

MASTER

Experimenteel onderzoek naar 1/f-ruis in GaAs- en InSb-puntcontacten

Ortmans, L.H.F.

Award date:
1975

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

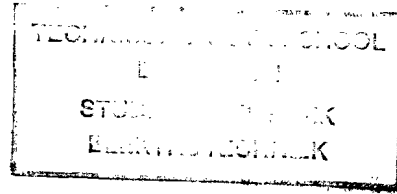
General rights

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

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

1909 bse

Technische Hogeschool Eindhoven,
Afdeling der Elektrotechniek,
Eindhoven.



Experimenteel onderzoek naar $1/f$ -ruis
in GaAs- en InSb-puntcontacten.

door

L.H.F. Ortmans

Verslag van het afstudeerwerk
verricht bij de vakgroep EV.

Coach: Ir. L.K.J. Vandamme

Afstudeerhoogleraar: Prof.Dr. F.N. Hooge.

1. Voorwoord	1
2. Inleiding	2
3. Kinematische opstelling	5
3.1. Eisen te stellen aan meetinstrumenten voor experimenten met puntcontacten	5
3.2. Beschrijving van de kinematische opstelling en de randapparatuur voor metingen op 77K	5
3.3. Quantitatieve analyse van de meetmethode	10
4. 1/f Ruis relaties in puntcontacten	13
4.1. Bulkruis van een puntcontact	13
4.2. Puntcontact met uniforme film	13
4.3. Film-gedomineerd puntcontact met parallel-capaciteit	15
4.4. Piekjes-gedomineerde contacten	16
5. Mechanische aspecten van GaAs- en InSb-puntcontacten	23
5.1. Bepaling van de Youngsmodulus E van GaAs en InSb	23
5.2. Drukafhankelijkheid van ρ_{bulk} van InSb	24
6. Ohmse contacten op GaAs	26
6.1. Eisen voor goede ohmse contacten	26
6.2. Literatuuroverzicht voor contacten op GaAs	26
6.3. Interpretatie van eigen experimenten	27
7. Experimenten met GaAs	29
7.1. Metingen aan GaAs-puntcontacten (n-type)	29
7.1a. Niet-geformeerde constricties	29
7.1b. Geformeerde constricties	36
7.2. Metingen aan homogene cilinders (n- en p-type) met geformeerde metallische contacten	40
8. Experimenten met InSb-puntcontacten	46
8.1. Preparatie van de cilinders	46
8.2. Metingen aan InSb-puntcontacten met oxydehuiden op 300K	47
8.3. Metingen aan InSb-puntcontacten met de kinematische opstelling op 77K	50
9. Samenvattingen en conclusies	54
10. Literatuurlijst	56

1. VOORWOORD

Gaarne wil ik dankzeggen aan Prof.Dr. F.N. Hooge voor de getoonde belangstelling en Ir. L.K.J. Vandamme voor de begeleiding en waardevolle discussies tijdens het afstudeerwerk.

De heer H. Treur van de Afdelingswerkplaats wordt bedankt voor de technische adviezen, C.J.A. Martens en J.A.F. Bongers voor het tekenen en construeren van allerlei benodigde apparatuur, in het bijzonder de kinematische opstelling, die zowel op 300K als 77K aan alle gestelde eisen voldoet.

De heer C.J.H. Heijnen van de vakgroep EEA wordt bedankt voor de assistentie bij het maken van microscoopfoto's van de geformeerde GaAs-oppervlakken.

Tenslotte een woord van dank aan Mej. Ans van der Linden voor de verzorging van het verslag.

Loe Ortmans,
Februari 1975.

2. INLEIDING

In Hooge's publicaties [1], [2], [3] wordt gesteld dat 1/f ruis van homogene samples geschreven kan worden als

$$\left\langle \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 \right\rangle = C \frac{\Delta f}{f} \quad (1)$$

met

$$C = \frac{\alpha}{N} \quad (2)$$

V is de gemiddelde spanning over het sample als er een constante stroom door vloeit, $\langle (\Delta V)^2 \rangle$ de gemiddelde fluctuaties in de spanning V tengevolge van de stroomdoorgang, C de 1/f ruis-intensiteit, $\alpha (= 2 \times 10^{-3})$ een experimentele constante, N het totale aantal vrije ladingsdragers, f de frequentie en Δf de bandbreedte.

Om experimentele redenen wordt er voor metalen een meetconfiguratie gebruikt van twee gekruiste cilinders die met een bekende kracht F op elkaar gedrukt worden. Aan deze dubbele constrictie worden gemeten de 1/f ruis-intensiteit C en de contactweerstand R.

Hoppenbrouwers en Hooge [4], [5] toonden aan dat de 1/f ruis van zo'n puntcontact fysisch dezelfde is als de bulkruis.

Vandamme [6] verklaart de afwijkingen voor halfgeleider-puntcontacten (Ge en Si) door de 1/f ruis van een uniforme natuurlijke oxydehuid als bulk-effect in de ruisrelaties te betrekken.

Zowel CR-grafieken als RF-grafieken tonen als onafhankelijke experimenten, welke situatie in werkelijkheid optreedt: constrictie-gedomineerd of film-gedomineerd (tabel I).

Tabel I

	Constrictie-gedomineerd puntcontact	Film-gedomineerd puntcontact
Ruis tegen weerstand	$C \sim R^3$	$C \sim R$
Weerstand tegen kracht	$R \sim F^{-1/3}$	$R \sim F^{-2/3}$

Vandamme geeft een quantitative beschrijving met realistische aannamen van de dikte ($= 1/2t$) van de film en de beweeglijkheid van de ladingsdragers (μ_{film}) in de oxydehuid.

In dit afstudeerverslag worden resultaten besproken van experimenteel 1/f ruis-onderzoek aan GaAs en InSb.

De aanleiding tot het onderzoek aan GaAs-puntcontacten is Mircea's [7] publicatie geweest over 1/f ruis-metingen aan GaAs-n⁺nn⁺ epitaxiale weerstanden. Hij stelt hierin dat 1/f ruis toch een oppervlakte-effect is.

Er werd verondersteld, dat constricties geschikte configuraties waren om ook voor GaAs 1/f ruis als bulk-effect aan te tonen. Dit is niet mogelijk gebleken. Uit gemeten RF-grafieken volgt dat het puntcontact film-gedomineerd is met een soortelijke weerstand van de film $\rho_{\text{film}} = 10^8 - 10^{11} \Omega\text{cm}$.

De CR-grafiek, die om experimentele redenen slechts spanningsgestuurd is op te nemen, geeft $C \approx 10^{-6}$ over meer dan 3 decaden in R. Dit is niet in overeenstemming met tabel I. De IV-karakteristieken van het puntcontact zijn niet ohms.

De hoogohmige oxydehuid op GaAs is ook de oorzaak van de moeilijkheden bij het maken van laagruisende contacten op GaAs. Vandamme [8] vermeldt een werkwijze waarmee zowel op n- als p-GaAs zulke contacten aangebracht zijn. Voor zijn homogene preparaten geldt met (2) $\alpha_{\text{exp}} \approx 2 \cdot 10^{-3}$. In tegenstelling tot Mircea concludeert Vandamme dat de 1/f ruis voor GaAs als bulk-effect is aangetoond.

De 1/f ruis van halfgeleider-puntcontacten is zeer hoog. Hierdoor is het niet noodzakelijk dat de metaal-halfgeleiderovergang zo weinig ruist dat voor de cilinders (2) geldt. $\alpha_{\text{exp}} \approx 1-1000$ is reeds voldoende. De metaal-halfgeleiderovergangen op de uiteinden van de cilinders worden ohms door formeren. Dit is het ontladen van een condensator over de metallische contacten. Er ontstaan in de oxydehuid een aantal k parallele kanaaltjes, waardoor het metaal direct contact maakt met de halfgeleider. De 1/f ruis van deze contacten is te beschrijven met een model bestaande uit k parallele contactspots met een gemiddelde straal a, die ongecorreleerd ruisen, zoals Hoppenbrouwers en Hooge [5] beschrijven.

Vaker formeren met toenemende condensatorspanning doet het aantal kanaaltjes en de gemiddelde diameter toenemen.

De gemeten 1/f ruis-intensiteit C en de weerstand R van de metallische contacten leiden met het model tot $k=200-2000$ en $a=10^{-5}-10^{-4}$ cm.

Foto's van de oppervlakken, waar het metallisch contact opgezeten heeft, tonen duidelijk een aantal piekjes en putjes. De oxydehuid is doorgeprikt, tengevolge van plaatselijke verdichting van de veidsterkte. Een schatting uit

microscopfoto's van het aantal k klopt met de berekende waarden uit het eenvoudige ruismodel.

Tenslotte zijn er experimenten gedaan met geformeerde GaAs-puntcontacten (gekruiste cilindergeometrie). Een condensator wordt ontladen over het contactoppervlak. De contactweerstand R wordt 10^4 - 10^6 lager. De IV-karakteristiek van het puntcontact is ohms. De gemeten CR- en RF-grafieken tonen een film-gedomineerd gedrag met realistische aannamen voor ρ_{film} en μ_{film} . Een model met k -parallele contactspots kan worden verworpen, omdat het berekende aantal $k \ll 1$ is.

Een aantal publicaties [9] t/m [14] over de drukafhankelijkheid van de soortelijke weerstand ρ_{bulk} van InSb hebben geleid tot het onderzoek aan InSb-puntcontacten.

De drukken, die met de meetapparatuur voor de puntcontacten gerealiseerd kunnen worden, liggen in het gebied waarin alle auteurs een toenemende ρ_{bulk} vinden met toenemende druk. Zowel in de RF- als in de CR-grafiek kan de invloed hiervan worden bekeken.

Experimenten op 300K tonen echter zowel in de CR- als in de RF-grafiek een film-gedomineerd gedrag voor krachten van 10^{-2} - 10^{+2} N, met realistische aannamen voor ρ_{film} en μ_{film} . De drukafhankelijkheid kan op kamertemperatuur niet worden onderzocht.

Er is een meettoestel met kinematische oplegging ontwikkeld waarmee zowel op kamertemperatuur (300K) als in vloeibare stikstof (77K) gemeten kan worden.

Hiermee zijn zowel voor p- als n-type InSb puntcontactmetingen verricht.

Vandamme [8] heeft reeds aangetoond dat zowel voor p- als n-type InSb op 300K en 77K geldt dat $\alpha_{\text{exp}} \approx 2 \times 10^{-3}$. Hooge en Hoppenbrouwers [15] toonden hetzelfde aan voor opgedamppte goudlaagjes; zelfs bij 4,2K geldt $\alpha_{\text{exp}} \approx 2 \times 10^{-3}$. De $1/f$ ruis is onafhankelijk van de temperatuur.

De CR- en de RF-grafiek bij 77K geven zowel bij n- als bij p-type InSb een bulk-gedomineerd gedrag te zien. Met ρ_{bulk} en n_{bulk} (respectievelijk p_{bulk}) uit Hall-metingen op 77K met de methode van Van der Pauw [16] volgen de CR-punten nagenoeg Hooge's lijn [4]. Dit zou betekenen, dat de ρ_{bulk} op 77K niet drukafhankelijk is.

De RF-grafieken geven een ρ_{bulk} die groter is dan uit vierpuntsmetingen op 77K, hetgeen toch op een drukafhankelijkheid zou wijzen. Ook kan het aanrakingsoppervlak anders zijn dan wordt verondersteld. Uit de CR- en RF-grafieken kunnen realistische waarden voor μ_{film} en ρ_{film} worden afgeleid voor oxydehuiden op 77K.

3. KINEMATISCHE OPSTELLING

3.1. Eisen te stellen aan meetinstrumenten voor experimenten met puntcontacten

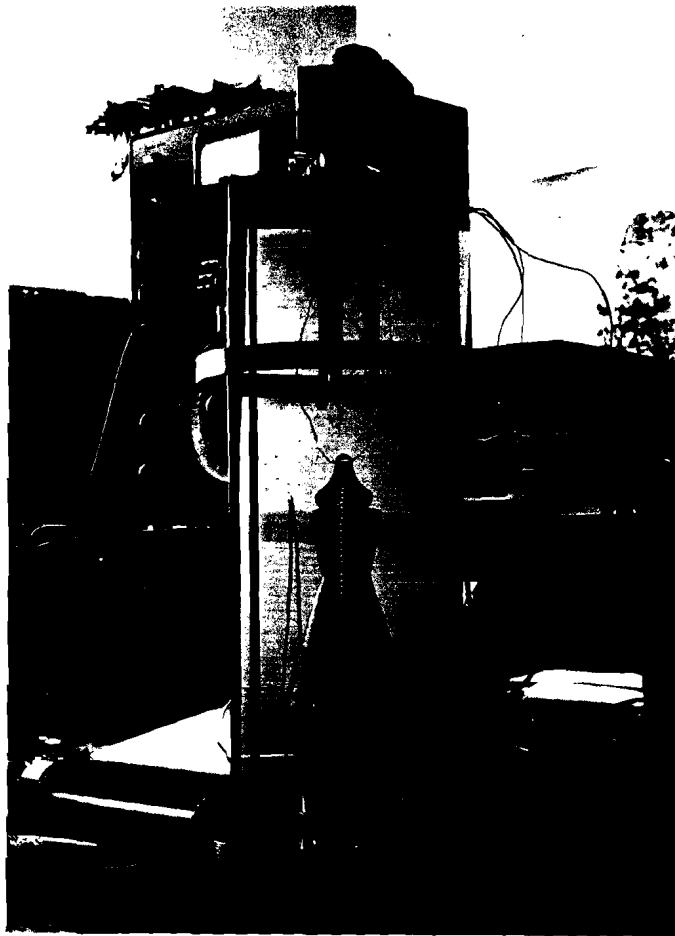
Deze kunnen tot de volgende punten worden samengevat:

1. Het instrument moet geschikt zijn om vierpuntsmetingen aan gekruiste cilinders te doen;
2. de kracht F moet instelbaar zijn over 4 decaden. Dit geeft voor bulk-gedomineerde puntcontacten variaties in R over meer dan 1 decade en voor film-gedomineerde puntcontacten over bijna 3 decaden;
3. de ingestelde kracht moet niet verlopen in de tijd. Het instellen van een nieuwe kracht moet zonder schokken geschieden;
4. de kracht moet te meten zijn binnen 10%;
5. het contactpunt mag niet verschuiven;
6. er moet een mogelijkheid zijn om te meten bij verschillende temperaturen.

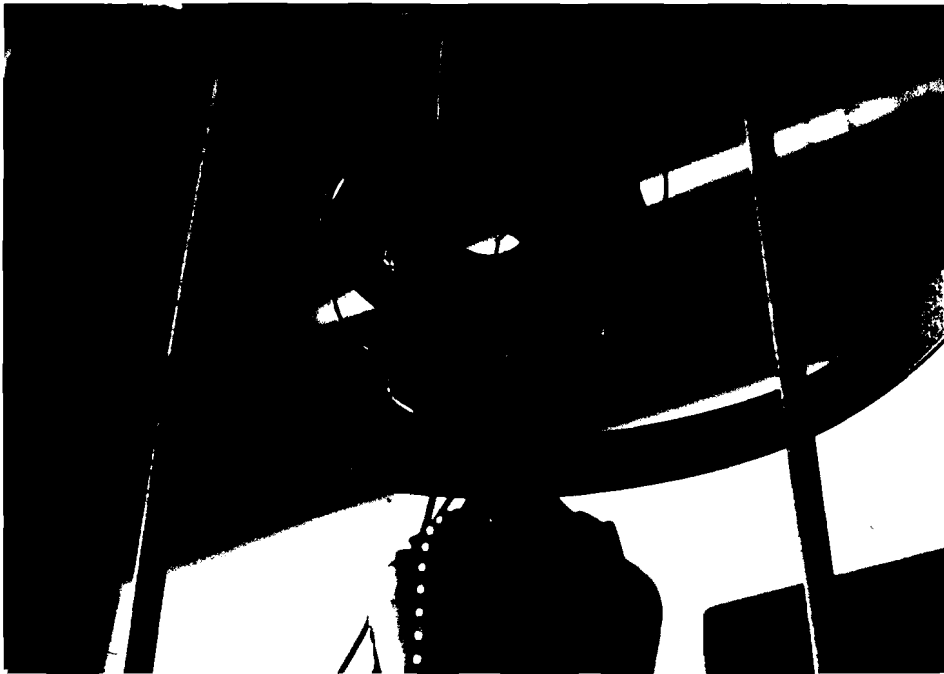
3.2. Beschrijving van de kinematische opstelling en de randapparatuur voor metingen op 77K

De kinematische opstelling (figuur 1) is ontworpen voor metingen aan puntcontacten van gekruiste cilinders die in twee geharde gootjes worden bevestigd. De ene wordt gemonteerd tegen een star plateau (figuur 2), de andere op een vrijhangende schotel (figuur 3). Op de laatste zijn een V-gleuf en een tetraeder-vormige drager gemonteerd. Indien de vrijhangende schotel omhoog getrokken wordt, komen de kogels, die tegen het starre plateau zijn gemonteerd, in het tetraeder en de V-gleuf te zitten. Hierdoor worden 3 vrijheidsgraden van translatie en 2 van rotatie opgeheven. De 6e vrijheidsgraad wordt opgeheven op het moment dat de cilinders elkaar raken. Door deze kinematische oplegging [17] verschuift het raakpunt van de gekruiste cilinders niet meer.

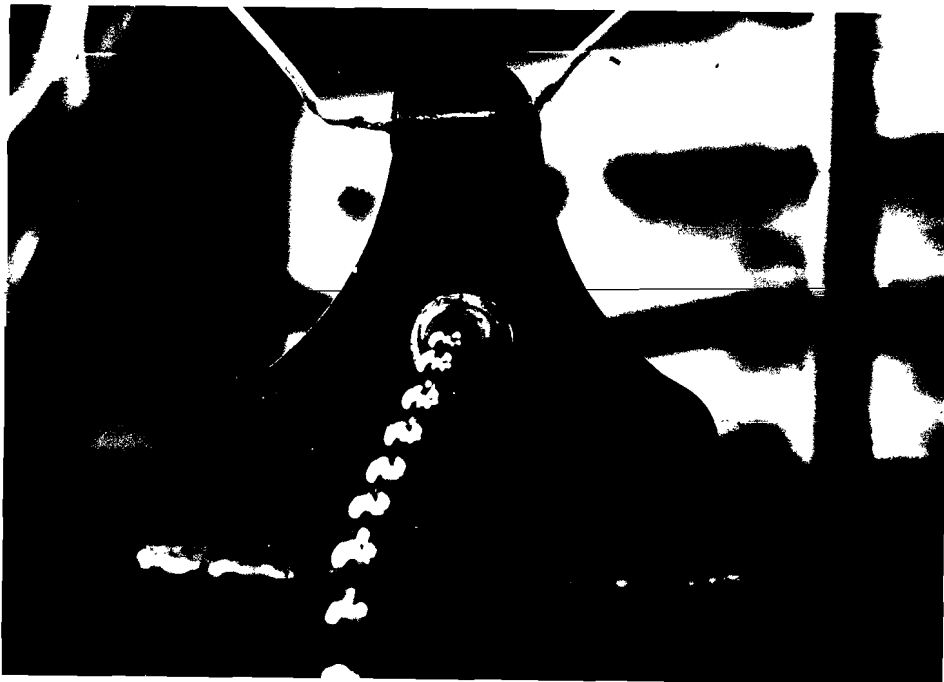
De zwaartepunten van de kogels in de V-gleuf en tetraeder en het raakpunt van de cilinders liggen op de hoekpunten van een gelijkzijdige driehoek. In het zwaartepunt hiervan trekken we met een bekende kracht in verticale richting. Op het puntcontact zal $1/3$ van deze totale kracht werken. Deze kracht wordt gemeten met 4 rekstrookjes (TML Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd., type FCA-3), die in een brug van Wheatstone geschakeld zijn. Dit geeft temperatuurcompensatie [18] en vergroot de gevoeligheid met een factor 2.



figuur 1: Kinematische opstelling met ijkgewichten.



figuur 2: Détailopname van het starre plateau met twee kogels en één cilinder.



figuur 3: Détailopname van vrijhangende schotel met tetraeder, V-gleuf en één cilinder.

De rekstrookjes zijn geplakt op een stalen strip van 140μ dikte en $0,7$ cm lengte. De doorsnede is zodanig gekozen dat we bij de grootste kracht (300N) nog binnen de grenzen van de elastische vervorming zitten.

De trekrichting bestaat uit een trekstang met schroefdraad (spoed $0,75$ mm), een wormoverbrenging (1:50) en een reductietandwiel (1:4). Met een instelknop op de tandwielkast wordt de kracht aangebracht.

