

Opdagelsen af pn junction'en, byggeblokken i alle halvledere

Oversat fra IEEE Spectrum, June 1997 af OZ2TG Steen Gülstorff, Lindehaven 9, 2500 Valby

Om eftermiddagen den 6. marts 1940 modtog Joseph Becker og Walter Brattain et telefonopkald fra deres chef Mervin Kelly, leder af Bell telephone laboratorierne. Mervin bad dem om at komme til hans kontor med det samme, uanset hvad de var i gang med.

De to midaldrende fysikere, der havde studeret termisk emission og andre overfladefænomener i en årrække, skyndte sig af sted og nåede chefens kontor få minutter senere. Her mødte de andre gruppeledere og to mænd fra Bells radiolaboratorium. En af dem var Russel Ohl; foran ham var der anbragt en simpel elektrisk opstilling, bestående af et voltmeter forbundet til en kulsort stav omkring 3 cm lang. Staven var et stykke silicium, et materiale, som Russel havde studeret de sidste 5 år. Russel tog nu en stavlygte og pegede med lysstrålen direkte på staven. Pludselig sprang voltmeterets nål op til næsten 500 mV. De tilstedeværende var chokerede - det var en effekt, der var omkring 10 gange større end den, man kendte fra nogen fotocelle.

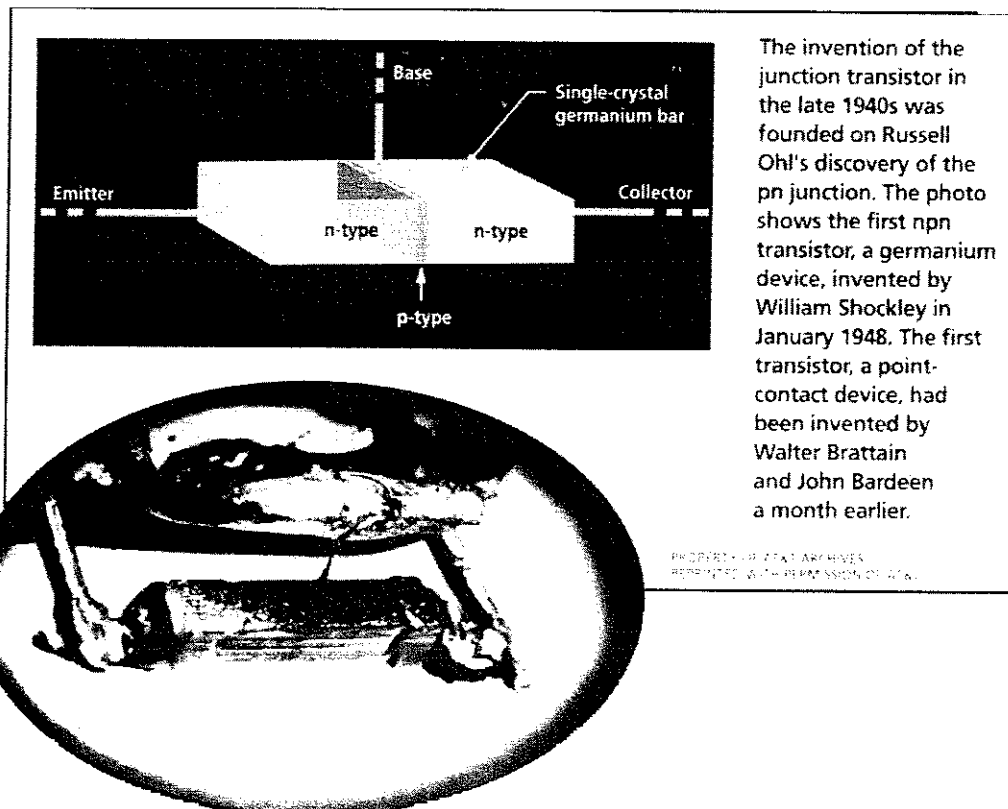
Russels arbejde med silicium blev startet på grund af hans interesse for mikrobølge radiokommunikation. Da krigen var nær, blev denne interesse særlig interessant, da bølgelængder mindre end en meter var meget interessante til brug i radaranlæg. Men generering og især detektering af ultrakorte bølger

var et problem, der beskæftigede hundreder af videnskabsmænd både i Europa og USA.

