

PEMAKAIAN RESISTOR KARBON DAN DIODA SAMBUNGAN P-N
DALAM THERMOMETRY SUHU RENDAH

Marsongkohadi^{*)}

A. Kreshna^{**)}

Ngurah Made Agung^{***)}

R I N G K A S A N

Karakteristik dari resistor karbon dan dioda sambungan p-n yang terdapat di pasaran, telah diteliti pada suhu antara 80°K dan 220°K. Data-data dari resistor karbon, sesuai dengan persamaan tiga-parameter dari Clement-Quinnell. Suhu yang dihitung dari persamaan ini, berbeda $\pm 0,5$ persen dengan suhu yang diukur. Kepekaan termometriknya adalah sedemikian rupa, sehingga jika ketelitian pengukuran tahanan 0,1 persen, maka perbedaan suhu sebesar 0,4°K pada 93°K dapat dideteksi. Reprodusibilitas dari pengukuran suhu ini lebih kurang 4 persen.

Pada beberapa dioda sambungan p-n yang diselidiki, karakteristik T-V pada suhu kamar sampai suhu nitrogen cair, hampir linear. Selain dari itu, dioda ini menunjukkan reproduibilitas yang baik setelah mengalami guncangan termis.

Kecuraman dari karakteristik T-V dengan arus sebagai parameter dapat diterangkan de-

^{*)} Departemen Fisika, Institut Teknologi Bandung dan Pusat Reaktor Atom Bandung, BATAN.

^{**)} Lembaga Fisika Nasional, LIPI dan Universitas Padjadjaran Bandung.

^{***)} Universitas Udayana, Bali.

ngan menganggap bahwa sambungan p-n tersebut mengalirkan arus rekombinasi-generasi, sesuai dengan teori Sah, Noyce dan Shockley.

A B S T R A C T

The characteristics of some commercially manufactured carbon resistors and p-n junction diodes are measured from 80°K to 220°K. Datas of the resistors fit the three-parameter equation of Clement-Quinnell. Temperatures calculated by this equation are within ± 0.5 percent, of the measured temperatures. Thermometric sensitivity is such that by measuring resistance to one part in 1000, it is possible to detect temperature changes of 0.4°K at 93°K. Temperatures are reproducible within about 4 percent, from run to run.

In some p-n junction diodes, we have observed nearly linear T-V characteristics from room temperature to liquid nitrogen temperature. In addition these diodes exhibit good repeatability on temperature cycling. The slope of the T-V characteristics with current as a parameter, is explained by assuming that the device conducts primarily recombination-generation current according the theory of Sah, Noyce and Shockley.

1. Pendahuluan

Guna penelitian bahan-bahan maknetik dengan difraksi neutron, telah dibuat suatu Kriostat Nitrogen Cair, dengan cuplikan berupa serbuk atau kristal tunggal. Untuk menentukan suhu cuplikan, diperlukan suatu thermometer yang cukup tinggi kepekaan dan reproduibilitasnya, serta sederhana dalam cara pengukurannya.

Resistor karbon dan dioda sambungan p-n, telah diselidiki sifat-sifatnya pada suhu rendah, untuk menjajagi kemungkinan pemakaiannya sebagai thermometer suhu rendah (cryometer). Resistor karbon mempunyai sifat-sifat baik untuk thermometer, karena mempunyai koefisien panas tinggi, kapasitas panas rendah dan tidak dipengaruhi medan maknit.

Clement-Quinnell, ⁽¹⁾ menggunakan resistor karbon buatan Allen Bradley Company, untuk thermometer suhu rendah dan me-

mengemukakan relasi antara suhu T dan tahanan R , dengan tiga parameter,

$$\log R + K/\log R = A + B/T \quad (1)$$

dengan ketelitian 0,5 persen dalam daerah suhu $2^\circ\text{K} - 20^\circ\text{K}$. Untuk ketelitian yang lebih tinggi (1 mdeg K), pada tahun 1970, Balcombe et al, ⁽²⁾ mengemukakan persamaan polynom orthogonal,

$$T^{-1} = b_{-1}x^{-1} + b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + \dots \quad (2)$$

dimana $x = \log R$.

Untuk menentukan koefisien b dalam persamaan (2) dengan methoda "least squares", maka persamaan (2) dituliskan sebagai,

$$x T^{-1} = s_0 P_0 + s_1 P_1 + s_2 P_2 + s_3 P_3 + s_4 P_4 \quad (3)$$

dimana P_n adalah polynom orde n dalam x , yang didefinisikan,

$$P_n = (x - k_n) P_{n-1} - l_n P_{n-2} \quad n \geq 2 \quad (4)$$

Konstanta-konstanta k_n , l_n dan s_n ditentukan dari data kalibrasi (x_i, T_i) . Walaupun methoda ini dapat dipakai dengan ketelitian 0,1% namun kalibrasinya sangat rumit, sehingga mereka mengemukakan relasi yang lebih sederhana, dengan tiga buah parameter,

$$T = A/(\log R - B)^P \quad (5)$$

dimana A dan P ditentukan dengan tiga suhu kalibrasi. Kete-

litiannya dapat mencapai 1/3% dalam daerah suhu $0,6^{\circ}\text{K} - 4,2^{\circ}\text{K}$, untuk resistor 470 Ohm, $\frac{1}{2}$ watt buatan Speer Company.

McNamara, ⁽³⁾ telah menunjukkan bahwa, untuk dioda sambungan p-n, tegangan maju (forward voltage), pada arus tetap, berubah secara linear dengan suhu, untuk daerah di sekitar suhu kamar. Linearitas inilah yang memungkinkan dioda sambungan p-n dipakai sebagai cryometer.