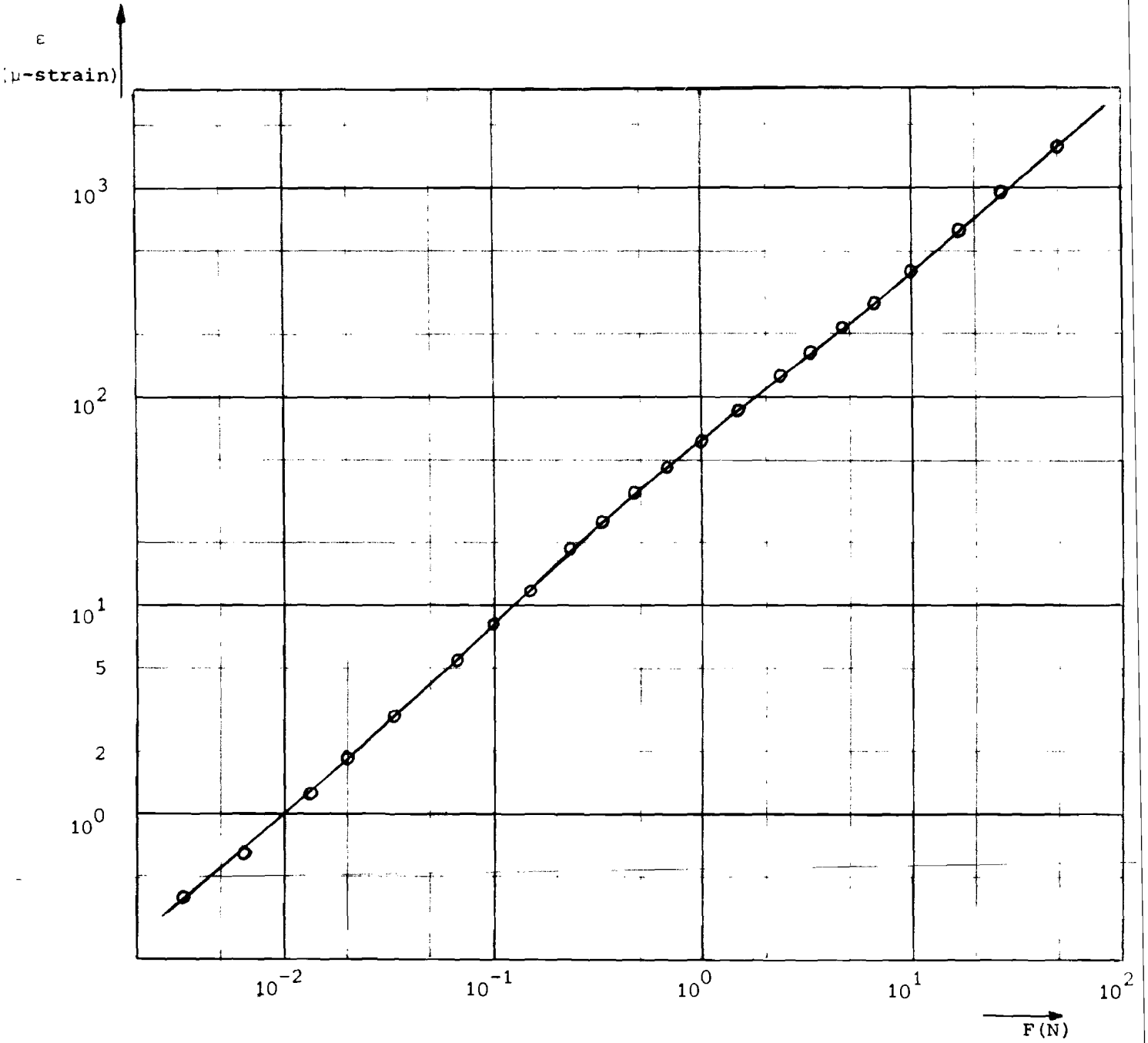
De ijkgrafiek (figuur 4) is opgenomen met gewichten (figuur 1) die met een schaal aan het kettinkje gehangen zijn. Horizontaal staat uit de totale kracht, gedeeld door drie. Verticaal is uitgezet de relatieve rek ϵ in μ -strain gemeten met de rekmeter. De uitslag op de rekmeter vertalen we in een kracht F (10^{-2} - 10^2N) op de cilinders.

De vrijhangende schotel is zodanig uitgebalanceerd, dat het zwaartepunt nagenoeg samenvalt met het ophangpunt aan het kettinkje. Het ophangpunt is in verticale richting instelbaar.

De schotel kan zich onder een hoek instellen ten opzichte van het starre plateau, als de cilinders niet de vereiste diameter van 5 mm hebben. Bovendien kan door een aantal plaatjes van verschillende dikte het verschil in diameter gecompenseerd worden tot cilinders van 4 mm.

Metingen op 77K worden uitgevoerd in een dewarvat, dat met een pertinax verloopring wordt afgesloten. Drie kolommen van 160 mm zorgen ervoor dat de rekstrookjes niet met de vloeibare stikstof in aanraking komen. Om de rekstrookjes is een oventje aangebracht. Met een thermostaat regelen we de omgevingstemperatuur op een constante waarde (≈ 20 à 30°C). De temperatuur van de voeler moet net beneden de ingestelde waarde blijven. Bij een aan-uit-regeling zijn de temperatuurfluctuaties zo groot dat uitslag op de μ -strainmeter een cyclus van 4μ -strain beschrijft. Beneden 10μ -strain zijn de meetpunten dan niet betrouwbaar.

Het regelen van een constante omgevingstemperatuur is een tijdrovende zaak. De voedingsspanning van het oventje moet ingesteld worden tussen 10 en 14V . Dit hangt af van de warmtelek, die groter is naarmate het stikstofniveau in het dewarvat hoger staat. Bij de juiste spanning verloopt de μ -strainmeter niet meer, en kan worden gemeten vanaf het 10μ -strain bereik. Komen de rekstrookjes toch in aanraking met de vloeibare stikstof, dan moeten ze vervangen worden. De elastische eigenschappen van de lijm gaan sterk achteruit. Van de nieuwe rekstrookjes moet een nieuwe ijkgrafiek opgenomen worden.



figuur 4: IJkgrafiek kinematische opstelling.

Het is onmogelijk om simultaan ruis-en krachtmetingen te doen. De draag-
golffrequentie (5000Hz) van het meetsignaal voor de rekmetingen verstoort de
ruismetingen. Voor ruismetingen schakelen we de μ -strain-brug uit. We laten
de voeding van het oventje aan om de rekstrookjes op 300K te houden.

3.3. Quantitatieve analyse van de meetmethode

De vrijhangende schotel wordt tweedimensionaal beschouwd in de situatie,
dat deze tegen het starre plateau aanzit (figuur 5). De kracht F grijpt aan op
het puntcontact. F_y en F_x zijn de resultanten van de krachten op de V-gleuf
en het tetraeder. De kracht K wordt met de rekstrookjes gemeten en met
de trekrichting aangebracht. S is de afstand van het zwaartepunt O tot de
hoekpunten van de gelijkzijdige driehoek. De schotel maakt een hoek α_1 met
het starre plateau. Het gewicht G van de schotel grijpt op een afstand s van O
aan door het gewicht van de cilinder. Het aangrijppunt van K ligt een afstand u
boven O.

De translatie-voorwaarden leveren op

$$F + F_y = (K - G) \cos \alpha_1 \quad (3)$$

$$F_x = (K - G) \sin \alpha_1 \quad (4)$$

De rotatie-voorwaarde ten opzichte van O leidt tot

$$F - F_y = -G \frac{S}{S} \cos \alpha_1 + K \frac{u}{S} \sin \alpha_1 \quad (5)$$

Uit (3) en (5) volgen:

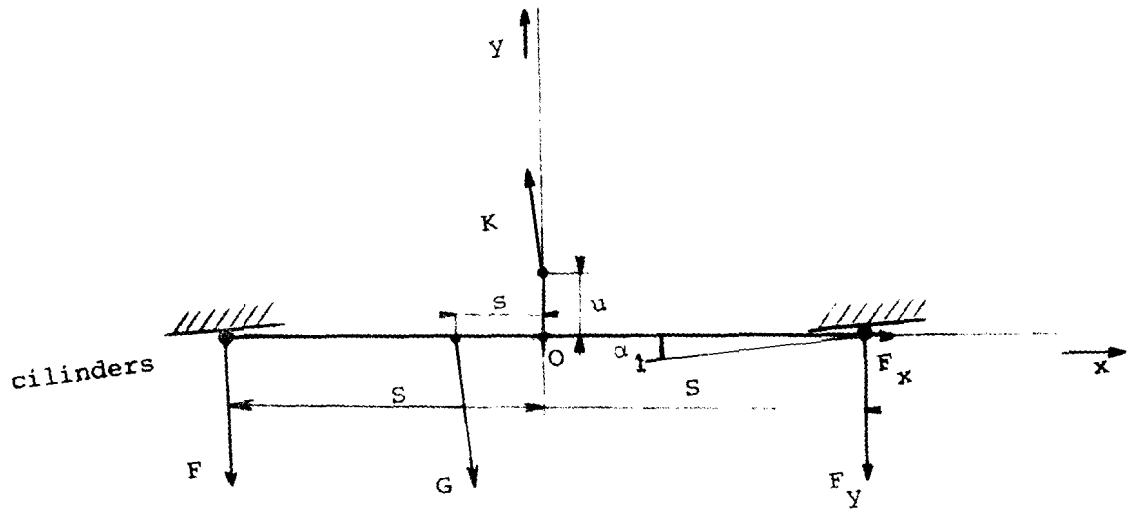
$$F = \frac{K}{2} (\cos \alpha_1 - \frac{u}{S} \sin \alpha_1) - \frac{G}{2} \cos \alpha_1 (1 + \frac{S}{S}) \quad (6)$$

$$F_y = \frac{K}{2} (\cos \alpha_1 + \frac{u}{S} \sin \alpha_1) - \frac{G}{2} \cos \alpha_1 (1 - \frac{S}{S}) \quad (7)$$

De μ -strainmeter wordt op nul gezet als de cilinders elkaar net raken. De weer-
stand daalt dan van oneindig naar een eindige waarde. Dit kan binnen
0,5 μ -strain geschieden. Dan geldt $F=0$. De kracht op de rekstrookjes is K_1 .

Vergelijking (6) wordt:

$$0 = \frac{K_1}{2} (\cos \alpha_1 - \frac{u}{S} \sin \alpha_1) - \frac{G}{2} \cos \alpha_1 (1 + \frac{S}{S}) \quad (8)$$



figuur 5: Tweedimensionale schets van de vrijhangende schotel met kinematische oplegging.

Vanuit deze toestand wordt een extra kracht ΔK aangebracht

$$K = \Delta K + K_1 \quad (9)$$

Substitutie in (4), (6) en (7) van (8) en (9) geeft

$$F_x = (\Delta K + K_1 \frac{u}{S} \tan \alpha_1 + G \frac{S}{S}) \sin \alpha_1 \quad (10)$$

$$F_y = \frac{\Delta K}{2} (\cos \alpha_1 + \frac{u}{S} \sin \alpha_1) + K_1 \frac{u}{S} \sin \alpha_1 + G \frac{S}{S} \cos \alpha_1 \quad (11)$$

$$F = \frac{\Delta K}{2} (\cos \alpha_1 - \frac{u}{S} \sin \alpha_1) \quad (12)$$

Stel nu: $\alpha_1 = 3^\circ$, $u = 2 \text{ mm}$, $s = 2 \text{ mm}$ en $S = 20 \text{ mm}$ als in de praktische situatie voorkomende parameters. Stel bovendien $K_1 \approx G$, dan volgt

$$\begin{aligned} F_x &\approx (\Delta K + 0,1G) 0,05 \\ F_y &\approx \frac{\Delta K}{2} + 0,1G \\ F &\approx \frac{\Delta K}{2} \end{aligned} \quad (13)$$

Door een geschikte compensatiemethode komt het gewicht G van de schotel niet in (12) voor. De correctieterm is zo klein dat (13) over het gehele gebied van in te stellen krachten geldig is.

Voor drie steunpunten gaan (12) en (13) over in

$$F = \frac{\Delta K}{3} (\cos \alpha_1 - \frac{2u}{S} \sin \alpha_1) \quad (14)$$

$$F \approx \frac{\Delta K}{3} \quad (15)$$

Conclusie:

Voor de kinematische opstelling geldt dus, dat de kracht F op het puntcontact de totale kracht K gedeeld is door drie vanaf de nulinstelling.

4. 1/f RUIS-RELATIES IN PUNTCONTACTEN

In dit hoofdstuk worden een aantal formules gegeven zonder afleiding. Steeds wordt verwezen naar de betreffende publicaties waarin dit wel wordt gedaan.

4.1. Bulkruis van een puntcontact

Een geschikte configuratie voor het meten van 1/f ruis is een puntcontact van twee gekruiste cilinders, die op elkaar gedrukt worden. De contactweerstand R van deze constrictie is volgens Holm [19]

$$R = \frac{\rho_{\text{bulk}}}{\pi a} \quad (16)$$

Voor een puntcontact geven Hooge en Hoppenbrouwers [4] een uitdrukking voor de 1/f ruis analoog aan (1)

$$\left\langle \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 \right\rangle = \left\langle \left(\frac{\Delta R}{R} \right)^2 \right\rangle = \frac{\alpha \pi^2 R^3}{20 n_{\text{bulk}}^3 \rho_{\text{bulk}}} \frac{\Delta f}{f} \quad (17)$$

De 1/f ruis-intensiteit wordt

$$C = \frac{\alpha \pi^2 R^3}{20 n_{\text{bulk}}^3 \rho_{\text{bulk}}} \quad (18)$$

4.2. Puntcontact met uniforme film

Vandamme [6] veronderstelt dat iedere halfgeleider een natuurlijke oxydehuid bezit met een dikte 1/2t (figuur 6). (16) gaat over in

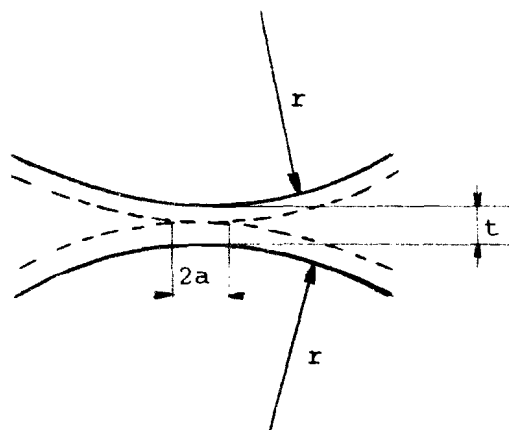
$$R = \frac{\rho_{\text{bulk}}}{\pi a} + \frac{t \rho_{\text{film}}}{\pi a^2} \quad (19)$$

Met de parameter

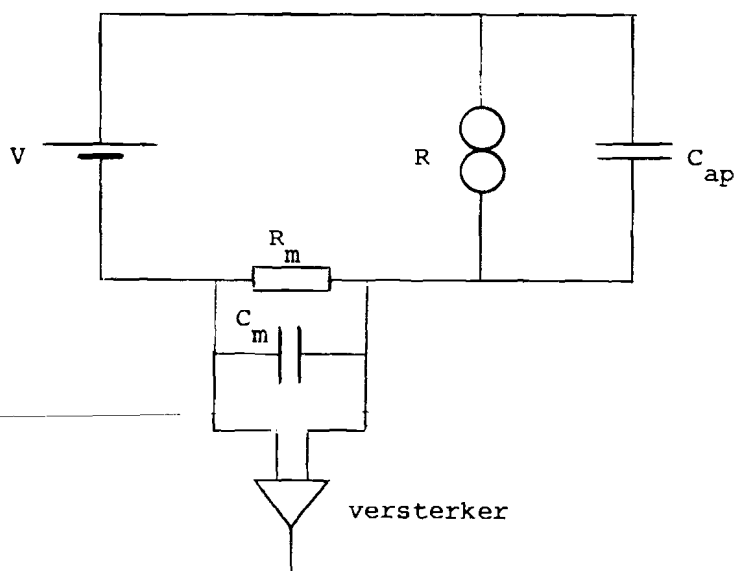
$$\phi = \frac{R_{\text{film}}}{R_{\text{constr.}}} = \frac{t \rho_{\text{film}}}{a \rho_{\text{bulk}}}$$

wordt (19)

$$R = \frac{\rho_{\text{bulk}}}{\pi a} (1 + \phi) \quad (20)$$



figuur 6: Puntcontact met uniforme film.
Niet op schaal getekend.



figuur 7: Spanningsgestuurde ruisopstelling voor metingen aan
hoog-ohmige puntcontacten met parallelcapaciteit.

De 1/f ruis-intensiteit gaat over in

$$C = \frac{\alpha \pi^2 R^3}{20 n_{\text{bulk}} \rho_{\text{bulk}}^3} \left(\frac{1}{1 + \phi} \right)^5 \left(1 + 20 \phi \frac{n_{\text{bulk}} \rho_{\text{film}}}{n_{\text{film}} \rho_{\text{bulk}}} \right) \quad (21)$$

4.3. Film-gedomineerd puntcontact met parallel-capaciteit

Is de contactweerstand $R > 10^6 \Omega$, dan kan de 1/f ruis om experimentele redenen slechts spanningsgestuurd gemeten worden (figuur 7). Voor $R_m < 20R$ geldt:

$$\left\langle \left(\frac{\Delta R}{R} \right)^2 \right\rangle = \left\langle \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 \right\rangle = \left\langle \left(\frac{\Delta V_m}{V_m} \right)^2 \right\rangle = \frac{\alpha}{N} \frac{\Delta f}{f} \quad (22)$$

V_m is de spanning over de meetweerstand R_m , $\langle (\Delta V_m)^2 \rangle$ de gemiddelde fluctuaties in V_m tengevolge van de weerstandsfluctuaties in R .

Als er een capaciteit C_{ap} parallel aan het puntcontact staat dan geldt:

$$\left\langle \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 \right\rangle = \frac{\alpha}{N} \frac{1}{(1 + (2\pi f \tau_p)^2)^2} \frac{\Delta f}{f} \quad (23)$$

met $\tau_p = RC_{ap}$ en $V^2 = I^2 |Z|^2$ waarin $|Z|^2 = R^2 / (1 + (2\pi f \tau_p)^2)$.

Met de parallelcapaciteit C_m van het meetsysteem volgt voor een film-gedomineerd puntcontact

$$\left\langle \left(\frac{\Delta V_m}{V_m} \right)^2 \right\rangle = \frac{\alpha R}{n_{\text{film}} \rho_{\text{film}} t^2} \frac{1}{(1 + (2\pi f \tau_p)^2)^2} \frac{1}{(1 + (2\pi f \tau_m)^2)} \frac{\Delta f}{f} \quad (24)$$

$\tau_m = R_m C_m$ de tijdconstante van het meetsysteem.

Voor $\tau_p \gg \tau_m$ volgt dat het 1/f spectrum voor $\tau_p = 1$ overgaat naar $1/f^3$.

De achtergrondruis van het meetsysteem bestaat uit de ruis van de versterker en die van de parallelschakeling van R , C_{ap} , R_m en C_m .

De bijdrage van de versterker wordt per eenheid van bandbreedte $4k_B T R_{eq} (1 + f_o/f)$. R_{eq} is een weerstand die dezelfde thermische ruis geeft als de versterker. De term f_o/f vertegenwoordigt de 1/f ruis van de versterker. Voor $f = f_o$ is de 1/f ruis gelijk aan de thermische ruis.

~~Voor~~ De thermische ruis van de parallelschakeling is $4k_B \text{Re}(Z_p)$. $\text{Re}(Z_p)$ is het reële deel van de impedantie Z_p .

k_B is de constante van Boltzmann, T de absolute temperatuur. De totale bijdrage per eenheid van bandbreedte is

$$\frac{\langle (\Delta V)^2 \rangle}{\Delta f} = 4kT \left(\frac{R_p}{1 + (2\pi f\tau)^2} + R_{eq} \left(1 + \frac{f_0}{f} \right) \right) \quad (25)$$

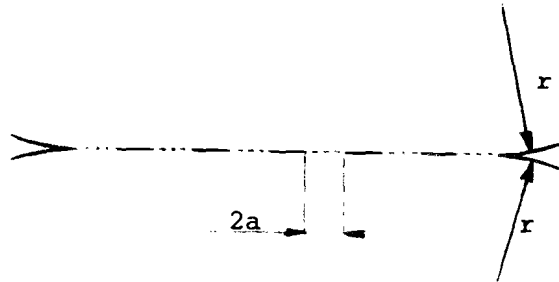
met

$$R_p = \frac{RR_m}{R + R_m} \text{ en } \tau = R_p (C_{ap} + C_m)$$

4.4. Piekjes-gedomineerde contacten

1. parallelschakeling van k gelijke contactspots

De gekruiste cilinders kunnen ook op een aantal discrete plaatsen k elektrisch contact maken. De straal van de contactspot is a (figuur 8)



figuur 8: piekjes gedomineerd puntcontact; $k\pi a^2 \ll 0,1\pi r^2$.
Niet op schaal getekend.

