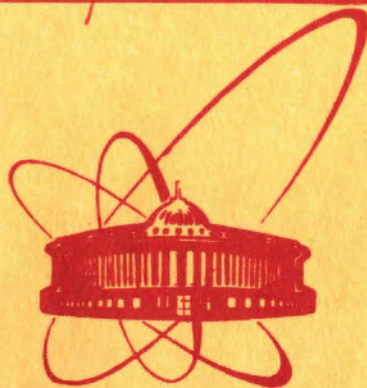


2807/2-80

23/VI-80



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

13-80-113

Л. Яншак

ПРИМЕНЕНИЕ ДИОДНЫХ ДАТЧИКОВ
В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕТРИИ
/Обзор/

Направлено в ПТЭ

1980

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие криогенной техники в науке и производстве требует надежных, точных и дешевых методов измерения температур в широком диапазоне.

Одним из современных методов измерения температуры является использование полупроводниковых диодных датчиков. К их достоинствам относятся: возможность перекрытия широкого интервала температур, высокая чувствительность, малые габариты и хорошая механическая прочность. В случае использования серийных полупроводниковых диодов можно значительно понизить стоимость термометров по сравнению со стоимостью коммерческих полупроводниковых или платиновых термометров.

2. ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

На возможность использования температурной зависимости тока полупроводникового диода в обратном направлении для измерения температуры впервые указал в 1959 году Смолянский^{/1/}.

Авторы работ^{/2-4/} предложили использовать температурную зависимость падения напряжения на р-п-переходе, через который протекает постоянный ток в прямом направлении. Mc Namara^{/5/} исследовал набор Ge и Si диодов в области температур от -40 до +100°C и определил среднюю величину чувствительности $dU/dT = 1,83$ мВ/К для Ge диодов и 2,11 мВ/К для Si диодов.

Применением диффузионных диодов из GaAs в широкопредельной термометрии занимались Cohen, Snow, Tretoja^{/6/}. Диоды изготавливались диффузией цинка в образец из легированного теллуром GaAs. Температурные зависимости падения напряжения на диоде при постоянном токе в прямом направлении /ВТ-характеристики/ почти линейны в диапазоне от комнатной температуры до температуры жидкого азота. С дальнейшим понижением температуры чувствительность плавно уменьшалась.

Исследованием диффузионных диодов из GaAs с разной концентрацией примесей в основном материале подробно занимались Dumin и Pearson^{/7/}.

Термометрические свойства Ge и Si диодов серийного производства были исследованы авторами работ^{/8-13/}. Дмитриенко и др.^{/14/} изучали температурную зависимость сплавных диодов из GaAs в области температур 4,2-300 К. В зависимости от типа

материала базы / n или p / диоды отличались формой VT-характеристики в области низких температур. Чувствительность в диапазоне температур выше 100 К была для обоих типов около 2 мВ/К. У диодов типа p⁺p / материал базы типа p / чувствительность при низких температурах повышалась, у диодов типа p⁺n / база типа n / - уменьшалась. Более подробные сведения приведены в работе /15/.

На основе перечисленных работ фирмой Lake Shore Cryotronics были разработаны диодные термометры из Si и GaAs /16/.

Подробным анализом свойств коммерческих GaAs диодных термометров занимались авторы /17,18/. Sclar, Pollock /19/ изучали свойства серийных планарных Si диодов в диапазоне 4,2-300 К.

Проблемой аналитического описания VT-характеристики диодов из GaAs в широком диапазоне температур занимались Praddaude и Pavese /21,22/. Результаты исследования термометрических свойств диодов производства ЧССР приведены в работах /23-25/, производства США - в работах /10,13,26/, советского производства - в работах /27,28,29/. Применение светодиодов в качестве датчиков температуры описано в работе /30/.

Возможность использования жидкостной эпитаксии для изготовления термометрических диодов была показана в работах /31,32/.

На основе результатов исследования свойств GaAs диодов, изготовленных жидкостной эпитаксией /33/, были определены технологические условия для изготовления диодов с линейным участком VT-характеристики в области 4-25 К /34/.