Barton, ⁽⁴⁾ telah menggunakan dioda germanium untuk mengukur suhu serendah $2,5^{\circ}\text{K}$, sedangkan Cohen, et al, ⁽⁵⁾ menggunakan dioda sambungan p-n, GaAs untuk thermometry dalam daerah $2,0^{\circ}\text{K} - 300^{\circ}\text{K}$. Penelitian-penelitian tersebut umumnya dilakukan dalam daerah suhu helium cair, sedangkan untuk eksperimen kami dalam difraksi neutron hanya dibutuhkan pengukuran suhu dalam daerah suhu nitrogen cair.

Laporan ini mengemukakan penelitian atas beberapa resistor karbon dan dioda sambungan p-n, yang terdapat di pasaran dalam negeri, untuk pembuatan thermometer suhu rendah.

2. Teori

a. Resistor karbon

Resistor karbon dibuat dari polykristal grafit yang dicampur dengan bahan pengikat misalnya resin. Sifat-sifat grafit tergantung pada ukuran kristalnya dan perlakuan panasnya (heat treatment).

Akan tetapi, tahanan dari suatu resistor karbon bukan saja dipengaruhi oleh sifat-sifat polykristalnya, tetapi juga oleh ketidak murniannya (impurities), dan sifat-sifat kontak antara partikel-partikel grafit tersebut. Karena itu untuk menurunkan relasi antara R dengan T secara umum tidaklah mungkin.

Biasanya relasi itu diturunkan secara empiris. Walaupun demikian akan diturunkan juga relasi antara R dengan T dengan menganggap grafit sebagai semikonduktor. Hal ini penting guna mendapatkan rumus-rumus empiris. Dengan mengikuti penurunan Seitz, ⁽⁶⁾ untuk semikonduktor, maka konduktivitas listriknya dapat dituliskan,

$$\sigma = \frac{4}{3} \sqrt{2} n_b^{\frac{1}{2}} \frac{e^2 \ell}{h} \frac{1}{3/2} (2\pi m^* kT)^{\frac{1}{2}} e^{-E_g/kT} \quad (6)$$

dimana n_b adalah jumlah elektron bebas per satuan volume, m^* adalah massa efektif dari elektron, ℓ adalah jejak bebas

rata-rata, E_g adalah celah energi (energy gap), k adalah konstanta Boltzmann, dan h adalah konstanta Planck. Apabila $kT \ll E_g/2$, maka $(kT)^{3/4}$ berubah secara perlahan-lahan jika dibandingkan dengan $e^{-E_g/kT}$, karena itu kita dapat tuliskan,

$$\sigma = Ke^{-E_g/kT} \quad (7)$$

dimana $K = 4/2\sqrt{2} n_b^{1/2} (2\pi m^* kT)^{3/4} \frac{e^2 \ell_0}{h^{3/2}}$, dapat dianggap konstant sehingga (7) menjadi,

$$\log R = a + b/T \quad a \text{ dan } b \text{ konstanta} \quad (8)$$

Kebanyakan semikonduktor memenuhi persamaan (8), akan tetapi untuk resistor karbon, Clement-Quinnell, ⁽¹⁾ memodifikasi persamaan (8), menjadi

$$\log R + K/\log R = A + B/T \quad (1)$$

Konstanta-konstanta A , B dan K dalam (1), ditentukan dari tiga buah suhu kalibrasi. Clement-Quinnell juga mengemukakan rumus empiris untuk menentukan konstanta-konstanta tersebut yakni,

$$\left. \begin{aligned} A \pm 3\% &= 1,62 \log R_{290} + 0,27 \\ B \pm 9\% &= 1,60 \log R_{290} + 0,48 \\ K \pm 6\% &= 0,594(\log R_{290})^2 + 0,377 \log R_{290} - 0,121 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

dimana R_{290} adalah tahanan pada suhu kamar.

b. Sambungan p-n

Karakteristik $V_f - I_f$ (tegangan maju-arus maju) dari sambungan p-n telah banyak diselidiki. Teori ideal dari sambungan p-n yang dikemukakan oleh Shockley, ⁽⁷⁾ dapat menerangkan karakteristik $V_f - I_f$ dari sambungan p-n germanium, pada suhu kamar dengan memuaskan. Akan tetapi, teori ini tidak berhasil menerangkan karakteristik $V_f - I_f$ dari sambungan p-n silikon. Sah, Noyce dan Shockley, ⁽⁸⁾ dapat menerangkannya dengan anggapan bahwa pada semikonduktor yang mempunyai celah energi besar, umur dan resistivitas rendah; arus rekombinasi-generasinya lebih dominan dari pada arus diffusi. Rapat arus rekombinasi-generasi dapat dituliskan,

$$J_{rg} = \frac{KT}{\tau_o \epsilon} n_i e^{qV_f/2kT} \quad (10)$$

sedangkan jumlah arus diffusi yang mengalir dalam daerah p dan n ialah,

$$J_D = \left(\frac{2qn_p L_o}{\tau_o} \right) e^{qV_f/kT} \quad (11)$$

dimana q adalah muatan elektron, ϵ adalah medan listrik, n_i adalah rapat elektron dalam pita konduksi, τ_o adalah umur rata-rata dari pembawa (carrier) di dalam daerah rekombinasi, n_p adalah rapat lubang dalam pita valensi, V_f adalah tegangan maju dan L_o adalah panjang diffusi. Maka rapat arus total yang mengalir dalam sambungan p-n adalah,

$$J = \left(\frac{2qn_p L_o}{\tau_o} \right) e^{qV_f/kT} + \frac{KT}{\tau_o \epsilon} n_i e^{qV_f/2kT} \quad (12)$$

Dari persamaan (12), nyatalah bahwa perubahan arus terhadap V_f , akan lebih kecil dari $e^{qV_f/kT}$ dan lebih besar dari

$e^{qV_f/2kT}$, jadi dapat didekati dengan $e^{qV_f/nkT}$ dimana $1 < n < 2$. Karena itu dapat dituliskan,

$$I_f = I_s e^{qV_f/nkT} \quad (13)$$

Teranglah bahwa I_f berubah lebih lambat dari pada "ideal rectifier formula".

