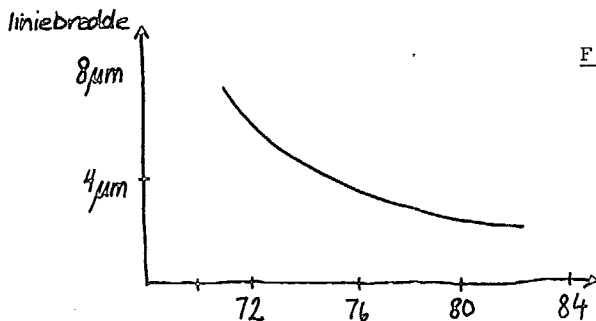
Mange opdeler udviklingen i forskellige "integrationsperioder", nemlig SSI, MSI, LSI, og VLSI dækkende over h.h.v. "small scale", "medium scale", "large scale" og "very large scale" integration. Igen er inddelingen lidt arbitrær.

Arnold Reisman bruger i en artikel i "Proceedings of the IEEE", fra 1983 (18, s.550) denne inddeling:

- SSI: 2^1 til 2^6 (= 2 til 64 komponenter pr. chip)
- MSI: 2^6 til 2^{11} (= 64 til 2048 ----)
- LSI: 2^{11} til 2^{16} (= 2048 til 65536 ----)
- VLSI: 2^{16} til 2^{21} (= 65536 til 2097.152 ----)

Han vurderer det nuværende stade til, afhængigt af hvordan man tæller, at være i slutningen af LSI eller i begyndelsen af VLSI perioden. Dvs, at der er i omegnen af 100.000 komponenter på vore dages integrerede kredsløb.

Den eksponentielle stigning i antallet af komponenter pr. chip har været ledsaget af en reduktion i liniebredden og en forøgelse af chiparealet. Formindskelsen af liniebredden kan anskueliggøres på denne måde: (Efter Reisman, 18, s. 551)



Figur 24.

Den almindeligt anvendte liniebredde i dag ligger på omkring 2,5 til 3 μ m. 1 μ m er en tusindedel millimeter.

I begyndelsen af 60'erne blev det for alvor teknisk muligt at lave felteffekt transistorer. Den type, der kom frem i slutningen af 60'erne, var MOS-transistoren. Man havde i lang tid problemer med funktionsdygtigheden og operationstiden for MOS-transistorerne, men i begyndelsen af 70'erne var de i stand til at konkurrere med den bipolære teknik. De er stadig langsommere, men de kan laves mindre end de bipolære, og de forbruger mindre energi. De sidste to ting betyder, at der kan anbringes mange flere MOS-transistorer på en chip. Desuden er de enklere at fremstille end de bipolære, og dermed billigere, da de ikke kræver så mange procestrin. MOS-teknikker eller IGFET (Insolated-Gate-Field-Effect-Transistor), som er den mere generelle betegnelse for felteffekttransistorerne, er derfor bedre egnede som LSI og VLSI komponenter end de bipolære transistorer.

FORHOLDET MELLEM VIDENSKAB OG TEKNOLOGI BELYST VED EKSEMPLER:

Den tendens, man allerede kunne spore i 50'erne, med at teknologiudviklingen blev mere præget af mere empiriske og mindre bekostelige udviklingsmetoder, end det var tilfældet ved opfindelsen af transistoren, blev endnu tydeligere i 60'erne. Således faldt industriens forsknings og udviklingsomkostninger fra 27% af salget i 1958 til kun 6% af salget i 1965. (15, side 168)⁺

Samtidig blev forbindelsen til den grundforskning, som foregik på universiteterne tilsyneladende også svagere. Elektronik Revolutionen illustrerer denne udvikling med følgende citater fra amerikanske halvlederindustrifolk:

⁺ Det har ikke været muligt at finde sammenlignelige tal for den totale omsætning og den totale investering i perioden 55 til 70. I perioden fra 58 til 65 steg omsætningen, så faldet i investeringer er ikke i absolutte tal så stort som procenterne antyder.

"Der begyndte omkring 1960 at opstå en erkendelse af, at faststoffysikken havde lagt laboratoriet bag sig, og var blevet en del af fabrikken. Ingeniører og teknikere lyttede med andre ord ikke længere til grundforskerne, og var i virkeligheden ikke længere særlig interesserede i, hvad grundforskerne beskæftigede sig med" (15, side 167) Douglas Warschauer⁺

"Jeg fik et helt chok, da jeg fornylig konstaterede, at det vi lavede med en eller to decimalers nøjagtighed dengang i halvtredserne, stadig er noget, man arbejder med på universiteterne - blot at man nu med samme ildhu er gået i gang med den tredje decimal i en evig jagt på hvert lille hop i båndstrukturen." (15, side 168) Douglas Warschauer

"Er der noget, der kan få glansen til at gå af Skt. Gertrud, så er det det, at vi er for dygtige. Der kan laves så meget ved hjælp af det, der allerede er opfundet, at teknologien simpelthen ikke længere kan følge med. Der er nok at lave med at udnytte det, der allerede er lavet.....og der er så meget af det, der ud fra et teknisk synspunkt trænger til forbedring, at det simpelthen ikke er nødvendigt at øse penge i nye komponenter." (15, side 168) Ralph Bray.

"Det meste grundlæggende arbejde i halvlederkom-

⁺Douglas Warschauer og G. Heilmeyer er amerikanske halvlederindustrifolk, men de bliver ikke præsenteret yderligere i Elektronik Revolutionen.

Ralph Bray er professor på Purdue University.

ponentfysikken udføres i dag af industrien -
ikke af universiteterne."

(15, side 169)

George Heilmeyer

Men selv om forbindelsen til universiteternes grundforskning blev svagere i 60'erne i takt med at industriens forskning blev mere selvstændig og tog føringen indenfor snævre, relevante fysikområder, er der noget der tyder på at, at industriens interesse for universiteternes grundforskning er blevet større igen indenfor de senere år. F.eks. skriver IBMs forskningschef, Lewis Branscomb, i en leder i et særnummer af *Physics Today* 1979, om mikroelektronik: (6, s.134)

"Skønt det er den almindelige opfattelse at grundforskning er styrende for teknologien, har vi i mikroelektronikken et område hvor teknologien er styrende for den naturvidenskabelige forskning. Det kan imidlertid ikke vare ved. En yderligere ekspansion i dette nye og spændende område vil blive mere og mere sammenflettet med fremskridt i såvel universiteternes og forskningscentrenes som den private industris grundforskning. Inden for industrien er konstruktørerne i alvorlig fare for at overskride grænsen for deres videnskabelige formåen efterhånden som de kritiske dimensioner i de strukturer de opbygger nærmer sig lysets bølgelængde. Endvidere ser det ud til at den fremtidige udvikling vil søge at anvende værktøjer og processer der indeholder fænomener som i nogle tilfælde kun dårligt forstås, og i andre tilfælde endog hører til de dele af den naturvidenskabelige grundvidenskab der normalt ikke anses for at have nogen anvendelse i industrien."

Industriens agtpågivenhed overfor grundvidenskabens betydning kan også aflæses af, at IEEE holder symposier med emnet : "Samarbejde mellem universiteter, regering og indu-

stri", med det formål, at give teknologiudviklingen de bedst mulige betingelser. (19)

IEEE står for "Institute of Electrical and Electronic engineers". Formålet med IEEE er at være kontaktorgan for folk indenfor denne branche og mellem industri, regering og universiteter og andre instanser af betydning.

På IEEEs konferencer diskuteres sager af fælles interesse, bl.a. hvordan man kan koordinere bestræbelserne for at give den amerikanske halvlederindustri de bedste konkurrencebetingelse på verdensmarkedet.

Ved IEEEs 4. symposium i maj 1981 med titlen "University, Industry, government, microelectronics" holdt I. R. Sandler fra Motorola et foredrag, hvor han bla. snakkede om, at man kun ved industrien og universiteternes fælles anstrengelser kunne undgå mangel på kvalificeret arbejdskraft til halvleder industrien ved overgangen til VLSI-perioden. Han sagde bl.a.:

"Generally when an engineer is hired by a semiconductor company...his college learned skills are not adequate for cost effective performance. It is then necessary for him to have on-the-job training. That training lasts approximately three years before he is cost effective. Additional skills will become necessary as we shrink semiconductors to the device size required for approximately 1 million devices on a chip which is our goal by 1985."

"In time past industry and educators generally talked only at arms length. We begin to see today closer cooperation between industry and educators. Even more of this will be required in the future."

"It may be necessary in addition for a new type of educational institution to develop. This is essence a super trade school at the master level.....Such a super trade school might..... teach mixed diciplines which are often used in the semiconductor industry. For example, an en-

gineer who sustains a processing line often requires knowledge of chemistry, chemical engineering, crystallography, solid state physics, in addition to electrical engineering skills."
(19, side IV-A-2)

Af citatet kan man se, det hidtil har været nødvendigt for industrien selv at give de ansatte en del af deres kvalifikationer. Men efterhånden som miniaturiseringen skrider fremad får de ansatte brug for endnu flere kvalifikationer, som det er en fordel for industrien, hvis de kan få ved et nærmere samarbejde mellem industri og uddannelsesinstitutioner. Samarbejdet mellem universiteter og industri foregår altså i hvert fald ikke tilfældigt. Det er i høj grad et område industrien er opmærksom på.

Til sidst vil vi se på et eksempel, hvor fysikere inddrages i et industrielt forskningsprogram med henblik på en yderligere miniaturisering. Stedet er Bell-laboratorierne. Forskningsgruppen beskriver deres arbejde i en artikel i "Proceedings of the IEEE", fra maj 1983, som hedder "A systems approach to 1 μ MOS." (20)

Forskningsgruppen bestod af fasstoffysikere, folk med forstand på komponent - og kredsløbs modeller og design, folk med forstand på materialer procesteknologi og litografi.

De forskellige grupper havde forskellige opgaver:

Fysikerne og modelbyggerne udviklede nye 2 og 3-dimensionelle modeller af NMOS komponenterne og af deres fabriktionsproces.

Designerne udviklede testmetoder, og nye lay-out metoder, som undgik uønskede kapaciteter rundt omkring på chippen og som maximerede out-put strømmen.

Litograferne forfinede de herskende elektronstrålings- og røntgenstrålings litografimetoder, samt det optiske udstyr.

Procesgruppen udviklede lavtemperatur komponentfabrikationsprocesser og nye mønster overførselsteknikker.

Materialegruppen udviklede nye pålidelige forbindelsesliniemateriale med høj ledningsevne og stor modstandsdygtig-

hed over for elektromigration.

Samtidig med det teoretiske arbejde i denne forskningsgruppe, igangsattes en fabrikationslinie med de nye teknikker og materialer, så man kunne drage praktiske erfaringer og se at kredsløbene fungerede.

Formålet med fysikernes arbejde i den samlede forskningsgruppe var altså at udnytte deres fysiske viden til at forudsige (ved hjælp af computersimulation) nyudviklede komponenters virkemåde. I artiklen siges herom bl.a.:

"To develop an NMOS technology using $1\mu\text{m}$ lithography, it was necessary to device a processing sequence that would produce devices with optimal electrical characteristics. Varying processing steps and making empirical measurements until satisfactory results are achieved is both costly and time consuming. It is far more efficient to explore various process combinations by having accurate numerical simulation models that can be run on a modern computer reasonably quickly. These models also allow a detailed study of the effect of process variation on device behavior."

(2o, side 64o)

På trods af de simulationsprogrammer, der skal til, er dyre og indviklede at lave og køre, kan det altså betale sig at regne komponenternes virkemåder ud på forhånd frem for at prøve sig frem. Vi er langt fra den erfaringsbaserede teknologiudvikling.

I artiklen fortælles det, at kompleksiteten af programmerne stiger betydeligt, når de skal bruges til komponenter under $3\mu\text{m}$ i liniebredde. Indtil $3\mu\text{m}$ er en 1-dimensionel model tilstrækkelig nøjagtig, men under $3\mu\text{m}$ er det nødvendigt med 2 og 3 - dimensionelle modeller. Gruppen udviklede to slags modeller: procesmodeller og elektriske modeller.

Procesmodellerne havde til formål på baggrund af oplysninger om de variable, man kan stille på under fremstillingsprocessen (såsom tider, temperaturer, ionimplanteringsdoser osv), at udregne f.eks. oxidtykkelser og urenhedfordeleliger eller andre størrelser af betydning for NMOS-transistorens funktion.

Resultaterne af disse procesmodeller - en nøjagtig beskrivelse af opbygningen af den nye NMOS - blev så brugt som input til de elektriske modeller, sammen med oplysninger om spændingerne over f.eks. Source og drain, og over gaten, til at udregne den forventede strøm gennem transistoren.

Om modellen siges det bl.a.:

"The modelling programs were implemented using a CRAY-1 computer that incorporated such features as first principles (electron) mobility model in which velocity saturation and perpendicular-field dependence are included as well as avalanche effects".

(2o, side 641)

Fysiske første principper indgår altså åbenbart i modellen. Det kan give et indtryk af omfanget af modellerne at se på prisen for at køre dem:

"The three-dimensional simulation is a inherently costly calculation, so that care was taken to use the most efficiently numerical methods. Even so, the resulting cost for one current-voltage point was approximately 200 dollars."

(2o, side 642)

KONKLUSION.

Dette er en konklusion på det historiske afsnit.

På de følgende sider vil vi trække op, hvilke karakteristika, vi har kunnet få øje på i den historiske udvikling, som illustrerer det i Tese 1 postulerede skift i den teknologiske udviklings karakter.

RØRTEKNOLOGIEN.

Videnskabsbaseret teknologi var karakteriseret ved en vis vekselvirkning mellem teknologi og videnskab, men teknologien udviklede sig i øvrigt ret selvstændigt i forhold til videnskaben, og omvendt.

At dette i vid udstrækning er i overensstemmelse med rørteknologiens udvikling, kan illustreres med følgende eksempler:

- Fysikeren Faradays arbejde med elektriske og magnetiske fænomener var forudsætningen for telegrafi med tråd
 - Brauns opdagelse af ensrettereffekten ved kontakten mellem metal og halvledere var forudsætningen for krystaldektoren.
 - Fysikeren Hertz' arbejde med at påvise elektromagnetiske bølger var forudsætningen for den trådløse telegrafi.
- Samtidig med at de tekniske opfindelser på denne måde i en eller anden forstand baserede sig på fysiske opdagelser udviklede teknologien sig dog ret selvstændigt i forhold til fysikken:
- Forbedringerne af krystaldektoren foregik uafhængigt af fysikernes indblanding.
 - Dioden var ikke en fysisk opdagelse men udsprang af glødelampe industrien.
 - Ved miniaturiseringen af rør var problemerne hovedsagelig af teknisk/teknisk art, som ikke krævede inddragelse af fysikere i arbejdet.

TRANSISTOREN.

Opfindelsen af transistoren skulle i følge vores indledning markere et skift i den teknologiske udviklings karakter fra videnskabsbaseret til videnskabeliggjort teknologi.

Videnskabeliggjort teknologi er karakteriseret ved, at samarbejdet mellem teknologi og videnskab er tættere, og ikke længere foregår tilfældigt. Videnskaben indgår i teknologiudviklingen ved at højtuddannede personer er nødvendige til at håndtere produktionen og nyudviklingen af produkter.

I den udvikling, der førte frem til opfindelsen af transistoren begyndte visse træk, som kendetegner en videnskabeliggjort teknologi, at dukke op:

- Bell ansætter fysikere til industriel forskning, og etablerer en forskningsafdeling.
- Op gennem 30'erne er der et vist samarbejde mellem Bells fysikere og universitetsfysikere, idet der holdes jævnlig kollokvier på Bell om kvantemekanikkens udvikling med deltagelse af universitetsfysikere.
- Bell etablerer en faststoffysisk forskningsgruppe, som bl. a. består af Shockley, Bardeen og Brattain.
- Under krigen iværksætter USAs regering et gigantisk forskningsprogram, ledet af Massachusetts Institute of Technology, om silicium og germaniums fundamentale egenskaber, med henblik på at forbedre radar-detektorerne. Forskningsprogrammet inddrager både universiteter og private forskningslaboratorier.
- Opfindelsen af transistoren kan opfattes som kulminationen af videnskabeliggjort teknologiudvikling.