Door Hooge en Hoppenbrouwers [5] is een uitdrukking hiervoor afgeleid analoog aan (18)

$$C = \frac{k^2 \alpha \pi^2 R^3}{20 n_{\text{bulk}} \rho_{\text{bulk}}} \quad (26)$$

Voor de contactweerstand R geldt volgens Holm [20] onder de voorwaarde $k\pi a^2 \ll 0,1\pi r^2$

$$R = \frac{\rho_{\text{bulk}}}{k\pi a} \quad (27)$$

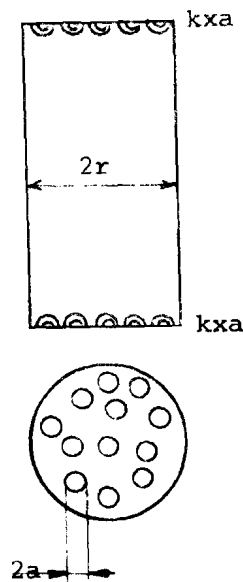
Uit (26) en (27) kunnen expliciete uitdrukkingen worden afgeleid voor k en a

$$k^2 = \frac{20}{\pi} \left(\frac{n_{\text{bulk}} C}{\alpha} \right) \left(\frac{\rho_{\text{bulk}}}{R} \right)^3 \quad (28)$$

$$a^2 = \frac{1}{20} \left(\frac{\alpha}{n_{\text{bulk}} C} \right) \left(\frac{R}{\rho_{\text{bulk}}} \right) \quad (29)$$

Een combinatie van C- en R-waarden kan worden geïnterpreteerd als een aantal contactpunten k met gemiddelde straal a .

Dit piekjes-gedomineerd puntcontact is vergelijkbaar met de situatie in figuur 9. Op de uiteinden van de cilinder zijn metallische contacten aangebracht die op een aantal discrete plaatsen k met de halfgeleider-contactspotjes met straal a geven. De metaal-halfgeleider-overgang wordt beschreven met een aantal parallelle constricties, die ongecorreleerd ruisen.



figuur 9: Cilinder met metallische contacten van k parallelle contactspots en gemiddelde straal a .

Steeds wordt er verondersteld dat de effectieve volumina van de constricties elkaar niet overlappen. De ruis in het kristal, waar de veldsterkte homogeen is, is te verwaarlozen ten opzichte van de ruis van de ohmse contacten.

2. parallelschakeling van grote en kleine contactspots

Ook is er mogelijk een situatie met $k \times a$ en $\gamma k \times \beta a$ constricties. In de veronderstelling dat elk contactgebiedje voldoende stroomgestuurd is (constante deelstromen) geldt [21]:

$$\left\langle \left(\frac{\Delta G}{G} \right)^2 \right\rangle = \frac{\pi^2 \alpha \sum_{i=1}^n R_i}{20 n_{\text{bulk}}^3 \rho_{\text{bulk}} \left(\sum_{i=1}^n G_i \right)^2} \frac{\Delta f}{f} \quad (30)$$

met

$$R_i = \frac{\rho_{\text{bulk}}}{\pi a} \quad \text{en} \quad G_i = \frac{1}{R_i} \quad \text{volgt}$$

$$\sum_{i=1}^n R_i = k R_i (1 + \frac{\gamma}{\beta}) \quad (31)$$

$$\sum_{i=1}^n G_i = \frac{k}{R_i} (1 + \gamma \beta) \quad (32)$$

Substitutie van (31) en (32) in (30) leidt tot

$$\left\langle \left(\frac{\Delta G}{G} \right)^2 \right\rangle = \frac{\pi^2 \alpha R_i^3}{20 n_{\text{bulk}}^3 \rho_{\text{bulk}} \cdot k} \frac{(1 + \gamma/\beta)}{(1 + \gamma \beta)^2} \frac{\Delta f}{f} \quad (33)$$

Voor de contactweerstand R_i die gemeten wordt, geldt

$$R = \frac{R_i}{k(1 + \gamma \beta)} \quad (34)$$

Na substitutie in (33) van (34) tenslotte:

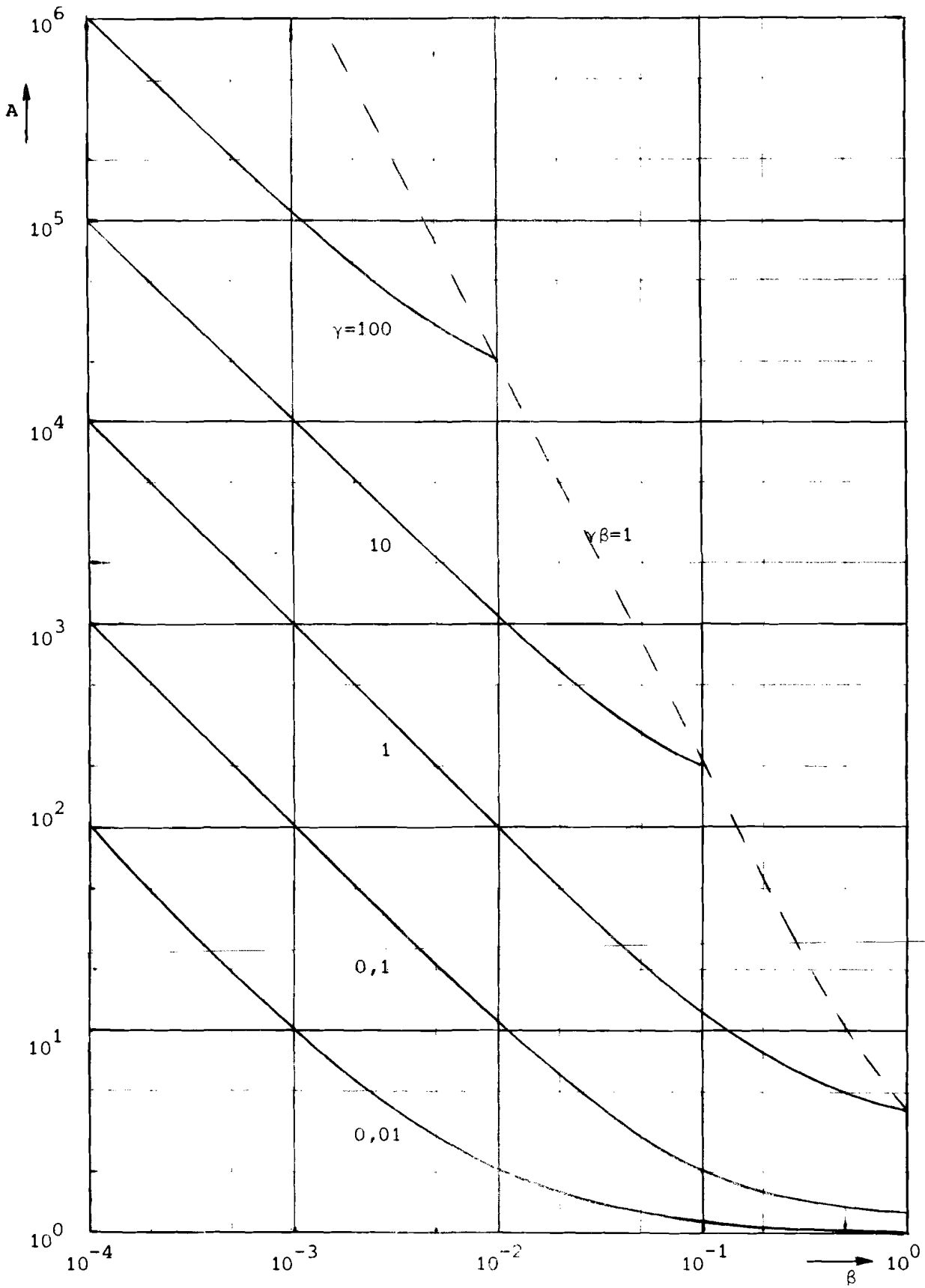
$$\left\langle \left(\frac{\Delta G}{G} \right)^2 \right\rangle = \frac{k^2 \pi^2 \alpha R^3}{20 n_{\text{bulk}}^3 \rho_{\text{bulk}}} (1 + \gamma(\gamma + \beta + \frac{1}{\beta})) \frac{\Delta f}{f} \quad (35)$$

Onder de voorwaarde $\gamma \beta \leq 1$ verandert R maximaal een factor 2. Twee extreme situaties worden geanalyseerd.

- a. Er zijn k grote spots en er worden γk kleine bijgevoegd met $\gamma > 0,01$;
- b. er zijn k kleine spots en er worden γk grote bijgevoegd met $\gamma < 1$.

Situatie a

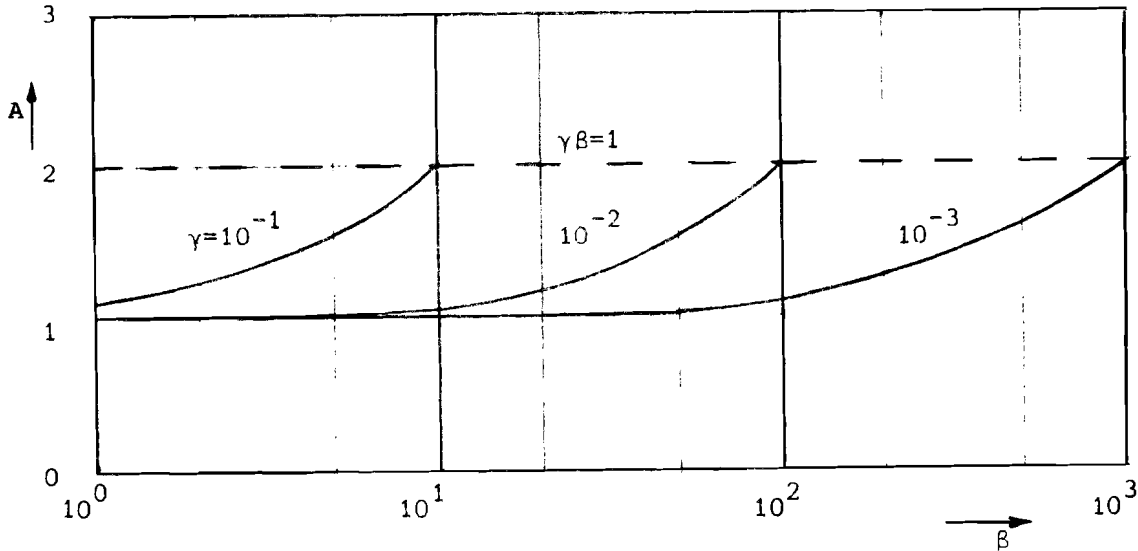
In figuur 10 is uitgezet de correctiefactor $A = (1 + \gamma(\gamma + \beta + 1/\beta))$ als functie van β met γ als parameter onder de voorwaarde $\gamma \beta \leq 1$. Uit de grafiek volgt dat bijvoegen van γk spotjes met een kleinere diameter de $1/f$ ruis aanzienlijk doet toenemen.



figuur 10: Correctiefactor A voor bijvoegen van γk kleine contactspots met straal βa .

Situatie b

In figuur 11 is uitgezet de correctiefactor A als functie van β met γ als parameter onder de voorwaarde $\gamma\beta \leq 1$. Bijvoegen van een klein aantal grote spots heeft nauwelijks invloed op de 1/f ruis.



figuur 11: correctiefactor A voor bijvoegen van γk grote contactspots met straal βa uitgaande van k kleine met straal a onder de voorwaarde $\gamma\beta \leq 1$.

3. Serieschakeling van grote en kleine contactspots

Er is een situatie mogelijk waarbij het ene metallische contact k spots heeft met straal a en het andere γk spots met straal βa (figuur 12). De beschrijving geschiedt met halve constricties. Hiervoor gaat (18) over in

$$C = \frac{16\pi^2 \alpha R_i^3}{20n_{\text{bulk}} \rho_{\text{bulk}}^3} \quad (36)$$

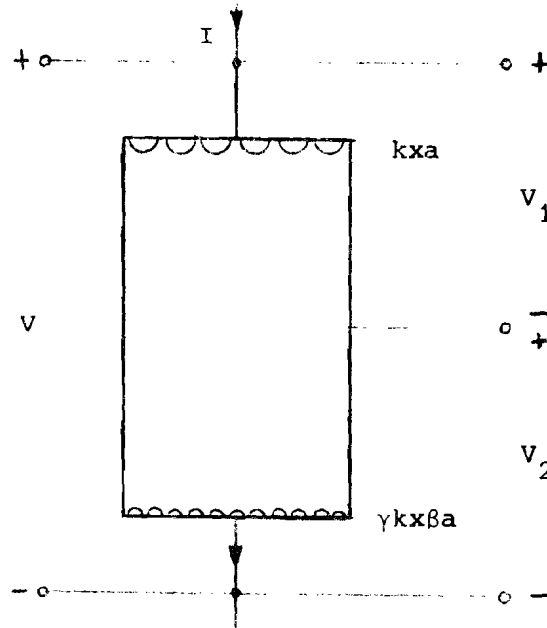
met $R_i = \frac{\rho_{\text{bulk}}}{2\pi a}$ de weerstand van één halve constrictie.

Voor ongecorreleerde fluctuaties $\langle(\Delta V_1)^2\rangle$ en $\langle(\Delta V_2)^2\rangle$ geldt

$$\langle(\Delta V)^2\rangle = \langle(\Delta V_1)^2\rangle + \langle(\Delta V_2)^2\rangle \quad (37)$$

Vergelijking (30) toegepast op figuur 12 en, gesubstitueerd in (37) geeft

$$\langle (\Delta V)^2 \rangle = \frac{16\pi^2 \alpha}{20n_{\text{bulk}} \rho_{\text{bulk}}^3} \left(\frac{R_i^3}{k} V_1^2 + \frac{R_i^3}{\gamma k \beta^3} V_2^2 \right) \quad (38)$$



figuur 12: Cilinder met metallische contacten.
Serieschakeling van $k \times a$ en $\gamma k \times \beta a$ contactspots.

Voor de contactweerstand R , die gemeten wordt, geldt nu

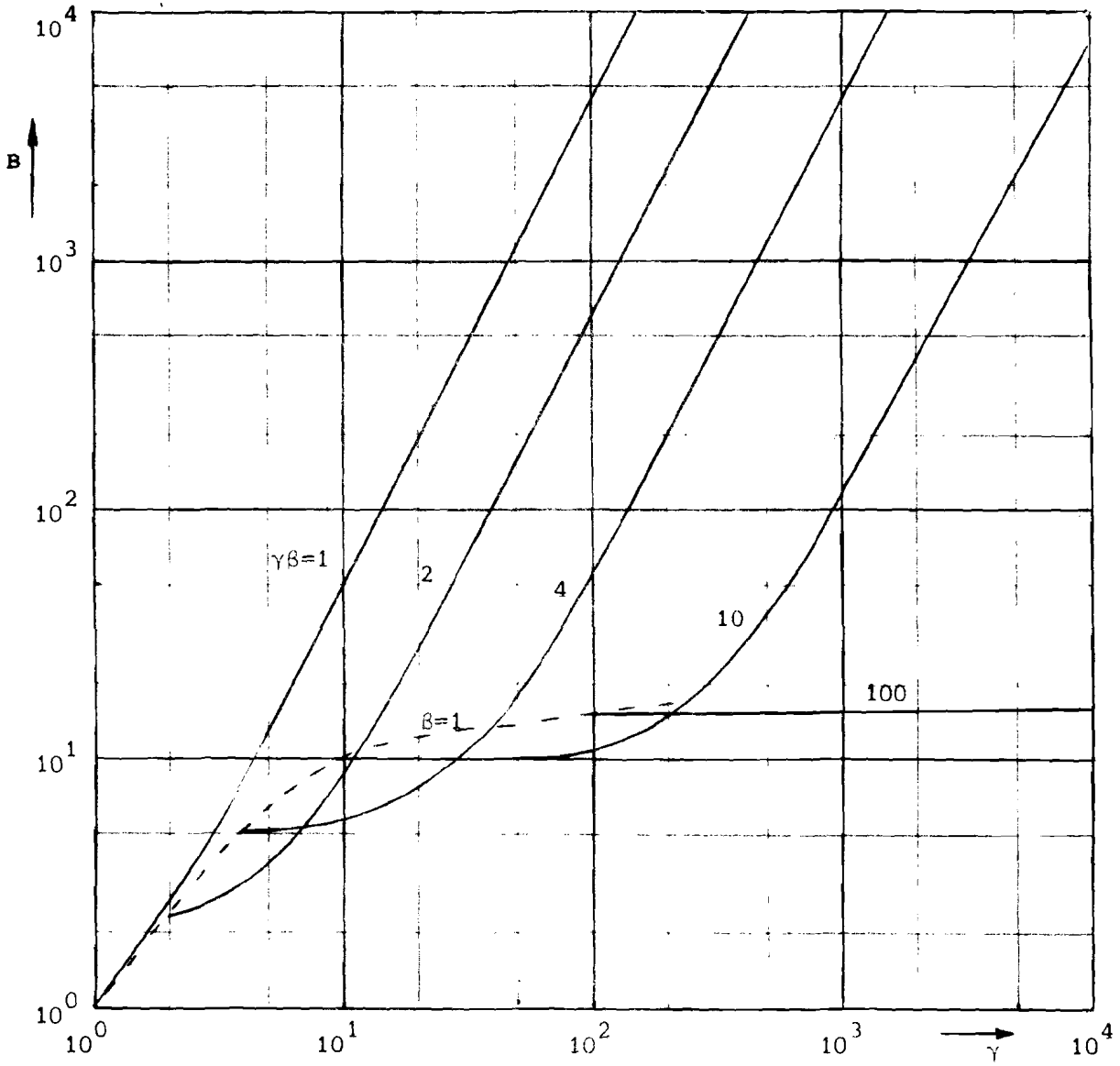
$$R = \frac{R_i}{k} \left(\frac{1 + \gamma \beta}{\gamma \beta} \right) \quad (39)$$

Substitutie van $V_1 = I \frac{R_i}{k}$, $V_2 = I \frac{R_i}{\gamma k \beta}$, $V = IR$ en (39) in (38) leidt tot

$$\left\langle \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 \right\rangle = \frac{k^2 \pi^2 \alpha R^3}{20n_{\text{bulk}} \rho_{\text{bulk}}^3} \frac{16(\gamma^2 + \gamma^5 \beta^5)}{(1 + \gamma \beta)^5} \frac{\Delta f}{f} \quad (40)$$

In figuur 13 is de correctiefactor $B = \frac{16(\gamma^2 + \gamma^5 \beta^5)}{(1 + \gamma \beta)^5}$ uitgezet als functie van γ met $\gamma \beta$ als parameter onder de voorwaarde $\gamma \beta \geq 1$. Uit (39) volgt dat R maximaal een factor 2 verandert.

Bijvoegen van meer spots met kleinere scrani doet de Δf ruis toenemen. Echter minder sterk dan bij de parallelschakeling van §4.4.2.. Voor $\gamma=10$ is de maximale toename van de ruis een factor 50.



figuur 13: Correctiefactor B voor serieschakeling van kx_a en γkx_b contactspots.

5. MECHANISCHE ASPECTEN VAN GaAs-EN InSb-PUNTCONTACTEN

De relatie van Hertz [22]

$$a = 0,88 \left(\frac{Fr}{E} \right)^{1/3} \quad (41)$$

beschrijft het verband tussen de straal a van het aanrakingsoppervlak en de kracht F , die op de cilinders wordt uitgeoefend, r is de straal van de cilinder en E de Youngsmodulus van het materiaal.

De uitdrukking voor de contactweerstand R als functie van de kracht F is dan

$$R = \frac{\rho_{\text{bulk}}}{0,88\pi} \left(\frac{Fr}{E} \right)^{-1/3} \left(1 + \frac{t_{\text{p film}}}{0,88\rho_{\text{bulk}}} \left(\frac{Fr}{E} \right)^{-1/3} \right) \quad (42)$$

De Youngsmodulus van de natuurlijke oxydehuid wordt gelijk of groter verondersteld dan die van het bulkmateriaal [6].

Twee punten worden nader beschouwd: de Youngsmodulus E en de drukafhankelijkheid van de soortelijke weerstand ρ_{bulk} van InSb.