Dalam suhu nitrogen cair, sampai suhu kamar, I_s dapat dinyatakan dengan,

$$I_s = J_{so} A e^{-qE_g/2kT} \quad (14)$$

dimana J_{so} adalah rapat arus, A luas penampang sambungan p-n dan E_g adalah celah energi. Persamaan (13) dan (14) berlaku sampai suhu nitrogen cair. Hal ini memang telah diduga untuk dioda yang berkonduksi terutama dengan arus rekombinasi-generasi.

3. Eksperimen

Untuk eksperimen yang kami lakukan, telah dibuat suatu kriostat khusus yang dapat mendinginkan resistor karbon dan dioda sambungan p-n yang diselidiki. Kriostat tersebut juga dapat mempertahankan suhu resistor dan dioda pada suhu tertentu selama pengukuran dilakukan. Pembuatan kriostat itu berdasarkan rancangan (design) dari van Oort,⁽⁹⁾ dibuat dari gelas pyrex, dengan tinggi 80 cm dan diameter dalam 8 cm, dan ber-dinding berganda. Ruang antara kedua dinding tersebut dihampakan (10^{-6} torr), dan dinding dalamnya dilapisi dengan perak. Spesimen yang akan diselidiki ditaruh di dalam kamar eksperimen (experimental chamber), yang dapat didinginkan dengan nitrogen cair dengan jalan konduksi melalui batang tembaga. Suhu ruang eksperimen dapat dirubah-rubah dengan suatu pemanas nekkelin. Dengan mengatur arus yang melalui kawat nikkelin itu, dapatlah dicapai suhu yang dikehendaki. Suhu spesimen diukur dengan thermokopel besi-konstanta.

Pengukuran tahanan dilakukan dengan jembatan Wheatstone, buatan pabrik Bleeker, Holland dengan ketelitian 0,1%. Peng-

ukuran arus dan tegangan maju dioda dilakukan dengan cara konvensional.

Resistor karbon yang diselidiki ialah,

1. Buatan Philips, 100 ohm, 5,6 ohm dan 6,8 ohm,
2. Buatan Girard-Hopkins, U.S.A. 47 ohm,
3. Buatan Matsushita, Jepang, 100 ohm,
4. Buatan River, U.S.A. 7 ohm,
5. Buatan Jepang (tak dikenal pabriknya), 3 kohm.

Sambungan p-n yang diselidiki ialah,

1. Lima buah dioda ialah SD1, S15, BY127, SW1 dan S1ZD,
2. Lima buah transistor, yakni BC109, AC126, AC128, 2SB175 dan 2SB178.

4. Hasil-hasil eksperimen

a. Resistor Karbon

Karakteristik R - T

Dari resistor-resistor yang telah diselidiki, hanya dua buah yang memenuhi relasi Clement-Quinnell, yakni resistor buatan Girard-Hopkins, 47 ohm dan resistor buatan Jepang, 3 kohm. Kedua resistor itupun memenuhi relasi Balcombe et al, (2), yakni persamaan (5) dengan P = 1. Pengambilan data-data dilakukan dalam selang waktu satu minggu untuk menguji reproduksibilitas. Dari tiga titik kalibrasi yakni, 93°K, 143°K dan 203°K, dapat ditentukan konstanta-konstanta A, B dan K. Untuk resistor karbon Girard-Hopkins, 47 ohm dipenuhi persamaan,

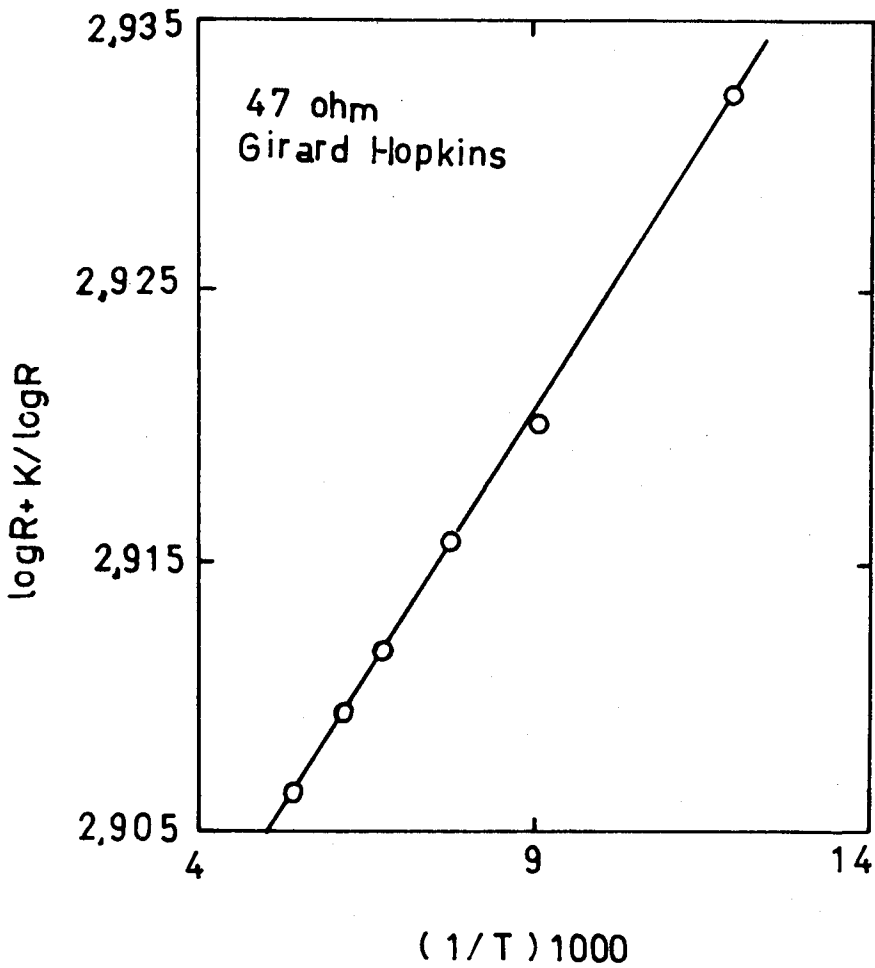
$$\log R + \frac{2,041}{\log R} = 2,886 + \frac{3,887}{T} \quad (15)$$