Disse eksempler vidner om, at samarbejdet mellem videnskab og teknologi bliver tættere, og at fysikere begynder at indgå i udviklingen af teknologiske opfindelser.

Som beskrevet i afsnittet, kan transistoropfindelsen opfattes som indbegrebet af en videnskabeliggjort teknolo-

giudvikling:

Forskerne var videnskabeligt uddannede. Deres forskning var både grundvidenskabeligt og anvendelsesmæssigt orienteret. De udviklede ny grundlæggende forståelse i forbindelse med opfindelsen af transistoren, som senere indbragte dem nobelprisen i fysik. Opfindelsen var af en sådan karakter, at en videnskabelig forståelse var nødvendig, for at følge produktet helt frem til at blive en pålidelig og salgbar vare.

Men selv om transistoropfindelsen var forskellig fra den teknologiudvikling, der fandt sted i forbindelse med rørdviklingen, er det langt fra sikkert, at den er typisk for den teknologiudvikling, der fandt sted sidenhen.

Der må vi se nærmere på mikroelektronikudviklingen i 60'erne og 70'erne.

MIKROELEKTRONIKKEN.

I 60'ernes mikroelektroniske udvikling skete der to karakteristiske ting, som gjorde forholdet mellem fysik og teknologi anderledes, end da transistoren blev opfundet:

- 1) Industrien satsede mindre på forskning end i 50'erne.
- 2) Der skete en (yderligere) selvstændiggørelse af industriforskningen i forhold til universitetsforskningen.

Det første så vi, ved at industriens investeringer i forhold til salget faldt fra 27% i 1958 til 6% i 1965.

Det andet så vi af citaterne fra "Elektronik Revolutionen". De sagde nemlig dels, at grundvidenskaben og teknologiudviklingen er gået hver sin vej: "Ingeniører og teknikere lyttede med andre ord ikke længere til grundforskerne og var i virkeligheden ikke længere særlig interesserede i, hvad grundforskerne beskæftigede sig med." Desuden sagde citaterne, at industrien stadig interesserede sig for fysik, og at den var længere fremme, hvad angik faststoffysik end universiteterne: "Faststof fysikken havde lagt laboratoriet bag sig, og var blevet en del af fabrikken", og: "Det mest grundlæggende arbejde i halvlederkomponentfysikken udføres idag i industrien - ikke af universiteterne".

Det var altså en bestemt del af fysikken: "halvlederkomponentfysikken", som industrien beskæftigede sig med, og som de var længere fremme med end universiteterne. Derfor havde de ikke længere behov for et så nært samarbejde med universiteterne som tidligere.

På den måde blev videnskabeliggjortheden mere usynlig igen, fordi den ikke kunne iagttages som et tæt samarbejde mellem universitetsfysik og teknologiudvikling. Men der er ingen tvivl om at fysikken i 60'erne stadig indgik som en nødvendig ingrediens i teknologiudviklingen, det var bare en speciel og mere anvendelsesorienteret del af fysikken, som ikke havde så meget tilfælles med universiteternes grundforskning.

Begge de to karakteristika kan forklæres ved, at det dyreste og dermed det mest grundforskningsprægede udviklingsarbejde i industrien blev mindre udbredt.

Det dyreste forskningsarbejde var den type, der f.eks. indgik i opfindelsen af transistoren på Bell. Her havde man mange forskere til at lave grundforskning både i teknologiske interessante - og i beslægtede områder i håb om, at der derved ville opstå interessante ting. Denne grundforskning var nødvendig, fordi det, der i lang tid var problemet ved transistoropfindelsen, var en helt grundlæggende forståelse af, hvad der egentlig foregik i halvlederen. Derfor var opfindelsen af transistoren forbundet med banebrydende videnskabeligt arbejde.

Eftersom den slags grundforskning i sin natur er svær at gøre effektiv, og fordi den er bekostelig at have med at gøre, vil industrien søge at undgå at gå grundvidenskabeligt til værks overfor problemer, den støder på.

I 60'erne var det ikke i samme grad banebrydende arbejde, der var nødvendigt. Den grundlæggende videnskabelige forståelse af, hvad der foregik, var etableret. Nu var det mere et spørgsmål om, at forfine de teknologiske processer, og lære at udnytte de muligheder, den etablerede forståelse gav, teknologisk. Til dette formål var det - bl.a. p.gr.a. den hurtige udviklingshastighed - mere effektivt med en mere "tek-

nisk" og mindre "grundvidenskabelig" arbejdsform.

Den forskning, der blev lavet i halvlederindustrien i 60'erne, udviklede også "ny viden", men ikke ny fundamental videnskabelig forståelse. Den ny viden var mere specifik viden om komponenternes virkemåde og egenskaber, forklaret ud fra videnskabelige grundbegreber indenfor rammerne af en allerede etableret videnskabelig forståelse. Udvikling af den form for viden, kan man godt kalde videnskab - nogle gange måske endda grundvidenskab - men det er en anvendelsesorienteret grundvidenskab, til forskel fra den "rene" grundvidenskab, som drives på universiteterne. Anvendelsesorienteret grundvidenskab kan gøres mere effektiv, fordi den kan sættes til at producere bestemt viden på bestilling. Man kan ikke få grundvidenskabelig forståelse på bestilling, der kommer svaret ofte fra en uventet side.

Den anvendelsesorienterede grundforskning er nødvendig for teknologiudviklingen, og tilpas effektiv til at blive trukket direkte ind i halvlederindustrien. Det var det, der skete med overgangen til halvlederelektronikken, og især i 60'erne. Her udviklede den sig meget, industrien kom langt foran universiteterne på dette felt, og på den måde virkede teknologiudviklingen styrende og udviklende på en faststoffysisk udvikling.

Artiklen om forskningsgruppen på Bells arbejde med at miniaturisere NMOS ned til 1μ m var et eksempel fra 1983 på, hvad man kunne kalde meget anvendelsesorienteret grundforskning. Fysikerne forudbereggede komponenternes virkemåde ud fra kendt fysisk viden ved hjælp af modelbygning og computerberegninger. Eftersom de tilsyneladende udelukkende anvendte "kendt" fysisk viden, kunne man sige, at de hverken "forskede" eller udviklede "ny viden". Men det er ikke rigtigt. De udviklede ny viden i form af ny specifik viden om de nye formindskede komponenters funktion. For at kunne gøre det, måtte de bygge nye modeller, dvs. lære at bruge den "kendte" viden på en ny måde, der bedre passede med virkeligheden end de gamle metoder. De nye modeller måtte de afprøve og til-

passe til virkeligheden i en slags eksperimentel forskningsproces, inden de brugte dem til at beregne de nye komponenters funktion.

På denne måde kortlagde de i detaljer den viden, de kendte fysiske principper kunne give, indenfor hidtil ukendte områder. Ved denne proces afprøvede de, de kendte fysiske princippers holdbarhed på nye områder og fænomener. Samtidig nærmede de sig også grænserne for de kendte fysiske princippers forklaringskraft. De kunne risikere at støde på fænomener, som ikke lod sig forklare indenfor den etablerede forståelsesramme, og som ville gøre "rigtig" grundforskning aktuell igen.

Citatet fra IBMs forskningschef, og IEEE's konferencer tyder på, at grundvidenskaben faktisk igen er blevet mere interessant for industrien. I følge IBMs forskningschef skyldes det, at miniaturiseringen har medført, at mikroelektronikken i dag beskæftiger sig med størrelsesordener, hvor den etablerede forståelse ikke længere slår til. Industrien bliver derfor igen mere interesseret i grundforskning og samarbejde med universiteterne.

På den måde vil forholdet mellem grundvidenskab og teknologi, også under den videnskabeliggjorte teknologi, veksle i perioder, alt efter hvad det i øjeblikket er for problemer teknologiudviklingen står overfor.

HVAD VI HAR VIST OG HVAD VI IKKE HAR VIST.

Alt i alt synes vi, vi har illustreret, at samarbejdet mellem teknologi og videnskab er blevet tættere og langt mere bevidst planlagt under faststofelektronikken end under rørelektronikken.

Vi har sandsynliggjort at fysikkens funktion bl.a. er, at udvikle ny viden. Denne "ny viden" kan være af mere eller mindre videnskabelig eller grundlæggende karakter.

Som beskrevet i afsnittet, mener vi at kunne se, at det giver mening, at skelne mellem "ny viden" i form af "ny videnskabelig forståelse" og "ny viden" i form af "nye anvendelser af kendt viden" eller "ny specifik viden om tekno-

logisk interessante fænomener". Vi har endda forsøgt os med en kategori: "anvendelsesorienteret grundforskning", til at skille udviklingen af den sidste slags viden fra udviklingen af den første slags. Dette gør det muligt at se nuancer i "graden af videnskabelighed i udviklingen" i forskellige perioder i den videnskabeliggjorte teknologiudvikling.

Men der er mange lag i den lagkage, og vi har ikke været nær tæt nok på til at kunne skille de forskellige typer af "ny viden" ud fra hinanden. Der skal man langt tættere på "hvad det faktisk er de laver", end det har været muligt for os i dette projekt. Man skulle i virkeligheden også sætte sig ind i, hvilken uddannelse de "videnskabelige" medarbejdere egentlig har, for at se i hvor høj grad, den er "videnskabelig". Men for at kunne gøre det, skal man frem for alt have en større fysisk indsigt, end vi har. Dette har vi faktisk følt som en hæmsko i arbejdet med det historiske afsnit. Vi var aldrig i stand til selv at vurdere, hvilken rolle fysikken spillede på et givet tidspunkt i den teknologiske udvikling, derfor var vi henvist til vurderinger fra folk, der var involveret i udviklingen.

Tilsvarende føler vi os også på denne baggrund kun i begrænset omfang i stand til at forklare, hvorfor det egentlig er nødvendigt med så mange videnskabeligt uddannede ansat i produktionen.

Ved udvikling af ny viden af den form, der fandt sted ved opfindelsen af transistoren, var det åbenbart, at det krævede en videnskabelig uddannelse. Ligeledes forekommer det indlysende, at den form for forskning Bell-gruppen repræsenterer, kræver videnskabelige kvalifikationer.

Men hvad når vi bevæger os ned fra topplanen og til de almindelige ingeniøropgaver, som vi påstod i indledningen også krævede videnskabeligt uddannede personer?

Her må vi nøjes med at konstatere, at man skal have mere indsigt i fysik, og man skal meget tættere på deres arbejdsfunktioner og uddannelse, end vi har været, for at se om det rent faktisk kræver videnskabelige kvalifikationer, og for-

stå hvorfor.

At det er svært at se "udefra" understøttes af en undersøgelse af danske elektronikingeniørers arbejde og kvalifikationsforhold (21) . Skønt der på danske elektronikfirmaer ikke findes forskningsafdelinger, og udvikling af "ny viden" kun må formodes at finde sted i yderst konkret form, har elektroingeniører, der er ansat på udviklingsafdelinger, faktisk en meget teoretisk uddannelse med relativt meget grundfagligt indhold. Det må altså åbenbart være nødvendigt med så høje kvalifikationer. Men hvorfor har endda ingeniørerne selv svært ved at forstå. Undersøgelsen blev lavet som et projekt på instituttet for samfundsfag på DTH og bestod bl.a. i en del interview med ingeniører ansat på udviklingsafdelinger i elektronikfirmaer. En tese for undersøgelsen lød:

"Elektronikingeniørers arbejde foregår i høj grad på basis af teorier og specielt matematisk formulerede analyseværktøjer. Arbejdet antages således specielt at foregå langt mere teoretisk og videnskabeligt fundet end det er tilfældet på bygge og anlægsområdet."

Og i konklusionen hed det:

"Denne tese har undersøgelsen afkræftet. De interviewede ingeniører har kun i ringe udstrækning anvendt teoretiske værktøjer ud over helt simple overslagsmæssige formler f.eks. Ohms lov." (21, s. 110)

Man kan drage flere konklusioner af dette:

Enten er det i virkeligheden kun nødvendigt med en videnskabelig uddannelse for de utroligt få topforskere på internationale eller amerikanske firmaers forskningsafdelinger.

Eller også er det mere et spørgsmål om at have en baggrundsviden, der giver en et "univers", som forøger ens handlemuligheder i situationen, uden man af den grund præcist kan pege på, hvilken lærdom man har brugt. Vi tror den sidste grund er mest rigtig, og at det er en medvirkende årsag til, at også danske ingeniører skal have så meget grundfag i deres uddannelse.

DEL 2

FYSIKKEN

|

MINIATURISERINGEN

FYSIKKEN I MINIATURISERINGEN.

INDLEDNING:

De følgende sider er et forsøg på at beskrive nogle af de punkter, hvor fysiske overvejelser er relevante i forbindelse med miniaturiseringen af mikroelektronik.

I det første afsnit vil vi se på, hvor små, det er muligt, at fremstille enkeltkomponenter på de integrerede kredse med principperne i den nuværende fremstillingsteknik beholdt.

Disse principper er (som omtalt under planarprocessen), at man ved hjælp af stråling tegner et mønster på et underlag, som "fremkaldes" under en ætsningsproces, hvorved dele af en siliciumskive blotlægges. De blotlagte områder dopes herefter med forureningsatomer, som ændrer de elektriske forhold i halvlederen på bestemte måder.

Vi kan nu dele spørgsmålet om, hvor små man kan lave dem op i tre underpunkter:

- 1) Hvor nøjagtigt kan man definere den stråle, man tegner med?
- 2) Hvor godt kan billedet fastholdes, som strålen tegner?
- 3) Hvor nøjagtigt kan man styre forureningen af halvlederen med fremmedatomer?

Indenfor disse tre områder har vi valgt nogle basale fysiske betragtninger ud, som vi kan se indgår som ingredienser til at besvare spørgsmålet.

I det næste afsnit ser vi på, hvor små, man kan forestille sig, enkeltkomponenterne kan være, hvis de samtidig skal kunne virke. Dette er et ret kompliceret spørgsmål bl.a. fordi de parametre, der er afgørende for komponentens funktion (spændingsfald, strømme, strømdensiteter, tidsfaktorer mv.) dels hænger indbyrdes sammen, og dels på forskellig vis afhænger af de geometriske dimensioner og den påtrykte ydre spænding.

I et forsøg på at få en form for overblik, over hvordan disse forskellige kritiske faktorer afhænger af de regulerbare størrelser, som man nedscaler under miniaturiseringen

(spændinger og dimensioner), gennemgår vi først nogle generelle scalingslove, som fortæller hvordan disse elektriske parametre opfører sig under nedscalingen.

Bagefter vil vi se på hvilke problemer, der kan opstå under scalingen.

Endelig - for at minde os selv om at enkeltkomponenterne indgår i en større sammenhæng (enkeltkomponenter chip - elektroniske apparater), og problemerne på komponentniveau altså også indgår i større sammenhænge, som de ikke kan anskues uafhængigt af, vil vi meget kort give et indtryk af, hvilke systemer enkeltkomponenterne indgår i.

Dette fører frem til en - ligeledes summarisk - berøring af samspillet mellem de fysisk/tekniske miniaturiseringsmuligheder på den ene side, og de designmæssige problemer af de større systemer på den anden side.

I konklusionen vil vi forsøge at trække op, hvad vi har lært om de to spørgsmål, som vi i indledningen stillede til dette afsnit, nemlig hvordan fysik indgår i den teknologiske udvikling, og om indsigt i fysik på nogen måde kan formodes at have en overbliksgivende karakter i forhold til den teknologiske udvikling.

HVOR SMÅ KAN MAN LAVE DEM?

HVOR NØJAGTIGT KAN MAN DEFINERE DEN STRÅLE, MAN TEGNER MED?

Diffraktionsproblemer.

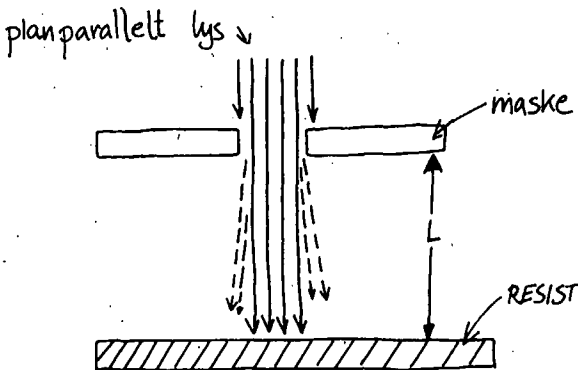
En faktor, som begrænser formindskelsen af såvel aktive komponenter som forbindelseslinier, er den uundgåelige uskarphe ved fotografisk overførsel af et mønster på chippen.