Исследованием влияния магнитных полей на VT-характеристики диодов занимались авторы работ /35-38/.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИОДНОЙ ТЕРМОМЕТРИИ

Термометрическим параметром диодных термометров является падение напряжения на диоде U, запитанном постоянным током I в прямом направлении. У зависимости напряжения от абсолютной температуры можно наблюдать две области:

а/ собственную область - часть VT-характеристики, расположенную в диапазоне от водородных до комнатных температур. Линейную зависимость в этой области определяют генерационно-рекомбинационный и диффузионный механизмы транспорта тока через p-n переход /39/. Вольтамперную характеристику в этой области можно записать в виде

$$I = I_0 \cdot \exp(eU/nkT), \quad /1/$$

где I₀ - ток сатурации, e - элементарный заряд электрона, n - фактор, величина которого находится в пределах 1-4 и зависит от механизма транспортного тока через переход, k - постоянная Больцмана.

Используя выражения для величины I₀:

$$I_0 = A_0 \cdot T^{3/2} \cdot \exp(-E_g/2kT) \quad /2/$$

и температурной зависимости ширины запрещенной зоны полупроводника E_g:

$$E_g = E_{g0} - \beta T. \quad /3/$$

получаем формулу VT-характеристики

$$U = \frac{E_{g0}}{e} - \frac{\beta k}{e} (\ln A_0 T^{3/2} - \beta/2k - \ln I) \cdot T, \quad /4/$$

которую можно записать в виде

$$U = U_0 - \gamma T, \quad /5/$$

где U₀ = E_{g0}/e - ширина запрещенной зоны при 0 К, γ - величина, слабо зависящая от температуры, определяющая чувствительность диодного термометра -S = dU/dT = γ. A₀ - константа данного полупроводника, зависящая от температуры.

Для Si и GaAs диодных термометров величина γ в температурной области 100-300 К почти постоянная и находится в пределах 2-3 мВ/К. Как видно из /4/, чувствительность диодного термометра в собственной области обратно пропорциональна току.

б/ Примесную область, типичную для диапазона гелиевых и водородных температур. В зависимости от технологии изготовления диода, типа и концентрации примесей базы диода, VT-характеристика либо увеличивает, либо уменьшает свой наклон с понижением температуры. В случае слабо легированной базы типа n или p, в области низких температур происходило "вымораживание" носителей тока базы. В связи с этим сопротивление базы и падение напряжения на диоде резко возрастает по экспоненциальному закону. В случае сильно легированной базы типа n эффект "вымораживания" отсутствует, и наклон VT-характеристики уменьшается вследствие преобладающего туннельного механизма в p-n переходе /40,41/.

Для сильно легированной базы типа n и скачкообразного концентрационного профиля p-n перехода VT-характеристику в области переходных температур можно написать в виде /33/:

$$U = U_{ot} - \gamma_1 T, \quad /7/$$

где

$$U_{ot} = E_{g0}/e + 1/\alpha \cdot \ln I/A_{ox} \quad /8/$$

$$\text{и } \gamma_1 = 1/e (\beta + 3k \ln T - 2k \ln \frac{N_D}{B_0}). \quad /9/$$

В приведенных выражениях α - фактор, учитывающий эффективную массу носителей тока и концентрацию примесей базы $N_D^{3/3}$. A_{ox} - фактор, включающий плотность локализованных состояний в запрещенной зоне, B_0 - константа, определенная полупроводником /для GaAs $B_0 = 3,28 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3} \text{ К}^{-3/2}$, для Si $B_0 = 3,87 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \text{ К}^{-3/2}$ /.
 В области низких температур чувствительность диодного термометра, определенная формулой /9/, приобретает вид

$$\gamma_1 = 1/e (\beta + k \cdot \ln \frac{1-k}{2k}), \quad /10/$$

где $k = N_A/N_D$ - степень компенсации материала базы.

Из формул /9/, /10/ видно, что чувствительность диодов с преобладающим туннельным механизмом в области переходных и низких температур, в отличие от собственной области, не зависит от тока. В области низких температур чувствительность не зависит от температуры, как видно из формулы /10/. Этот факт позволяет изготавливать диодные термометры с линейным участком ВТ-характеристики в области низких температур /34,42/.

4. СВОЙСТВА ДИОДНЫХ ТЕРМОМЕТРОВ

В настоящее время фирма Lake Shore Cryotronics Inc. выпускает диодные термометры из GaAs и Si разных типов /16/. На рис.1 показаны ВТ-характеристики диодных термометров типа TG 100 (GaAs), DT 500 (Si), а также ВТ-характеристика диода GA 300 (GaAs) фирмы Scientific Instruments Inc. Кремниевый диод типа DT 500 предназначен для измерения температуры в диапазоне 1-400 К. В области 30-400 К ВТ-характеристика имеет линейный участок с чувствительностью - 2,75 мВ/К / I = 10 мкА/.