Untuk resistor buatan Jepang, 3 kohm berlaku,

$$\log R + \frac{9,765}{\log R} = 6,270 + \frac{5,161}{T} \quad (16)$$

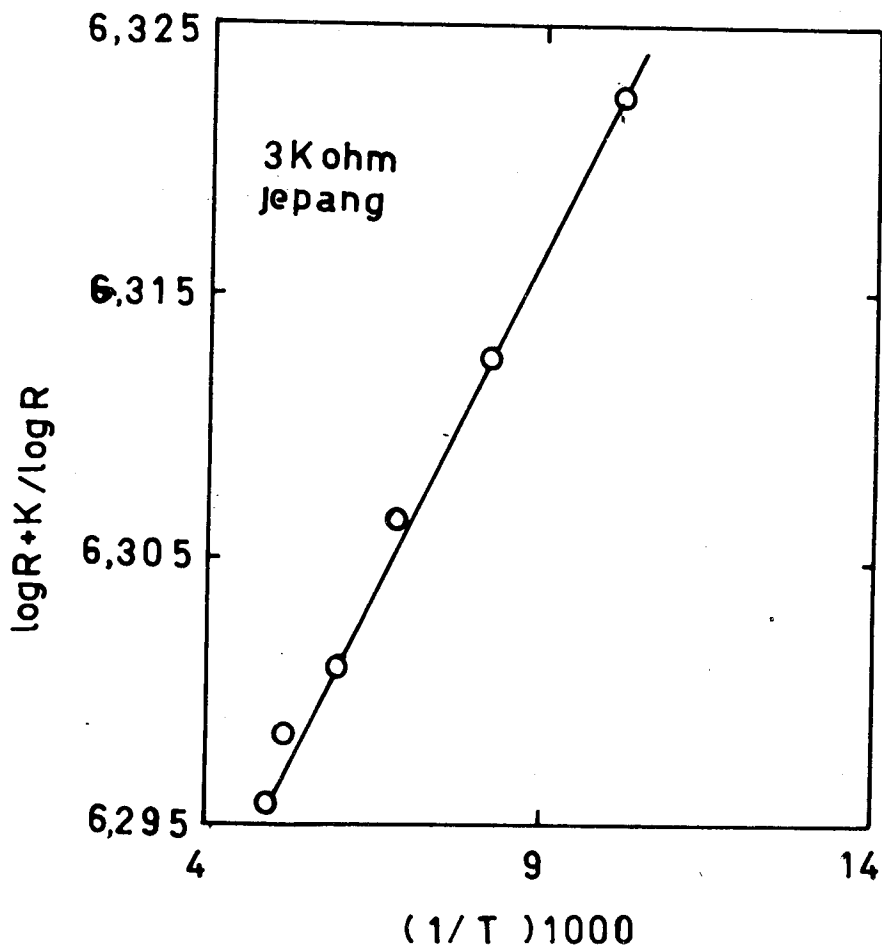
Gambar 1 dan 2 menunjukkan hubungan antara log R dengan 1/T untuk kedua resistor tersebut, yang seperti diharapkan berupa garis lurus.

Jika T_m adalah suhu yang diukur dan T_c adalah suhu yang dihitung dari persamaan (15) atau (16), sedangkan $\Delta T = T_m - T_c$



Gambar 1

Grafik $\log R + K/\log R$ vs $1/T$ untuk resistor karbon Girard-Hopkins 47 ohm



Gambar 2

Grafik $\log R + \frac{K}{\log R}$ vs $\frac{1000}{F}$ untuk resistor karbon buatan Jepang 3 K ohm

maka $\frac{\Delta T}{T} \times 100\%$ untuk kedua resistor tersebut lebih kurang 0,5%.

Reproduksibilitas

Untuk menyelidiki reproduksibilitas dari thermometer resistor karbon, telah ditentukan karakteristik R - T pada waktu yang berlainan dengan selang waktu tujuh hari. Hasil-hasil pengukuran reproduksibilitas dapat dilihat dalam Tabel 1.

Tabel 1
Reproduksibilitas dari pengukuran suhu
dengan thermometer resistor karbon

Harga Nominal resistor	Buatan Pabrik	Suhu ($^{\circ}$ K)	Reproduksi- bilitas	Selang waktu (hari)
47 ohm	Girard-Hopkins	103	4 %	7
		203	3 %	7
3 K ohm	Jepang	103	4 %	7
		203	3,5%	7
6,8 ohm	Philips	103	6 %	7
		203	4 %	7
7 ohm	River	103	4 %	7
		203	1,5%	7

Dalam percobaan ini juga telah diselidiki reproduksibilitas, setelah resistor karbon mengalami guncangan thermis (thermal shocks). Ternyata bahwa variasi tahanan setelah mengalami beberapa siklus, masih dalam batas-batas kesalahan alat pengukur.