Alle komponenterne på chippen har nogle tolerancegrænser, som de ikke må overskride, hvis de tilsammen skal udgøre et velfungerende kredsløb. Hvis vi ser på forbindelseslinierne har de nogle tolerancegrænser m.h.t. modstande, strømtæthed mv., som de skal befinde sig indenfor. Mange af disse faktorer afhænger af størrelsen af elementet (dette vender vi tilbage til under scalingslove). Når man formindsker stør-

relsen, vil det kræve relativt større nøjagtighed i definitionen af kanten, at holde sig indenfor tolerancegrænserne. Som eksempel kan vi tænke på forbindelseslinierne. Afgørende for velfungerende forbindelseslinier er, at de er så jævne i tykkelsen som muligt, så strømtætheden ikke enkelte steder bliver for stor, så ledningen brænder af. De må desuden være adskilt fra hinanden, så strømmen i den ene ledning ikke forstyrrer strømmen i den anden. Begge disse forhold afhænger af, hvor præcist man kan definere kanten.

Den principielle grænse for, hvor nøjagtigt man kan definere kanterne af komponenterne på chippen sættes af det anvendte lys bølgelængde. Usikkerheden på kantdefinitionen fremkommer under overførselen af mønsteret til chippen. Der findes forskellige metoder til dette, men uanset hvordan man bærer sig ad, undgår man ikke den begrænsning, der sættes af strålingens bølgelængde, idet strålerne på et eller andet tidspunkt vil komme ud af en eller anden form for hul, ved hvis rand der vil komme de med bølgeudbredelsen forbundne diffraktions- og interferensfænomener.

I denne forbindelse er det ligemeget, om man anvender lys eller elektronstråler, idet elektronernes bølgeegenskaber gør, at de udviser de samme diffraktions og interferens fænomener som lys. Forskellen er, at den bølgelængde, man normalt tillægger elektroner, er meget kortere end for synligt lys, og dette muliggør derfor en større nøjagtighed.



Figur 25.

Figur 25 illustrerer problemet med diffraktionen. Situationen er altså principielt den, at en eller anden form for stråling passerer en mæske eller en anden form for hul, og rammer et underlag på den anden side. I den fotolitografiske proces er underlaget resistent som dækker waferen. Inden strålingen rammer resistent vil den være blevet afbøjet en smule p.g.r.a. diffraktionen.

Diffraktionsproblemet kan beskrives v.h.j.a. teorien for bølgeudbredelse. I følge denne vil lys, når det passerer en spalte, interagere med det materiale, som danner spalten på en sådan måde, at bølgeudbredelsen på den anden side af spalten, kan forstås som om hvert punkt i spalten var kildepunkt for ringbølgede elementarbølger. Dette er Huygens princip. Se figur 26.

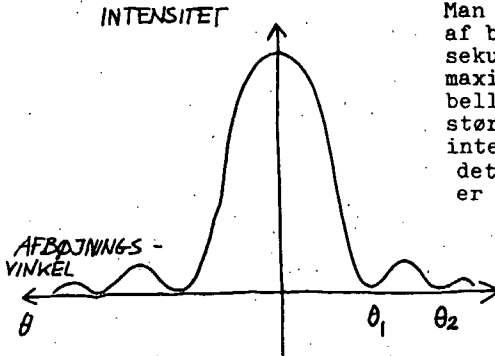


Figur 26.

Ved normal bølgeudbredelse vil interferens mellem sekundærbølgerne bevirke, at man kun iagttager de normale fremadskridende bølgefronter og ingen sekundærbølger. Men ved passagen mellem spalten, kan sekundærbølgerne fra kildepunkterne i kanten af spalten ikke interferere med nogen andre sekundærbølger til den ene side.

. Man kan få en fornemmelse af betydningen af dette fænomen ved at betragte intensitetsfordelingen af lyset i en afstand bagved spalten, som vist på figur 27. Intensitetsbilledet kan forstås, hvis man betragter interferenserne mellem sekundærbølgerne fra kildepunkterne i spalten nøjere. I midten vil intensiteten være størst, svarende til at der er lige langt

fra alle punkterne i spalten til midterpunktet på underlaget, der opfanger lyset under spalten. I midten vil der derfor være konstruktiv interferens og dermed maximal intensitet. I forskellige vinkler til siderne vil der være både konstruktiv og destruktiv interferens og intensiteten vil derfor variere. I de punkter, hvor der udelukkende er destruktiv interferens, vil intensiteten være nul:



Man kan få et indtryk af betydningen af de sekundære intensitetsmaxima ved at se på tabellen. Her er det især størrelsen af den totale intensitet I_{total} af det andet maximum, der er interessant.

Figur 27.

TABLE 15-I

Ring	Circular aperture			Single slit	
	m	I_{max}	I_{total}	m	I_{max}
Central maximum.....	0	1	1	0	1
First dark.....	1.220			1.000	
Second bright.....	1.635	0.01750	0.084	1.430	0.0472
Second dark.....	2.233			2.000	
Third bright.....	2.679	0.00416	0.033	2.450	0.0165
Third dark.....	3.238			3.000	

Kilde:
"Fundamentals
of optics."
Af Jenkins &
White. side
302.

Af tabellen fremgår det, at

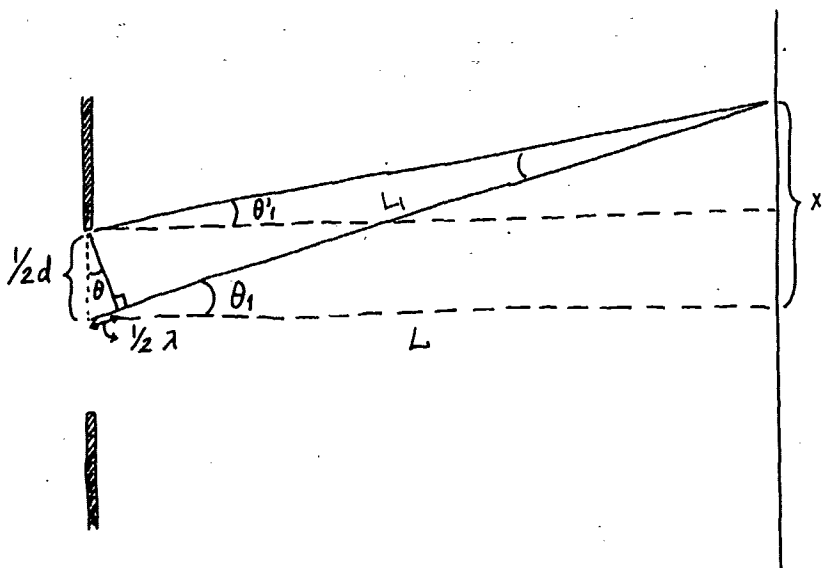
I_{max} (intensiteten i toppunktet) af det andet maximum er 4% af intensiteten i midtermaximumets toppunkt. Desværre er der ingen tal for den integrerede intensitet, men betydningen af de sekundære maxima er under alle omstændigheder ikke så stor. Derfor regner man også ofte "bredden" af midtermaximumet for "linjebredden".

Hvis L antages at være meget stor i forhold til d , således at vinklen ud til et givet punkt er den samme for alle kildepunkterne, kan man beregne vinklen for det første intensitetsminimum. Det vil optræde i den afstand fra midterlinjen, hvor man ved parvis sammenlægning af kildepunkter-

ne kan se at de udslukker hinanden. Hvis de skal udslukke hinanden, skal de bølger man lægger sammen have en forskel i vejlængde ud til punktet på netop $1/2$ bølgelængde. Dette er tilfældet for de to bølger, der er vist på figur 28. Det samme vil være tilfældet for alle bølgerne to og to. Det er selvfølgelig ligemeget i hvilken rækkefølge, man lægger dem sammen, det er bare lettest at se det på denne måde.

Ved at betragte tegningen ses også, at det første intensitetsminimum findes i en vinkel givet ved:

$$\sin \theta_1 = \frac{\frac{1}{2} \lambda}{\frac{1}{2} d} = \frac{\lambda}{d}$$



Figur 28.

Jo større d bliver i forhold til λ , jo mindre vil θ_1 og dermed afbøjningen være. Jo mindre d bliver i forhold til λ , jo mere udtværet vil billedet blive. Men forudsætningen for at denne regning går godt, er som sagt at $L \gg d$. hvor $\theta_1' \approx \theta_1$,

For at vise, hvor meget strålingens bølgelængde betyder for diffraktionsproblemerne, vil vi lave en overslagsberegning over diffraktionens størrelse for henholdsvis ultravioletlys og røntgenstråling. Det bliver kun en overslagsberegning fordi vi ikke tager højde for at forudsætningen med at $L \gg \lambda$ ikke er opfyldt. Det ultraviolette lys, der har været meget anvendt i de fotolitografiske processer, har en bølgelængde på ca. $4000 \text{ \AA} = 0,4 \mu\text{m}$. Til sammenligning har vi valgt røntgenstråling med en bølgelængde på 4 \AA . For at kunne sammenligne de to slags stråling, vil vi se på størrelsen af deres diffraktion i den samme geometri. Størrelserne af de indgående parametre har vi valgt således:

$$\lambda_1 = 4000 \text{ \AA} \quad L = 40 \mu\text{m} \quad d = 2 \mu\text{m}$$
$$\lambda_2 = 4 \text{ \AA}$$

Ultraviolet lys: Vinklen for det første intensitetsminimum bliver:

$$\sin \theta_1 = \frac{\lambda_1}{d} = \frac{0,4 \mu\text{m}}{2 \mu\text{m}} \Rightarrow \theta_1 \approx 11^\circ$$

og e

$$\text{og eftersom } \tan \theta_1 = \frac{x}{L} \Rightarrow x \approx 8 \mu\text{m}$$

Eftersom betingelsen: $d \ll L$ ikke er opfyldt, vil dette intensitetsminimum ikke være skarpt defineret i form af et punkt, hvor intensiteten bliver 0. Men i en afstand mellem 7 og $9 \mu\text{m}$ fra midteraksen vil intensiteten blive meget lille sammenlignet med intensiteten i midtermaximumet.

Vi kan se at denne afbøjning under alle omstændigheder er alt for stor til at man kan gøre sig håb om at tegne linier med liniebredder ned til $2 \mu\text{m}$.

Ved brug af røntgenstråling på $4 \mu\text{m}$ i bølgelængde bliver diffraktionen en faktor 1000 gange mindre. Det var denne form for stråling Bell-gruppen brugte, og ved brug af så-

kaldt "near-contact"-aftryk med en L på $20\mu\text{m}$ er det lykkedes dem at overvinde diffraktionsproblemerne i så høj grad at de kan tegne liniebredder ned til $0,75\mu\text{m}$. Men at de stopper her skyldes ikke diffraktionsproblemerne. (20, s. 648.)

Foruden diffraktionsproblemerne er der andre bidrag til uskarpheden i forbindelse med den fotolitografiske proces. Der er unøjagtigheder forbundet med at lave et fuldstændig parallelt bundt af stråler, inden de når masken. Der er også unøjagtigheder forbundet med placeringen af masken i forhold til waferen ligesom der også er fejl i billeddannelsen som følge af unøjagtigheder i det optiske system. Fejlkilden som følge af unøjagtig placering af maskerne i forhold til waferen er sammensat af mange forskellige ting såsom: det mekaniske systems evne til at holde maske og wafer parallelle, det optiske mærkningssystem, osv. Desuden er der unøjagtigheder forbundet med at fremstille masken. Maskerne bliver som regel fremstillet med elektronstråler. Her er spredning af strålingen som følge af høj tæthed af elektroner og dermed høj rumladningstæthed, ved smalle strålebundter.

HVOR GODT KAN BILLEDET FASTHOLDES SOM STRÅLINGEN TEGNER?

Spredning i underlaget.

Billedet, som strålingen tegner, bliver fastholdt ved at strålingen gør en fotoresist opløselig, sådan at den kan opløses på de belyste områder. (Der er også fotoresister, som hærdes ved bestråling så det er de ikke-belyste områder som vaskes væk). Hvis fotoresisten skal opløses ordentligt kræver det, at strålingen trænger helt ned gennem fotoresistlaget.

I det strålingen trænger ned gennem fotoresisten, vil den spredes p.gr.a. atomkernerne og elektronerne i resistenten. Hvis det er elektronstråler, der er tale om, kan spredningen betragtes som stødprocesser hvor vekselvirk-

ningen består i elektriske kræfter mellem partiklerne. Teorien for den spredning består i betragtninger over Coulombvekselvirkninger mellem de indkomne elektroner og atomerne i stoffet.

Kernespredning: Ved spredning på kernerne, kan kernerne betragtes som uendeligt tunge i forhold til elektronerne. Det betyder bl.a. at hvis en elektron rammer lige ind i en atomkerne, kan den ryge lige tilbage igen. Energibetragtninger over kerne-elektronvekselvirkningerne viser, at elektronen ikke kan aflevere ret meget af sin kinetiske energi til de kerner, den vekselvirker med, fordi de er meget tungere end elektronen. Når den ikke kan aflevere ret meget af sin kinetiske energi til kernerne tager det lang tid før den bliver bremsed op i stoffer hvor kernespredningen er dominerende, det vil hovedsagelig sige i stoffer med tunge kerner.

Elektronspredning: Ved spredning af elektroner på elektroner, er stoffets elektroners bindingsenergi som regel så lille i forhold til den indkomne elektrons energi, at den kan negliceres. Resultatet af en sådan spredning er altså to spredte elektroner. Da deres masser er lige store, kan den indkomne elektron ikke sendes baglæns ved stødet. Den maximale vinkel mellem elektronerne er 90° . Elektronerne kan aflevere mere af deres energi ved stødprocesser med elektroner, og det er derfor hovedsagelig ved disse stød elektronerne bremses op. Hvor langt de indkomne elektroner kan komme inden de bremses op, afhænger af energien af den indkomne stråling. Jo større energi den har, jo længere kan de komme. Hvis resisten er tyk, kan der blive tale om "multipel" spredning, hvor elektronerne vekselvirker mange gange med atomkerner eller elektroner på deres vej ned gennem resisten. Ved multipel spredning kan man regne statistisk på det, og på den måde beskrive den samlede spredning af strålingen.

Alt i alt bevirker strålespredningen i underlaget, at

strålingen ikke bevæger sig lige ned, men spredes i en vinkel ud til siden. Dette gælder ligesåvel for elektromagnetiske bølger som for elektroner. Størrelsen af den totale spredning afhænger af energien af den indkomne stråling. (22).

Wallmark (23,s.114) illustrerer denne spredning med disse figurer, som samtidig viser overensstemmelsen mellem teorien for multipel spredning og de eksperimentelle resultater:

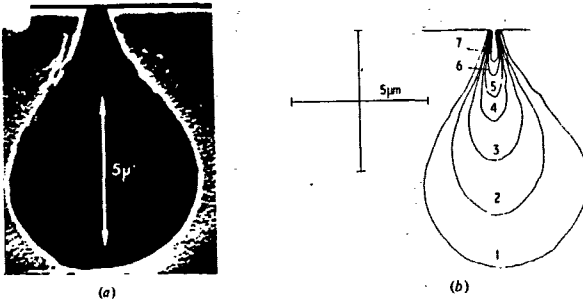
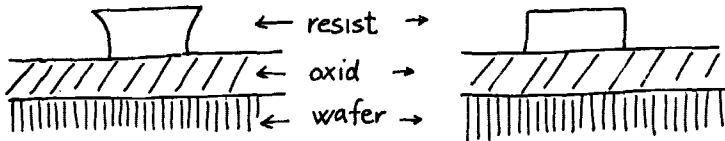


Figure 6. (a) Scanning electron micrograph of cleaved Lucite sample bombarded by 29.5 keV electrons and then developed. (b) Tracings of equi-energy dissipation profiles (from Herzog *et al* 1972).

Figur 29.

Resultatet af disse spredningseffekter er, at vi når fotoresisten bliver fremkaldt får et billede som ser sådan ud: i stedet for sådan:



Dette bliver naturligvis mere alvorligt jo tykkere fotoresisten er.