En af Russels kolleger, Geoge Southworth, havde siden midten af 30'erne prøvet at lave detektorer med elektronrør og kobberoxid ensrettere uden stort held. Således frustreret besluttede Southworth sig til at prøve en af de gamle krystal-detektorer, som han havde brugt under første verdenskrig. Disse besværlige dimser var langsomt blevet overhalet af de moderne trioder i løbet af 20'erne, så i midten af 30'erne var de ikke til at købe i nogen forretning mere. I stedet måtte han på jagt i diverse antikvarforretninger, hvor han endelig fandt nogle gamle 'cat-whisker' detektorer. Han tog dem med til sit laboratorium, indsatte en i sin modtager og begyndte at lede efter et godt 'sted', hvor modtagelsen var god. Efter godt en times søgen lykkedes det, han kunne endelig detektere sit mikrobølgesignal!

Southworth fortalte Russel om sine erfaringer; denne var ikke overrasket, og de blev enige om at finde hvilke materialer, der var bedst til krystal-detektorer. De prøvede over 100 forskellige materialer og fandt, at siliciumdetektorer var klart de bedste.

Russel havde tidligere undersøgt, hvad der gjorde et materiale til en god detektor. Han fandt, at det typisk var materialer fra den fjerde kolonne i det peri-



The invention of the junction transistor in the late 1940s was founded on Russell Ohl's discovery of the pn junction. The photo shows the first npn transistor, a germanium device, invented by William Shockley in January 1948. The first transistor, a point-contact device, had been invented by Walter Brattain and John Bardeen a month earlier.

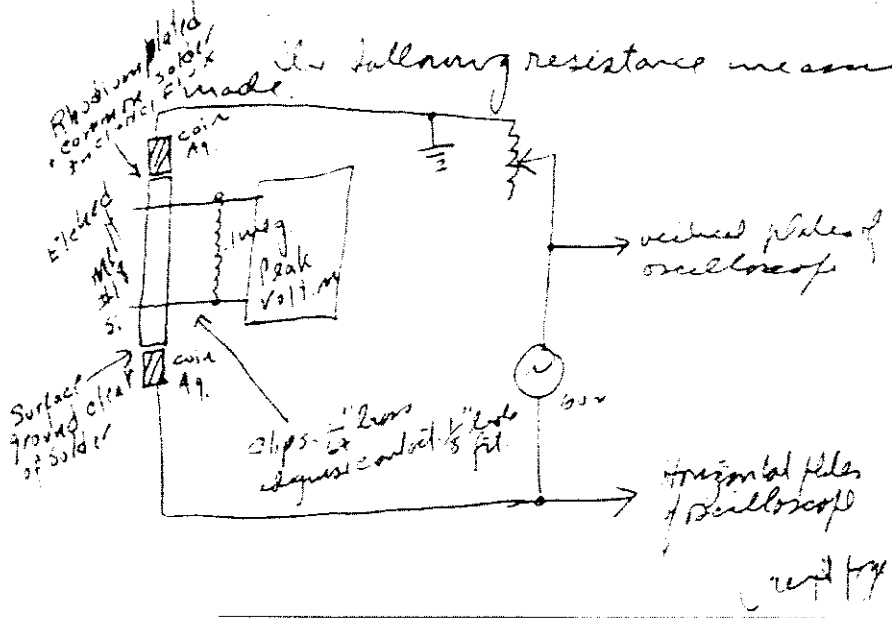
PHOTO BY J. STAL ARCHIVES
REPRINTED WITH PERMISSION OF IEEE

A Silicon Rod $\frac{1}{8}$ " diameter would have to have $\frac{I}{4} \times \frac{L}{64} = 12.3 \times 10^{-20} = 79 \times 10^3$ or a about 79 amps must be passed on effect equivalent to that produced at a faint contact.

The modulus of elasticity of Si content (Pentec) metal is 5.2×10^{10} and is reduced by contact is 2×10^{10} , or 1.25×10^{10} .

2-23-40

The following resistance measurements were



odiske system. Disse grundstoffer er specielle derved, at de kan dele deres elektroner med hinanden og derved danne materialer bundet sammen af et ekstensivt netværk af kovalente bindinger. De fire elektroner i et atom parres med fire elektroner fra nærliggende atomer i et krystalgitter for således at udgøre en atomskal med otte elektroner. Diamant og grafit, der begge består af kulstofatomer, er sådanne eksempler, der kun adskiller sig fra hinanden i måden kulstofatomerne er arrangeret. Silicium og germanium kan danne tilsvarende krystalstrukturer. Disse havde i begyndelsen af 30'erne fanget forskerens interesse, deriblandt Russels.