Kepekaan Thermometrik

Kita definisikan kepekaan thermometrik sebagai $\frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \times 100\%$. Kepekaan dari beberapa resistor karbon yang diselidiki, dapat dilihat dalam Gambar 3. Jelaslah bahwa resistor buatan Philips dan River mempunyai kepekaan yang kecil, dan hampir

konstan terhadap perubahan suhu. Resistor buatan Girard-Hopkins dan Jepang, kepekaannya bertambah dengan kenaikan suhu. Apabila pengukuran mencapai 0,1%, maka resistor Girard-Hopkins dapat membedakan suhu sebesar 0,4°K pada 93°K, sedangkan resistor Jepang dapat membedakan suhu 0,3°K pada suhu 93°K.

Pengaruh Medan Magnet

Dalam percobaan difraksi neutron dari beberapa bahan-bahan magnetik, kadang-kadang digunakan medan magnet. Clement-Quinnell, ⁽¹⁾ telah menunjukkan bahwa pengaruh medan magnet terhadap tahanan resistor karbon dapat ditentukan dari rumus empiris,

$$d(R/R_0)/d(H^2) = (5,5 + 1,8 \log R_n) T^{-1,5} \times 10^{-5} \quad (17)$$

dimana H adalah intensitas medan magnet dalam kilogauss, $\log R_n$ adalah logaritma dengan dasar 10 dari tahanan nominal ohm dan R_0 adalah tahanan pada suhu T tanpa medan magnet. Dari persamaan (17) tampak bahwa perubahan tahanan makin besar apabila suhu turun, dan harga nominal tahanan bertambah besar. Sebagai contoh, tahanan 120 ohm pada suhu 4,2°K dalam medan sebesar 45.000 gauss menurut persamaan (17) memberi kenaikan tahanan sebesar 2,14%. Untuk suhu nitrogen cair kenaikan tahanan, tidak berarti.

b. Sambungan p-n

Dari sepuluh buah sambungan p-n yang kami selidiki, ada beberapa yang menunjukkan sifat-sifat yang baik, untuk dipergunakan dalam pengukuran suhu rendah, yakni SD1, S15, BC109 dan AC126.

Karakteristik T - V_f

Karakteristik T - V_f dari beberapa sambungan p-n, yang telah diselidiki menunjukkan linearitas antara suhu 80°K dan 300°K. Salah satu dari karakteristik tersebut yakni untuk SD1 dapat dilihat dalam Gambar 4. Besaran-besaran yang dapat ditentukan dari karakteristik tersebut dapat dilihat dalam tabel 2.

Tabel 2
Beberapa besaran yang ditentukan dari karakteristik
T-V, beberapa sambungan p-n

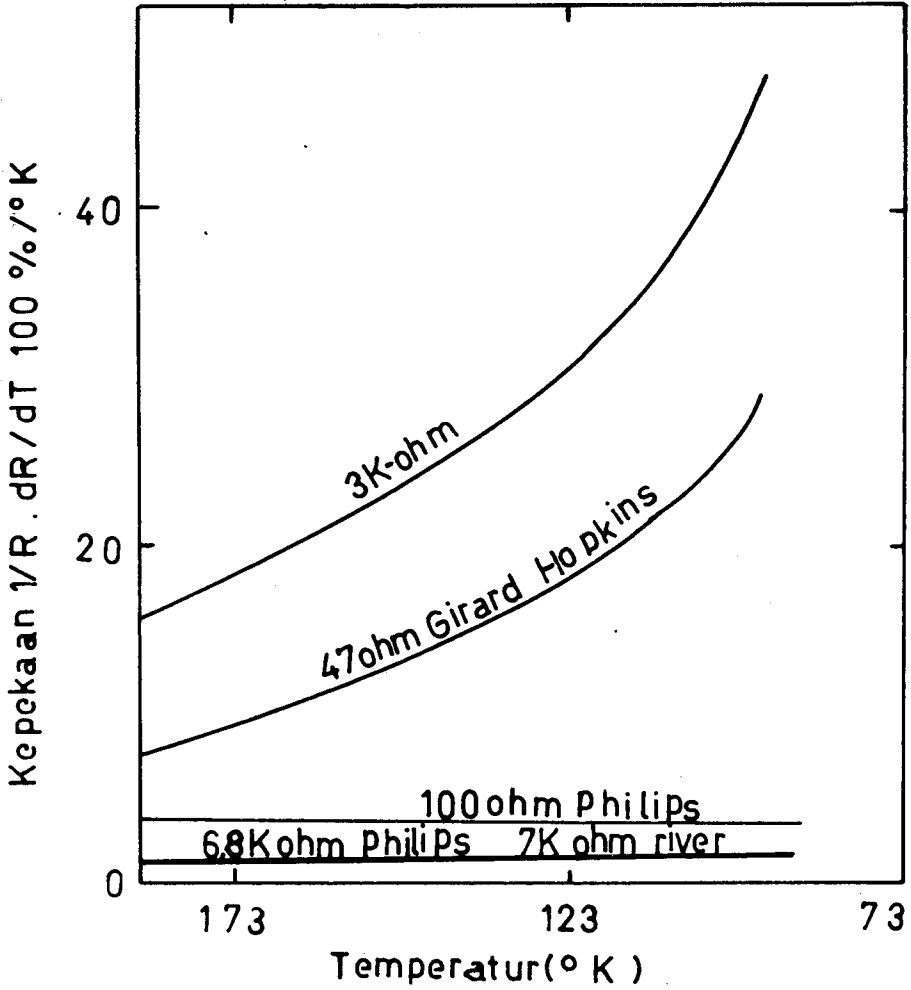
Sambungan p-n	Arus (mA)	$\Delta V/\Delta T$ (mV/°K)	T (°K)	$\frac{\Delta T}{T} \times 100\%$	T (°K)	$\frac{\Delta T}{T} \times 100\%$
SD1	0,12	-2,50	151,5	6,6	251,5	3,9
	0,70	-2,32	121,5	5,3	251,5	3,4
S15	0,12	-2,58	135,0	5,7	197,0	4,9
	0,99	-2,32	165,0	5,2	248,5	4,3
BC109	0,12	-2,07	151,0	3,2	203,0	3,6
	0,70	-1,98	142,5	4,2	203,0	3,7
AC126	0,12	-2,37	143,5	7,5	214,5	3,0
	0,99	-2,23	143,5	6,5	251,5	4,1