Problemet forstærkes af at den efterfølgende ætsnings proces ofte bidrager yderligere til "forstørrelsen" af mønsteret idet ætsningsmidlet ikke ætser lige ned men har en tendens til at "gnave" sig ned under resisten. Fornyelig har man derfor udviklet nogle nye plasmaætsningsmetoder, som ætser mere "lige ned".

HVOR NØJAGTIGT KAN MAN STYRE FORURENINGEN AF HALVLEDEREN?

DOPINGSVARIATIONER.

De elektriske egenskaber i halvlederne er helt afhængige af dopingskoncentrationerne af urenhedsstofferne. I fremstillingen af halvlederkredse er det derfor vigtigt, at have et nøje kendskab til fordelingen af disse fremmedatomer i halvledergitteret. Forureningsgraden er typisk mellem 10^{16} og 10^{20} fremmedatomer pr cm^3 , (til sammenligning er antallet af siliciumatomer pr cm^3 ca 10^{22}) alt efter hvilken funktion det dopede område har i komponentopbygningen.

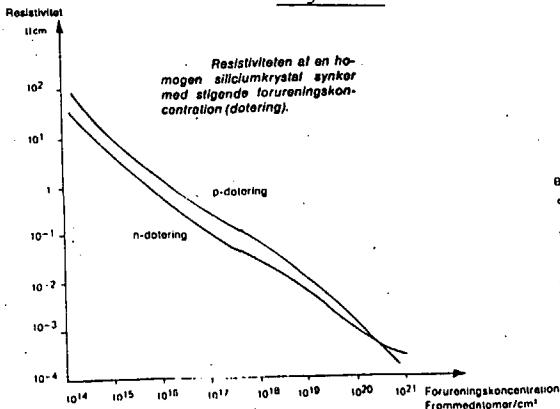
Betydningen af dopingsvariationer i halvledermaterialet kan anskueliggøres, ved at betragte sammenhængen mellem stoffets ledningsevne og dopingskoncentrationerne; den elektriske ledningsevne σ er givet ved

$$\sigma = e(N_d \mu_n + N_a \mu_p),$$

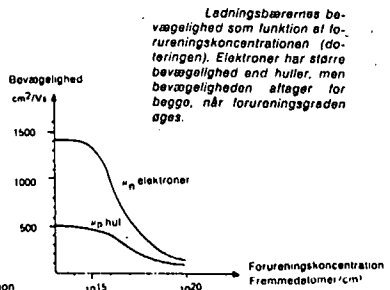
hvor N_a og N_d er hhv acceptor- og donorfordelingen, e er elektronladningen, og μ_n og μ_p er mobiliteten af elektroner og huller. (12)

Ud fra et kendskab til ladbingsbærernes mobilitet som funktion af forureningskoncentrationen (Figur 31.), kan man udregne resistiviteten i halvlederkrystaller som funktion af forureningskoncentrationen (Figur 30.). (24)

Figur 30.

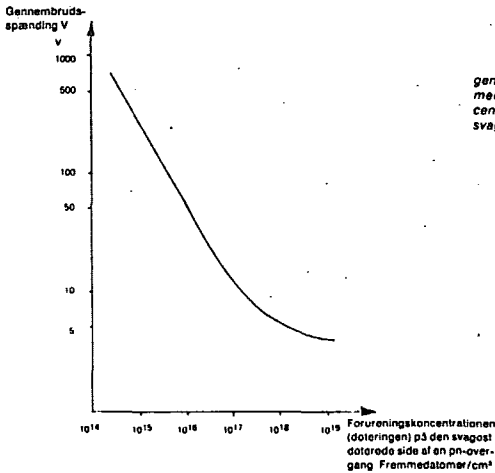


Figur 31.



Af figurerne ses at resistiviteten er stærkt afhængig af dopingskoncentrationerne, og eventuelle dopingsvariationer vil kunne medføre lokale ændringer i halvlederens ledningsevne.

I transistorparametrene har dopingsvariationerne betydning på gennembrudsspændingen. Baglans forspændte pn-overgange har en vis gennembrudsspænding, der bestemmes af dopingskoncentrationen på den lavest doterede side (figur 32.).



Figur 32.

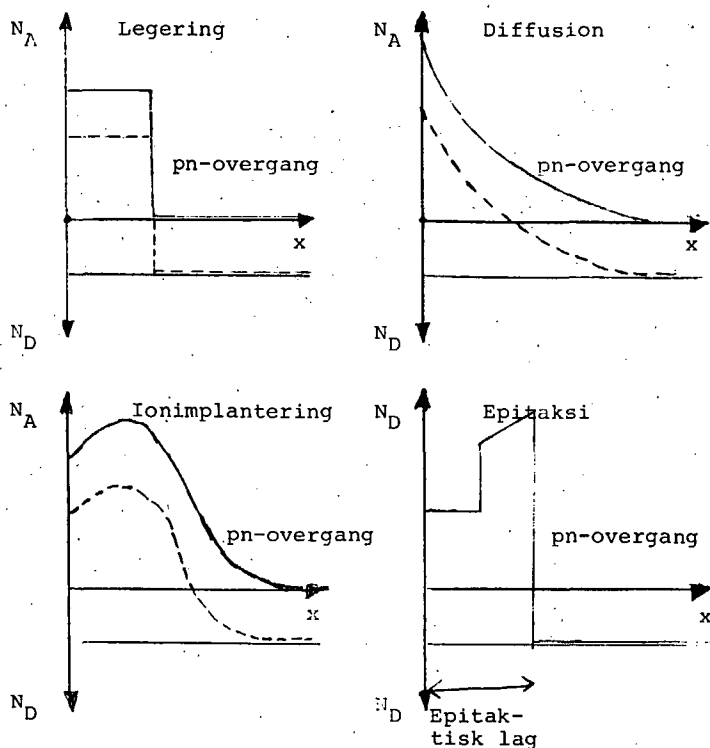
I felteffekt transistoren kan der opstå variationer i tærskelspændingen ved ligevægt. Tærskelspændingen er den mindste spænding, der skal lægges over source-drain i en depletion-type MOS-transistor for, at den bliver ledende. Denne tærskelspænding skyldes ladninger der er oplagret i gatens oxidlag, og defineres derfor som den spænding, der kræves for lige netop at overvinde ladningernes virkning. Evt dopingsvariationer vil kunne forrykke tærskelspænding værdi, og jo mindre depletionlagets bredde er, des større betydning vil de lokale ladningsfluktuationer have. (23)

Eventuelle dopingsvariationer vil have relativt større betydning for mindre dopingsområder, idet den statistiske gennemsnitskoncentration er mere præcis jo større elementområderne er. Således kan variationer i doping sætte en

nedre grænse for, hvor små man kan lave komponenterne...

Man bruger forskellige metoder til at dope halvleder-materialerne (se gennemgangen side 51.), og alt efter hvilken dotering og doteringsprofil man skal bruge, foretager man præcise processtyring mht. de anvendte stoffers renhed, procestiden, temperaturen mm. Doteringsprofilerne for de forskellige metoder ses i figur 33., der viser profilerne i en siliciumskive med grunddoteringen i n-type. (24)

Figur 33. Doteringsprofiler ved forskellige doteringsmetoder: Legering, diffusion, ionimplantering og epitaksi.



x Afstand til krystaloverfladen
 — Forureningskoncentration (dotering)
 - - - Virksom forureningskoncentration $N_A - N_D$
 N_A, N_D Koncentration af hhv donorer (N-forurening) og acceptorer (P-forurening)

Ved brug af disse forskellige teknikker er man i rimelig høj grad i stand til at kontrollere dopingskoncentrationerne, og derved opnå en tilfredsstillende fordeling af urenhedsatomerne i krystalgitteret. Men dopingsvariationerne i det mikroskopiske plan kan man ikke bestemme og disse får jo større og større betydning, når de enkelte områder bliver meget små i forhold til atomstørrelserne.

Dopingsvariationerne kan ikke alene beskrives ved fremstillingernes begrænsninger. Der vil altid -uanset hvor nøjagtige fremstillingsmetoderne kan gøres - forekomme statistiske fluktuationer i dopingskoncentrationerne. Wallmark har analyseret disse dopingsvariationer statistisk, og ud fra nogle tolerance antagelser beregnet fluktuationernes betydning for hvor små elementer man kan lave. (23)

Det antages at et siliciummateriale er jævnt dopet, fri for revner og sprækker og krystaluregelmæssigheder. I en makroskopisk betragtning vil dopingens altså være jævn, mens den på det mikroskopiske plan vil fluktuere omkring en N_0 er nu gennemsnitsantallet af urenhedsatomer i et element og ξ er den procentvise standardafvigelse. Fordelingen af urenhedsatomer i hvert volumenelement kan betragtes som en normalfordeling, hvilket Wallmark gør, og dermed fås et udtryk for, hvor stor en procentdel af volumenenhederne hvor ξ overskrides.

$$S = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\xi N_0} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy, \text{ hvor}$$

$$y = \left(\frac{N - N_0}{\sigma}\right), \text{ med standartafvigelsen } \sigma = \sqrt{N_0}$$

Ud fra dette kan man beregne forskellige værdier af S for varierende værdier af N_0 og ξ . Det har Wallmark gjort og resultatet vises figur 34.

Figur 34 . Sandsynligheden for at den maksimale tilladte afvigelse ϵ overskrides i antallet af urenhedsatomer pr komponent N_0 :

ϵ	$N_0 = 10^3$	$N_0 = 10^4$	$N_0 = 5 \cdot 10^4$	$N_0 = 10^5$
0,01	0.75	0.32	0.03	$3 \cdot 10^{-3}$
0.02	0.53	0.5	$1 \cdot 10^{-5}$	10^{-8}
0.033	0.29	$1 \cdot 10^{-3}$	10^{-8}	10^{-8}
0.05	0.12	$6 \cdot 10^{-7}$	10^{-8}	10^{-8}
0.10	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-8}	10^{-8}	10^{-8}

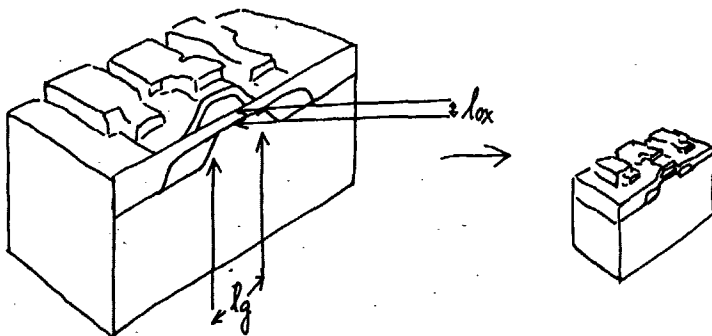
Af tabellen i ovenstående figur ses at jo mindre det totale antal urenhedsatomer pr komponent bliver, des større bliver sandsynligheden for at dopingsvariationerne vil overskride tolerancegrænsen. Dermed vil dopingskoncentrationerne sætte en grænse for, hvor små man kan lave halvlederkomponenterne.

HVOR SMÅ KAN DE VÆRE, HVIS DE SKAL VIRKE?

SCALINGSLOVE

Scaling af aktive komponenter

Figur 35.



De parametre man styrer ud fra, er dimensioner og spændinger. Vi forestiller os, at man scaler en MOS-transistor ned med en faktor a , således at alle spændinger ganges med $1/a$, og det samme gør geometriske dimensioner, såsom liniebredder og lagtykkelser. En undtagelse er, ihvertfald til en vis grad, diffusionsdybderne af dopningsatomerne, hvor der gør sig særlige forhold gældende. Vi vil nu se på, hvad der sker med komponentens elektriske parametre ved denne scaling.

Ved de følgende betragtninger er det vigtigt at holde rede på de forskellige betragtningsniveauer. Der er tre:

- komponentniveau
- kredsløbsniveau og
- chip-niveau.

Ved scalingsbetragtninger over et kredsløb ser man på en samling komponenter, der har en given funktion.

Strøm pr. komponent:

Strømmen gennem komponenten I_{DS} er den mængde ladning, der bevæger sig fra source til drain pr. tidsenhed.

Strømmen forholder sig til strømdensiteten på denne måde:

$$I = JA \quad \text{hvor } A \text{ er det areal, strømmen går igennem}$$

Antallet af ladningsbærere og deres bevægelse er afhængigt af materialeparametre og af feltstyrken (E). Således er

$$J = gE \quad \text{hvor } g \text{ er materialets specifikke ledningsevne, som naturligvis ikke ændrer sig ved scalingen.}$$

Feltstyrken under gaten er bestemt af spændingen over source og drain, V_{SD} , og spændingen over gaten V_g , samt af de geometriske størrelser, på følgende måde:

$$E_g = V_g / l_{ox} \quad \text{og} \quad E_{SD} = V_{SD} / l_{SD}$$

Af disse ligninger ses, at eftersom både spændinger og afstande scaler med a , vil feltstyrken forblive den samme før og efter scaling.

Da strømdensiteten J er lineært afhængig af E , vil den ligeledes forblive konstant.

Da $I = JA$ vil den samlede strøm, der går gennem transistoren formindskes med en faktor, som afhænger af arealets formindskelse. Arealet afhænger af diffusionsdybden, som ikke scalede fuldt. Ifølge Reisman (18) scales diffusionsdybden ikke, så resultatet er, at I_{DS} kun scaler med a .

Areal af komponenter og kredsløb:
går naturligvis ned med $1/a^2$.

Komponentdensitet:

Når arealet af en komponent går ned med $1/a^2$, vil den plads, et kredsløb optager på chippen også formindskes med

o $1/a^2$. Hvis der i øvrigt ikke opstår problemer, kan man altså anbringe a^2 gange så mange komponenter på chippen. Om komponenttætheden på chippen rent faktisk kan forøges så meget, afhænger af flere forskellige faktorer, især af forbindelsesliniernes scalingsegenskaber.

Gennemløbstid for et signal pr. kredsløb:

er bestemt af to faktorer foruden udbredelsehastigheden: De aktive komponenters switch-tid, og længden af kredsløbet. Hvor meget den første bliver mindre afhænger af forskellige faktorer, bl.a. af dimensionerne, og den anden scaler med a på grund af længden. Den samlede forsinkelsestid pr. kredsløb bliver ifølge Reisman (18) scalet med a , $T \rightarrow T/a$.

Energidissipation:

Hvis energidissipationen for et kredsløb med et givet spændingsfald V over, er P , og kredsløbet scales således at $V \rightarrow V/a$ og $I \rightarrow I/a$, vil energidissipationen for kredsløbet scale således:

$$P = VI \quad V/a \cdot I/a = VI/a^2$$

Scalingen betyder altså, at $P \rightarrow P/a^2$. Hvis antallet af kredsløb øges med en faktor a^2 på grund af forøgelsen af komponenttætheden, vil energidissipationen pr. areal forblive konstant.

Hvis der altså ikke var noget køleproblem på chippen inden scalingen, skulle der altså heller ikke være noget med den scalede chip. Imidlertid kan der komme problemer (især med forbindelseslinierne), som alligevel gør dissipationproblemerne større for den scalede chip. Det vil vi vende tilbage til.

Dette var energidissipationens ændringer, når vi scalede et bestemt kredsløb med en given energidissipation. I øvrigt afhænger energidissipationen meget af, hvilken slags kredsløb, der er tale om.

Opsummering :

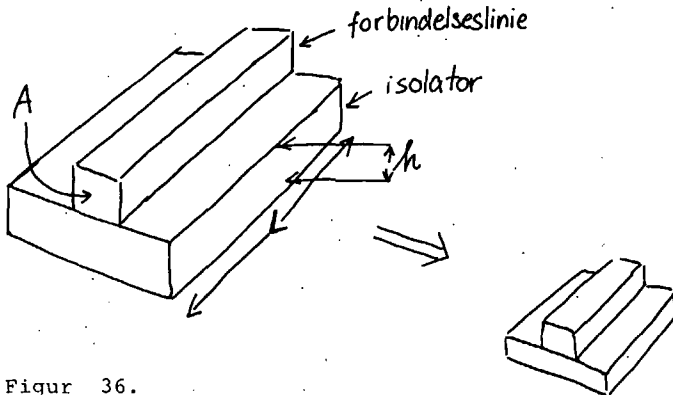
Det samlede resultat af scalingen af aktive komponenter kan samles op på følgende måde:

Densitet af komponenter	$D \rightarrow a^2 D$
Forsinkelsestid for et kredsløb	$\tau \rightarrow \tau/a$
Energidissipation for et kredsløb	$P \rightarrow P/a^2$
Tærskelsspænding	$V_T \rightarrow V_T/a$
Strømdensitet	$J \rightarrow J$
Strøm gennem hver komponent	$I \rightarrow I/a$

Umiddelbart ser det lovende ud med de aktive komponenters scalingsegenskaber. Der er dog grænser for, hvor meget man kan scale de aktive komponenter uden at der opstår problemer. Nogle af de problemer, der kan opstå, vil vi behandle i det følgende. Men forinden vil vi se på scalingen af forbindelseslinierne.