Silicium har været anvendt siden 1906 som krystaldetektor. Caborondum, en kombination af silicium og kulstof, var også populært i radiodetektorer i tyverne. Radiolyttere jagede rundt på overfladen af disse materialer med en metalspids - typisk lavet af tungsten - for at finde et 'varmt' sted, hvor der var god modtagelse. I dag ved vi, at det, der skyldes denne ujævne virkning, var materialets krystalstruktur og forskellige renhed hen over overfladen. Krystaldetektorer blev lavet af silicium, der var kommercielt tilgængeligt som tilsats i forbindelse med stål-fremstilling. Denne silicium var en kvalitet, der typisk indeholdt et par procent urenheder, såsom aluminium.

Disse tidlige detektorer var også kendetegnet ved at ensrette strømmen forskelligt fra det ene punkt til det næste.

Denne tilfældige virkemåde, gættede Russel, måtte skyldes urenheder i siliciumkrystallet. For at få mere ens prøver besluttede han sig at prøve at rense silicium. Men silicium smelter ved 1410 grader, som er varmt nok til at smelte en masse andre materialer. I 1939 fik han hjælp af to metallurger fra Bell Labs, der smeltede silicium i glasrør med en atmosfære af inaktiv helium.

Efter at siliciumet var størknet, blev glasset brækket af, og der blev savet små stykker af, som Russel brugte til sine forsøg. Han fandt ud af, at disse prøver var meget mere ensartede end tidligere; men stadig var der den forskel, at på nogle prøver løb strømmen fra tråden til krystallet og på andre modsat, og han havde ingen måde til at kontrollere dette fænomen.

Russel lavede forskellige test bl.a. ledningsevne på forskellige prøver. En af disse prøver opførte sig så underligt, at det ikke var muligt at få målinger, der kunne gentages. Han anbragte derefter denne prøve i den testopstilling, han normalt brugte till at teste silicium. Han opdagede, at hans oscilloskop viste en underlig sløjfe, der indicerede en eller anden form for barriere i prøven. Han udførte et par andre tests, uden at de gav nogle opmuntrende resultater. Denne mystiske barriere var åbenbart noget, man skulle undgå, en klar ulempe ved fabrikationen af detektorer.

Russel glemte så denne prøve indtil et år senere, den 23. februar 1940. Da genoptog han forsøgene og han opdagede, at sløjfen på oscilloskopet ændrede

form, når prøven blev anbragt over en skål vand; ligeledes ændredes kurveformen, når prøven kom i nærheden af en varm loddekolbe; i sandhed et mærkeligt stykke silicium.

I løbet af eftermiddagen fandt han ud af at, også nærheden af en tændt lampe havde en stor indflydelse. Og da han placerede lampen bag en ventilator, pulserede kurven med en frekvens på 20 Hz, svarende til frekvensen bladene på ventilatoren skyggede for lampen.

Den følgende uge var det så, han fremviste sit fund i Kelly's kontor. Ingen kunne på dette tidspunkt forklare fænomenet.

Det var under fremstillingen af prøverne tilbage i september, at der skete noget afgørende. Ved fremstillingen af siliciumstavene blev disse afkølet langsomt for at undgå at de revnede; dette medførte også, at urenhederne delte sig således, at midten af staven blev mildt forurenset og toppen af staven blev som kommerciel silicium.

Da teknikeren senere skulle skære prøver af staven, kom han ufrivilligt til at skære på tværs af grænsen mellem disse to områder. På overfladen, hvor de to områder mødtes, havde der dannet sig en barriere, ligesom det var kendt mellem kobber og dets oxid. Prøven var blevet en ensretter, hvilket var årsag til, at Russel havde besvær med at måle dens ledningsevne.

Silicium på den ene side var en 'excess' halvleder med ekstra elektroner på grund af forureningen der. På den anden side var der til gengæld et elektronunderskud, der skyldtes en anden type forurening.

Barrieren opstod, når elektronerne prøvede at udligne forskellen ved at gå fra den ene side til den anden. Når prøven blev belyst, løsnedes flere elektroner fra deres atomer; men på grund af barrieren kunne disse kun bevæge sig i en retning over denne med det resultat, at der løb en strøm, der gav den spændingsforskel, fysikerne observerede.

Da de blev klar over, at de var snublet over et vigtigt fænomen, besluttede de at finde navne til de to typer silicium: De kaldte det henholdsvis p-type og n-type. P for positiv og n for negativ. Hvis p-type silicium blev belyst, gav det årsag til en positiv spænding og modsat med n-type. Den højohmige barriere mellem de to typer blev kaldt pn-junction.