Kepekaan

Kepekaan $\Delta V/\Delta T$ dari sambungan p-n tergantung pada arus maju, dan lebih kurang konstan untuk daerah suhu nitrogen cair sampai suhu kamar. Kepekaan dari beberapa sambungan p-n dapat dilihat dalam kolom 3, tabel 2. Penyimpangan hasil pengukuran suhu dari linearitas karakteristik T - V_f , yang kita definisikan sebagai $\Delta T/T \times 100\%$ tergantung pada suhu T, dan dapat dilihat dalam kolom 5, tabel 2, untuk suhu T yang tercantum dalam kolom 4. Dalam kolom 7 tertera harga $\Delta T/T \times 100\%$ untuk suhu T yang tercantum dalam kolom 6.

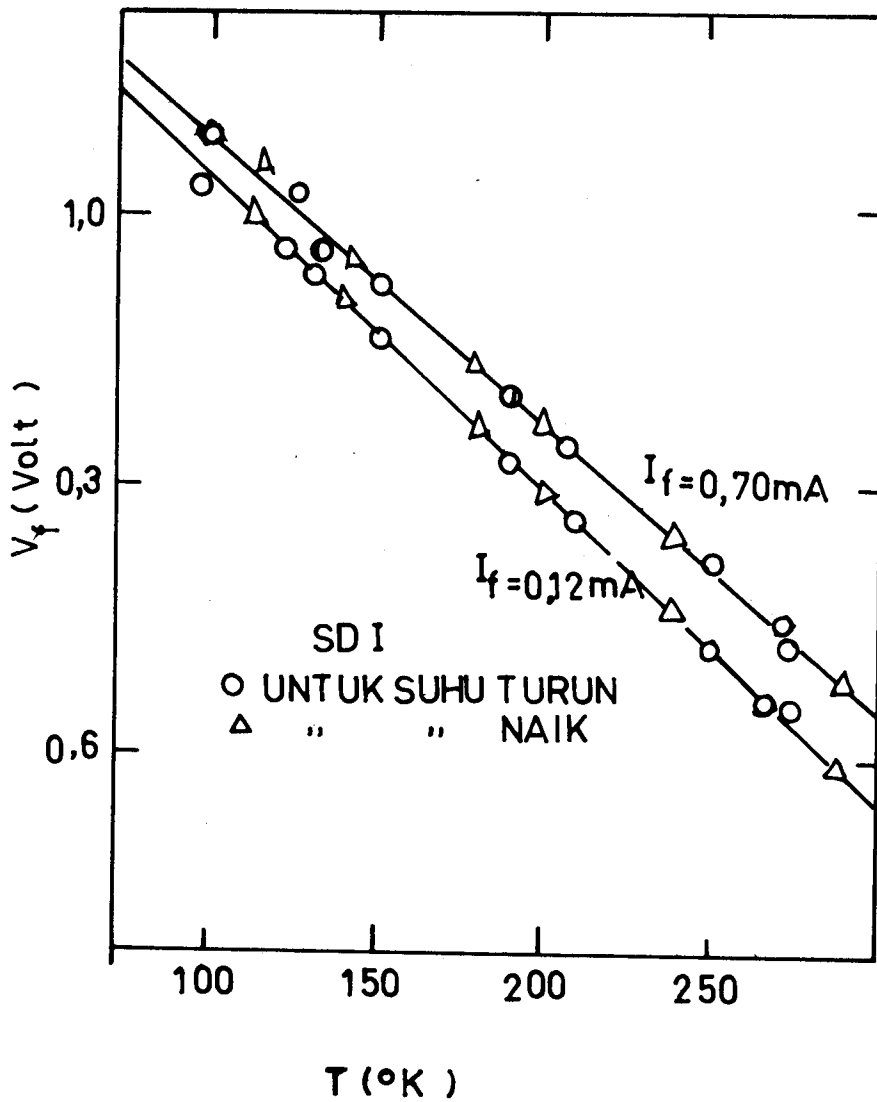
Reproduksibilitas

Untuk menentukan reproduksibilitas pengukuran suhu, telah ditentukan karakteristik T - V_f pada waktu yang berlainan, dengan selang waktu antara beberapa jam sampai beberapa hari.



Gambar 3

Kepekaan Thermometrik dari bermacam-macam resistor karbon



Gambar 4

Karakteristik $T - V_f$ dengan I_f sebagai parameter untuk sambungan p-n SD1

Pada umumnya reproduibilitas akan menjadi baik jika dipakai arus maju yang besar.

Hasil-hasil pengukuran reproduibilitas untuk beberapa sambungan p-n, dapat dilihat dalam kolom 4, tabel 3.