Scaling af forbindelseslinier.

I lighed med scalingen af de aktive komponenter ser vi på scaling med en faktor a af spændinger og dimensioner.



Figur 36.

Signaltransmissionen gennem forbindelseslinierne bestemmes af en række faktorer, som igen bestemmes af geometrien.

Kapacitansen af den "kapacitor", forbindelseslinierne danner med "omgivelserne", f.eks. siliciummet, som waferen er lavet af, afhænger af geometrien på følgende måde:

$$C = \frac{A}{d\epsilon} \quad C \rightarrow C/a$$

hvor ϵ er dielektricitetskonstanten af det mellemliggende materiale. A er arealet af forbindelseslinien, og d er tykkelsen af isolationsmaterialet mellem forbindelseslinierne og waferen. Heraf kan man se, at hvis A scaler med $1/a^2$, og d scaler med $1/a$, så må C scale med a. Kapacitansen af forbindelseslinierne går altså fra C til C/a .

Modstanden i forbindelseslinierne er givet ved:

$$R = \frac{1}{g \cdot A} \quad R \rightarrow aR$$

hvor g er ledningsevnen*, som afhænger af materialet. På samme måde som ved kapaciteten ses, at hvis de geometriske størrelser scales med $1/a$, må modstanden stige med en faktor a. Modstanden vokser altså fra R til aR. Dette er en uheldig konsekvens, fordi en større modstand ifølge Ohms lov ($V = RI$) alt andet lige vil give større spændingsfald gennem kredsløbet. Spændingerne skulle jo helst kunne scales med $1/a$, men dette ser ud til at volde nogen problemer for forbindelsesliniernes vedkommende.

Hastigheden af et signals transport gennem forbindelseslinierne afhænger af materialets ledningsevnen, og til en vis grad af isolationsmaterialets omkringing af ledningen. Hastigheden er tilnærmelsesvis lyshastigheden.

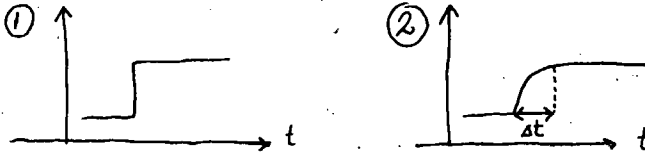
Når hastigheden er konstant betyder det, at den tid, signalet er om at forplante sig mellem de aktive komponenter, afhænger af længden af forbindelseslinierne. Hvis længden derfor scales med en faktor $1/a$, scaler udbredelsestiden også med en faktor $1/a$.

Der er en anden tidsfaktor inde i billedet end udbre-

* Den specifikke ledningsevne

delsestiden for signalerne, nemlig den tid, det tager for udgangssignalet, i form af en spændingsstigning, at vokse op til sin fulde størrelse.

Indgangssignalet består af en momentan spændingsstigning, svarende til figur 1. Ved udgangen vil spændingsstigningen ikke længere være momentan, men det tage tiden, Δt for signalet at vokse op, svarende til figur 2.



Forsinkel-
sestiden Δt skyldes, at det tager en vis tid at oplade den capacitor, ledningen sammen med waferen udgør. Den tid, det tager, er proportional med modstanden og med kapacitansen, altså med faktoren RC . Denne tidsforsinkel-
se betyder, at signalerne bliver "tværet ud" hen gennem kredsløbet.

Eftersom $R \rightarrow aR$ og $C \rightarrow C/a$ ved scalingen, betyder det, at tidsfaktoren forbliver konstant under scalingen. Den kommer derfor til at betyde relativt mere, når man scaler kredsløbene, fordi de andre tidsfaktorer bliver mindre.

En sidste faktor af stor betydning for forbindelsesliniernes funktion ved scaling er strømdensiteten, strømmen pr. arealenhed gennem et tværsnit af lederen. Her må man indrette forbindelseslinierne så de kan transportere den strøm, de aktive elementer kræver. Ved scalingen af de aktive komponenter så vi, at strømmen kun scalede fra I til I/a . Men da tværsnitsarealet af forbindelseslinierne ved en scaling med a formindskes med a^2 , vil strømtætheden stige med a . Denne stigning er alvorlig, fordi store strømtætheder meget let kan medføre elektromigration af utilladelig størrelse. På grund af modstandens og strømdensiteternes scalingsegenskaber er man ofte nødt til ikke at scale forbindelseslinierne helt så meget som den øvrige del af chippen.

Man kan opsummereforbindelsesliniernes scalingsegen-

skaber på følgende måde:

Kapacitans

$C \rightarrow C/a$

Resistans

$R \rightarrow aR$

Tidskonstant

$RC \rightarrow RC$

Strømtæthed

$J \rightarrow aJ$

Udbredelsestid

$t \rightarrow t/a$



ESO - EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY VERY LARGE TELESCOPE (VLT)

ESO is an intergovernmental organisation set up by 8 European countries in order to develop astronomical research in the Southern Hemisphere. ESO is now studying a certain number of new telescope concepts for a

giant 16 m or equivalent aperture telescope, for which purpose a new VLT Group has been set up at its headquarters in Garching near Munich, FRG. (Estimated investment approx. US \$ 100 million.)

ESO invites applicants for the following posts:

optical engineer or physicist (ref.: E - VLT4 - 04)

Education: engineering or university degree.

Experience and knowledge: several years of practical experience in the design and construction of optical systems. The candidate should demonstrate a marked interest in physical, geometrical and instrumental optics.

Assignment: analyse the coupling of various instruments with several telescopes, and of coupling the telescopes themselves. Evaluate the impact on the project and the technical constraints imposed by the use of a VLT in an interferometric mode. Participate in the definition of the telescope optics.

engineer physicist (ref.: E - VLT4 - 05)

Education: degree in mechanical engineering, plus specialisation (or direct experience) in thermodynamics, or aerodynamics. Training as a physicist, followed by sufficient practical experience, may be considered.

Experience and knowledge: several years' experience with complex systems, preferably in a large project, involving varied technologies (civil engineering, thermics, aerodynamics).

Assignment: to be responsible for protecting the telescopes against external elements, while maintaining optimum observation conditions, by reducing the thermal effects, turbulence, and direct wind action on telescopes.

physicist engineer (ref.: E - VLT4 - 06)

Education: university or engineering degree (physics - optics - meteorology).

Experience and knowledge: several years' experience in a field related to atmospheric physics, especially that of atmospheric image-transmission.

Assignment: to be responsible for the selection of a site favourable for the installation of a future VLT. In particular, to take responsibility for the choice of methods, their application and the analysis of their results. The methods used will involve the most advanced techniques, including acoustic, radio, thermal and optical soundings.

PROBLEMER SOM OPSTÅR VED SCALING.

Elektromigration.

Elektromigration betyder, at et stofs atomer begynder at bevæge sig pga. elektriske kræfter. Foruden elektriske kræfter kan termiske gradienter udgøre en kraft på atomerne fx. i forbindelses linjerne, hvor der sker en jouleheating. (18)

Hvis vi kun nøjes med at se på de elektriske kræfter, der er indvolveret, er der for det første den kraft, som det elektriske felt påvirker elektronerne med:

$$\vec{F} = nq\vec{E} = nq\frac{v}{\mu_e}\vec{I} = \frac{nq}{\mu_e} \frac{I_e}{nqA}\vec{I} = \frac{1}{\mu_e} \vec{J}_e$$
$$\vec{J}_e = \mu_e \vec{F}$$

hvor F er kraften pr volumenenhed, n er antallet af elektroner i et givent volumen, q er elektronladningen, E det elektriske felt, v driftshastigheden, μ_e elektronmobiliteten I_e elektronstrømmen, J_e strømdensiteten.

Keyes har i kilde (25) behandlet elektromigrationsfænomenet: Den kraft de enkelte elektroner opacceleres med, svarer til den kraft, som de under stød, påvirker atomerne med. Jo større \vec{E} -felt og dermed større elektronstrømsdensitet, des større vil krafterne på atomerne være. Ved nu at betragte atomgitteret som havende en bestemt atommobilitet μ_a , opstiller Keyes et udtryk for atomstrømsdensiteten, som funktion af den kraft \vec{F} , atomerne påvirkes med: $\vec{J}_a = \mu_a \vec{F}$

Hvis man sætter t_d til, en leder kan holde før den bryder sammen, bliver $J_a t_d d^2$ det maksimale antal atomer, som kan flytte sig fra lederen i dens levetid. Omdet antal kan man sige, at det under alle omstændigheder skal være mindre end det samlede antal atomer i volumenet, Nd^3 :

hvor N_a er atomdensiteten. $J_a t_d d^2 < Nd^3$

Når alle atomkernerne, $N_a d^3$, i volumenet, d^3 , har flyttet

sig, er lederen i hvert tilfælde brudt sammen. Dette antal hænger sammen med elektronstrømdensitetes på følgende måde:

$$J_a t_d < N d^3$$

↓

$$\frac{M_a}{M_e} J_e t_d^2 < N d^3, \quad \text{da } J_a = M_a F = \frac{M_a}{M_e} J_e$$

↓

$$\frac{M_a}{M_e} I_e t_c < N d^3, \quad \text{da } J_e = \frac{I_e}{d^2}$$

↓

$$t_c < \frac{M_e}{M_a} \frac{N d^3}{I_e} = \frac{M_e}{M_a} \frac{N d^3}{J d^2} = \frac{M_e}{M_a} \frac{N}{J_e}$$

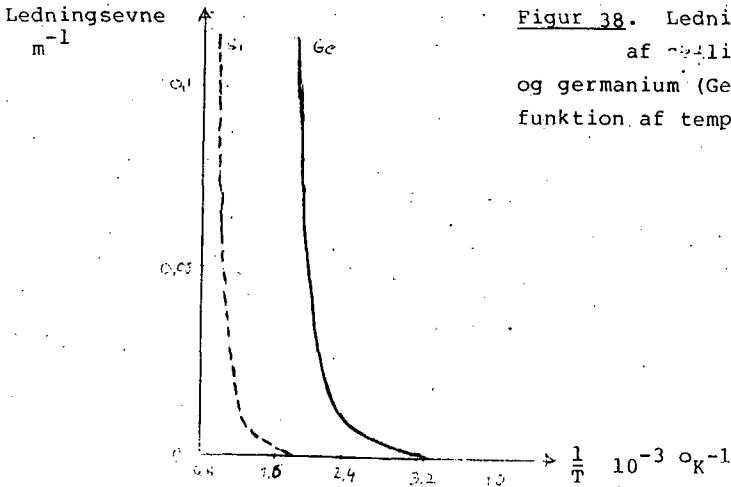
Vi har altså:

$$\underline{t_c < \frac{M_e}{M_a} \frac{N}{J_e}}$$

Heraf kan ses, at jo større J_e bliver, jo kortere levetid har lederen. Udtrykket lider under at det i praksis er svært at bestemme M_a .

Energidissipation.

Halvleder er i stand til at lede -selv ved stue temperatur, og ledningsevnen afhænger af antallet af elektroner over energigabet. Det gælder at ledningsevnen $\sigma = qn\mu$ hvor n er antallet af frie elektroner, q deres ladning og μ mobiliteten af disse. Mobiliteten aftager ved stigende temperatur, men denne effekt vil i halvlederne udlignes af en exponentielt vækst i antallet af frie elektroner. Dette er årsagen til at, der vil være en stigende ledningsevne i halvledere, når temperaturen stiger, eller sagt på en anden måde: Halvledere har negative temperaturkoefficient. I figur 38. er ledningsevnen af ren Silicium og germanium afbildet som funktion af temperaturen. (12)



Figur 38. Ledningsevnen af Silicium (Si) og germanium (Ge) som funktion af temperaturen.

Af figuren ses, at ved temperaturer over 600°K vil halvledernes ledningsevne være temlig temperatur-følsomme.

Ledningsevnsens temperaturafhængighed har betydning for funktionen af de integrerede halvlederkredse, idet der udvikles joulevarme i de strømførende ledere og i de aktive kom-

ponenter. Størrelsen af denne såkaldte energidissipation afhænger chipkonstruktionen, dvs. de anvendte komponenter, komponenttætheden, anvendte materialer og desuden af den måde kredsene opereres på. Energidissipationen sætter en grænse for integrationsniveauet, dvs. hvor mange kredse der kan opbygges på en enkelt chip. Umiddelbart kan dette være lidt svært at se, idet energidissipationen pr kredse vil blive mindre, jo mindre de enkelte komponenter gøres. I scalingsafsnittet viser vi at en nedscaling med faktoren a , betyder en stigning i komponentdensiteten på a^2 , mens energidissipationen/kreds P vil falde til $\frac{P}{a^2}$. Konsekvensen af dette skulle altså være, at hvis der ingen kølingsproblemer var med den uscalede chip, ville de heller ikke opstå i den scalede. Men eftersom den totale energispredning er konstant, og tærskelsspændingen og dermed energitilførselsspændning nedscaleres med a , må den totale strøm i chippen stige:

$$P_{\text{før}} = P_{\text{efter}} \Rightarrow U_f I_f = \frac{U_f}{a} \cdot I_e \Rightarrow I_e = I_f \cdot a$$

Der skal altså løbe en større strøm i smallere baner. Dette kan give anledning til lokale energidissipationsproblemer, der kan nærme sig grænserne for, hvad de gængse køleteknikker kan klare. (18) Dette problem vil specielt opstå i de ledere der forsyner chippen med strøm. Hvis man sammenligner strømforsyningsnettet med et træ, så vil den større strøm altså kunne betyde energidissipationsproblemer i stammen og de største grene. Det er derfor ikke muligt at nedscale disse forsyningsledere i takt med resten af chippen.

"Short-channel-effect".

Afgørende for en god transistor funktion er sammenhængen mellem ændringer i gatespændingen og den strøm, der løber under gaten. Den strøm, der løber under gaten er bestemt af forholdet mellem kanalens længde og spændingen mellem source og drain. Hvis der af en eller anden grund bliver et misforhold mellem de to faktorer, bliver det sværere at styre transistorstrømmen med gatespændingen. Når transistoren scales opstår der lettere et sådant misforhold, i form af, at længden mellem source og drain bliver for kort i forhold til spændingen mellem dem. Forkortelsen skyldes, at dopningsområderne bliver sværere at holde adskilte. Når dette sker, vil det medføre en formindskelse af tærskel-spændingen, fordi der lettere kommer til at løbe en strøm. Dette kaldes "short-channel-effect" i modsætning til en velfungerende transistor, som udviser "long-channel" opførsel.

"Hot-electron effect".

"Hot-electron effect" betyder, at visse energirige elektroner, som bevæger sig fra source til drain har energi nok til at gennembryde potentialbarrieren under gaten til isolationsmaterialet. Her kan de blive fanget af defekter i oxidlaget og udgøre en fastsiddende negativ ladning. En negativ ladning under gaten betyder, at gatens tærskel-spænding bliver højere, fordi den positive ladning først skal opveje den fastsiddende negative, før den kan begynde at påvirke ladningerne under gaten.

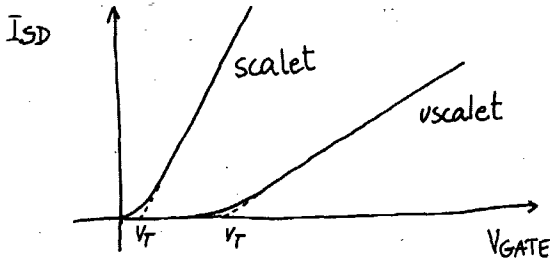
De energirige elektroner kan enten være almindelige elektroner, som tilfældigvis har særlig høj energi, eller de kan skabes p.gr.a. radioaktiv stråling.