Russel og hans kolleger begyndte snart at få mistanke om, at de underlige fænomener, de observerede, skyldtes små urenheder, der delte sig afhængig af deres atomvægt, således at urenheder med lave atomvægt ville søge mod toppen af staven og give p-type silicium og tungere atomer ville søge mod midten og give n-type. De vidste dog ikke, hvilke materialer der var tale om, før metallurger fra Bell fandt små mængder bor i p-type silicium; et meget let grundstof, som findes til venstre for kulstof i det periodiske system.

Hvad der forårsagede n-type silicium, viste sig at

June 25, 1946.

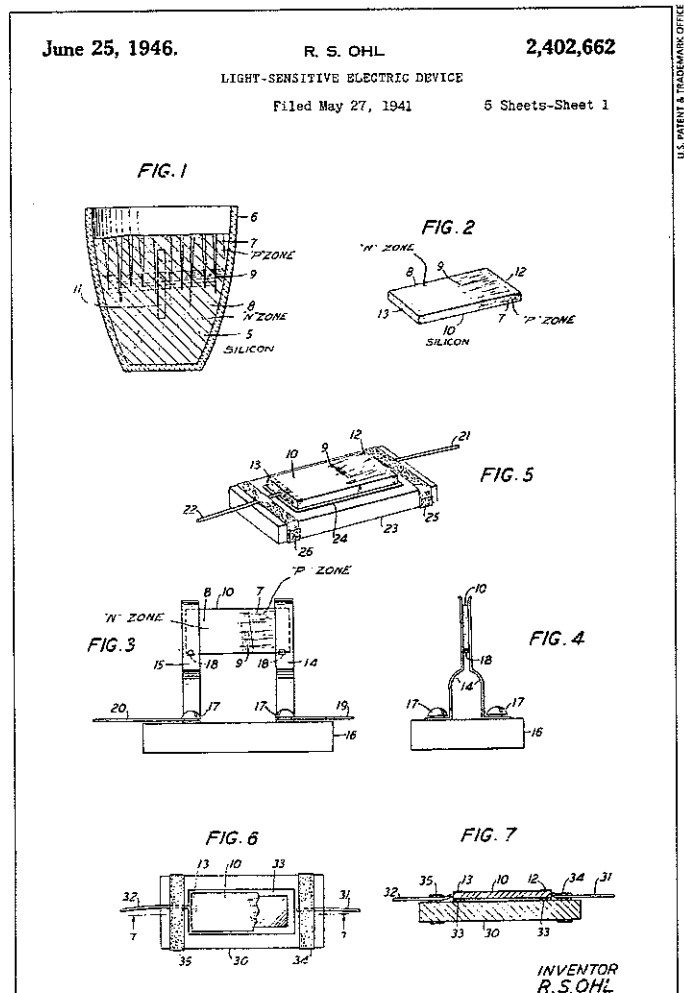
R. S. OHL

2,402,662

LIGHT-SENSITIVE ELECTRIC DEVICE

Filed May 27, 1941

5 Sheets-Sheet 1



være sværere at bestemme. Under deres forsøg, hvor de skar prøver ud med en diamantssav, havde de dog bemærket en speciel lugt, der mindede om lugten fra acetylenlamper, som dem man brugte på biler før de fik elektrisk lys. De indså, at lugten måtte stamme fra fosforgas, der igen opstod på grund af forurening med fosfor, et grundstof der er lidt tungere end silicium. Med deres næser havde de detekteret så små mængder fosfor, som det ikke var muligt at bestemme ved hjælp af massespektroskopi.

Således blev det gennem de tidlige 40'ere opdaget, at bor og aluminium, grundstoffer fra den tredje kolonne i det periodiske system lige til venstre for kul, silicium og germanium førte til P-type silicium, hvori mod grundstoffer fra den femte kolonne såsom fosfor, gav n-type.

Siliciumkrystal-detektorer blev en nøglekomponent i radar-modtagere under verdenskrigen. Der forgik samarbejde med England om at udvikle metoder til at fremstille 99.999 % ren silicium, der derefter blev tilført omhyggeligt kontrollerede mængder af bor eller aluminium - altsammen en betingelse for at fremstille pålidelige krystal-detektorer.

Men en ting holdt Kelly hemmelig: Opdagelsen af pn-junctionen. Resten af krigen var det kun en lille udvalgt skare af forskere hos Bell, der vidste noget.