Tabel 3
Reproduibilitas pengukuran suhu dengan
beberapa sambungan p-n

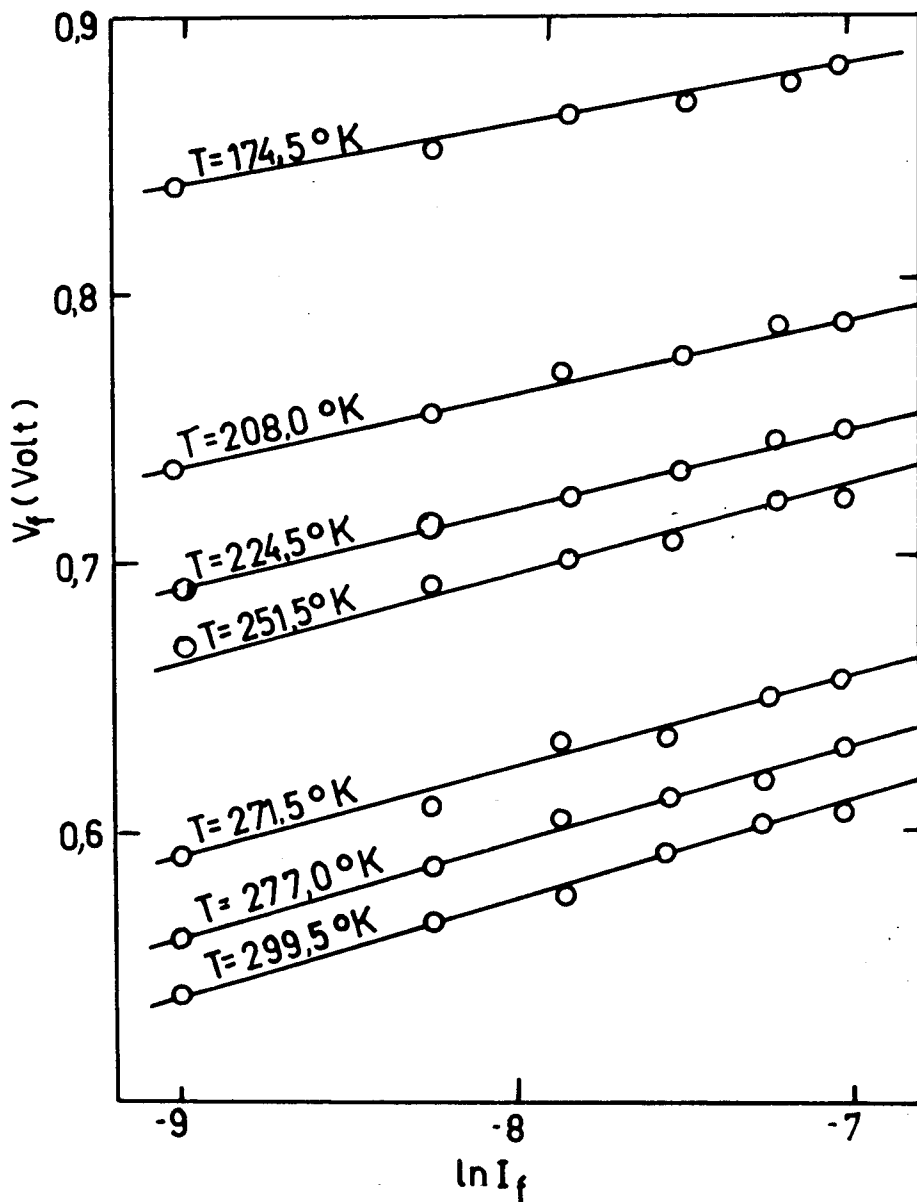
Sambungan p-n	Arus (mA)	T (°K)	$\Delta T/T \times 100\%$	Selang waktu
SD1	0,12	228,8	3,5	4 jam
	0,70	228,8	2,8	4 jam
S15	0,12	155,0	3,8	1,25 jam
	0,99	155,0	2,8	1,25 jam
BC109	0,12	197,0	3,7	13 hari
	0,76	197,0	1,3	13 hari
AC126	0,12	179,0	2,4	13 hari
	0,99	179,0	2,6	13 hari

Dalam percobaan ini juga ditentukan reproduibilitas setelah sambungan p-n mengalami guncangan thermis, yakni dengan melakukan "cycling" suhu antara suhu nitrogen cair dengan suhu kamar. Ternyata bahwa sambungan p-n tersebut cukup stabil dalam penunjukan suhu.

Karakteristik $V_f - I_f$, dengan T sebagai parameter juga telah ditentukan. Dari karakteristik ini dapat digambarkan grafik V_f vs $\ln I_f$ yang dapat dilihat dalam Gambar 5 untuk SD1. Grafik itu sebagai diharapkan merupakan garis lurus karena menurut persamaan (13),

$$\ln I_f = \ln I_s + qV_f/nkT \quad (18)$$

Gambar 5
Grafik V_f vs $\ln I_f$ dengan T sebagai parameter
untuk sambungan p-n SD1



Dengan ekstrapolasi grafik V_f vs $\ln I_s$ maka dapat ditentukan $\ln I_s$. Dari persamaan (18) dan grafik V_f vs $\ln I_f$ dapat ditentukan harga n untuk setiap suhu T . Ternyata n tidak banyak bergantung pada T . Harga n dari beberapa sambungan p-n yang diselidiki, dapat dilihat dalam kolom 3, tabel 4.