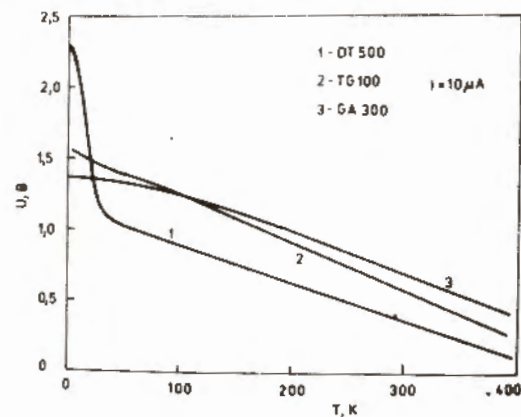


Рис.1. ВТ-характеристики диодных термометров TG100, DT500, GA300.

В этой области отклонение от нелинейности не превышает $\pm 0,5\%$. В области низких температур чувствительность повышается до -50 мВ/К. Мощность, выделяемая в датчике при температуре 4,2 К и токе 10 мкА, равна 25 мкВт. Шум датчика при тех же условиях и ширине полосы 0-1 Гц не превышает 100 мкВ. Диодный термометр DT 500 чувствителен к магнитному полю. Например, при 4,2 К и магнитной индукции 2,5 Т температурная ошибка составляет 0,77 К, при 5 Т она равна 2,4 К.

Диодный термометр из GaAs типа TG100 предназначен для температурной области 1-400 К. В диапазоне 100-400 К ВТ-характеристика имеет линейную зависимость с наклоном 2,9 мВ/К / I = 10 мкА/, в области низких температур она зависит от температуры, как показано на рис.2. Здесь приведены температурные зависимости чувствительности двух диодных датчиков типа

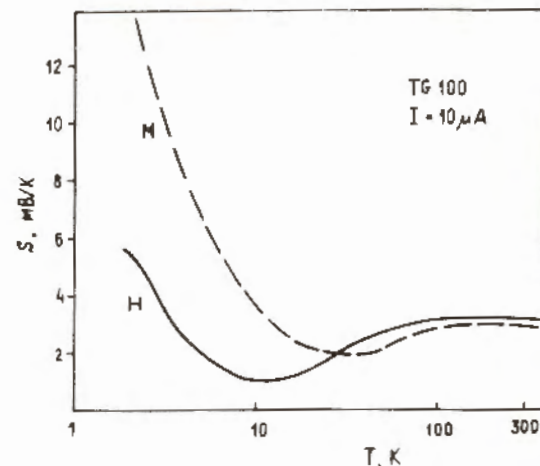


Рис.2. Температурная зависимость чувствительности GaAs диодных термометров типа TG100M и TG100H.

TG100M и TG100H, отличающихся не только величиной чувствительности, но и величиной температурной ошибки под влиянием магнитного поля, которая показана на рис.3. Выделяемая мощность при 4,2 К и 10 мкА равна 15 мкВт. Подробные сведения о диодных термометрах типа TG100 приведены в работах /18,22/. Диодные термометры типа TG100 и DT500 позволяют осуществлять измерения температуры, изменяющейся со скоростью 100 К/с. Чувствительность диодного термометра типа GA300 плавно уменьшается с понижением температуры.

На рис.4 приведены ВТ-характеристики диодов из GaAs, изготовленных технологией жидкостной эпитаксии /32/. На рисунке показано влияние уровня легирования базы диода на форму ВТ-характеристики.

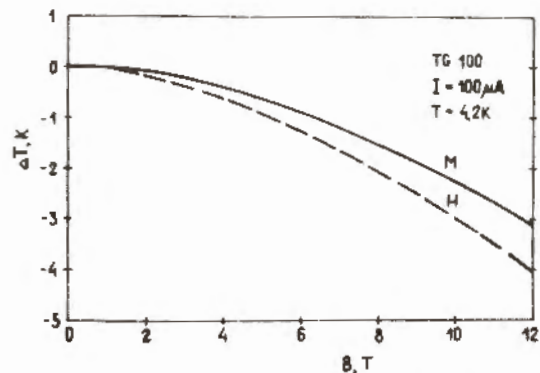


Рис. 3. Влияние магнитного поля на GaAs диодные термометры типа TG100M и TG100H.