Man kan modvirke skaderne af "hotte" elektroner ved at mindske antallet af defekter i isolationsmaterialet f.eks. ved forskellige annealings metoder.

Mindste tærskelspænding.

Når de geometriske dimensioner scales med en faktor a , scaler den spænding over gaten, der skal til at skabe en bestemt feltstyrke under gaten også med a .

I området lige omkring tærskelspændingen er strømmen gennem transistoren ikke lineært afhængig af spændingen over gaten. Reisman (18, s.555) viser en strøm/spændings-karakteristik for en scalet og en uscalet transistor, der ser sådan ud:



Figur 39.

Kurverne viser, at man stort set kan regne strømmen gennem transistoren for proportional med gatespændingen, når denne ligger over tærskelspændingen, som er den ret-linede kurves skæring med x-aksen.

Den store komponent kræver kraftigere ændringer af gatespændingen for at opnå en bestemt strømændring fordi isolationsmaterialet er tykkere. Derfor den mindre hældning af kurven.

Af kurverne fremgår, at den ikke-lineære spændingsafhængighed for forholdsvis større betydning jo mindre komponenten er. Hvis komponenten bliver scalet for meget, kan det medføre, at der vedbliver at løbe en strøm i gennem transistoren efter at gatespændingen er reduceret til nul.

Baggrundsstråling.

I takt med udviklingen af de meget små linibredder er de effekter, som baggrundsstrålingen kan have på IC blevet mere betydningsfulde, idet energioverførsel fra strålingen kan ændre ladningsophobningerne rundt omkring på chippen. Det er specielt α -partikler, der på grund af deres store masse og derved forholdsvis korte opbremsningslængde vil kunne forårsage skader i chippen. Ved sammenstød med elektroner vil der ske en impulsoverførsel med excitation til følge. På grund af strålingens høje energi vil den således være i stand til at udvikle et par millioner hul-elektron par. En del af de herved udviklede elektroner vil kunne forvolde fejlfunktioner i hukommelsesceller, ved at aflade nogle af de kapacitorer, disse er opbyggede af. Fig. 40 viser størrelsesordenen af de effekter α -partiklerne kan forvolde.

Figur 40. Alfa-partikel effekter.
Kilde(18)

(I en celle)	Ved $3\mu\text{m}$	Ved $1\mu\text{m}$
Kapacitans	60 fF	20 fF
"Stored" ladning	500 fF	60 fF
opsamlede α -partikler	60 fF	20 fF

Til sammenligning svarer en femtoCoulomb (fC) af "stored" ladning til ca. $6,2 \cdot 10^3$ ladninger, og på $1\mu\text{m}$ niveauet er den totale "stored" ladning kun i størrelsesordenen $3,7 \cdot 10^5$ ladninger. På $0,5\mu\text{m}$ niveauet vil det kun svare til $1 \cdot 10^5$ ladninger. α -partikler kan altså medføre kortvarige skader på hukommelsesceller.

En anden uheldig virkning α -partikler kan have i chip-sene forekommer i "Isolated-Gate-fieldeffekt-transistorerne" (IGFET'erne). Her kan særlig energirige frie elektroner (hot electron effect) fra α -partikel-sammenstød bevæge sig igennem "depletion"-regionen og op i gate-iso-

latoeren. Dette vil medføre betydelige permanente skader i transistorfunktionen, idet der kan ske en ændring af gate-spændingen.

α -partikelstrålingen kan stamme dels fra den kosmiske stråling og den på jorden naturligt forekommende radioaktivitet, men også fra selve siliciumchippen, linieforbindelserne, pakkematerialet og de umiddelbare omgivelser. I øvrigt er det morsomt (eller hva') at tænke på, hvilke konsekvenser en forøget baggrundsstråling, hidrørende fra atombombesprængninger, kan have på de elektriske halvleder-installationer i sprængningsområdet og omegn!

MINIATURISERINGSPROBLEMER PÅ CHIP NIVEAU OG PÅ APPARAT-
NIVEAU.

"Pakkeproblemer"

I de foregående beskrivelser af, hvordan nogle bestemte faktorer satte grænser for miniaturiseringen, bestod "grænsen" ofte i, at komponentens funktion blev mere og mere upålidelig, jo mindre den blev. For forbindelseslinierne blev risikoen for elektromigration større jo større strømtætheder, man måtte operere med. For de aktive komponenter blev risikoen for shortchanneleffect større, jo mindre komponenten blev.

Grænserne for formindskelsen kan altså bestå i at en del af elementerne kommer til at bryde nogle tolerancegrænser, man af hensyn til det samlede system må sætte til de enkelte komponenter. Ved fastsættelsen af disse tolerancegrænser må man altså inddrage betragtninger over det totale systems funktion. Det samlede systems opbygning spiller en stor rolle for hvilke tolerancegrænser man kan tillade for komponenterne i det opbygningen kan gøre systemet mere eller mindre følsomt overfor fejl i enkeltkomponenterne.

Foruden tolerancegrænserne overfor de enkelte komponents egenskaber og karakteristika er der især 3 andre faktorer som er kritisk afhængige af det samlede systems opbygning og kompleksitet. De er:

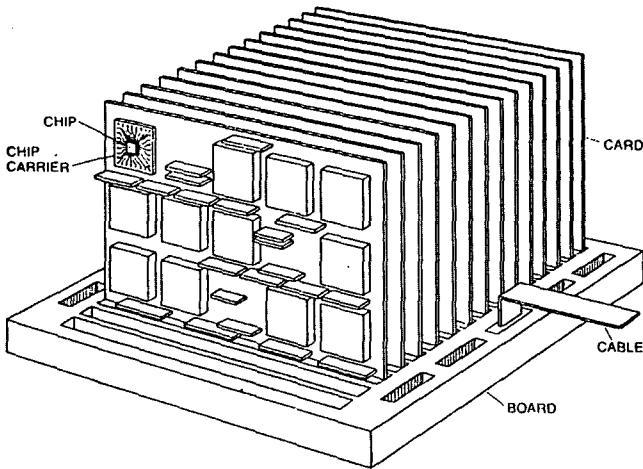
- topologiske problemer med at føre forbindelseslinierne rundt de rigtige steder - tilstrækkeligt isoleret fra hinanden.
- forsinkelsestiden for signalerne i forbindelseslinierne mellem enkeltdelene
- varmeudviklingen når enkeltdelene sidder tæt sammen.

Disse tre faktorer er meget afhængige af systemets kompleksitet, jo større kompleksiteten er, jo flere problemer giver de anledning til. En af konsekvenserne af miniaturiseringen er netop muligheden for at bygge mere og mere komplekse systemer og man har derfor sat meget ind på at komme sådanne problemer til livs. De tre sidste faktorer hænger sammen på den måde, at man for at undgå for stor forsinkelsestid skal anbringe enkeltdelene så tæt på hinanden som muligt så for-

bindelseslinierne kan være så korte som muligt. Men dette øger risikoen for for stor varmeudvikling, og det gør de topologiske problemer større.

For at give et indtryk af betydningen af kompleksiteten og integrationsgraden af de systemer, enkeltkomponenterne indgår i, og for at vise af miniaturiseringen af chips ikke kan forstås uafhængigt af de systemer, de indgår i, vil vi se på 2 "pakkesystemer" eksemplificeret ved 2 computere fra IBM. (26)

Den ene (3033) er opbygget af tre integrationsniveauer (en meget anvendt metode) Se figur 41.

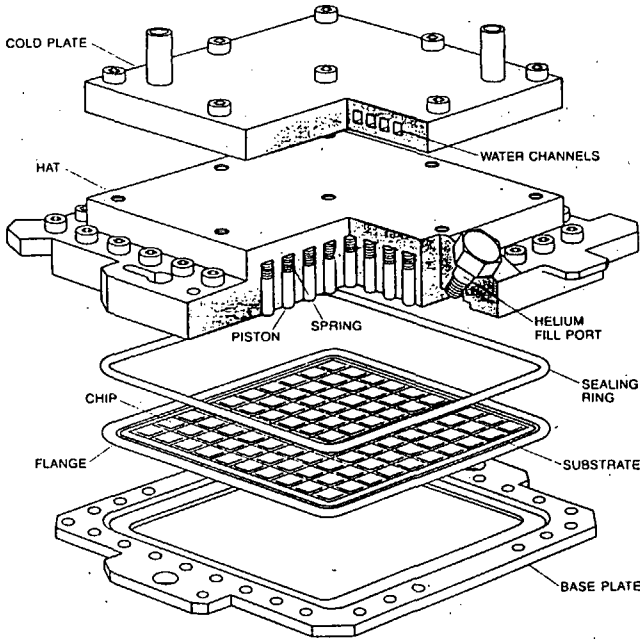


Figur 41.

HIERARCHY OF PACKAGES in a large digital computer has traditionally had three levels. Each chip is housed in an individual carrier; a number of carriers and other components are attached to a printed-circuit card; several cards are in turn mounted on a larger printed-circuit board. The assembly is connected to the rest of the system by cables. With the recent introduction of a module capable of holding more than 100 chips it has been possible to eliminate the card level and thereby to reduce the number of interconnections and the total wiring length.

En nylig udvikling har gjort det muligt, at komme ned på to integrationsniveauer ved hjælp af det såkaldte "Thermal-conduction-module"-system. Her er mellem 100 og 133 chips monteret meget tæt på et keramiksubstrat, som er 9 gange 9 cm stort og 5 mm tykt. Der er mere end 12.000 kontaktsteder mellem chippene og substratet, og substratet rummer 33 lag forbindelseslinier. En så tæt pakning kræver et effektivt kølesystem og dette er tilgodeset gennem et kombineret helium og vand kølesystem. Princippet er vist på figur 42 og 43 .

Figur 42.

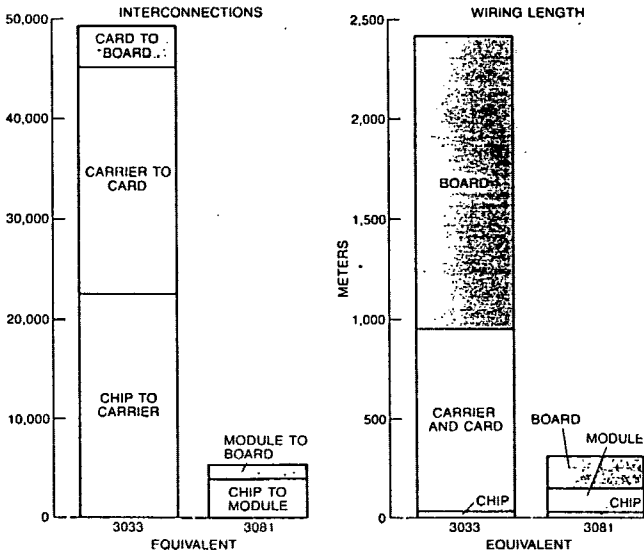
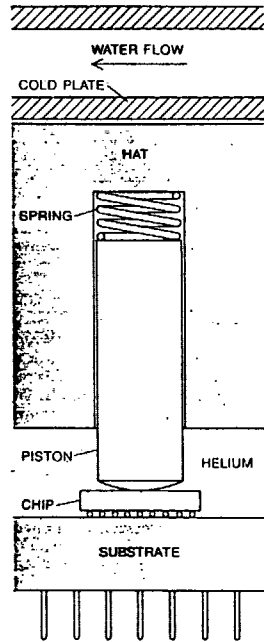


THERMAL-CONDUCTION MODULE houses the multilayer substrate and cools the 100 or more chips mounted on its surface. The substrate is clamped between a baseplate and a "hat" equipped with spring-loaded metal pistons. Each piston presses against the back of a chip, conducting heat to a cold plate bolted on top of the hat. The cold plate in turn gives up the heat to chilled water that is pumped through channels in the plate. The module's ability to dissipate heat is enhanced by filling the internal volume with helium, which has a higher heat conductivity than air. The rated power-handling capacity of the thermal-conduction module is 300 watts.

Et keramisk substrat med sit kølesystem udgør et "Thermal-conduction-module". 9 af disse moduler sættes nu sammen til en større enhed. Det er med dette pakkesystem IBMs computer 3081 er opbygget.

De to pakkesystemer er sammenlignet på figur 44. De sammenlignede systemer er et enkelt "Thermal-conduction-module" og et sæt af 3033 komponenter med det samme antal logiske funktioner. Antallet af forbindelseslinier mellem pakkeniveauerne i 3081 modellen er 10 gange mindre end i 3033 modellen.

Figur 43.



Figur 44.

Desuden er forbindelseslinierne i "Thermal-conduction-module"-systemet af en mere pålidelig slags end i det andet system. Den totale ledningslængde er 8 gange mindre for 3o81 end for 3o33 og 3o81 har derfor også en tilsvarende mindre signaltransmissions tid.

Designproblemer.

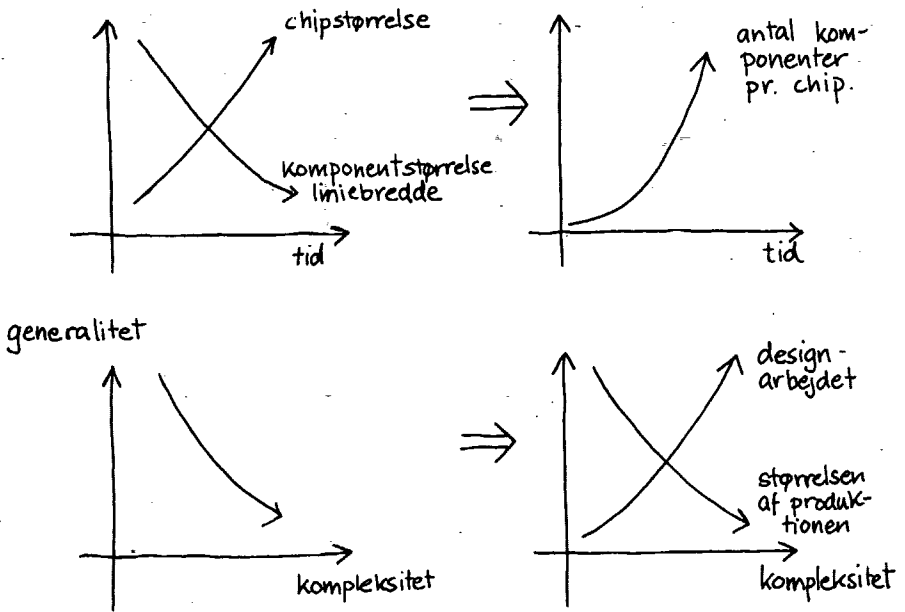
Vi kan altså se at opbygningens og designmetoderne spiller en overordentlig stor rolle for størrelsen og for pålideligheden af det samlede system. Dette gælder ligesåvel på chipniveau som på apparatniveau. Opbygnings- og designmetoderne er faktisk afgørende for, hvor komplekse systemer, det overhovedet er muligt at lave.

Samspillet mellem de fysisk/teknologiske muligheder på den ene side og de designmæssige muligheder på den anden side har interessante konsekvenser for miniaturiseringens økonomiske betingelser. Et aspekt af disse konsekvenser vil vi kort omtale i det følgende fordi det giver et interessant perspektiv på miniaturiseringsproblematikken, som er med til at understrege, at teknologiudviklingen kun kan forstås som et kompliceret samspil mellem videnskabelige, tekniske, designmæssige og økonomiske muligheder.

Desuden vil vi kort se på, hvormeget designproblemerne betyder, for hvor godt man kan udnytte de miniaturiseringsmuligheder, som den fysisk/teknologiske udvikling har åbnet op for.

De fire kurver på figur 45 sammenfatter nogle helt karakteristiske træk ved miniaturiseringen.

Den sidste kurve viser industriens dilemma: efterhånden som kompleksiteten af kredsløbene vokser bliver designarbejdet (og dermed en stor del af udviklingsomkostningerne) større og større. Samtidig bliver den færdige chips funktion mere og mere specialiseret, og afsætningsmulighederne derfor mindre. Når udviklingsomkostningerne bliver større og af-



Figur 45.

sætningsmulighederne bliver mindre, har industrien et problem. Et problem som kun bliver værre af, at fysikerne på Bell udvikler stadig mindre enkeltkomponenter.