5.1. Bepaling van de Youngsmodulus E van GaAs en InSb

Door een aantal auteurs zijn de C_{ij} componenten bepaald voor GaAs [23] en InSb [24].

De coëfficiënt C_{ij} geeft het verband tussen de spanning σ_{ij} en relatieve deformatie ϵ_{ij} in een bepaalde richting in het elastisch gebied [25].

$$\sigma_{ij} = \sum_{ij} C_{ij} \epsilon_{ij} \quad (43)$$

Op grond van reciprociteitsrelaties kan het aantal (= 36) C_{ij} 's verminderd worden. Toepassen van symmetrie-eigenschappen geeft voor kubische symmetrie een reductie tot 3 (C_{11} , C_{12} en C_{44}). Voor het isotrope geval blijven over C_{11} en C_{12} en er geldt:

$$2C_{44} = C_{11} - C_{12} \quad (44)$$

Aan het oppervlak van de cilinders komen alle kristalrichtingen voor. Op de contactspot worden de twee preparaten met willekeurige kristalrichtingen op elkaar gedrukt. De Youngsmodulus E is een goede benadering voor de verschillende mogelijkheden (C_{ij}).

De Youngsmodulus E wordt in C_{ij} 's uitgedrukt volgens [26]

$$E = \frac{(C_{11} - C_{12})(C_{11} + 2C_{12})}{(C_{11} + C_{12})} \quad (45)$$

Voor kubische symmetrie geldt (44) niet. De Youngsmodulus wordt nu met behulp van de Glijdingsmodulus G berekend.

W. Voigt (1887) berekende G door aan te nemen dat de deformatie overal hetzelfde is.

$$G_V = \frac{1}{5} (C_{11} - C_{12} + 3C_{44}) \quad (46)$$

A. Reuss (1929) nam aan dat de spanning hetzelfde is.

$$G_R = \frac{5C_{44}(C_{11} - C_{12})}{4C_{44} + 3(C_{11} - C_{12})} \quad (47)$$

De Youngsmodulus volgt dan uit ($\nu=0,33$ Poisson-constante)

$$E = 2G(1+\nu) \quad (48)$$

(46) en (47) geven steeds verschillende uitkomsten. Experimentele waarden liggen veelal tussen beide in en dicht bij het rekenkundig of meetkundig gemiddelde.

In tabel II zijn berekende waarden voor Glijdings-en Youngsmoduli gegeven. Ze zijn voor GaAs en InSb uit de C_{ij} 's van [23] en [24] bepaald met vergelijkingen (45) t/m (48). Alle grootheden zijn uitgedrukt in 10^{10} N/m^2 .

Voor alle verdere berekeningen wordt er in dit verslag gewerkt met E_{rek} .

Tabel II

	E	G_V	E_V	G_R	E_R	G_{rek}	E_{rek}
GaAs	8,7	4,9	13,0	4,5	12,0	4,7	12,5
InSb	4,1	2,5	6,6	2,2	5,9	2,35	6,25

5.2. Drukafhankelijkheid van ρ_{bulk} van InSb

Keyes [9] heeft reeds in 1955 drukafhankelijkheid tot $12 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ waargenomen in InSb-kristallen. Hij vond met toenemende druk een stijging in ρ_{bulk} in een gebied van $-78^\circ\text{C} - +300^\circ\text{C}$.

De toename wordt kleiner bij lagere temperatuur zowel bij p- als n-type materiaal.

Gebbie [10] breidde het gebied van druk uit tot $70 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ en -89°C voor n-type InSb ($n_{\text{bulk}} = 4 \cdot 10^{14} / \text{cm}^3$). Op 300K werd een toename gevonden van meer dan drie decaden waarna een zeer scherpe daling (factor 10^5) optreedt bij $30 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$. Bij -89°C eerst een toename met een factor 50, daarna over een groot gebied van druk een constante waarde, gevolgd door een scherpe daling bij $50 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$.

Volkov [11] nam voor p-InSb waar, dat ρ_{bulk} op 78K voor $p_{\text{bulk}} < 10^{13} / \text{cm}^3$ toenam met de druk. Voor samples met $p_{\text{bulk}} = 2 \cdot 10^{14} / \text{cm}^3$ bleef ρ_{bulk} onveranderd tot $10 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$.

N.N. Sirota en V.B. Shipilo [12], [13] hebben gemeten aan p-type InSb ($p_{\text{bulk}} = 3,7 \cdot 10^{13} / \text{cm}^3$) en n-type ($n_{\text{bulk}} = 1,7 \cdot 10^{14} / \text{cm}^3$). Zij werkten in het temperatuurgebied van 293K - 573K bij drukken tot $20 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$. Bij constante temperatuur werd een toename van ρ_{bulk} waargenomen bij groter wordende druk. Alle auteurs zoeken een verklaring in een vergroting van de bandafstand bij toenemende druk ($\approx 15 \text{ meV} / 10^8 \text{ N/m}^2$).

Bij de experimenten in dit verslag beschreven kunnen drukken gerealiseerd worden tot $20 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ op 300K en 77K.

De drukafhankelijkheid van ρ_{bulk} zal kunnen blijken uit RF-grafieken en verder door werken in CR-grafieken.

6. OHMSE CONTACTEN OP GaAs

6.1. Eisen voor goede ohmse contacten

Ohmse contacten hebben een lineaire IV-karakteristiek in 1e en 3e kwadrant.

Het type van de potentiaalbarrière van een metaal-halffgeleider-overgang hangt af van het verschil in de uitroepotentiaal ϕ_m van het metaal en ϕ_s van de halffgeleider [27]. Voor n-type geldt $\phi_m < \phi_s$ en voor p-type $\phi_m > \phi_s$ om een ohmse metaal-halffgeleider-overgang te maken. Er zijn echter een aantal complicaties (o.a. oppervlaktetoestanden en oxydschichten), die deze eenvoudige regel verstoren.

Om toch ohmse contacten op deze halffgeleiders te krijgen, worden ets-, plating-, opdamp- en legeertechnieken toegepast bij verschillende temperaturen en tijdsduur. Bij het opdampen is de kwaliteit van het vacuum, de snelheid van het opdampen en de laagdikte belangrijk. De legeertemperatuur, tijdsduur en het gebruikte formaat zijn eveneens zeer belangrijk.

Ook worden diffusen toegepast om aan het oppervlak dunne, zwaar gedoopte (n^+ of p^+) lagen te creëren, die de barrière aan het contactoppervlak verlagen. Er worden metalen en legeringen van allerlei samenstellingen op de halffgeleider aangebracht.

Voor een goed ohms contact is naast een lage overgangsweerstand vooral de 1/f ruis van het contact van belang. De contactruis moet te verwaarlozen zijn ten opzichte van de bulkruis, zodat (2) geldt. Vaak blijken laag-ohmige contacten toch veel 1/f ruis te vertonen.

6.2. Literatuuroverzicht voor contacten op GaAs

Tabel III [21] geeft een aantal mogelijkheden om op GaAs ohmse contacten te maken [28] t/m [38] en is het resultaat van een literatuuronderzoek.

De auteurs gebruikten een groot aantal verschillende metalen en legeringen. Voorbewerking, etsen en nabewerkingen hebben grote diversiteit en invloed op het al of niet ohms zijn. Als etsmiddel wordt vaak $H_2SO_4-H_2O_2$ gebruikt.

Opdampen geschiedt op laagdruk en levert in een temperatuurgebied van 400-800°C in een oven. Als omgeving wordt een schutgas (N_2-H_2) of een hoog vacuum gebruikt. Zowel op n- als p-type GaAs zijn er ohmse contacten gemaakt voor preparaten met $n=10^{11}-10^{20} \text{ cm}^{-3}$ en $p=10^{17}-10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

Nog meer literatuurverwijzingen worden gegeven in het boek "Heterojunctions and Metal-Semiconductor Junctions" van A.G. Milnes en D.L. Feucht [39].

Vandamme [8] gebruikte voor zijn homogene preparaten de werkwijze van Cox en Strack [28] op zowel n- als p-GaAs uit tabel III. Op het contact werden gouddraadjes gebond. De metingen zijn tweepunts voor n-GaAs ($n = 2,3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) en vierpunts voor p-GaAs ($p = 2,3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$).

6.3. Interpretatie van eigen experimenten

De experimenten zijn uitgevoerd aan cilinders van 5mm doorsnede en 10mm lengte. De metallische contacten zijn op de uiteinden aangebracht. In tabel IV is een overzicht gegeven van de beste resultaten.

Met (2) vinden we $\frac{1}{f} \propto \frac{1}{\exp}$. De gemeten 1/f ruis is niet afkomstig van het bulkmateriaal maar van de metaal-halfgeleider-overgang.

Zonder formeren waren de contacten met ohms (① en ②).

Formeren verlaagt de contactweerstand $R = 2R_c$ met 2 à 3 decaden. De 1/f ruis werd door herhaaldelijk formeren 10^1 tot 10^2 lager.

Contacten ③ waren zonder formeren ohms. Bij ④ was formeren niet nodig. Temperatuurbehandelingen doen de kwaliteit van de contacten duidelijk toenemen. Dit blijkt uit verlagen van de contactweerstand R en de 1/f ruis.

In §7.2. zal de 1/f ruis gebruikt worden om de contacten te beschrijven met k spots, die een straal a hebben.

De 1/f spectra werden bij de metingen [5] soms verstoord door burst-noise [40] en laagfrequent-oscillaties [41] boven de kritische veldsterkte.

De cilinders met metallische contacten kunnen gebruikt worden om puntcontact-metingen te doen. De 1/f ruis van een constriction is veel groter (minimaal een factor 1000).

Tabel IV

Materiaal	Vorbewerking	Contactprocedure	Nabewerking	$2R_c (\Omega)$ 2-punts gemeten	C	$\alpha_{\text{exp}} = \frac{x\alpha}{x}$
① n-GaAs $\rho = 0,0273 \Omega\text{cm}$ $n = 1,2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ $R_{\text{bulk}} = 0,96 \Omega$	Ontvetten in aceton Etsen in $\text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2 - \text{H}_2\text{O}$ (gedefinieerd).	Anodisch en kathodisch ontvetten. Galvanisch opbrengen van Cu-laag daarna Cr-laag. Met Sn koperdraad solderen.	Formeren 340V ₊ tot contacten ohms zijn en de weerstand niet meer verandert.	0,34 0,24 0,14 0,09	4×10^{-13} $6,6 \times 10^{-13}$ 3×10^{-13} 2×10^{-13}	$4,8 \times 10^6$ 8×10^6 $3,6 \times 10^6$ $2,4 \times 10^6$
② p-GaAs $\rho = 0,077 \Omega\text{cm}$ $p = 3,7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ $R_{\text{bulk}} = 0,5 \Omega$	Ontvetten in aceton in ultrasoon trilbad. Etsen in $\text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2 - \text{H}_2\text{O}$.	In solderen op kopse kanten. Evrimet (soldeerwater) zorgt voor de mechanische hechting.	Formeren 380V ₊ tot contacten ohms zijn en de weerstand niet meer verandert.	0,55 0,55 0,35 0,35	5×10^{-13} 9×10^{-13} 9×10^{-14} 6×10^{-14}	18×10^6 33×10^6 $3,3 \times 10^6$ $2,2 \times 10^6$
③ n-GaAs $\rho = 0,1 \Omega\text{cm}$ $n = 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ $R_{\text{bulk}} = 0,5 \Omega$	Ontvetten in alcohol in ultrasoon trilbad. Etsen in $\text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2 - \text{H}_2\text{O}$. Gladschuren op fijn schuurpapier.	In solderen door sample op smelttemperatuur In (156 °C) te brengen. Ni galvanisch opbrengen. Legeren in 30% H_2 - 70% N_2 schutgas gedurende 5 min. op 300 °C. Met Sn draad solderen.	Formeren 340V ₊ tot de weerstand niet meer verandert.	0,3 0,1	$1,2 \times 10^{-14}$ 4×10^{-14}	$1,6 \times 10^4$ $5,3 \times 10^4$
④ n-GaAs $\rho = 0,1 \Omega\text{cm}$ $n = 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ $R_{\text{bulk}} = 0,5 \Omega$	Als ③.	Als ③. Nu echter legeren gedurende 15 min. op 510 °C.	Formeren niet nodig.	0,06 0,04	$6,6 \times 10^{-16}$ $2,8 \times 10^{-16}$	900 220

7. EXPERIMENTEN MET GaAs

Voor de preparatie van de cilinders wordt verwezen naar tabel IV in hoofdstuk 6 (nr. ①, ②, ③, ④).

De cilinders zijn zodanig geëtsd, dat ze een metallisch spiegelen oppervlak bezitten.

7.1. Metingen aan GaAs-puntcontacten (n-type)

Voor de experimenten wordt een balans gebruikt. De kracht wordt veranderd door gewichten bij te zetten over 3 decaden (0,1-100N). De gewichten zijn zodanig gekozen dat de meetpunten op een logaritmische schaal nagenoeg equidistant verdeeld zijn.

7.1a. Niet geformeerde constricties

1. IV-karakteristieken.

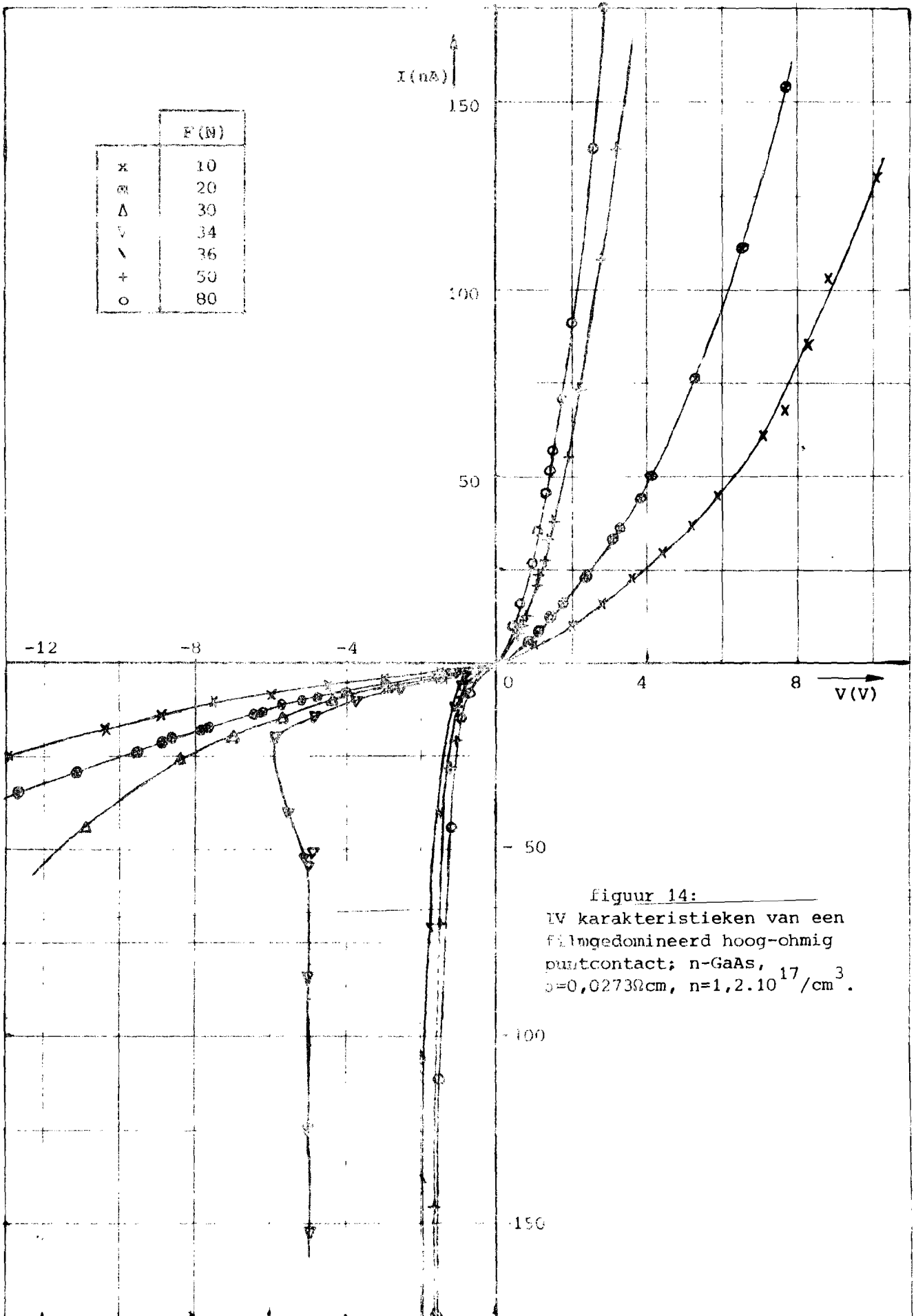
Een eerste vereiste voor het meten van $1/f$ ruis aan constricties is een ohmse IV-karakteristiek. Het puntcontact is dan te beschrijven met het eenvoudige bulk- en filmmodel. De IV-karakteristieken worden op een oscilloscoop bekeken. De IV-karakteristieken van de onderzochte GaAs-puntcontacten waren niet ohms en vaak niet symmetrisch.

Bij 12V over de puntcontacten nam de stroom sterk toe (zener-conditie).

Uit $\log I(V)$ -grafieken werd ook in beide kwadranten een duidelijk exponentieel gedrag waargenomen.

Bij kleine krachten ($F < 0,5N$) waren de zenergebieden vaak niet stabiel. Het kwam ook voor dat over het gehele gebied van krachten $0,1N < F < 100N$ nauwelijks enige verandering in de IV-karakteristiek werd gevonden. De IV-karakteristieken vertoonden een duidelijk waarneembare knik, welke bij vers geëtsde cilinders kleiner is dan 24 uur na het etsen ($V < 250mV$).

In figuur 14 is een voorbeeld gegeven van IV-karakteristieken met de kracht F op de cilinders nr. ④ uitgeoefend als parameter. In het 1e kwadrant is er een zenerkarakter. In het 3e kwadrant een zenergedrag dat zelfs van de kracht afhankelijk is. Dit is een zenergebied waargenomen.



Conclusie:

IV-karakteristieken zijn niet ohms, niet symmetrisch en vertonen een knik rond de oorsprong. Ze zijn nauwelijks reproduceerbaar.

2. RF-grafieken.

De niet reproduceerbare IV-karakteristieken hebben uiteraard consequenties voor de RF-metingen. De gemeten RF-grafieken hadden vaak een helling (-2/3) over 2 decaden in F. Ook kwamen hellingen (-1/3) voor. Soms trajecten met achtereenvolgens hellingen (-1/3), (-2/3) en (-1/3).*

De RF-grafieken zijn opgenomen in het gebied waarin de IV-karakteristiek als lineair kan worden beschouwd ($V < 2V$, zie figuur 14).

Uit de RF-grafieken zijn met (42) ρ_{film} 's bepaald voor trajecten, die over een factor 50 een helling (-2/3) geven. Berekeningen leiden tot $\rho_{\text{film}} = 10^8 - 10^{11} \Omega \text{cm}$ voor $t = 60 \text{ \AA}$ en E volgens tabel II. Dit is ook gevonden door Higier [42] en Harman [43].

De contactweerstand is zeer hoog ($R = 10^6 - 10^{10} \Omega$). Een geschikte methode om RF-grafieken te maken is de IV-karakteristiek op de oscilloscoop te bekijken in het rechte gebied en de kracht E te variëren.