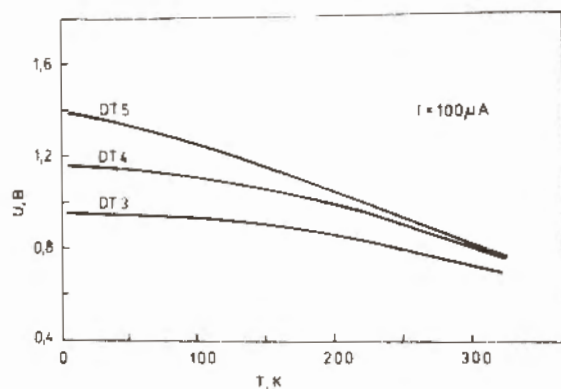


Рис. 4. VT-характеристики диодов, изготовленных жидкостной эпитаксией из GaAs.

На рис. 5 показана VT-характеристика Si диода типа KB 105 /производства ЧССР/ с линейной областью в диапазоне 4-25 К. В области температур 160-350 К чувствительность равна 2,06 мВ/К, в области 4-25 К - около 8,6 мВ/К /I = 100 мкА/.

На рис. 6 показана температурная зависимость относительного изменения напряжения на диоде KB 105 под действием магнитного поля величиной 5 Т в области 4,2-35 К. Большая чувствительность диода к магнитному полю исключает его применение в присутствии магнитных полей. Эпитаксиальные диоды из GaAs типа DT 5 в области низких температур почти нечувствительны к магнитному полю до 2,5 Т³⁴. Повторяемость диодных датчиков после температурных циклов 4,2-300 К порядка ±0,01 К не достигает величины повторяемости германиевых термометров сопротивления /±0,0005 К/, но для многих применений достаточна.

Недостатком диодных термометров является долговременная нестабильность VT-характеристики, вызванная деградацией p-n перехода¹⁵. Поэтому рекомендуется проверять калибровку диодных датчиков не менее 1 раза в год.

Рис. 5. VT-характеристика Si диода типа KB 105.

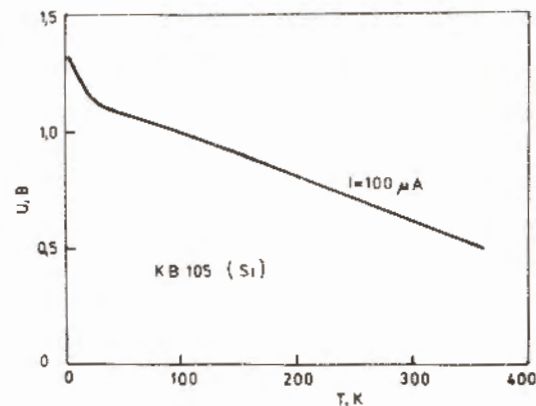
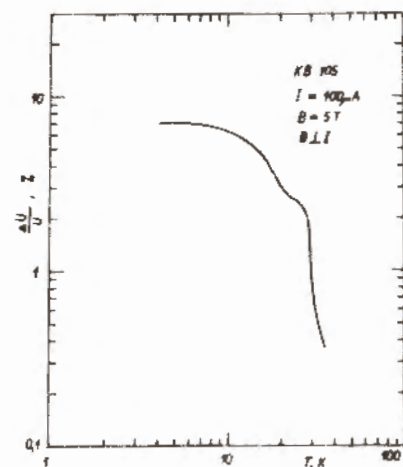


Рис. 6. Температурная зависимость относительного изменения напряжения на диоде KB 105 под влиянием магнитного поля 5Т.



5. ПРИМЕНЕНИЕ ДИОДНЫХ ДАТЧИКОВ

Простейшая схема для измерения температуры диодным датчиком состоит из источника стабилизированного постоянного тока /10-100 мкА/ и вольтметра /обычно цифрового/ с большим входным сопротивлением. Поскольку относительная чувствительность диодных термометров $\nu = 1/U \cdot dU/dT$ порядка $10^{-2} - 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, необходимо использовать цифровой вольтметр с 4-5 знаками. Повышение разрешающей способности с данным цифровым вольтметром достигается компенсацией части напряжения на диоде, например, напряжением нормального элемента. Точность стабилизации

тока и разрешающая способность вольтметра для определенной точности измерения температуры датчиком типа ТQ100 приведена в таблице.