Desuden viser en tabel fra "Proceedings of the IEEE" (18) at de muligheder for arealudnyttelse på chippen som rent fysisk/teknologisk er til stede, i hvert fald for de logiske kredses vedkommende er svære at udnytte af designmæssige årsager :

TABLE V
DENSITY ADVANTAGES OF SMALL DIMENSIONS

Minimum Dimension	Memory Bits/Chip*	Logic Elements/Chip*
4	16K	800 - 2,000
2	64K	2,500 - 7,000
1	256K	8,000 - 20,000

*Chip Size = 15-20 mm²

Figur 46.

Grunden til at antallet af logiske elementer på chippen varierer er brug af forskellige design-metoder.

Hvad hjælper det, at man i princippet er i stand til at anbringe f.eks. 1 million komponenter på en chip, hvis designomkostningerne er så store, at det kun kan betale sig at anbringe 200.000?

Det kan faktisk godt undre en, at industrien bliver ved at bruge enorme summer (selv om forskningsindsatsen er blevet væsentlig mindre) på den teknologisk/fysiske side af sagen, når de allerede er støt ind i den slags problemer.

Baggrunden for denne trods alt stadig høje forskningsindsats fra hardwarefabrikanternes side, skal måske findes i den arbejdsdeling, der er sket indenfor mikroelektronikken i de sidste 10 år. Tidligere var det hardwarefabrikanterne (hovedsagelig store amerikanske firmaer som ITT, TI IBM, Motorola, Fairchild osv.), der selv både fremstillede og markedsførte deres produkter. Men efterhånden blev det uoverskueligt for dem selv at udnytte de muligheder, deres teknologi gav, og holde en forbindelse med aftagerne, samtidig med, at de også holdt gang i deres enorme hardwareproduktionsapparat. Det gav mulighed for opkomsten af en masse mindre kapitalkrævende "design firmaer", som kunne danne bindeled mellem hardwarefabrikanterne og kunderne.

Denne arbejdsdeling betød at konkurrencebetingelserne ændrede sig. Nu konkurrerer hardwarefabrikanterne stadig om at være længst fremme angående teknologisk muligheder og miniaturisering (derfor den stadige forskningsindsats), mens designfirmaerne konkurrerer om at finde på de smarteste design, bl.a. ved at udvikle computer-aided-design metoder, og de smarteste måder at lave "halvfabrikerede" chips på. Med halvfabrikerede chips menes måder at udnytte stordriftsfordele på i de første procestrin, mens de sidste procestrin kan varieres i små produktionsserier til forskellige formål.

Der findes flere af den slags "halvfabrikata" metoder, f.eks. "gatearray" og "cellarray" metoderne. Disse metoder har hver deres fordele, men ingen af dem kan på nogen måde udnytte de miniaturiseringsmuligheder, der egentlig er til stede.

Gatearray-metoden er den eneste metode, hvor selve chip-

pen bliver prækabrikeret. Det bliver den, ved at der tryk- en hel masse chips, hvor portfunktionerne er anbragt, og hvor der er plads til forbindelseslinier, som så sættes på bagefter efter behov. Denne metode har stordriftfordelene på hardwarensiden, men den begrænsede plads til "rutning" og manglende fleksibilitet giver dårlig arealudnyttelse.

Cellarray er en designmetode, hvor design for færdige celler med bestemte funktioner er lavet på forhånd. Til et kredsløb kan man så kombinere forskellige af disse celler, og anbringe dem smart på chippen i forhold til hinanden og på den måde lave et nyt kredsløb. Denne metode giver en bedre arealudnyttelse end gatearray, men tilgængæld har den ikke stordriftfordelene på hardwarensiden.

Den eneste designmetode, som kan udnytte de miniaturiseringsmuligheder, der er tilstede, er "full costum design" og ovenikøbet "brain-aided-full-custom-design". Denne designmetode går ud på, at man laver et helt nyt kredsløbsdesign fra grunden til et bestemt formål. "Brain-aided" vil sige, at det (delvist i hvert fald) er lavet af mennesker og ikke af en komputer. Denne metode er stadig CAD (Computer-aided-design)-metoden overlegen, når det gælder om at udnytte pladsen på chippen optimalt. Den er bare meget tidskrævende. Full-custom-design er en sjælden foreteelse, for den kræver enorme styktal, hvis den skal være rentabel.

I øjeblikket har man indtryk af, at der er nok at lave med at udvikle designmetoder, computersimulationsprogrammer, halvfabrikatateknikker, testprogrammer osv, og at det er her begrænsningerne ligger for teknologiens udviklings og anvendelsesmuligheder, og ikke i hvor mange komponenter det er muligt at anbringe på en chip.

KONKLUSION:Hvordan indgår fysik i den teknologiske udvikling?

Ved at arbejde med afsnittet om grænser for miniaturisering af mikroelektronik, er vi blevet klogere på dét spørgsmål på én måde: Vi har set, hvordan fysikken kan bruges til at give nogle generelle "retningslinier" for teknologiuudviklingen, idet man nemlig, v.hj.a. fysik kan beskrive nogle grænsebetingelser, som teknologien i en eller anden forstand er underlagt.

Karakteristisk for de grænser er, at de på en måde er uovervindelige. Difraktionseffekter og fluktuationer på det atomare niveau, kan man ikke undgå. Man kan undgå, at de bliver et problem, ved "at styre udenom dem", eller ved slet ikke at komme i nærheden af dem. Som eksempel kunne man tage diffraktionsproblemerne:

I begyndelsen anvendte man ultraviolet lys i de fotografiske processer. Efterhånden som man gjorde liniebredderne på chippen mindre, gjorde diffraktionen det umuligt, at tegne linierne tilstrækkeligt skarpt. Denne umulighed kunne forstås og beskrives v.hj.a. fysikkens teori for bølgeudbredelse. Man kunne også v.hj.a. fysikken finde ud af, hvad man skulle gøre for at afhjælpe problemet: bruge mere kortbølget stråling. Dette kunne f.eks. være røntgenstråling, men fysikken fortalte også, at partikler, f.eks. elektroner, kan opfattes som bølger med meget kort bølgelængde, og brug af disse kunne måske være en vej til at undgå diffraktionsproblemerne.

Resultatet er blevet, at man nu bruger en kombination af røntgenstråling og elektronstråler i forskellige trin i den fotolitografiske proces. Herved har man styret udenom den første "grænse" man støtte på: diffraktionen af UV-lys. Difraktionen er ikke længere noget problem, fordi man nu befinder sig et stykke fra de liniebredder, hvor diffraktionsproblemer med røntgenstråling begynder at melde sig.

Men den fysiske grænse diffraktionen er udtryk for, har man ikke ændret noget ved. Måske vil diffraktionen med røntgenstråling en dag blive et problem, når miniaturiseringen

er fortsat nogle år endnu, og man har styret udenom de grænser, man aktuelt står overfor nu. Ved hvilke liniebredder det vil ske, kan man forudsige nu v.hj.a. fysik. På den måde kan fysikken fortælle, hvor langt man kan komme i bestemte retninger i teknologiudviklingen.

Ved at betragte diffraktionsproblemerne i sig selv, kan man ikke finde nogen absolut grænse for miniaturiseringen - for man kan bare bruge mere og mere kortbølget stråling. Men derved opstår der nogle nye problemer fordi energien af strålingen bliver større og større. Her kommer så en ny grænse ind i billedet: spredningen af strålingen i underlaget (resisten), og i det hele taget den ravage strålingen forårsager i underlaget. De problemer bliver større jo mere energirig strålingen er. Disse effekter kan man også beskrive v. hj.a. fysik, og de er også uovervindelige på den måde, at når man bestråler stoffet er det umuligt, at undgå, at der sker en spredning af strålingen p.gr.a. atomerne og elektronerne i stoffet. Størrelsen af denne spredning afhænger i en vis udstrækning af egenskaber ved resisten - hvor tunge dens atomkerner er, hvor tynd man kan lave den, uden at der kommer huller i den osv. Men totalt at undgå spredning er umuligt - det fortæller fysikken.

Hvis man ser på begge de to fænomener kan man forudsige en grænse, hvor man ikke kan gøre strålingen mere kortbølget af hensyn til energiindholdet, og den deraf følgende spredning i underlaget. Når man når dertil, kan man med fysikken i ryggen sige: nu kan vi ikke udvikle de fotolitografiske metoder mere, vi kan simpelthen ikke undgå den sidste rest usikkerhed i defineringen af linierne, som skyldes en kombination af diffraktion og spredning.

Har indsigt i fysik en overbliksgivende karakter:

Det at der findes den slags grænser for teknologiudviklingen, som de fysiske grænser udgør, er interessant af (mindst) to grunde.

For det første udgør de en karakteristisk forskel mellem teknologien i dag og teknologien for 100 år siden. Det siger

noget om, at det er et nyt - videnskabeligt - kendskab til naturen, der er nødvendigt. Man kan ikke basere sig på erfaring, fordi teknologien har udviklet sig ud i områder, hvor vi af gode grunde ikke kan have nogen erfaringer, medmindre vi netop anstiller "videnskabelige" eksperimenter. Vores almindelige makroskopiske forståelse af verden slår ikke længere til. Idet vi bevæger os ind i mikroverdenen, støder vi på nye grænser, som har en anderledes og ny karakter af uovervindelighed, som kun fysikken kan fortælle os om.

For det andet slår eksistensen af sådanne grænser en pæl igennem den almindelige opfattelse: "at alt kan lade sig gøre, hvis man bare bruger penge nok, til at finde ud af hvordan." Denne holdning stammer fra den almindelige erfaring, at det meget ofte er økonomien, der begrænser teknologiudviklingen. Dette kan vi inden for mikroelektronikken belyse med et andet eksempel: Renheden af silicium.

Her eksisterer nemlig ikke nogen absolutte grænser for, hvor rent man kan lave silicium. Man har forskellige metoder til at fremstille silicium i mere eller mindre ren form. En metode er zoneraffinerings-teknikken. Ved den metode bliver siliciummet ikke 100% rent. Ved en anden metode, masseseparation, hvor stoffet i ionform bliver accelereret i et magnetfelt, kan man faktisk fremstille 100% rent silicium, men den metode er selvfølgelig langt dyrere end zoneraffineringsmetoden. Her er det økonomien, der bestemmer, og ikke fysikken. I betragtning af, at det er noget nyt, at der kommer fysiske grænser ind i billedet på den måde, og de i øvrigt kan være svære at skelne fra økonomiske og tekniske grænser, er det nok ikke så underligt, at der er mange, der ikke er opmærksomme på deres eksistens.

Der er en form for grænse, vi ikke har omtalt endnu, nemlig det man kunne kalde en teknisk grænse. De tekniske grænser er sværere at skelne fra de fysiske grænser end de økonomiske. De tekniske grænser har noget med metode og "fingerfærdighed" at gøre. Det var tekniske grænser, der var inde i billedet ved miniaturiseringen af rør. Her lå begrænsnin-

gen i, hvor tæt man kunne anbringe f.eks. anoden og et gitter på hinanden i en tredimensionel struktur med vakuum i mellem. Et af problemerne var, at systemet skulle være stift, så de aldrig kom til at røre ved hinanden f.eks. ved rystelser. Men det var makroskopiske størrelser, man havde med at gøre, og ikke usikkerheder, der skyldtes fundamentale egenskaber ved naturen.

Tekniske grænser er i høj grad inde i billedet ved mikroelektronikken også. Et eksempel kunne være den nøjagtighed, man anbringer maskerne over hinanden på chippen med.

Disse to grænser: fysiske og tekniske - kan være lige alvorlige - der er simpelthen forskel på hvor nøjagtige mekaniske systemer kan være, så grænserne kan være lige alvorlige set fra et teknologisk synspunkt. Men derfor er der alligevel forskel på deres karakter. På grund af den teknologiske udvikling, vil de tekniske grænser være forskellige på forskellige tidspunkter i historien, mens de fysiske står fast. (Eller så fast som nu fysiske teorier står - men det er under alle omstændigheder langt fastere end de tekniske grænser.)

Tilsammen udgør de tekniske, økonomiske og fysiske grænser randbetingelserne for teknologiudviklingen. Arbejdet med de fysiske grænser for miniaturiseringen, har fået os til at skille de tre typer grænser begrebsligt ud fra hinanden. For at kunne gøre det skulle vi kende til de fysiske overvejelser, der indgår i bestemmelsen af grænserne. Dette, kan man måske sige, er altså et eksempel på at fysisk indsigt bidrager til at overskue betingelserne for teknologiudviklingen.

Selv om de tre typer grænser begrebsligt er adskilt, kan det være svært i praksis klart at kategorisere en grænse som enten teknisk eller fysisk. Det kræver dels et stort overblik over, hvilke faktorer, der er inde i billedet, og dels indgår fysiske og tekniske grænser i en integreret sammenhæng i de teknologiske problemstillinger, hvor det således tit vil være meningsløst at prøve at skille dem ad.

Det at tekniske og fysiske grænser, på trods af, at de er

forskellige i deres karakter, indgår i et uadskilleligt hele i de teknologiske problemstillinger, giver et fingerpeg om samspillet mellem videnskab og teknologi i den videnskabeliggjorte produktion. Dette fingerpeg går ud på, at det måske holder op med at være meningsfuldt at spørge om, hvad der er videnskab og hvad der er teknologi. Måske udgør den industrielle forskning en ny kategori, som kan afløse kategorierne grundforskning, anvendt forskning og udviklingsarbejde, som går i opløsning under videnskabeliggørelsen.

- (1) Ole Knudsen: "Elektrodynamikkens Gyldendal, 1980.
historie."
- (2) J.D. Bernal: "Videnskabens Pax/Modtryk, 1965.
historie" Bind 3.
- (3) P. LaCour og "Historisk fysik" 1966.
J. Appel:
- (4) Helge Holst (red) "Opfindelsernes Nordisk forlag, 1923
bog"
- (5) G.W.A Dummer: "Electronic inven- Pergamon Press, 1978.
tions and dis-
coveries."
- (6) Jens Højgård Jen- "Om fysik 1" Hans Reitzels for-
sen & Søren Kjøl- lag 1983.
rup:
- (7) John S Mayo: "The role of Micro- Scientific American
electronics in Sep. 1977.
communications"
- (8) G.L. Pearson & "History of Semi- Proceedings of the
W.H. Brattain: conductor Research". IRE, december 1955.
- (9) W. Shockley: "The path to the IEEE transactions on
conception of the electron devices, vol
junction Transistor" ED-23, no 7, July 1976.
- (11) Lilian Hoddeson: "The roots of solid- Physics Today/Marts
state research at 1977.
Bell-labs."
"The discovery of Historical Studies in
the point-contact the Physical Sciences.
transistor". Vol. 12, part 1. 1981.

- Open University: "The wave nature of light", S loo 28. The open university Press, Walton Hall, Bletchley, Bucks, 1971.
- "Quantum Theory" & Quantum Physics and the Atom", Sloo 29 & 30. -----
- (12) ---- "Electrons in Solids", TS 251, nr. 4 -----
- (13) Kittel: "Semiconductors-rectifiers and Transistor." "Introduction to solid state Physics" 2. udgave kap 14, 1960
- (14) J.D. Meindl: "Microelectronic circuit Elements" Scientific American Temanr. sep 1977.
- W.C. Holton: "The Large-Scale Integration of microelectronic circuits." -----
- W.G. Oldham: "The fabrication of Microelectronic circuits." -----
- (15) Enerst Braun & Stuart MacDonald "Elektronik Revolutionen" Teknisk forlag, 1979
- (16) J.C. Slater: "Solid-State and Molecular Theory: A Scientific Biography" A Wiley- Interscience Publication. New York 1975.
- (17) Robert N. Noyce: "Microelectronics" Scientific American, (temanr.) sep. 1977.

- (18) Arnold Reisman: "Device, Circuit, Proceedings of the and Technology Scaling to micron and submicron Dimensions." IEEE, vol. 71, no. 5, maj 1983.
- (19) University, Government, Industry, Microelectronics." Symposium proceedings, maj 1981. Starkville Mississippi.
- (20) M.P. Lepselter, D.S. Alles m. fl: "A systems Approach to 1 μ m NMOS." Proceedings of the IEEE, vol. 71, no 5.
- (21) Gert Mølgård: "Elektronikingeniørers arbejde og kvalifikations forhold". Institut for Samfunders arbejde og kvalifikations forhold". DTH 1982.
- (22) R. D Ewans: "The Atomic Nucleus" McGraw-Hill Book komp. kap: 19. 1955.
- (23) J.T. Wallmark: "Fundamental physical limitations in integrated electronic circuits." Solid State Devices 4. European sol.stat. phys. device resarch conf. Nottingham 1974
- (24) G. Hellgren m.fl: "Integreret elektronik" Teknisk forlag, 1977.
- (25) R.W. Keyes: "Physical Limits in Digital Electronics" IEEE, vol. 63, no. 5. maj 1975
- R.W. Keyes: "Physical Problems of Small Structures in Electronics" IEEE, vol.60, nr.9, sep. 1972.
- (26) A.J. Blodgett: "Microelectronic Pakaging" Scientific American, Juli, 1983.