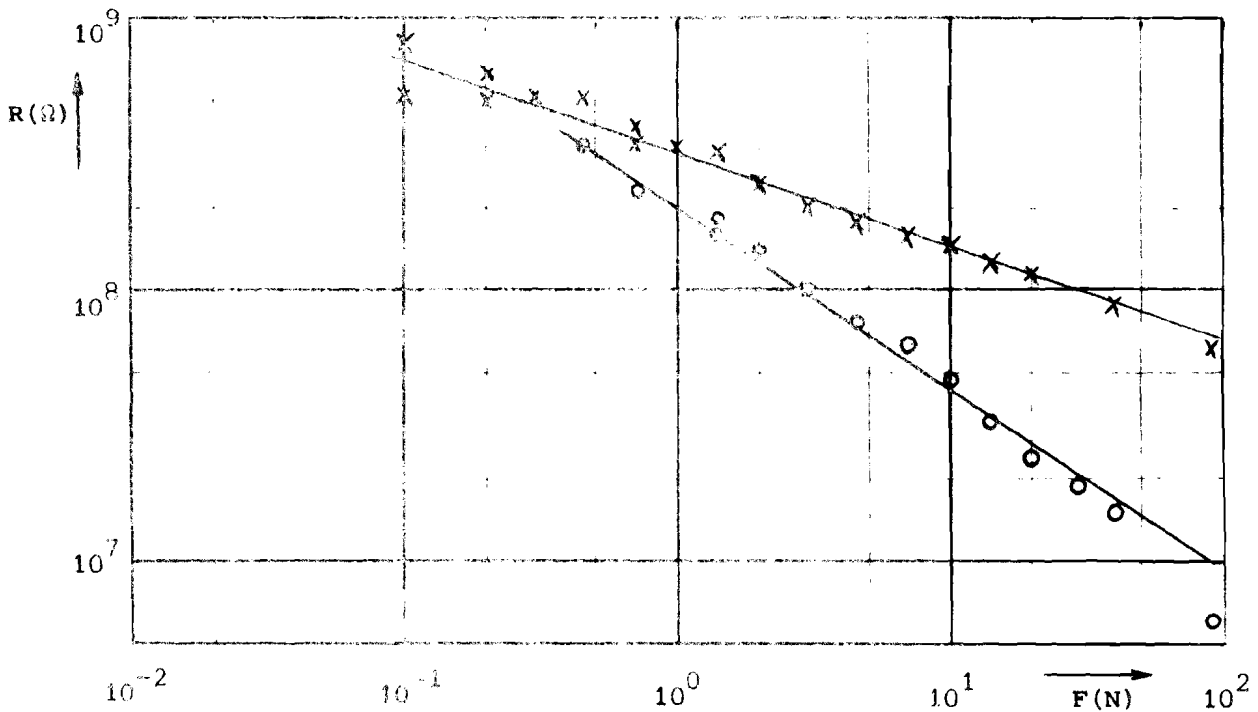
Experimenten met $V = 25V$ over het puntcontact tonen nagenoeg geen afhankelijkheid tussen R en F ($R = 5 \cdot 10^4 \Omega$). Er wordt in het zenergebied van de IV-karakteristiek gewerkt.

Figuur 15 geeft RF-grafieken voor cilindertjes (1). De spanning over het puntcontact $V = 1,6V$. De kruisjes x komen overeen met een situatie als in het 3e kwadrant van figuur 14; de bolletjes o met het 1e kwadrant. Uit de helling (-2/3) volgt $\rho_{\text{film}} = 10^9 \Omega \text{cm}$.

Conclusie:

De gemeten RF-grafieken tonen een hoog-ohmig film-gedomineerd karakter (helling (-2/3)). Er is geen verklaring voor de helling (-1/3).

* Met helling wordt hier bedoeld de richtingscoëfficiënt in een grafiek waarin beide grootheden (hier R en F) logaritmisch zijn uitgezet.



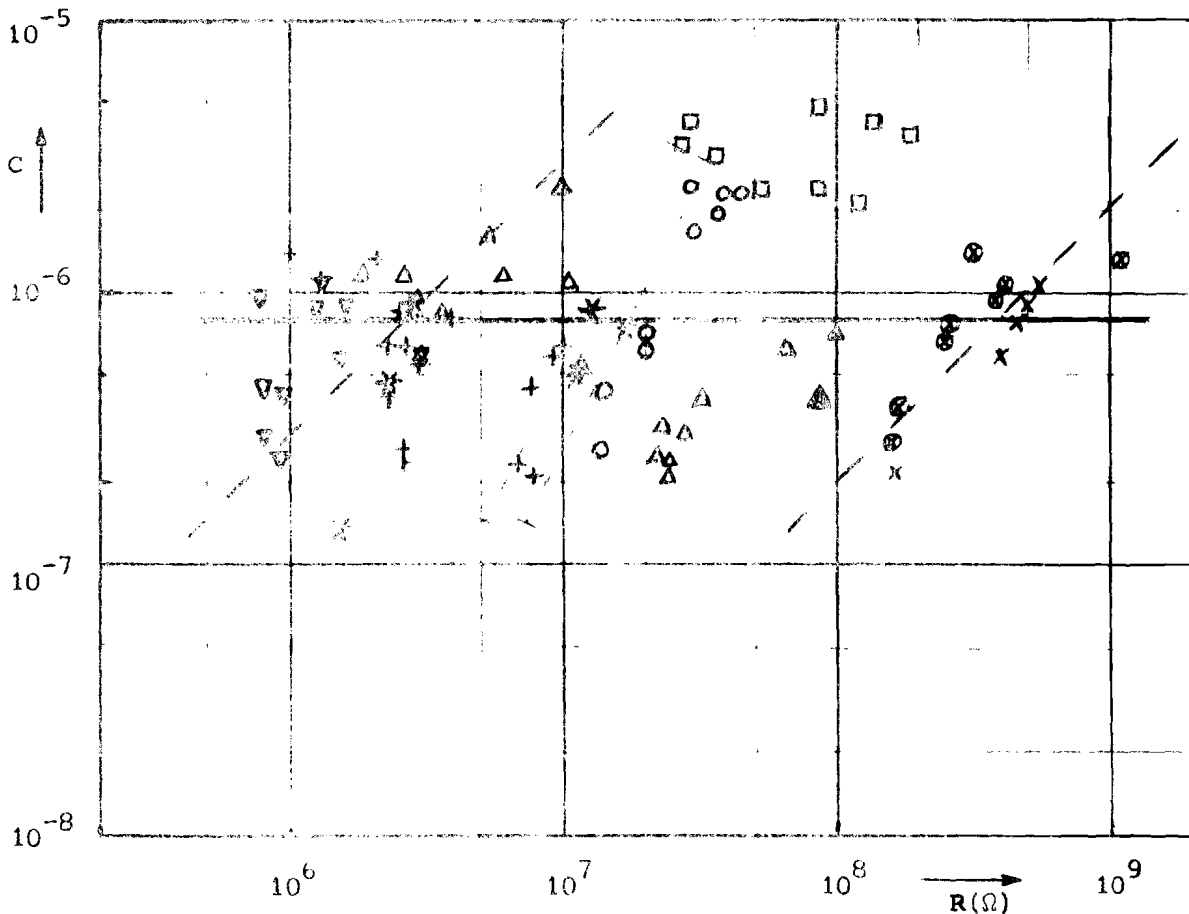
figuur 15 CR-grafieken van een puntcontact van n-GaAs, $\rho = 0,0273 \Omega\text{cm}$ en $n = 1,2 \cdot 10^{17}/\text{cm}^3$; $V = 1,6\text{V}$.
 o filingedomineerd in 1e kwadrant figuur 14,
 $\rho_{\text{film}} = 10^9 \Omega\text{cm}$; x punten in 3e kwadrant figuur 14.

3. CR-grafieken

Aangezien niet aan de voorwaarde van een rechte IV-karakteristiek voldaan is, kan er nauwelijks iets over de $1/f$ ruis gezegd worden. De contactweerstand is zo hoog, dat er voorschakelweerstand R_V van $10^8 - 10^{12} \Omega$ gebruikt moeten worden om te voldoen aan $R_V > 20R$ voor stroomsturing. Spanningsbronnen van ~~100-1000V zouden nodig zijn~~. De ingangsimpedantie van de gebruikte versterkers ($R_{\text{in}} = 100\text{M}\Omega$) is te laag om zonder compensaties te meten. Daarom wordt in dit geval gekozen voor spanningssturing (zie 4.3.).

Een CR-grafiek van een puntcontact van de cilinders (4) is opgenomen met $V = 3,2\text{V}$ (figuur 16). De hoge spanning is nodig om boven de achtergrondruis (25) van het meetstelsel uit komen. De weerstand R moet worden beschouwd als de gelijkstroomweerstand van het meetpunt in de IV-karakteristiek (figuur 14) in het 1e kwadrant.

C is nagenoeg constant over meer dan 3 decaden in R . De punten zijn opgenomen bij 500Hz en 1000Hz. Van een aantal punten (*, #) zijn spectra opgenomen. Klusters meetpunten (x, o, A) op dezelfde contactspot opgenomen, impliceren een mogelijke helling (+1) voor de filingedomineerde situatie.



figuur 16: CR-grafiek van spanningsgestuurd puntcontact
 n -GaAs, $\rho=0,1 \Omega\text{cm}$ en $n = 5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$.

In een simultaan opgenomen RF-grafiek wordt min of meer een helling $(-2/3)$ gevonden.

Deze trend zou echter moeten doorzetten voor meetpunten op andere spots opgenomen, met andere krachten F . Voor de punten $(+, \Delta)$ werd eerst een helling $(+1)$ gevonden. Bij verhoging van de kracht nam C weer met een factor 10 toe in plaats van verder te dalen.

De simultaan opgenomen RF-grafieken leiden tot $\rho_{\text{film}} = 10^8 - 10^9 \Omega\text{cm}$.

Om toch een indruk te krijgen van mogelijke waarden van μ_{film} worden deze voor de gestippelde lijnen berekend. De driehoeken ∇ geven $3 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{Vs}$, de bollen \bullet $2 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Dit is erg laag voor een klassiek geleidingsmechanisme.

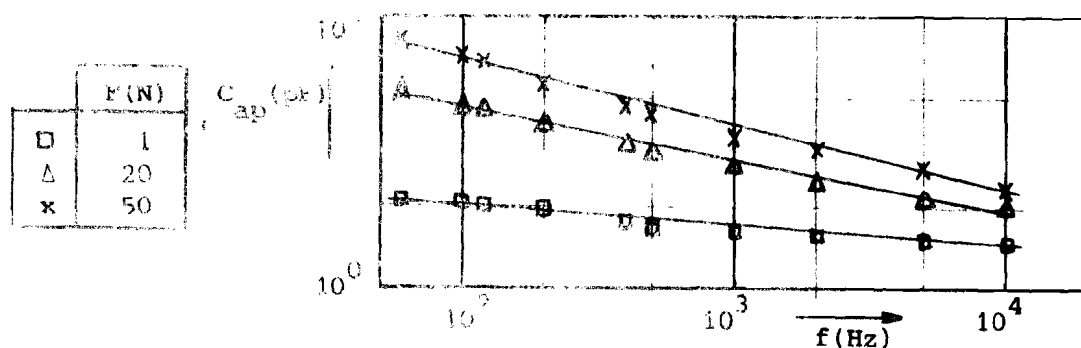
Conclusie:

Voor een niet geformeerd puntcontact is $C \propto R^{-6}$. Een mogelijke verklaring is, dat de film over het oppervlak van de cilinders inhomogeen is. Hierdoor zijn de metingen niet reproduceerbaar.

4. Capaciteitsmetingen.

De ruis-spectra hebben soms een helling tussen (-1) en (-3). Dit kan veroorzaakt worden door een capaciteit C_{ap} parallel aan het puntcontact, zie §4.3..

Capaciteitsmetingen aan GaAs puntcontacten van cilinders nummer ④ met een brug leveren, als functie van de frequentie f met de kracht F als parameter, grafieken op als figuur 17.



figuur 17: Parallel capaciteit van puntcontact n-GaAs $\rho=0,1 \Omega\text{cm}$ en $n=5 \cdot 10^{16}/\text{cm}^3$ als functie van de frequentie f met de kracht F als parameter.

Naast de capaciteit is ook de parallel-weerstand R gemeten (figuur 18).

Voor de capaciteit wordt gevonden $C_{ap} = 1-10\text{pF}$. De contactweerstand $R = 10^7-10^9 \Omega$ ligt in dezelfde grootte-orde als bij de RF-metingen. C_{ap} is frequentie-afhankelijk en een factor 10 lager dan men voor deze oxydehuiden zou verwachten. C_{ap} wordt gedacht te bestaan uit een serie-schakeling van een frequentie-afhankelijke depletion capaciteit en de capaciteit van de oxydehuid. Dit is niet verder onderzocht.

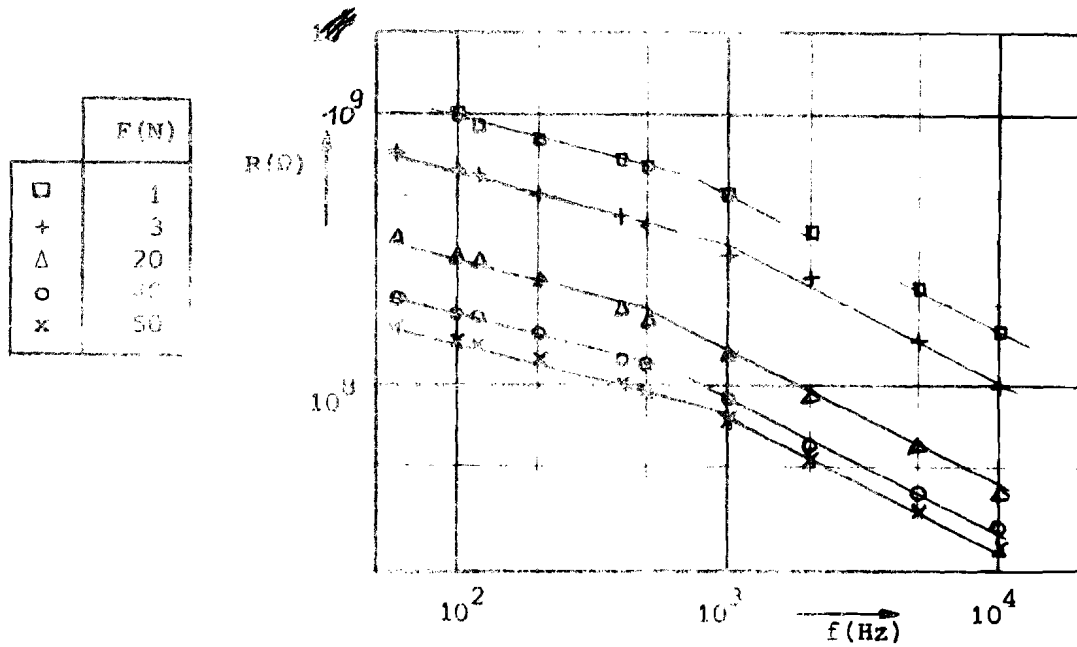
Voor $F=50\text{N}$ geldt $\tau_p = RC_{ap} = 10^{-3}\text{s}$. Dit geeft een -3dB punt bij $f = 160\text{Hz}$. Reeds bij lage frequentie tendeert het $1/f$ ruisspectrum naar een helling (-3).

Berekeningen met (24) en (25) met gemeten grootheden als parameters tonen dat de spanning $V > 3\text{V}$ moet zijn om nog voldoende boven de achtergrond te kunnen meten.

De meetpunten uit de CR-grafiek van figuur 16 zijn allen $1/f$ spectra.

Conclusie

Door de parallel capaciteit $C_{ap} = 1-10\text{pF}$ zijn de spectra niet te interpreteren. Voor grote R is dit reeds bij lage frequentie het geval.



figuur 19: Weerstand R van puntcontact van n-GaAs $\rho=0,1 \text{ Scm}$ en $n=5 \cdot 10^{16}/\text{cm}^3$ als functie van de frequentie f met de kracht F als parameter.

De bulkruis van GaAs is met puntcontactmetingen niet aan te tonen. Er kunnen geen duidelijke uitspraken gedaan worden over de oxydehuid. Wel blijkt dat deze zeer hoog-ohmig [42], [43] is en een inhomogene structuur heeft. De metingen zijn nauwelijks reproduceerbaar.

7.1b. Geformeerde constricties

1. Inleiding.

Formeren gaf bij de metallische contacten van de cilinders een verlaging van de contactweerstand en de $1/f$ ruis (6.3.). Er is ook een condensator ontladen over de hoog-ohmige oxydehuid van het puntcontact, waarop we een kracht van 50-100N uit oefenden. Een blauw-groene vonk springt over aan de contactspot met $a \approx 10^{-2}$ cm volgens (41).

De contactweerstand R wordt verlaagd tot 100 à 10000 Ω . De IV-karakteristiek van het geformeerde puntcontact is ohms. De tijdconstante τ_p is te verwaarlozen. Relaxeringen kunnen te hooggestruurd geschieden.

2. CR-grafieken.

De CR-grafieken hebben een helling (+1) over 3 decaden in R (figuur 19). Voor nummer ① was de kracht $F=100N$ en de ontladspanning 320V, voor nummer ④ werd gebruikt $F=50N$ en 190V. De contactweerstand werd gevarieerd door de kracht F te verkleinen. Zowel voor nummer ① als voor ④ zijn er drie meetseries opgenomen. De metingen zijn goed reproduceerbaar. De spreiding in de meetpunten is niet groot. De meetpunten liggen voor nummer ① 1 decade lager dan voor nummer ④. Dit kan aan het verschil in formeerspanning liggen. Berekende lijnen voor de bulkruis volgens (18) snijden de meetpunten.

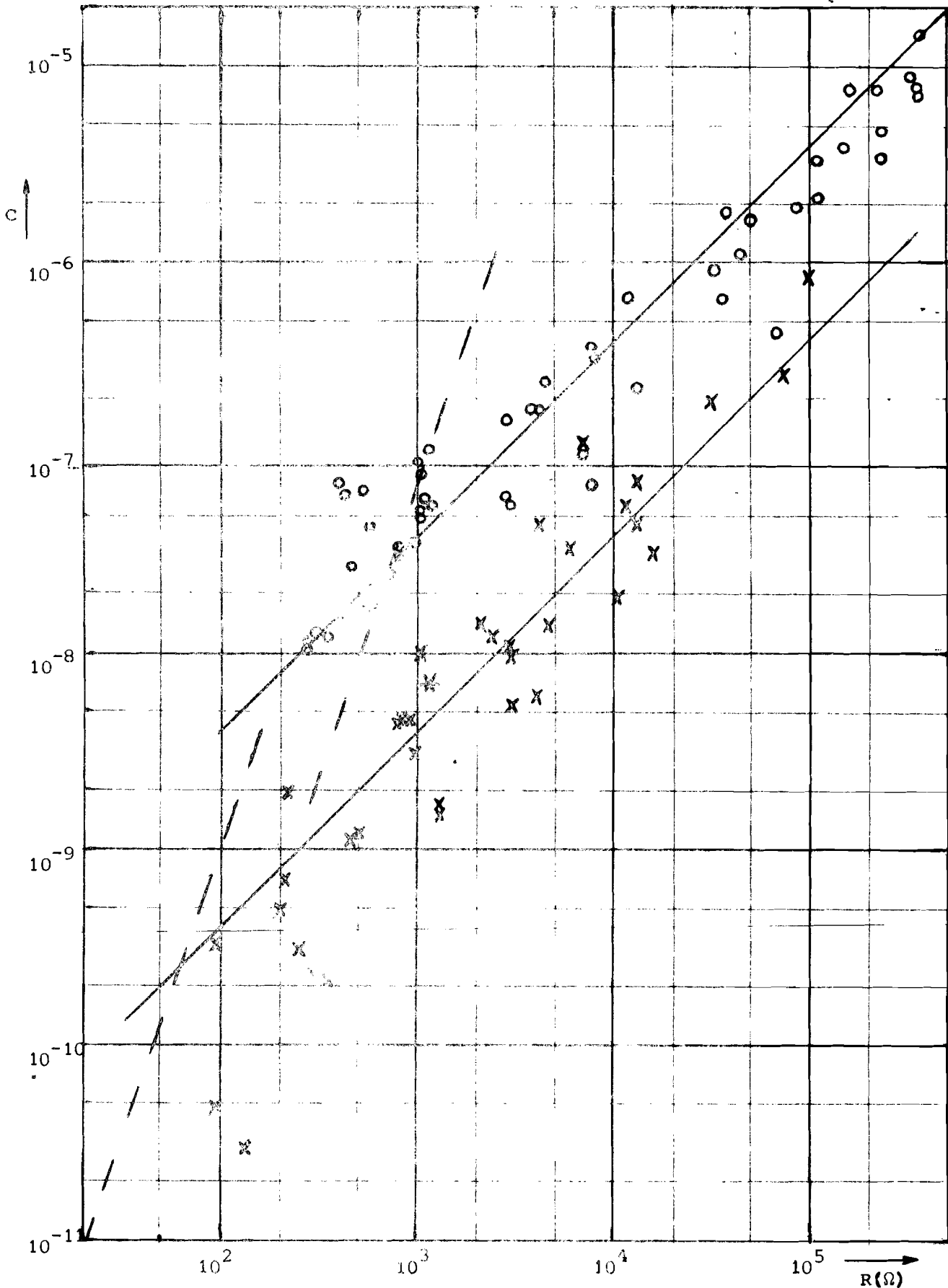
3. Modellen.

a. Een op één plaats doorgeprikte oxydehuid. De CR-grafiek zou een helling (+3) moeten vertonen volgens (13).

b. Een model met een aantal spots die elektrisch contact maken zoals in §4.4.1..