Tabel 4
 Harga n dan E_g pada suhu kamar untuk beberapa sambungan p-n yang diselidiki

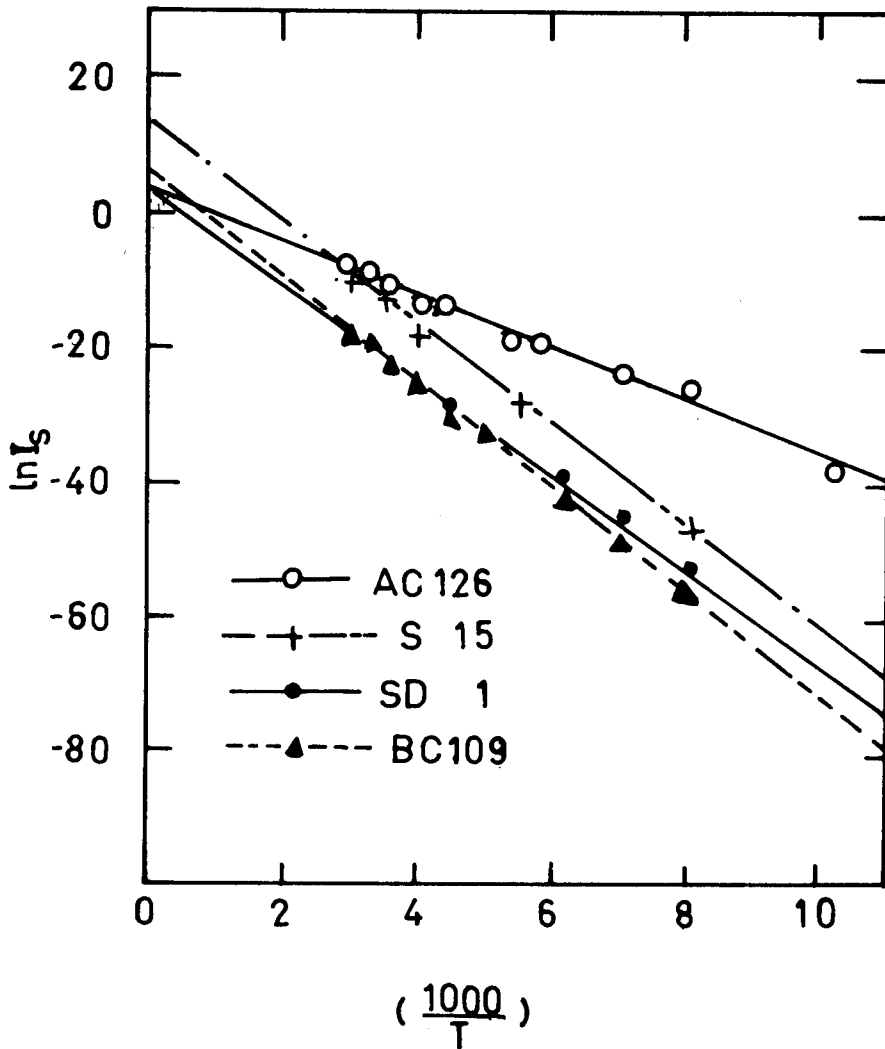
Sambungan p-n	Bahan	n	E_g (ev)
SD1	Si	1,5	1,12
S15	Si	1,5	1,23
BC109	Si	1,4	1,25
AC126	Ge	0,88	0,73

Dari grafik V_f vs $\ln I_f$, dapat ditentukan $\ln I_s$ untuk setiap harga T , sehingga kita dapat menggambarkan grafik $\ln I_s$ vs $1000/T$. Untuk SD1, grafik tersebut dapat dilihat dalam Gambar 6, yang seperti kita harapkan berupa garis lurus.

Menurut persamaan (14),

$$\ln I_s = \ln(J_{so} A) - qE_g/2kT \quad (19)$$

sehingga dari kecuraman grafik $\ln I_s$ vs $1000/T$, dapat kita tentukan celah energi E_g . Hasil dari perhitungan E_g dapat dilihat dalam kolom 4, tabel 4.



Gambar 6

Grafik $\ln I_s$ vs $\frac{1000}{T}$ untuk beberapa sambungan p-n

5. Kesimpulan

Resistor karbon 47 ohm buatan Girard-Hopkins, mempunyai sifat-sifat baik untuk thermometer suhu rendah. Reprodusibilitasnya dapat diperbaiki dengan melindungi resistor itu dengan selubung tembaga.

Beberapa sambungan p-n seperti SD1, S15, BC109 dan AC126 dapat dipakai untuk pengukuran suhu rendah. Karakteristik $T - V_f$ nya linear dalam daerah nitrogen cair - suhu kamar.

Ucapan terima kasih

Terima kasih kami ucapkan kepada Departemen Fisika, ITB, Lembaga Fisika Nasional, LIPI dan Pusat Reaktor Atom Bandung, BATAN, yang telah membiayai dan menyediakan fasilitas sehingga proyek ini dapat diselenggarakan dengan lancar.

Kepustakaan

1. J.R. Clement and E.H. Quinnell, Rev. Sci. Instr. 23, 213 (1952).
2. R.J. Balcombe, D.J. Emerson and R.J. Potton, J. of Phys. E: Sci. Instrum. 3, 43 (1970).
3. A.G. McNamara, Rev. Sci. Instr. 33, 330 (1962).
4. L.E. Barton, Electronics, 35, 38 (1962).
5. B.G. Cohen, W.B. Snow, and A.R. Tretola, Rev. Sci. Instr. 34, 1091 (1963).
6. F. Seitz, Modern Theory of Solids, McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, 1940, p. 191.
7. W. Shockley, Bell Sys. Tech. J. 28, 435 (1949).
8. C.T. Sah, R.N. Noyce, and W. Shockley, Proc. I.R.E. 45, 1228 (1957).
9. J. van Oort, J. Sci. Instr. 28, 279 (1951).

(Received 22nd August 1974)