- 1/78 "TANKER OM EN PRAKSIS" - et matematikprojekt.
Projektrapport af Anne Jensen, Lena Lindenskov, Marianne Kesselhahn og Nicolai Lomholt.
Vejleder: Anders Madsen.
- 2/78 "OPTIMERING" - Menneskets forøgede beherskelsesmuligheder af natur og samfund.
Projektrapport af Tom J. Andersen, Tommy R. Andersen, Gert Kreinøe og Peter H. Lassen.
Vejleder: Bernhelm Booss.
- 3/78 "OPGAVESAMLING", breddekursus i fysik.
Lasse Rasmussen, Aage Bonde Kræmmer, Jens Højgaard Jensen.
- 4/78 "TRE ESSAYS" - om matematikundervisning, matematiklæreruddannelsen og videnskabsrindalismen. Nr. 4 er p.t. udgået.
Mogens Niss.
- 5/78 "BIBLIOGRAFISK VEJLEDNING til studiet af DEN MODERNE FYSIKS HISTORIE".
Helge Kragh.
- 6/78 "NOGLE ARTIKLER OG DEBATINDLÆG OM - læreruddannelse og undervisning i fysik, og - de naturvidenskabelige fags situation efter studenterrøret".
Karin Beyer, Jens Højgaard Jensen og Bent C. Jørgensen.
- 7/78 "MATEMATIKKENS FORHOLD TIL SAMFUNDSØKONOMIEN". Nr. 7 er udgået.
B.V. Gnedenko.
- 8/78 "DYNAMIK OG DIAGRAMMER". Introduktion til energy-bound-graph formalismen.
Peder Voetmann Christiansen.
- 9/78 "OM PRAKSIS' INDFLYDELSE PÅ MATEMATIKKENS UDVIKLING". - Motiver til Kepler's: "Nova Stereometria Dolliorum Vinariorum".
Projektrapport af Lasse Rasmussen.
Vejleder: Anders Madsen.
-
- 10/79 "TERMODYNAMIK I GYMNASIET".
Projektrapport af Jan Christensen og Jeanne Mortensen.
Vejledere: Karin Beyer og Peder Voetmann Christiansen.
- 11/79 "STATISTISKE MATERIALER"
red. Jørgen Larsen
- 12/79 "LINEÆRE DIFFERENTIALLIGNINGER OG DIFFERENTIALLIGNINGSSYSTEMER". Nr. 12 er udgået.
Mogens Brun Heefelt
- 13/79 "CAVENDISH'S FORSØG I GYMNASIET".
Projektrapport af Gert Kreinøe.
Vejleder: Albert Chr. Paulsen

14/79 "BOOKS ABOUT MATHEMATICS: History, Philosophy, Education, Models, System Theory, and Works of Reference etc. A Bibliography".
Else Høyrup. Nr. 14 er p.t. udgået.

124

15/79 "STRUKTUREL STABILITET OG KATASTROFER i systemer i og udenfor termodynamisk ligevægt".
Specialeopgave af Leif S. Striegler.
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen.

16/79 "STATISTIK I KRÆFTFORSKNINGEN".
Projektrapport af Michael Olsen og Jørn Jensen.
Vejleder: Jørgen Larsen.

17/79 "AT SPØRGE OG AT SVARE i fysikundervisningen".
Albert Christian Paulsen.

18/79 "MATHEMATICS AND THE REAL WORLD", Proceedings of an International Workshop, Roskilde University Centre, Denmark, 1978. Preprint.
Bernhelm Booss & Mogens Niss (eds.).

19/79 "GEOMETRI, SKOLE OG VIRKELIGHED".
Projektrapport af Tom J. Andersen, Tommy R. Andersen og Per H.H. Larsen.
Vejleder: Mogens Niss.

20/79 "STATISTISKE MODELLER TIL BESTEMMELSE AF SIKRE DOSER FOR CARCINOGENE STOFFER".
Projektrapport af Michael Olsen og Jørn Jensen.
Vejleder: Jørgen Larsen.

21/79 "KONTROL I GYMNASIET - FORMAL OG KONSEKVENSER".
Projektrapport af Crilles Bacher, Per S. Jensen, Preben Jensen og Torben Nysteen.

22/79 "SEMIOTIK OG SYSTEMEGENSKABER (I)".
1-port lineært response og støj i fysikken.
Peder Voetmann Christiansen.

23/79 "ON THE HISTORY OF EARLY WAVE MECHANICS - with special emphasis on the role of reality".

24/80 "MATEMATIKOPFATTELSER HOS 2.G'ERE". Nr. 24 a+b er p.t. udgået.
a+b 1. En analyse. 2. Interviewmateriale.
Projektrapport af Jan Christensen og Knud Lindhardt Rasmussen.
Vejleder: Mogens Niss.

25/80 "EKSAMENSOPGAVER", Dybdemodulet/fysik 1974-79.

26/80 "OM MATEMATISKE MODELLER". Nr. 26 er p.t. udgået.
En projektrapport og to artikler.
Jens Højgaard Jensen m.fl.

27/80 "METHODOLOGY AND PHILOSOPHY OF SCIENCE IN PAUL DIRAC'S PHYSICS".
Helge Kragh.

28/80 "DIELEKTRISK RELAXATION - et forslag til en ny model bygget på væskernes viscoelastiske egenskaber".
Projektrapport, speciale i fysik, af Gert Kreinøe.
Vejleder: Niels Boye Olsen.

- 29/80 "ODIN - undervisningsmateriale til et kursus i differentialligningsmodeller".
 Projekt rapport af Tommy R. Andersen, Per H.H. Larsen og Peter H. Lassen.
 Vejleder: Mogens Brun Heefelt
- 30/80 "FUSIONSENERGIEN - - - ATOMSAMFUNDETS ENDESTATION".
 Oluf Danielsen. Nr. 30 er udgået.
 Udkommer medio 1982 på Fysik-, Matematik- og Kemilærer-
 nes forlag.
- 31/80 "VIDENSKABSTEORETISKE PROBLEMER VED UNDERVISNINGSSYS-
 TEMER BASERET PÅ MÆNGDELERE". Nr. 31 er p.t. udgået
 Projekt rapport af Troels Lange og Jørgen Karrebæk.
 Vejleder: Stig Andur Pedersen.
- 32/80 "POLYMERE STOFFERS VISCOELASTISKE EGENSKABER - BELYST
 VED HJÆLP AF MEKANISKE IMPEDANSMÅLINGER OG MOSSBAUER-
 EFFEKTMÅLINGER".
 Projekt rapport, speciale i fysik, af Crilles Bacher og
 Preben Jensen.
 Vejledere: Niels Boye Olsen og Peder Voetmann Chri-
 stiansen.
- 33/80 "KONSTITUERING AF FAG INDEN FOR TEKNISK-NATURVIDENSKA-
 BELIGE UDDANNELSER. I-II".
 Arne Jakobsen.
- 34/80 "ENVIRONMENTAL IMPACT OF WIND ENERGY UTILIZATION".
 ENERGY SERIES NO.1. Nr. 34 er udgået.
 Bent Sørensen. Publ. i "Renewable Sources of Energy and the Environment",
 Tycoon International Press, Dublin, 1981.
- 35/80 "HISTORISKE STUDIER I DEN NYERE ATOMFYSIKS UDVIKLING".
 Helge Kragh.
- 36/80 "HVAD ER MENINGEN MED MATEMATIKUNDERVISNINGEN ?".
 Fire artikler.
 Mogens Niss.
- 37/80 "RENEWABLE ENERGY AND ENERGY STORAGE".
 ENERGY SERIES NO.2.
 Bent Sørensen.
-
- 38/81 "TIL EN HISTORIETEORI OM NATURERKENDELSE, TEKNOLOGI
 OG SAMFUND". Nr. 38 er p.t. udgået
 Projekt rapport af Erik Gade, Hans Hedal, Henrik Lau
 og Finn Physant.
 Vejledere: Stig Andur Pedersen, Helge Kragh og
 Ib Thiersen.
- 39/81 "TIL KRITIKKEN AF VÆKSTOKONOMIEN".
 Jens Højgaard Jensen.
- 40/81 "TELEKOMMUNIKATION I DANMARK - oplæg til en teknolo-
 givurdering". Nr. 40 er p.t. udgået
 Projekt rapport af Arne Jørgensen, Bruno Petersen og
 Jan Vedde.
 Vejleder: Per Norgaard.
- 41/81 "PLANNING AND POLICY CONSIDERATIONS RELATED TO THE
 INTRODUCTION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES INTO ENERGY
 SUPPLY SYSTEMS".
 ENERGY SERIES NO.3.
 Bent Sørensen.

42/81 "VIDENSKAB TEORI, SAMFUND - En introduktion til materialistiske videnskabsopfattelser".

Helge Kragh og Stig Andur Pedersen.

126

43/81 1. "COMPARATIVE RISK ASSESSMENT OF TOTAL ENERGY SYSTEMS".

2. "ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF DECENTRALIZATION".
ENERGY-SERIES NO.4.

Bent Sørensen.

44/81 "HISTORISK UNDERSØGELSE AF DE EKSPERIMENTELLE FORUDSÆTNINGER FOR RUTHERFORDS ATOMMODEL".

Projektrapport af Niels Thor Nielsen.

Vejleder: Bent C. Jørgensen.

45/82

46/82 "EKSEMPLARISK UNDERVISNING OG FYSISK ERKENDELSE - I+II ILLUSTRERET VED EKSEMPLER".

Projektrapport af Torben O. Olsen, Lasse Rasmussen og Niels Dreyer Sørensen.

Vejleder: Bent C. Jørgensen.

47/82 "BARSEBACK OG DET VÆRST OFFICIELT-TÆNKELIGE UHELD".

ENERGY SERIES NO.5.

Bent Sørensen.

48/82 "EN UNDERSØGELSE AF MATEMATIKUNDERVISNINGEN PÅ ADGANGSKURSUS TIL KØBENHAVNS TEKNIKUM".

Projektrapport af Lis Eilertzen, Jørgen Karrebæk, Troels Lange, Preben Nørregaard, Lissi Pedersen, Laust Rishøj, Lill Røn, Isac Showiki.

Vejleder: Mogens Niss.

49/82 "ANALYSE AF MULTISPEKTRALE SATELLITBILLEDER".

Projektrapport af Preben Nørregaard.

Vejledere: Jørgen Larsen & Rasmus Ole Rasmussen.

50/82 "HERSLEV - MULIGHEDER FOR VEDVARENDE ENERGI I EN LANDSBY". ENERGY SERIES NO.6.

Rapport af Bent Christensen, Bent Hove Jensen, Dennis B. Møller, Bjarne Laursen, Bjarne Lillethorup og Jacob Mørch Pedersen.

Vejleder: Bent Sørensen.

51/82 "HVAD KAN DER GØRES FOR AT AFHJÆLPE PIGERS BLOKERING OVERFOR MATEMATIK?"

Projektrapport af Lis Eilertzen, Lissi Pedersen, Lill Røn og Susanne Stender.

52/82 "DESUSPENSION OF SPLITTING ELLIPTIC SYMBOLS"

Bernhelm Booss & Krzysztof Wojciechowski.

53/82 "THE CONSTITUTION OF SUBJECTS IN ENGINEERING EDUCATION".

Arne Jakobsen & Stig Andur Pedersen.

54/82 "FUTURES RESEARCH" - A Philosophical Analysis of Its Subject-Matter and Methods.

Stig Andur Pedersen & Johannes Witt-Hansen.

55/82 "MATEMATISKE MODELLER" - Litteratur på Roskilde
Universitetsbibliotek.

En bibliografi.

Else Høyrup.

Vedr. tekst nr. 55/82:
Se også tekst 62/83.

127

56/82 "ÉN - TO - MANGE" -
En undersøgelse af matematisk økologi.
Projektrapport af Troels Lange.
Vejleder: Anders Madsen.

57/83 "ASPECT EKSPERIMENTET" -
Skjulte variable i kvantemekanikken?
Projektrapport af Tom Juul Andersen.
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen.

Nr. 57 er udgået.

58/83 "MATEMATISKE VANDRINGER" - Modelbetragtninger
over spredning af dyr mellem småbiotoper i
agerlandet.
Projektrapport af Per Hammershøj Jensen &
Lene Vagn Rasmussen.
Vejleder: Jørgen Larsen.

59/83 "THE METHODOLOGY OF ENERGY PLANNING".
ENERGY SERIES NO. 7.
Bent Sørensen.

60/83 "MATEMATISK MODEKSPERTISE" - et eksempel.
Projektrapport af Erik O. Gade, Jørgen Karrebæk og
Preben Nørregaard.
Vejleder: Anders Madsen.

61/83 "FYSIKS IDEOLOGISKE FUNKTION", som et eksempel på
en naturvidenskab - historisk set.
Projektrapport af Annette Post Nielsen.
Vejledere: Jens Høyrup, Jens Højgaard Jensen og
Jørgen Vogelius.

62/83 "MATEMATISKE MODELLER" - Litteratur på Roskilde
Universitetsbibliotek.
En bibliografi. 2. rev. udgave
Else Høyrup

63/83 "CREATING ENERGY FUTURES: A SHORT GUIDE TO
ENERGY PLANNING".
ENERGY SERIES No. 8
David Crossley & Bent Sørensen

64/83 "VON MATHEMATIK UND KRIEG".
Bernhelm Booss og Jens Høyrup

65/83 "ANVENDT MATEMATIK - TEORI ELLER PRAKSIS".
Projektrapport af Per Hedegård Andersen, Kirsten
Habekost, Carsten Holst-Jensen, Annelise von Moos,
Else Marie Pedersen, Erling Møller Pedersen.
Vejledere: Bernhelm Booss & Klaus Grünbaum

66/83 "MATEMATISKE MODELLER FOR PERIODISK SELEKTION I
ESCHERICHIA COLI".
Projektrapport af Hanne Lisbet Andersen, Ole
Richard Jensen og Klavs Frisdahl.
Vejledere: Jørgen Larsen og Anders Madsen

- 67/83 "ELIPSOIDE METODEN - EN NY METODE TIL LINEÆR PROGRAMMERING?"
Projektrapport af Lone Biilmann og Lars Boye
Vejleder: Mogens Brun Heefelt
- 68/83 "STOKASTISKE MODELLER I POPULATIONSGENETIK"
- til kritikken af teoriladede modeller.
Projektrapport af Lise Odgård Gade, Susanne Hansen, Michael Hviid, Frank Molgård Olsen.
Vejleder: Jørgen Larsen.
- 69/83 "ELEVFORUDSÆTNINGER I FYSIK"
- en test i l.g med kommentarer
Albert Chr. Paulsen
- 70/83 "INDLÆRINGS- OG FORMIDLINGSPROBLEMER I MATEMATIK PÅ VOKSENUNDERVISNINGSNIVEAU"
Projektrapport af Hanne Lisbet Andersen, Torben J. Andreasen, Svend Aage Houmann, Helle Glerup Jensen, Keld Fl. Nielsen, Lene Vagn Rasmussen.
Vejleder: Klaus Grünbaum & Anders H. Madsen
- 71/83 "PIGER OG FYSIK"
- et problem og en udfordring for skolen?
Karin Beyer, Sussanne Blegaa, Birthe Olsen, Jette Reich & Mette Vedelsby
- 72/83 "VERDEN IFOLGE PEIRCE" - to metafysiske essays, om og af C.S. Peirce.
Peder Voetmann Christiansen
- 73/83 "EN ENERGIANALYSE AF LANDBRUG"
- økologisk contra traditionelt
ENERGY SERIES No. 9
Specialeopgave i fysik af
Bent Hove Jensen
Vejleder: Bent Sørensen