Uit (28) volgt rond de lijn voor de bulkruis volgens (18) voor \circ
 $k \approx 0,5 \text{ à } 3$. Voor $R = 12k\Omega$ volgt $k = 0,07$ en $R = 360k\Omega$ geeft $k = 0,002$. Er wordt een grote discrepantie gevonden tussen de aanname $k \geq 1$ en de berekende waarden $k \ll 1$ voor grote R .

c. Een gedegenerereerde oxydehuid, die laag-ohmiger wordt door het ontladen van de condensator. Het puntcontact met een uniforme film geeft volgens Vandamme [6] een CR-grafiek met helling (+1). Uit de grafiek kunnen beweeglijkheden van de film worden uitgerekend. Voor ① wordt gevonden $\mu_{\text{film}} = 4,5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ voor ④ $\mu_{\text{film}} = 45 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Dit zijn acceptabele waarden voor oxydehuiden. Voor de dikte $t = 60 \text{ \AA}$ genomen.



figuur 19: CR-grafieken van onafgeleide, filmgedomineerde puntcontacten (n-GaAs).
 $\circ \rho_{\text{bulk}} = 0,1 \Omega \text{cm}, \mu_{\text{film}} = 45 \cdot 10^2 \text{Vs/cm}^2$; $\times \rho_{\text{bulk}} = 0,0273 \Omega \text{cm}, \mu_{\text{film}} = 4,5 \cdot 10^3 \text{cm}^2/\text{Vs}$

4. RF-grafieken.

Indien het film-gedomineerde model geaccepteerd wordt dan moeten ook de RF-grafieken de voorspelde helling $(-2/3)$ hebben.

Figuur 20 geeft RF-grafieken, die over 2 decaden een helling $-2/3$ hebben. Het formeren is zowel bij nummer (1) als bij nummer (4) met 350V geschied voor elke meetserie. De RF-metingen zijn zeer subtiel. Reeds bij kleine trillingen verschuift de contactspot. De contactweerstand R wordt dan 2 decaden groter. Voor $F < 1N$ is de spreiding in de meetpunten zeer groot.

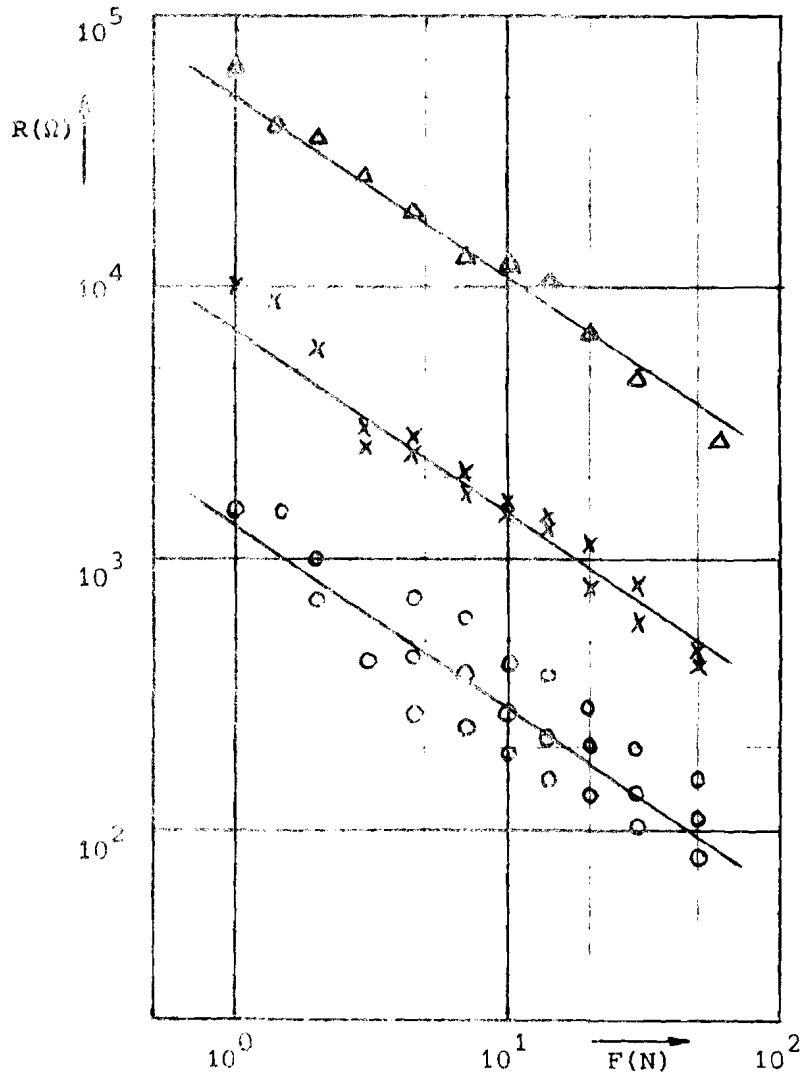
Met (42) wordt voor (1) als gemiddelde waarde gevonden $\rho_{\text{film}} = 0,8 \cdot 10^5 \Omega\text{cm}$ uit 10 meetseries, voor nummer (4) $\rho_{\text{film}} = 4 \cdot 10^5 \Omega\text{cm}$ uit 4 meetseries.

Voor de cilinders nummer (4) is nog een tweede serie meetpunten (Δ) gegeven. Deze is een 1/2 uur na de laatste keer formeren opgenomen. Hiervoor geldt $\rho_{\text{film}} = 28 \cdot 10^5 \Omega\text{cm}$. Een $\rho_{\text{film}} = 5 \cdot 10^5 \Omega\text{cm}$ werd gevonden 15 minuten na de laatste keer formeren.

De oxydehuid wordt na het formeren weer hoog-ohmiger. De beweeglijkheid van de ladingdraggers in de gedegenerende oxydehuid verandert niet.

Conclusie:

Geformeerde constricties van Gals gedragen zich volgens het uniforme filmmodel. Dit wordt zowel in de CR- als in de RF-grafiek gedemonstreerd met acceptabele waarden voor ρ_{film} en μ_{film} [44], [45].



figuur 20: RF-grafieken van geformeerde filmgedomineerde puntcontacten (n-GaAs).
 o $\rho_{\text{film}} = 0,8 \cdot 10^{-5} \Omega\text{cm}$; $k_0 = 4 \cdot 10^5$; o en x als in figuur 19.
 Δ als o $\frac{1}{2}$ uur na laatste keer formeren, $\rho_{\text{film}} = 28 \cdot 10^{-5} \Omega\text{cm}$.

7.2. Metingen aan homogene cilinders (n- en p-type) met geformeerde metallische contacten

1. Inleiding.

Goede ohmse contacten maken op GaAs en een beschrijving geven van de structuur, is moeilijk. De hoog-ohmige oxydehuid is de belangrijkste oorzaak hiervan. De structuur van een preparaat met twee contacten is: metaal-oxyde-halfgeleider-oxyde-metaal.

De IV-karakteristieken zijn niet-ohms en niet-symmetrisch zonder formeren. Op de uiteinden van een cilinder, waarvan de lengte-as in de (1,1,1) richting gegroeid is, worden aan de ene kant Ga-atomen en aan de andere As-atomen gevonden. De hoge α_{exp} van de cilinders in §6.3. na formeren kan verklaard worden met 1/f ruis van de metaal-halfgeleider-overgangen.

2. Modellen.

- a. Stel, de oxydehuid wordt laag-ohmiger zoals bij de geformeerde constricties (§7.1b.).

Het oppervlak dat laag-ohmiger wordt is kleiner dan πr^2 . Voor $a = 0,01 - 0,1$ cm wordt $2R_c = 300 - 3\Omega$ ($2R_c = t\rho_{film}/\pi a^2$). Dit is veel groter dan gevonden na formeren (§6.3.). Van cilinders nummers ①, ③, ④ zijn de C's en overeenkomstige R-waarden uitgezet in een grafiek. Deze "CR"-grafiek vertoont niet de voor een oxydehuid te verwachten helling (+1). De spreiding is groot. Een geformeerd film-model wordt voor deze contacten verworpen.

- b. De oppervlaktestructuur van het GaAs is niet glad, maar duidelijk gewelfd. De oxydehuid is weliswaar hoog-ohmig, echter ook duidelijk inhomogeen. Het opgebrachte metallisch contact heeft een korrelige oppervlaktestructuur. Plaatselijk zal er een grote veldverdichting kunnen optreden. Het ontladen van de condensator over het contactoppervlak gaat gepaard met een zodanige energiedissipatie, dat de oxydehuid plaatselijk doorslaat. Op deze doorgeslagen spots maakt het metaal direct contact met de halfgeleider. De stroomdoorgang zal via deze parallelle kanaaltjes plaatsvinden. Iedere contactspot ruist ongecorrigeerd volgens een halve constrictie. Onder de aanname dat aan beide contacten hetzelfde geschiedt, wordt met (28) en (29) $k = 200-1000$ en $a = 10^{-5} - 10^{-4}$ cm voor cilinders ①, ③ en ④ gevonden. Voor de contactweerstand geldt $R=2R_c$.

3. Analyse van de contacten met 1/f ruis van k parallelle constricties met straal a.

Het formeren is geschied aan een aantal cilinders nummer ② van p-GaAs. Na iedere keer formeren werd de contactweerstand $R (= 2R_c)$ en de 1/f ruis-intensiteit C gemeten. De wijze van formeren is voor iedere cilinder anders. Met (28) en (29) zijn a's en k's berekend. Deze zijn uitgezet in figuur 21 en 22 op de verticale assen. Op de horizontale as is uitgezet de wijze van formeren.

Er wordt een kwalitatieve analyse van de grafieken gegeven. Een vergelijking wordt gemaakt van a met ω . Voor (40+ - 320+) wordt een toenemende a gevonden; k neemt eerst toe en wordt dan constant. Voor (40+ - 320+) blijken a en k bij verder formeren nauwelijks te veranderen. + Formeren is duidelijk doelgericht. Direct wordt het benodigde aantal contactspots gemaakt om de stroom te laten passeren. Dan wordt vergeleken Δ met +. Voor (160+ - 160+) verandert a nauwelijks en neemt k licht toe. (320+ - 320+) doet a duidelijk toenemen evenals k. Een grotere energiedissipatie aan de contacten geeft steeds meer spots k met een grotere straal a.

Conclusie:

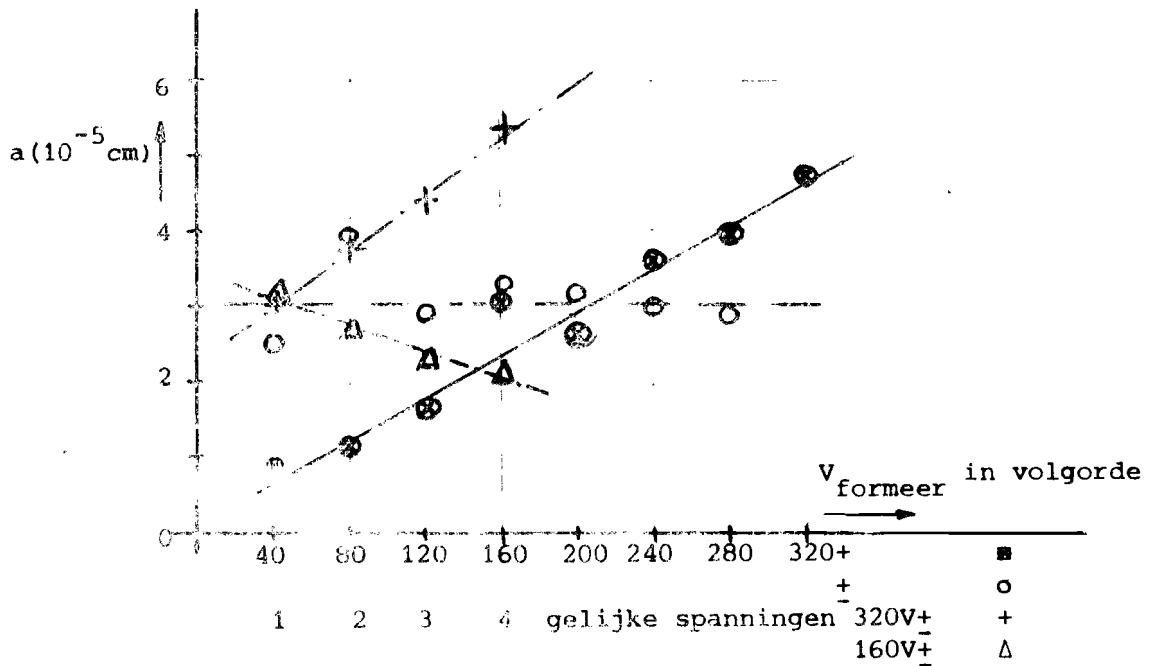
Globaal gezien neemt het aantal spots k toe door vaker formeren met een hogere spanning. Ook a neemt toe. Bij een groot aantal keren formeren komt k eerder tot een eindwaarde dan a. Er geldt $200 < k < 2000$ en $10^{-5} \text{ cm} < a < 10^{-4} \text{ cm}$.

4. "CR"-grafiek.

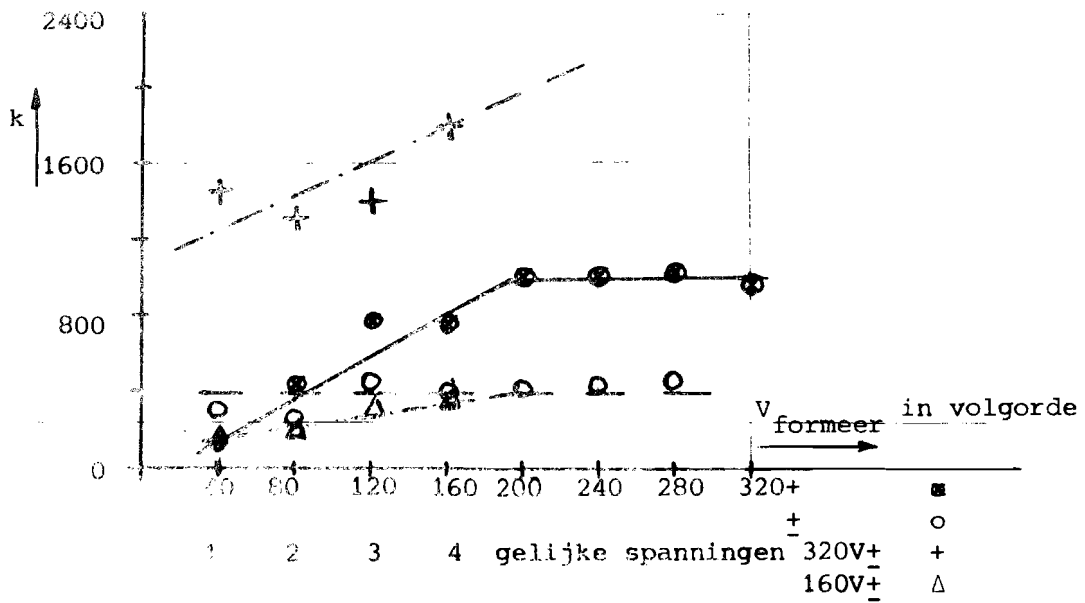
In een verzamelgrafiek zijn uitgezet alle gemeten C's tegen de overeenkomstige R's. (figuur 23). De spreiding van de punten in de CR-grafiek is niet groot, hoewel de meetpunten afkomstig zijn van een aantal verschillende experimenten. Vooral de punten (40+ - 320+) liggen op een duidelijk traject over 3 decaden in C. De clusters (Δ , o) wijken hiervan niet veel af.

Dit laat een speculatie toe omtrent een model op grond van de CR-grafiek. Uit (26) en (27) blijken de volgende afhankelijkheden $C \propto k^2 R^3$ en $R \propto k^{-1} a^{-1}$.

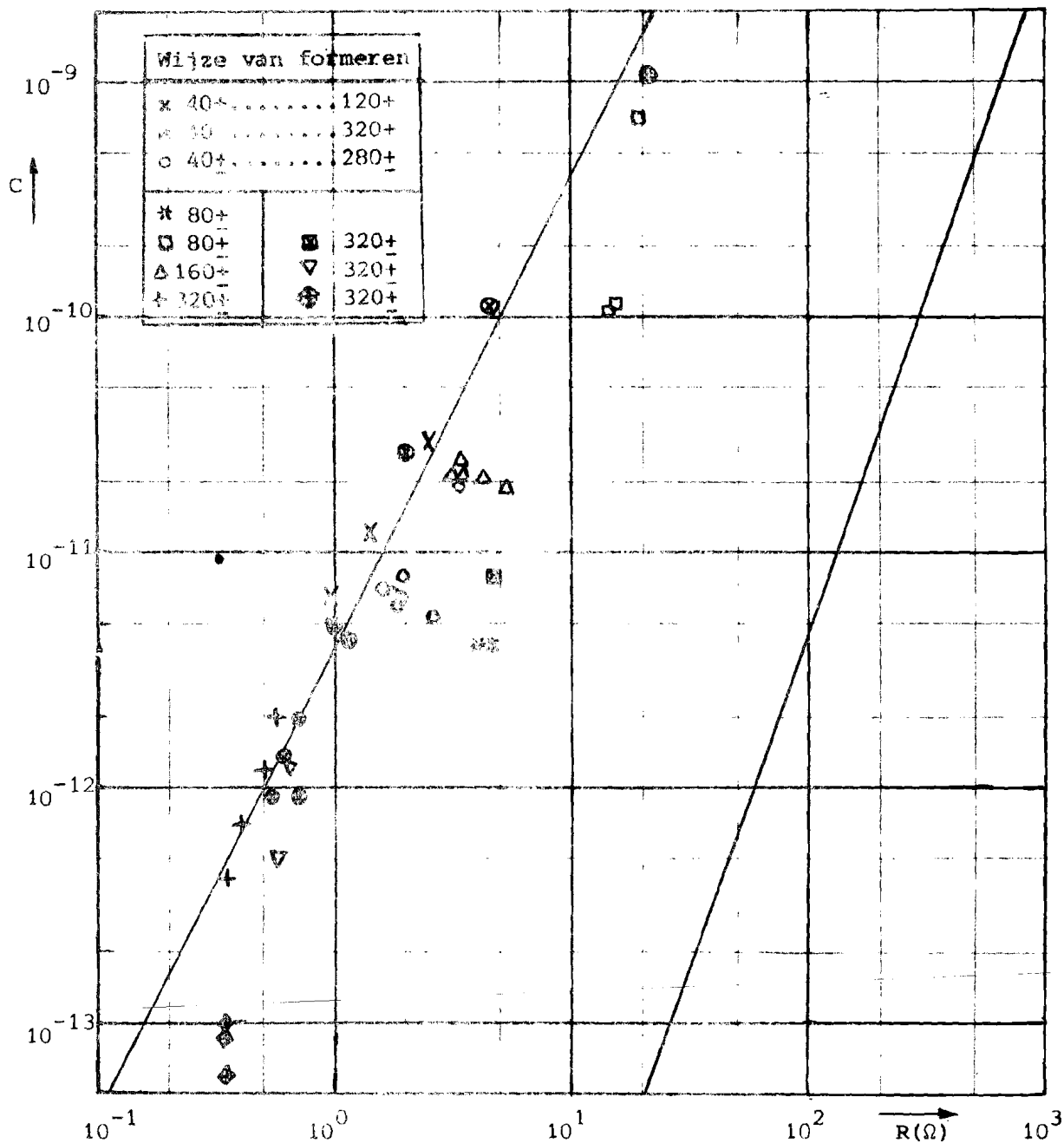
In tabel V staan een aantal mogelijke exponenten η van de CR-grafiek met hun gevolgen voor het $k \times a$ model. Een lijn met helling (+2) is de beste rechte door de meetpunten Δ . Er geldt $C = \lambda R^2$ met $\lambda = 4 \times 10^{-12} / \Omega^{+2}$.



figuur 21: Straal a van de contactspots als functie van de wijze van formeren.



figuur 22: Aantal contactspots k als functie van de wijze van formeren.



figuur 23: "CR"-grafiek van geformeerde metallische contacten op p-GaAs; $p_{\text{bulk}} = 3,7 \cdot 10^{17} / \text{cm}^3$, $\rho_{\text{bulk}} = 0,077 \Omega \text{cm}$. Lijn onder helling (+2) is de beste lijn door de punten \square . Lijn met helling (+3) volgens (18).

Tabel V

CvR^η η	kvR^ζ ζ	avR^ξ ξ
1	-1	0
2	-1/2	-1/2
3	0	-1

Geformeerde contacten op GaAs hebben een model met $kvR^{-1/2}$ en $avR^{-1/2}$. Dit model is onafhankelijk van de wijze van formeren.

