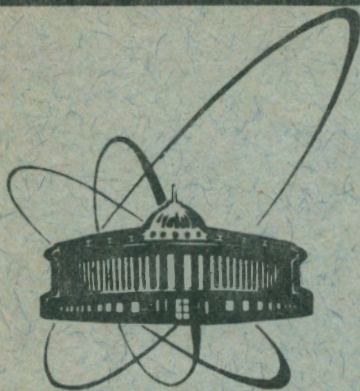


91-173



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

P8-91-173

Ким Ун Се, В.И. Дацков

СТАБИЛЬНОСТЬ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ
ПРИ КРИОГЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

1991

1. Введение

В настоящее время во многих научно-исследовательских организациях мира в криогенной технике широко используются диодные датчики температуры на основе полупроводниковых электронных элементов^{/1,2/}.

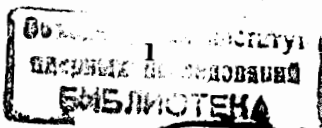
Достоинствами таких датчиков являются: линейность характеристики в широком интервале температур, высокая чувствительность, малые габариты и хорошая механическая прочность. Кроме того, по сравнению с термометрами сопротивления для диодных датчиков высокостабильный измерительный ток не нужен^{/3,4/}. Термометры на основе серийных полупроводниковых диодов существенно дешевле коммерческих полупроводниковых или платиновых термометров сопротивления^{/5/}. Последнее обстоятельство оказалось существенным стимулом для многих работ, как, например,^{/6/}, где в результате испытаний 25 типов диодов СССР в интервале температур 15–300 К для широкого применения в криогенной технике выбраны диоды типа КД 105 и КД 503.

Однако недостатком диодных термометров является долговременная нестабильность вольт-токовой (ВТ) характеристики, вызванная деградацией Р-Н перехода, величина которой зависит от конструкции прибора и качества технологии его изготовления^{/7/}. Пока неизвестен оптимальный тип диода, удовлетворяющий всем требованиям криогенного термометра, и мало работ, посвященных исследованию долговременной нестабильности ВТ-характеристики диодов.

В данной статье рассмотрены результаты исследования временной нестабильности ВТ-характеристик 45 типов промышленных кремниевых диодов СССР и КНДР при многократных охлаждениях от комнатной температуры до температуры жидкого азота.

2. Измерение ВТ-характеристик диодов

Термометрическим параметром диодных термометров является падение напряжения U на диоде, запитанном постоянным током I в прямом направлении Р-Н перехода. Измерение напряжения на диоде осуществлялось по 4-проводной схеме (рис.1) цифровым вольтметром типа В7-34А и с питанием диода стабильным (10^{-4}) током 10 мкА.



Всего было испытано 223 диода в 45 партиях по 5-20 диодов каждого типа, в том числе 23 советских диода типов: КД 104, КД 105, КД 503, КД 512, КД 517, КД 522^{8/}; и 200 диодов из КНР типов: АН 17, АН 31, ЧОНЬ 334, КОМ 210, КОМ 242 и др^{9/}.

Испытание диодов заключалось в циклическом охлаждении-отогреве от комнатной (300 К) до температуры жидкого азота (77,4 К) и измерении напряжения на диодах в каждом цикле. После предварительных 50 циклов охлаждения-отогрева (термоциклирования) в течение 6 мес. проводились дополнительные испытания отдельных партий диодов.

3. Результаты испытаний

Проведенные испытания показали, что ни у одного из диодов не был разрушен корпус, но в 4 диодах был нарушен электрический контакт. На рис.1 видно, что при комнатной температуре ВТ-характеристики разных типов диодов (1-ЧОНЬ 334, 2-КД 105Б, 3-КД 503А, 4-АН 17) имеют существенный разброс: от 0,3 В до 0,6 В, а при азотной температуре разброс небольшой: от 0,96 В до 1,02 В. Очевидно, это связано с различным легированием кремниевых пластинок в этих диодах, так как среди них есть стабилитроны, выпрямительные и точечные диоды. Разный тип легирования кремния дает существенный разброс тока термогенерации носителей заряда при комнатной температуре и малый разброс из-за "вымораживания носителей" при низкой температуре^{10/}.

Испытания термоциклированием показали три вида поведения нестабильности ВТ-характеристики диодов. К первому можно отнести существенное монотонное изменение ВТ-характеристики диодов одного типа после каждого термоциклирования. Ко второму - незначительное отклонение ВТ-характеристики и колебание ее при термоциклировании на уровне "плато". К третьему можно отнести существование в партии одного типа диодов с поведением ВТ-характеристики 1-го и 2-го вида. Стабильность ВТ-характеристики диода определялась по относительному изменению напряжения (ΔU) на нем при термоциклировании по формуле:

$$\Delta U = \frac{U_i - U_1}{U_1} * 100\%, \quad (1)$$

где U_1 - напряжение на диоде перед термоциклированием и U_i - после каждого цикла охлаждения в жидком азоте.

На рис.2 показана нестабильность ВТ-характеристики хороших (2- КД 105Б, 3- АН 17) и для сравнения плохих (1- ЧОНЬ 334, 4- КД 503А) диодов. Видно, что в течение 50 термоциклов напряжение на диоде ЧОНЬ 334 монотонно возросло на 0,5%, на диоде КД 503А упало на 0,8%.