Først i 1946 blev der indgivet fire patenter på siliciumdetektorer og pn-junctions i Russel Ohls navn. Kelly samlede i foråret en skare forskere, heriblandt Shockley, for at arbejde videre på Russels opdagelser. En af Shockleys første kommentarer var: 'Har du nogen sinde tænkt på, at hvis du anbragte en punkt-kontakt ved barrieren, så kunne du få kontrol over strømmen'. Tre uger senere begyndte Shockley at skrive sine tanker ned om, hvad han kaldte 'solid state valve', en forstærker bestående af en pn-junction. Det kan være, at en sådan forstærker kan laves af silicium med bor og fosfor forurening, konkluderede han den 16. april.

Hans efterfølgende forsøg gav ikke nogen målelig forstærkning, men det førte til, at et andet forskerhold gjorde opfindelsen af punkt-kontaktstransistoren: Brattain og John Bardeen i december 1947.

Shockley, der ikke var med i den gruppe, der gjorde denne opfindelse, følte sig forbigået og startede en heftig aktivitet, der førte til hans opfindelse af pn-junction transistoren den 23. januar 1948. Hans design bestod af to pn-junctions adskilt af en tynd stribe p-type silicium, der brugtes til at kontrollere strømmen. Da metoder til at lave sådanne bipolære junction transistorer i germanium blev forfinet 3 år

senere, var elektronikfabrikanter i USA og Japan ikke sene til at indse, at Shockleys metode var den rigtige. I dag er pn junctions en fundamental del af vores moderne halvlederindustri: Hvis transistoren er nervecellen, så er pn junctionen dens DNA.

Alligevel er navnet på dens opfinder stort set ukendt. Det skyldes dels hemmeligheder omkring krigstiden og Bell laboratoriets ivrighed med at forkynde de afledte opfindelser såsom transistoren og solcellen.

Flere detaljer omkring Russel Ohls arbejde kan læses i bogen 'Crystal Fire' af Michael Riordan og Lillian Hoddeson.

**Husk stof til OZ
februar senest den
22. januar**

DET TYKKE og DET TYNDE

Pope H 1000

H 1000 er det robuste, smidige og amatørvenlige 50 ohm kabel med "standardmål" og forbedrede data, set i forhold til RG 213.

Inderlederen er 2,62 mm tyk og omsluttet af kvælstofopskummet polyethylen. Herover er trukket en dobbelt skærm af kobberfolie og kobberflet.

Kappen er af sort PVC og måler 10,3 mm.

Pris pr. meter: 14,00 kr. incl. moms.

Rabat ved hele ruller.

BNC - UHF (PL 259) og N-konnekterer lagerføres til H 1000 / RG 213.

Data:

Tab ved 30 meter

	RG 58C/U
10 MHz	1,5 dB
28 MHz	2,7 dB
50 MHz	3,8 dB
144 MHz	5,3 dB
432 MHz	10,0 dB
1,3 GHz	19,4 dB

Max effekt 28 MHz:	350 W
Max effekt 144 MHz:	150 W
Max effekt 1,3 GHz:	50 W
Hastighedsfaktor:	0,66
Ydre diameter:	5,0 mm

Pope H 155

H 155 er det nye kabel fra Pope, der sender RG58 på pension som radioamatørernes foretrukne "tynde" 50 ohm kabel!

Inderlederen består af 19 x 0,28 mm omsluttet af kvælstofopskummet polyethylen. Herover er trukket en dobbelt skærm af alu-folie og fortinnet kobberflet. Knappen er af grå PVC og måler 5,4 mm.

Pris pr. meter: 6,25 kr. incl. moms.

Rabat ved hele ruller.

UHF (PL 259) og BNC konnekterer lagerføres til H 155 / RG 58.

	H 155	RG 213	H 1000
	0,9 dB	0,7 dB	0,3 dB
	1,4 dB	0,9 dB	0,6 dB
	2,0 dB	1,4 dB	0,8 dB
	3,5 dB	2,6 dB	1,4 dB
	6,0 dB	5,1 dB	2,6 dB
	10,7 dB	8,3 dB	4,7 dB

	700 W	1800 W	2200 W
	300 W	800 W	950 W
	100 W	200 W	300 W
	0,81	0,66	0,83
	5,4 mm	10,3 mm	10,3 mm

FÅS HOS

RADIOAMATØRERNES FORLAG APS

Klokkestøbervej 11, 5230 Odense M - Telefon 66 15 65 11 - Fax: 66 15 65 98