In de CR-grafiek is eveneens een rechte met (18) voor één constrictie getekend. De gemeten 1/f ruis-intensiteit C is $10^4 - 10^6$ groter. Deze grote verschillen zijn verklaard met het piekjesmodel.

5. Foto's van piekjes op en putjes in de geformeerde GaAs-oppervlakken.

Er is een quantitative beschrijving gegeven (kita), die gesteund wordt op een kwalitatieve analyse van het formerproces. Dit is echter geenszins een bewijs dat de aannamen juist zijn.

Van de geformeerde GaAs-oppervlakken zijn foto's gemaakt (figuur 24 en 25) na het verwijderen van het gesoldeerde In-contact.

Figuur 24 toont duidelijk een aantal uitstulpingen. Op deze piekjes zal het metaal direct contact maken met de halfgeleider.

Een globale berekening leert, dat het aantal piekjes in de grootte-orde ligt van 1000-2000. Geteld is het aantal, dat met het In contact gemaakt heeft. De berekende $k=1240$ uit de CR-meting voorafgaande aan het fotograferen van het contactoppervlak. De overeenstemming tussen telling en berekening is zeer goed.

Figuur 25 geeft een foto van het andere contactoppervlak, waarop in putjes een groot aantal kleine spotjes van het In-contact zijn achtergebleven.

Alle cilindres, die op verschillende wijze zijn geformeed, vertonen beide typen oppervlakken. De manier van formeren kan de oorzaak niet zijn. Een verklaring kan zijn dat aan het ene contact Ga-atomen boven zitten en aan het andere contact As-atomen.

Er kan op grond van de foto's aangenomen worden dat er een zekere spreiding in de straal a van de spots is. Uit §4.4.2. (figuur 12) is duidelijk dat, uitgaande van de spots met de kleinste diameter, door bijvoeging van grotere spots, geen duidelijke toename van de 1/f ruis te verwachten is.

Ook verschillen in aantallen op de uiteinden (§4.4.3.) geven met $\gamma < 10$



100 μ

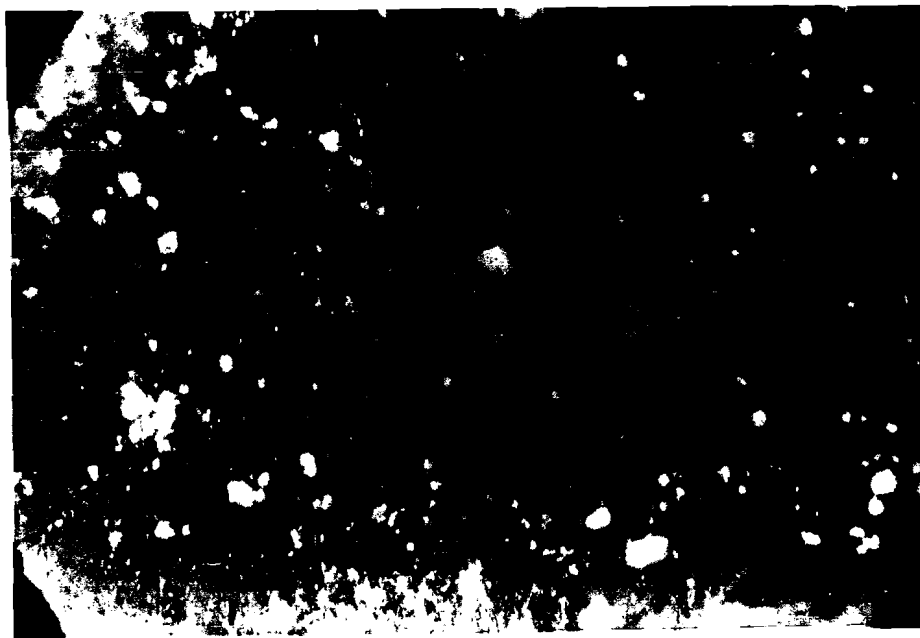
Figuur 24: Microscopfoto van piekjes op het geformeerde GaAs-oppervlak. 300x vergroot.

hooguit een factor 10-30 meer in de 1/f ruis, dan het eenvoudige $k\lambda$ model. (figuur 13).

Conclusies

Uitgaande van een aantal spots k met gelijke straal a kunnen zonder al te grote afwijkingen de geformeerde contacten op GaAs worden beschreven.

De quantitative analyse met (28) en (29) komt goed overeen met het discrete aantal contact spots op de foto's.



figuur 25: Microscopiefoto van In-dots die in putjes op het geformeerde GaAs-oppervlak zitten. 480x vergroot.

8. EXPERIMENTEN MET InSb-PUNTCONTACTEN

De metingen aan constricties van InSb-cilinders zijn gedaan op kamertemperatuur (300K) en in vloeibare stikstof (77K). De cilinders hadden een lengte van 10mm en een diameter van 4 à 5mm. We wilden nagaan hoe de druk- en temperatuurafhankelijkheid uitwerkte in zowel de RF- als de CR-grafieken.

8.1. Preparatie van de cilinders

Tabel VI geeft een overzicht van de relevante grootheden [46] van de InSb-cilinders, bepaald met de methode van Van der Pauw [16]. De cilinders worden in dit verslag aangeduid met nummer ⑤ t/m nummer ⑧.

Tabel VI

Materiaal	Soortelijke weerstand (Ωcm)	Concentratie Hallmetingen (cm^{-3})	Beweeglijkheid (cm^2/Vs)	Temperatuur (K)	Opmerkingen
⑤ n-type	4×10^{-3}	$2,8 \times 10^{16}$	56.000	300	Intrinsiek 300K
	$2,8 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{15}$	220.000	77	
⑥ n-type	$3,5 \times 10^{-3}$	$3,2 \times 10^{16}$	56.000	300	Intrinsiek 300K
⑦ p-type	$5,5 \times 10^{-3}$	2×10^{16}	57.000	300	Intrinsiek 300K $\mu_n \gg \mu_p$
	4,2	$3,3 \times 10^{14}$	4.500	77	
⑧ p-type	$5,5 \times 10^{-3}$	2×10^{16}	57.000	300	Intrinsiek 300K $\mu_n \gg \mu_p$
	1	$1,4 \times 10^{15}$	3.500	77	

De cilinders zijn als vierkante blokjes gezaagd uit een plak, die in de (1,1,1)-richting is gegroeid, en daarna op de gewenste diameter geslepen. Deze bewerkingen geven een vrij korrelige structuur.

De cilinders worden ontvet in een ultrasoon trilbad. Etsen in $3\text{HF}-3\text{HNO}_3-4\text{H}_2\text{O}$ (gedeïoniseerd) maakt de oppervlakte-structuur gladder.

Metingen aan puntcontacten van ruwe cilinders zijn niet reproduceerbaar. CR- en RF-grafieken hiervan zijn niet te interpreteren aan de hand van eenvoudige modellen (§4.1. en §4.2.). Het maken van ohmse contacten op InSb is eenvoudig. Een Sn-contact is bij 300K te prefereren. De mechanische stabiliteit is groot. Bij 77K breekt het kristal stuk op de soldeerplaats wegens het verschil in uitzettingscoëfficiënt van Sn en InSb. Met In solderen (smeltemperatuur van In 156°C), nadat het contactoppervlak bevochtigd is met evrimet (soldeerwater), geeft zowel op 300K als op 77K een goede mechanische hechting. Alle preparaten die op 77K gemeten zijn hebben In-contacten.

8.2. Metingen aan InSb-puntcontacten met oxydehuiden op 300K.

1. Natuurlijke oxydehuiden.

De metingen zijn uitgevoerd met een balans, waarmee de kracht F gevarieerd werd door bijschuiven van gewichten (zie §7.1.). De RF- en CR-grafieken (figuur 26 en 27) geven hellingen (-2/3) en +1) over 2 decaden in R . Dit is een film-gedomineerd gedrag.

De kruisjes (x) geven een meting voor nummer ⑥ die representatief is voor experimenten aan InSb op 300K. Steeds geldt $V < 50\text{mV}$ voor het punt-contact [41]. De IV-karakteristieken zijn recht.

In tabel VII worden gemiddelde waarden van ρ_{film} en μ_{film} uit een aantal experimenten gegeven. Voor $t = 60 \text{ \AA}$ genomen.

Tabel VII

InSb 300K	Uit RF- grafieken: ρ_{film} (Ωcm)	Spreiding ρ_{film} een factor	Aantal ex- perimenten	Uit CR- grafieken: μ_{film} (cm^2/Vs)	Spreiding μ_{film} een factor	Aantal ex- perimenten
n-type ⑤ en ⑥	1700	5	21	50×10^{-3}	6	14
p-type ⑦ en ⑧	1700	2	5	25×10^{-3}	4	4

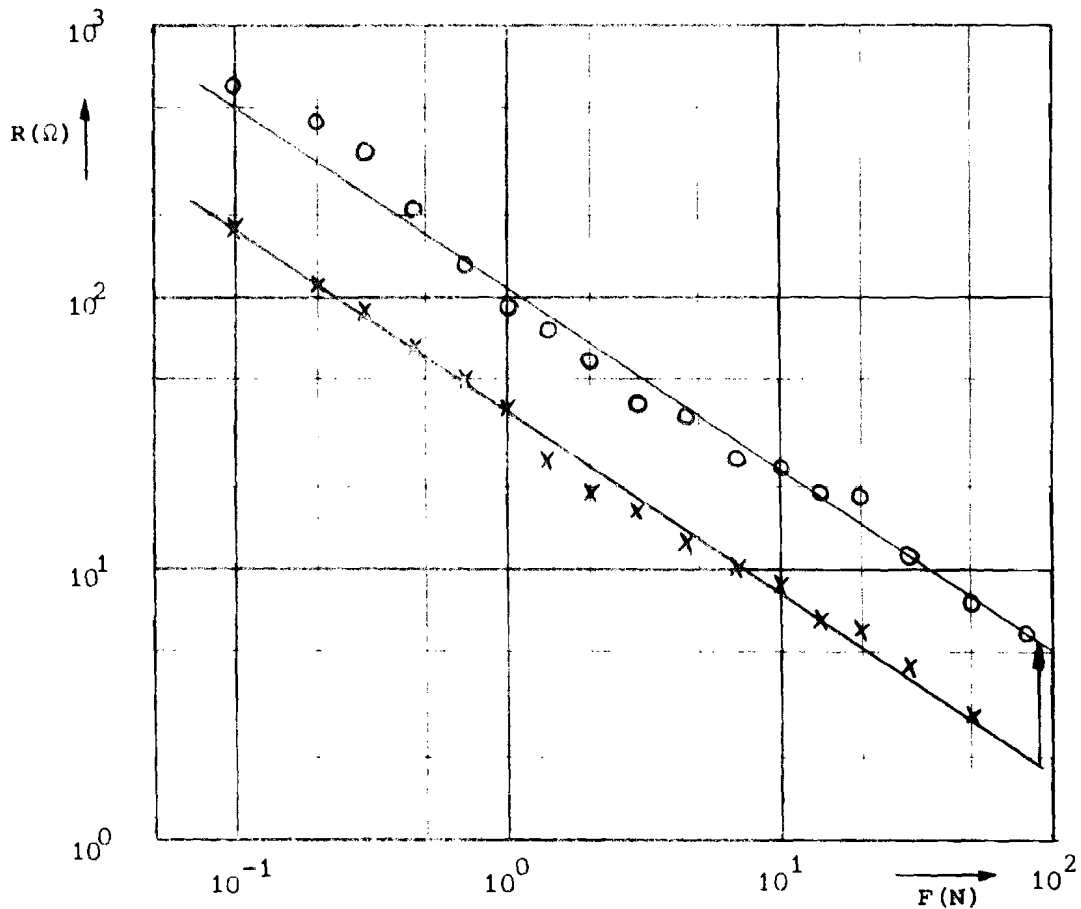
Tussen n- en p-type is nauwelijks verschil in ρ_{film} en μ_{film} . Beide zijn op 300K intrinsiek en hebben nagenoeg dezelfde waarden voor ρ_{bulk} , n_{bulk} en μ_{bulk} . De oxydehuiden zullen dus ook dezelfde eigenschappen hebben.

Uitgaande van een constante $\rho_{\text{film}} = 1700 \text{ } \Omega\text{cm}$ kunnen diktes van de oxydehuiden berekend worden uit de RF-grafieken. De diktes variëren van 10-50 Å ($=1/2t$). De waarde 10 Å werd gevonden vlak na het etsen.

De drukafhankelijkheid van ρ_{bulk} is niet waargenomen, omdat de oxydehuid overheerst.

2. Gegroeide oxydehuid na H_2O_2 -behandeling.

Teneinde het filmmodel voor InSb-puntcontacten verder aan te tonen, lieten we de natuurlijke oxydehuid groeien. Gedurende 18 uur werden de cilinders ⑥ in een 30% H_2O_2 -oplossing gelegd.



figuur 26: RF-grafieken van n-type InSb, $n_{\text{bulk}} = 3,2 \times 10^{16} / \text{cm}^3$
 $\rho_{\text{bulk}} = 3,5 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$; x vóór H_2O_2 -behandeling
 $\rho_{\text{film}} = 1900 \Omega \text{cm}$, $t = 60 \text{ \AA}$; o ná H_2O_2 -behandeling
 $t = 134 \text{ \AA}$.

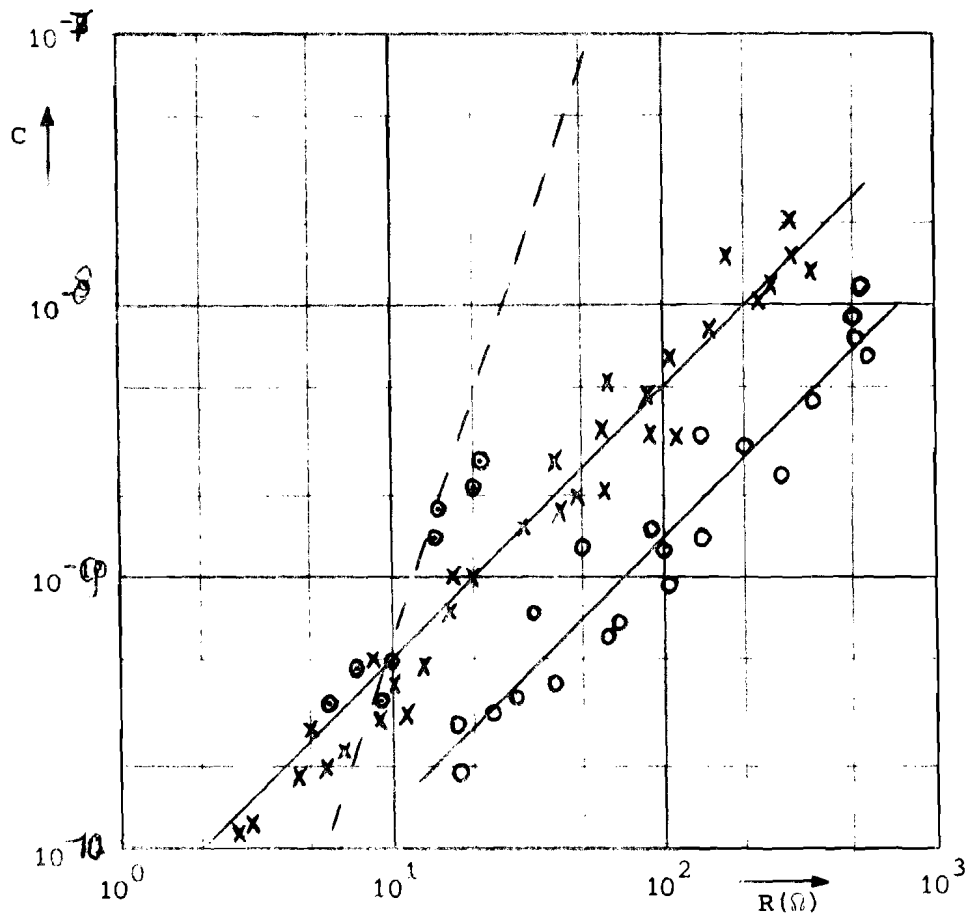
Haeri en Rhoderic [47] lieten de natuurlijke oxydehuid op GaP groeien door een behandeling in kokende H_2O_2 .

De RF- en CR-grafieken (figuur 26 en 27), gemeten vóór (x) en na (o) de H_2O_2 -behandeling, geven aan dat de oxydehuid verdubbeld is.

Vóór de H_2O_2 -behandeling wordt met $1/2t = 30 \text{ \AA}$ voor $\rho_{\text{film}} = 1900 \Omega \text{cm}$ en $\mu_{\text{film}} = 56 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 / \text{Vs}$ gevonden. Met deze waarden volgt voor (o) uit de RF-grafiek $t = 134 \text{ \AA}$ en uit de CR-grafiek $t = 108 \text{ \AA}$.

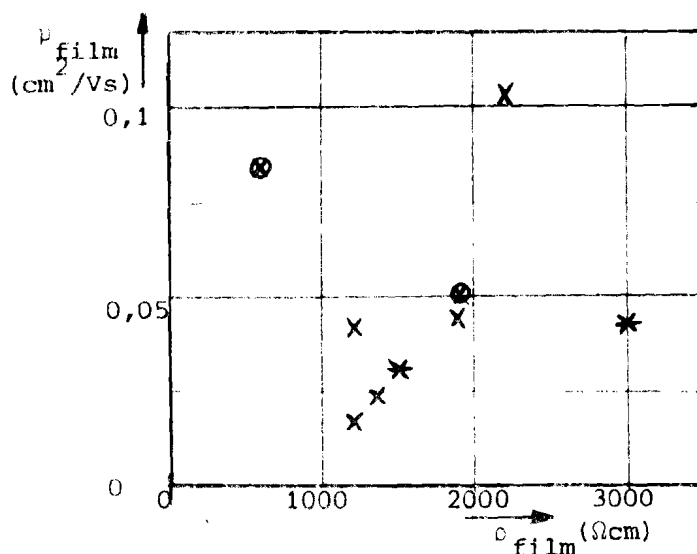
De $1/f$ ruis-intensiteit C is voor $F > 10\text{N}$ plotseling een factor 10 groter, en volgt de trend van de CR-punten onder helling (+1) na de H_2O_2 -behandeling niet meer.

De meetpunten θ blijken (18) te volgen. Een verklaring is, dat de oxydehuid brosser is geworden. De oxydehuid breekt bij $F=10\text{N}$ tengevolge van de grote druk. Nog verder laten groeien door de cilinders 20 minuten in kokende H_2O_2 te leggen, geeft niet reproduceerbare metingen.



figuur 27: CR-grafiek n-InSb, $n_{\text{bulk}} = 3,2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,
 $\rho_{\text{bulk}} = 3,5 \times 10^{-3} \text{ } \Omega\text{cm}$; x vóór H_2O_2 -behandeling
 $\mu_{\text{film}} = 56 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$; $t = 60 \text{ \AA}$, o ná $\text{H}_2\text{-O}_2$ -
 behandeling $t = 108 \text{ \AA}$; θ volgen (18) alsof film
 doorgeprikt wordt bij $F=1N$.

Van 7 paar cilinders nummer (5) zijn RF- en CR-grafieken opgenomen. Hieruit zijn ρ_{film} 's en μ_{film} 's bepaald (figuur 28). De metingen (\square , \star) zijn aan dezelfde paren cilinders uitgevoerd. Er blijkt geen verband te bestaan tussen verandering in ρ_{film} en μ_{film} voor hetzelfde materiaal. Op grond van de grote spreiding in ρ_{film} en μ_{film} zijn er geen verdere experimenten gedaan om het groeiproces van de oxydehuid in H_2O_2 verder te onderzoeken. De ruis nam vaak exponentieel af met een factor 20 en een tijdconstante van 1 à 2 minuten. Soms werd de $1/f$ ruis verstoord door burst-noise.



figuur 28: Bepaalde ρ_{film} 's en μ_{film} 's op n-InSb
 $n_{bulk} = 2,8 \times 10^{16}/cm^3$, $\rho_{bulk} = 4 \times 10^{-3} \Omega cm$ uit
 simultaan opgenomen RF- en CR-grafieken.