Таблица

ΔT	$\Delta I/I$	ΔU
1,1 К	5%	1 мВ
0,1 К	0,5%	100 мкВ
0,01 К	0,05%	10 мкВ

В температурной области, где ВТ-характеристика линейна, можно использовать измерительную схему с операционным усилителем⁴³, которая позволяет проводить измерение температуры в цифровом виде.

На рис. 7 показана принципиальная схема преобразователя температура - напряжение

для цифрового вольтметра. Операционный усилитель осуществляет преобразование ВТ-характеристики $U_1 = U = U_0 - \gamma T$ /5/ на зависимость $U_2 = 0,01 T$. опорное напряжение, которое подается на неинвертирующий вход операционного усилителя, равно величине U_0 , усиление операционного усилителя должно быть равным

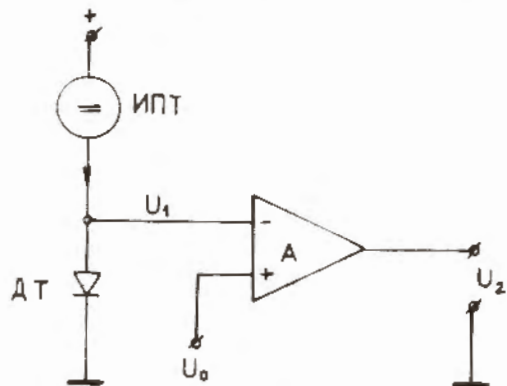


Рис. 7. Принципиальная схема преобразователя температура-напряжение.

$A = 0,01/\gamma$. Выходное напряжение преобразователя пропорционально величине абсолютной температуры, с коэффициентом пропорциональности 0,01 В/К. На рис. 8 приведена функциональная схема преобразователя для цифрового измерения температуры в области $-100^\circ\text{C} \div +100^\circ\text{C}$. Величина опорного напряжения равна напряжению на диодном датчике при 0°C .

В настоящее время существуют разные типы серийных цифровых термометров с диодными датчиками, например, DRC 7, DRC 70, фирмы Lake Shore Cryotronics Inc.

Для монтажа диодных датчиков надо соблюдать те же правила, что и для других низкотемпературных термометров. Электрические провода к измерительной схеме необходимо экранировать для исключения наводок от переменного тока, выпрямление которых

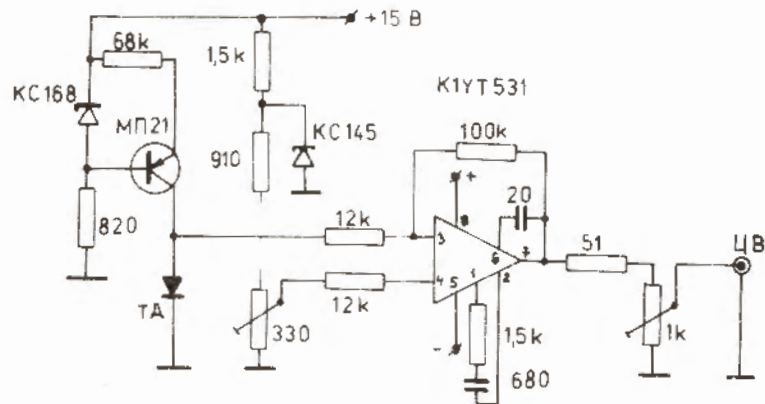


Рис. 8. Функциональная схема цифрового термометра для диапазона температур $-100^\circ\text{C} \div +100^\circ\text{C}$.

в диоде приводит к погрешности в измерении. Из-за относительно большой мощности, выделяемой датчиком, следует обеспечить хороший тепловой мост к образцу.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В обзоре приведены сведения о применении в термометрии диодных полупроводниковых датчиков.

Кроме известных диодных термометров для измерения температуры в диапазоне 1-400 К, с точностью $\pm 0,1$ К, можно успешно применять дешевые кремниевые или германиевые серийные диоды.

Использование диодов с линейным участком ВТ-характеристики позволяет проводить измерение температуры в цифровом виде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смолянский Р.Э. ПТЭ, 1959, 83.
2. Harris H. Sci.Amer., 1961, 204, p.192.
3. Jonscher A.K. Brit.J.Appl.Phys., 1961, 12, p.363.
4. Barton L.E. Electronics, 1962, 35, p.38.
5. McNamara A.G. Rev.Sci.Instr., 1962, 33, p.330.
6. Cohen B.G., Snow W.B., Tretola A.R. Rev.Sci.Instr., 1963, 34, p.1091.
7. Dumin D.J., Pearson G.L. J.Appl.Phys., 1965, 36, p.3418.
8. Senf G. Exp.Tech.Phys., 1964, 12, p.70.
9. Фогельсон И.Б. ПТЭ, 1964, 227, 1.

10. Unsworth J., Rose-Innes A.C. *Cryogenics*, 1966, 6, p.239.
11. Verster T.C. *Electronics Lett.*, 1968, 4, p.175.
12. Muelemans H.L.F., Verbeke O. *Cryogenics*, 1968, 8, p.398.
13. Smeathers P.R. *Cryogenics*, 1968, 8, p.393.
14. Dmitrenko I.M. et al. *Cryogenics*, 1969, 9, p.281.
15. Логвиненко С.П., Алуф Т.Д., Зарочинцева Т.М. *Криогенная вакуумная техника*, 1972, вып. 2, 69. Изд. ФТИИТ, Харьков.
16. Lake Shore Cryotronics Inc., Short form catalog 1973.
17. Swartz R.L., Swartz J.M. *Cryog.Technol.*, 1969, 5, p.250.
18. Swartz J.M., Gaines J.R. *Temperature, its Measurement and Control in Science and Industry*, 1972, vol.4, p.1117.
19. Sclar W., Pollock O.B. *Solid-State Electron.*, 1972, 15, p.473.
20. Praddaude H.C. *Rev.Sci.Instr.*, 1969, 40, p.599.
21. Pavese F. *Cryogenics*, 1974, 14, p.425.
22. Pavese F., Limbarinu S. *Temperature, its Measurement and Control in Science and Industry*, 1972, vol.4, p.1103.
23. Jelinek J., Dolezal I. *Czech.J.Phys.*, 1970, A20, p.491.
24. Prehnal V. *Temperature Measurement in Chemistry*, CVTS, Pardubice, 1976, p.157.
25. Veprek J. *Slaboproudny obzor*, 1977, 38, p.226.
26. Ray J., Chandra G. *Cryogenics*, 1974, 14, p.414.
27. Логвиненко С.П., Россоманский О.А. *ПТЭ*, 1975, 219, 2.
28. Иванов Л.П. и др. *ПТЭ*, 1976, 247, 2.
29. Безверхняя Н.С. и др. *ПТЭ*, 1975, 278, 5.
30. Griffing B.F., Shivashankar S.A. *Rev.Sci.Instr.*, 1977, 48, p.1225.
31. Jansak L., Kordos P., Blahova M. *Czech.J.Phys.*, 1974, A24, p.364.
32. Jansak L., Kordos P. *Elektrotech. cas.*, 1975, 26, p.312.
33. Jansak L., Kordos P., Blahova M. *Res.report EU-SAV*, III-3-2/3, Bratislava, 1975.
34. Jansak L., Kordos P., Blahova M. *Inst.Phys.Conf. Ser.* 26, 1975, p.65.
35. Arends J., Wright R.C. *Cryogenics*, 1969, 9, p.281.
36. Swami R., Tantry S.A.P. *Int. J.Electronics*, 1974, 32, p.435.
37. Neuringer L.J., Rubin L.G. *Temperature, its Measurement...*, 1972, vol.4, p.1085.
38. Aldridge R.V. *Solid-State Electron.*, 1974, 17, p.614.
39. Sah T.C., Noyce R.N., Shockley W. *Proc. IRE*, 1957, 45, p.1228.
40. Yajima T., Esaki L. *J.Phys.Soc.Jap.*, 1958, 13, p.1281.
41. Kane E.O. *J.Appl.Phys.*, 1961, 32, p.83.
42. Jergel M., Jansak L., Blahova M. *Acta Phys. Slovaca*, 1977, 27, p.73.
43. Huen T. *Rev.Sci.Instr.*, 1970, 41, p.1368.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 февраля 1980 года.