8.3. Metingen aan InSb-puntcontacten met de kinematische opstelling op 77K.

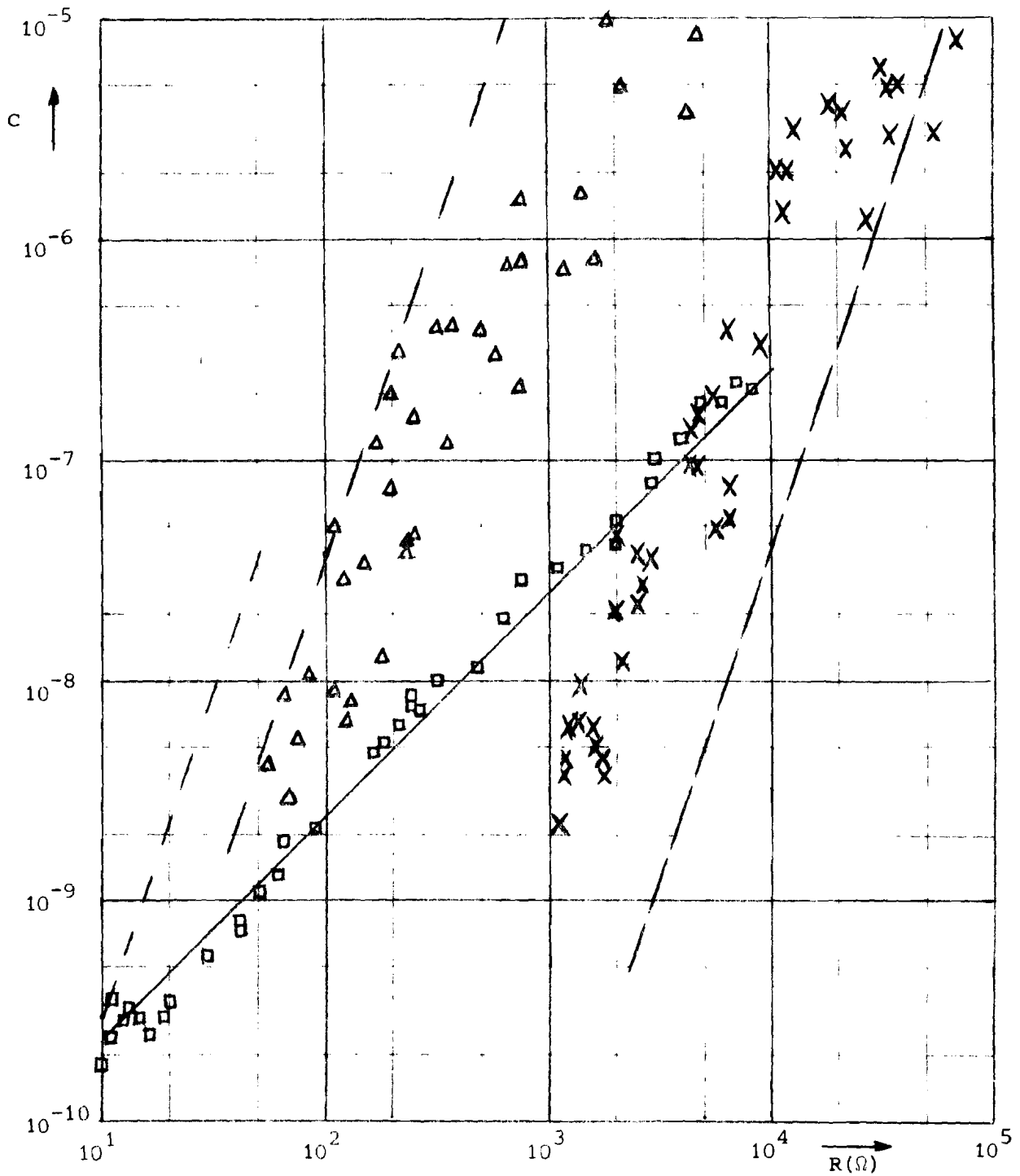
De experimenten op 77K geven de temperatuur- en drukafhankelijkheid van InSb-puntcontacten. Voor de metingen wordt de kinematische opstelling gebruikt (hoofdstuk 3). Van n-type nummer (5) en p-type nummer (7) en (8) zijn CR- en RF-grafieken bepaald. De CR-grafieken (figuur 29) geven ^{een}tendens naar helling (+3). De overgang van bulk- naar film-gedomineerd-gebied is gemeten. De (x) geven p-type, nummer (7); de (Δ) geven n-type, nummer (5). Om de verschillen met 77K te accentueren is er een grafiek voor 300K opgenomen van nummer (7) met $\mu_{film} = 28 \cdot 10^{-3} cm^2/Vs$. De gestippelde lijnen zijn volgens (18).

Met aannamen van ρ_{film} en μ_{film} zullen we lijnen door de punten kunnen trekken.

RF-grafieken op 77K tonen eveneens een overgangsgebied van bulk- naar film-gedomineerde situatie (figuur 30). De (x), (Δ) en (\square) komen overeen met de CR-grafiek. Voor 300K is getekend een lijn met $\rho_{film} = 2000 \Omega cm$.*

In tabel VIII zijn de relevante grootheden, die berekend zijn uit de beste lijnen door de punten gegeven.

* Op 300K geven zowel n- als p-type InSb nagenoeg identieke filmgedomineerde grafieken (tabel VII).



figuur 29: CR-grafieken met kinematische opstelling opgenomen.
 Δ n-InSb nr. ⑤, 77K. \times p-InSb nr. ⑦, 77K; \square idem 300K.
 \times en \square aan dezelfde cilinders opgenomen. \square punten gelden ook voor n-type op 300K.

Tabel VIII

InSb 77 K	$\rho_{\text{film}} (\Omega\text{cm})$	$\rho_{\text{bulk}} (\Omega\text{cm})$	$\phi = \frac{t\rho_{\text{film}}}{a\rho_{\text{bulk}}} = R_f/R_c$				
			10^{-2}N	10^{-1}N	1N	10N	100N
⑤ n-type	4.000	1,6	2,5	1,1	0,5	0,25	0,11
⑦ p-type	80.000	27,5	2,9	1,34	0,58	0,29	0,13

Voor ⑤ geldt dat ρ_{bulk} uit de RF-grafiek 57x groter is dan uit tabel VII. Voor ⑦ is ρ_{bulk} 6,5x groter.

In de literatuur [9] t/m [14] geeft alleen Volkov [11] waarden voor ρ_{bulk} onder druk op 77K (§5.2.).

Voor p-InSb ($p_{\text{bulk}} = 2.10^{14} \text{ cm}^{-3}$) vond hij in het gebied van $3.10^8 - 10.10^8 \text{ N/m}^2$ een $\rho_{\text{bulk}} = 5,1 \Omega\text{cm}$, die hetzelfde was als bij 10^5 N/m^2 (= 1 at.). Deze drukken komen overeen met krachten $F = 1-10\text{N}$ op het puntcontact.

De CR-grafiek met $p_{\text{bulk}} = 3,3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ nummer ⑦ toont dus aan dat ρ_{bulk} bij 77K niet drukafhankelijk is. Hetzelfde zou men kunnen zeggen voor $n_{\text{bulk}} = 1,2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ nr. ⑤ voor n-InSb.

De grote verschillen moeten dan verklaard worden uit de oppervlaktestructuur waardoor het contactgebied anders is dan volgens (41)*.

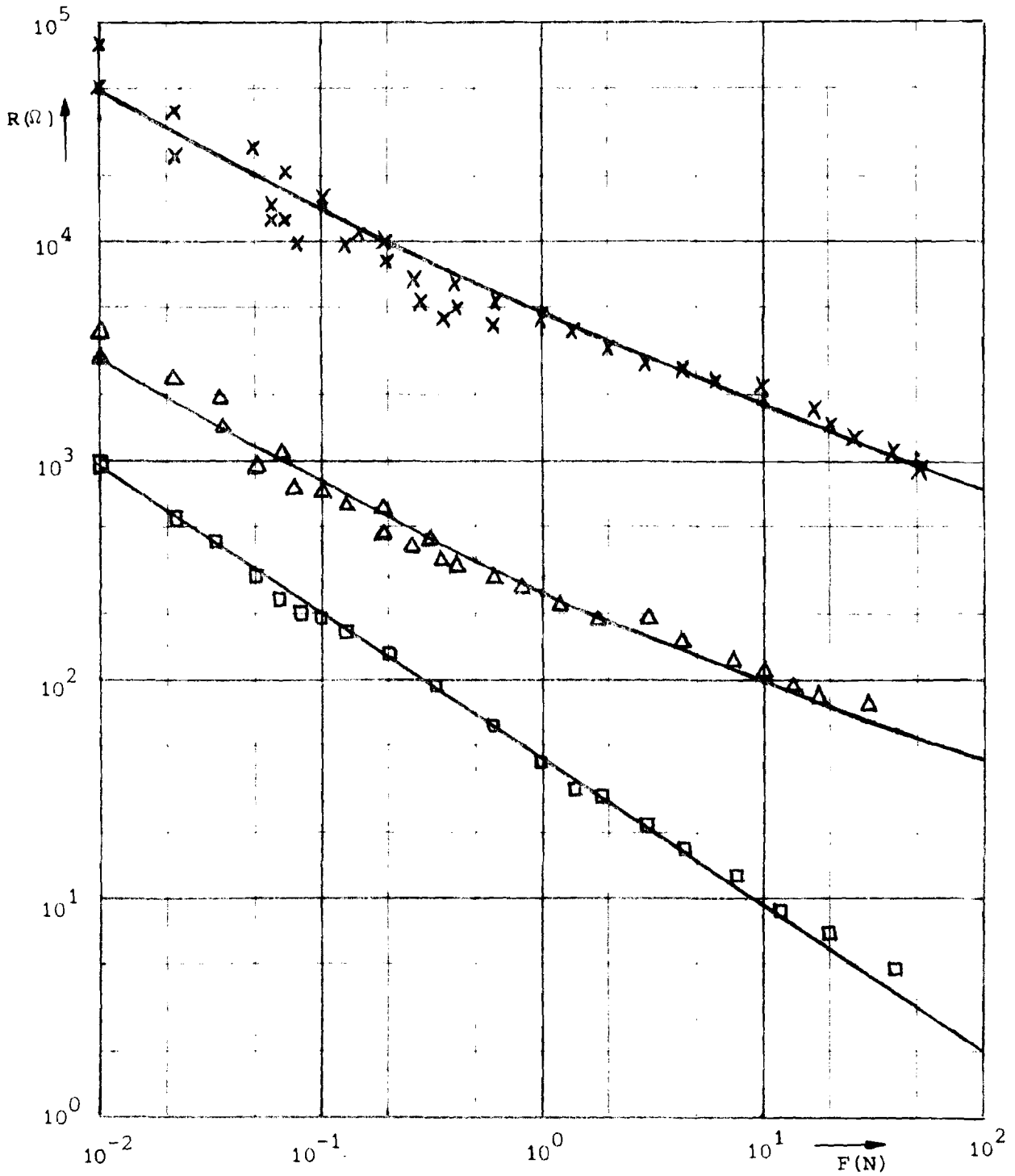
Duidelijk is dat voor deze discrepantie een oplossing gezocht moet worden.

Uit een globale extra-polatie naar een helling (+1) in de CR-grafiek vinden we voor de beweeglijkheden van de oxydehuiden op 77K: nummer ⑤ 1,6 cm^2/Vs , nummer ⑦ 0,28 cm^2/Vs , zodat de grootte-orde hiervan is afgeschat.

Conclusie:

Uit de CR-grafieken volgt het bulk-gedomineerd gedrag van de puntcontacten op 77K. De RF-grafieken geven een ρ_{bulk} die groter is dan volgens vierpuntsmetingen. De kinematische opstelling is zowel op 300K als op 77K te gebruiken en geeft reproduceerbare grafieken.

* Op grond van beschikbare literatuurgegevens kan een grote temperatuurafhankelijkheid van de Youngsmodulus E uitgesloten worden.



figuur 30: RF-grafieken met kinematische opstelling opgenomen.
 Δ , x en \square aan dezelfde cilinders en op dezelfde temperaturen als
figuur 29. Getrokken lijnen zijn de beste lijnen door de meetpunten
met de parameters uit tabel VIII.

9. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

De samenvatting wordt in de vorm van tabel IX gegeven. In deze tabel is in het kort weergegeven wat aan het einde van iedere paragraaf is gesteld.

Verder onderzoek dient te geschieden aan slechte metallische contacten op halfgeleiders, die na formeren ohms zijn geworden. Nagegaan moet worden hoe de piekjes en putjes ontstaan, die aan de GaAs-oppervlakken zijn aangetoond.

Ook dient onderzocht te worden of de afzonderlijke piekjes beschouwd kunnen worden als stroomgestuurde constricties. Hierover is in dit verslag geen uitspraak gedaan. Wel is duidelijk dat de kleinste contactspots de grootste bijdrage leveren tot $1/f$ ruis.

Eveneens moeten contacten op andere halfgeleiders met een hoog-ohmige oxydehuid worden onderzocht, die na formeren ohms zijn geworden.

Met $1/f$ ruis kunnen we een ohms contact op een halfgeleider beschrijven, òf als ideaal ohms contact [8], òf piekjes-gedomineerd contact, òf als film-gedomineerd contact (§7.1b.).

Bij InSb dient de discrepantie tussen ρ_{bulk} uit RF-metingen en ρ_{bulk} uit vierpunsmetingen op 77K verder onderzocht te worden.

De metingen op 300K en 77K dienen uitgebreid te worden tot hogere, lagere en tussenliggende temperatuurgebieden, teneinde meer gegevens over temperatuurafhankelijkheden van ρ_{film} en μ_{film} te krijgen.

Tabel IX

Materiaal	Meetconfiguratie	Hellingen grafieken		$\rho_{\text{film}} (\Omega\text{cm})$	$\mu_{\text{film}} (\text{cm}^2/\text{Vs})$	Dominerend gedrag	Opmerkingen
		CVR^{V} v	$\text{R}^{\text{F}}\text{X}$ x				
n-GaAs	Niet geformeerd puntcontact	0	-2/3	$10^8 - 10^{11}$	$10^{-6} - 10^{-8}$	film	IV-karakteristiek niet ohms, niet symmetrisch. Film inhomogeen. Parallel-capaciteiten verstoren 1/f spectra.
			-1/3	-----	-----	niet onderzocht	
n-GaAs	Geformeerd puntcontact	1	-2/3	$5 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^6$	$4,5 \cdot 10^{-3} - 45 \cdot 10^{-3}$	film	Gedegeneerde oxydehuid wordt laag-ohmiger door het ontladen van de condensator.
n-GaAs p-GaAs	Homogene cilinders met geformeerde metallische contacten	2	niet relevant	-----	-----	200-2000 als parallele constricties ruisende piekjes	Ene contact piekjes erop, andere putjes erin. Model $a^{\text{VR}}^{-1/2}$, $k^{\text{VR}}^{-1/2}$.
n-InSb	Puntcontact 300K	1	-2/3	1700	$50 \cdot 10^{-3}$	film	Experimenten met oxydehuiden van diktes $10 - 60 \text{ \AA}$ ($=1/2t$).
	Puntcontact 77K	3	-1/3	4000	1,6	bulk	$\rho_{\text{bulkRF}} \approx 60\rho_{\text{bulk}}$ vierpunts. Verklaring uit drukafhankelijkheid of oppervlaktestructuur.
p-InSb	Puntcontact 300K	1	-2/3	1700	$25 \cdot 10^{-3}$	film	Intrinsiek op 300K. Gedraagt zich als n-type, omdat $\mu_n > \mu_p$
	Puntcontact 77K	3	-1/3	80000	0,28	bulk	$\rho_{\text{bulkRF}} \approx 7\rho_{\text{bulk}}$ vierpunts. Verklaring uit drukafhankelijkheid of oppervlaktestructuur.

10. LITERATUURLIJST

- [1] F.N. Hooge, Phys. Lett. 29A, 139 (1969)
- [2] F.N. Hooge, Physica, 60, 130 (1972)
- [3] F.N. Hooge, H.J.A. van Dijk and A.M.H. Hoppenbrouwers, Philips Res. Repts., 25, 81 (1970)
- [4] F.N. Hooge and A.M.H. Hoppenbrouwers, Phys. Lett. 29A, 642 (1969)
- [5] A.M.H. Hoppenbrouwers and F.N. Hooge, Philips Res. Repts., 25, 69 (1970)
- [6] L.K.J. Vandamme, J. Appl. Phys. 45, 4563 (1974)
- [7] A. Mircea, A. Roussel and A. Mittonneau, Phys. Lett. 41A, 345 (1972)
- [8] L.K.J. Vandamme, Phys. Lett. 49A, 233 (1974)
- [9] R.W. Keyes, Phys. Rev. 99, 490 (1955)
- [10] H.A. Gebbie, P.L. Smith, I.G. Austin and J.H. King, Nature, 188, 1095, (1960)
- [11] A.S. Volkov, V.V. Galavanov, B.V. Izvozhikov and I.A. Taksami, Sov. Phys. Solid State, 8, 2958 (1967)
- [12] N.N. Sirota and V.B. Shipilo, Phys. Stat. Sol. 25, K27 (1968)
- [13] N.N. Sirota and V.B. Shipilo, Sov. Phys. Semicond. 3, 699 (1969)
- [14] S.I. Narita and T. Masaki, J. Phys. Soc. Japan, 28, 1098 (1970)
- [15] F.N. Hooge and A.M.H. Hoppenbrouwers, Physica, 45, 386 (1969)
- [16] L.A. van der Pauw, Philips Res. Repts. 13, 334 (1958)
- [17] M. Pollerman, Bauelemente der Physikalischen Technik, Springer Verlag (1955)
- [18] B.J. Ong, Polytechnisch Tijdschrift, 26, 592a (1963)
- [19] R. Holm, Electric Contacts, Springer Verlag (1967)
- [20] R. Holm, 5e Internationale Tagung, München, 16, (1970)
- [21] L.K.J. Vandamme, Private Communication
- [22] S.P. Timoshenko and J.N. Goodier, Theory of Elasticity, McGraw Hill, New York, p. 409 (1951)
- [23] Yu. A. Burenkov, Yu. M. Burdukov, S.Yu. Davydov and S.P. Nikanorov , Sov.Phys.Solid State, 15, 1175 (1973)
- [24] G.I. Peresada, Sov. Phys. Solid State, 14, 1546 (1972)
- [25] C. Zwikker, Physische Materiaalkunde 2, Wetenschappelijke Uitgeverij N.V., Amsterdam, p. 80 (1967)
- [26] H.M. Ledbetter and R.P. Reed, J. Phys. Chem. Ref. Data, 2, 531 (1973)
- [27] A. van der Ziel, Solid State Physical Electronics 2nd. ed., Prentice Hall, Inc. London, p. 97 (1969)

- [28] R.H. Cox and H. Strack, *Solid State Electron.*, 10, 1213 (1967)
- [29] K.K. Shih and J.M. Blum, *Solid State Electron.*, 15, 1177 (1972)
- [30] Bernstein, J. *Electrochem. Soc.*, 109, 270 (1962)
- [31] B.W. Hakki and S. Knight, *IEEE Trans. Electron.Devices*, ED-13, 93 (1966)
- [32] G.F. Day, *IEEE Trans. Electron.Devices*, ED-13, 88 (1966)
- [33] W.D. Edwards, et.al., *Solid State Electron*, 12, 935 (1972)
- [34] C.R. Paola, *Solid State Electron*, 13, 1189 (1970)
- [35] J. Gyulai and J.W. Mayer, *J. Appl. Phys.* 42, 3578 (1971)
- [36] B.R. Pruniaux, *J. Appl. Phys.* 42, 3575 (1971)
- [37] Ya.A. Goldberg and B.V. Tsarenkov, *Sov. Phys. Semicond.*, 3, 1447 (1970)
- [38] V.P. Duraev et.al., *J.Appl.Phys.*, 25, 1576 (1970)
- [39] A.G. Milness and D.L. Feucht, *Heterojunctions and Metal-Semiconduction Junctions*, Academic Press, New York and London, p. 288 (1972)
- [40] A. van der Ziel, *Fluctuation Phenomena in Semiconductors*, Butterworth, London (1959)
- [41] M. Stoisiiek, D. Wolf and H.J. Queisser, *App.Phys.Lett.* 19, 288 (1971)
- [42] T. Higier and G.G. Harman, *Proc. of the Int. Res.Symp. on Electric Contact Phenomena*, University of Maine, p. 31, (1961)
- [43] G.G. Harman and T. Higier, *J.Appl.Phys.*, 33, 2198 (1962)
- [44] K. Hulls and P.W. McMillan, *J.Phys.*, D-5, 865 (1972)
- [45] D. Adler, *Amorphous Semiconductors*, Butterworth, London, p. 32 (1971)
- [46] B. Lengeler, *Cryogenics*, 8, 439 (1974)
- [47] S.Y. Haeri and E.H. Rhoderick, *Metal-semiconductor contacts*, The Institute of Physics, London and Bristol, *Proc. of Phys. Conf. ser. no. 22*, p. 84 (1974).