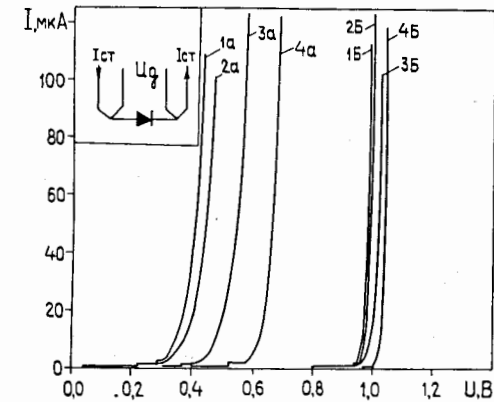


Рис.1. Вольт-амперные характеристики диодов :
1 - Чонь 334 2 - КД 105Б 3 - КД 503А 4 - АН 17;
а - при комнатной температуре 300 К,
б - при температуре жидкого азота 77,4 К.

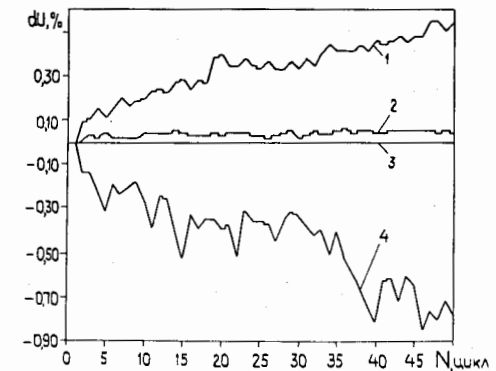


Рис. 2. Стабильность прямого напряжения на диодах в жидком азоте при термоциклировании:
1 - Чонь 334 2 - КД 105Б 3 - АН 17 4 - КД 503А

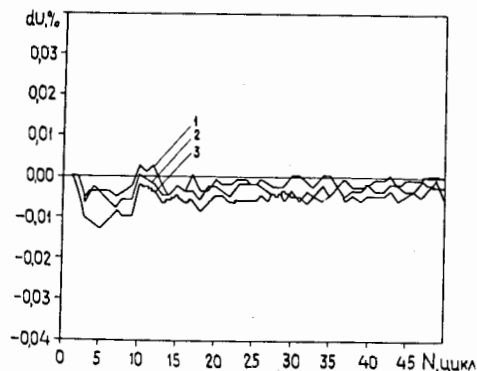


Рис. 3. Стабильность прямого напряжения на трех диодах типа АН 17 в жидком азоте при термоциклировании .

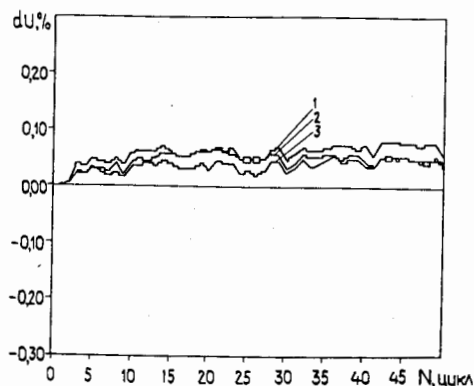


Рис. 4. Стабильность прямого напряжения на трех диодах типа КД 105Б в жидком азоте при термоциклировании.

Изменение напряжения на этих диодах имеет скачкообразно-прерывистый вид, что указывает на наличие знакопеременных тепловых деформаций в корпусах диодов при термоциклировании. Такой вид нестабильности ВТ-характеристики диодов говорит о плохом качестве соединения между элементами конструкции диодов, имеющими разные коэффициенты температурной деформации, как, например: кремний-медь, керамика-медь, металл-полупроводник-эпоксидный компаунд и т.д. Т.е. такое монотонное изменение может привести к поломке диодов и данные типы диодов нецелесообразно применять в криогенной термометрии.

На рис.3 показана нестабильность ВТ-характеристики самых лучших диодов в наших экспериментах - диодов типа АН 17 (КНДР) при термоциклировании. Всего было испытано 25 диодов этого типа и все показали высокую стабильность ВТ-характеристики при термоциклировании. Из рисунка видно, что стабилизация ВТ-характеристики в пределах 0,01 % наступает уже после 15 циклов охлаждения у всех трех диодов.

На рис.4 показана нестабильность ВТ-характеристики отечественных диодов типа КД 105Б, рекомендованных в работе [6] и показавших удовлетворительные характеристики при термоциклировании. Видно, что стабилизация ВТ-характеристики 3 из 5 испытанных диодов в пределах 0,07% наступает после 10-15 циклов охлаждения.

На рис.5 показана нестабильность ВТ-характеристики диодов типа Чонь 334 при термоциклировании. Диод 1 имеет плохую стабильность, возрастающую при термоциклировании до 0,4 %, а диод 2 имеет хорошую стабильность в пределах 0,02 % в течение всех циклов охлаждения. Т.е. здесь мы наблюдаем разброс характеристик диодов одного типа из-за качества заводской технологии их изготовления. Из 5 испытанных диодов типа Чонь 334 два имели плохую стабильность.

Результаты испытания всех 45 типов диодов СССР и КНДР показаны в табл., где U_{300K} - напряжение на диоде в прямом направлении при комнатной температуре, $U_{77,4K}$ - при температуре жидкого азота, \bar{U} - среднее напряжение на одном диоде при температуре жидкого азота в 50 циклах охлаждения определялось по формуле:

$$\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n}, \text{ где} \quad (2)$$

U_i - напряжение на диоде при каждом охлаждении, n - число термоциклов от 1 до 50;

dU (%) - среднеквадратичное отклонение напряжения на диоде определялось по следующей формуле:

$$dU = \frac{\sqrt{\sum_i (U_i - \bar{U})^2 / n}}{\bar{U}} * 100 \% \quad (3)$$

Таблица

| ТИП ДИОДА | U _{300k} /В/ | U _{77.4k} /В/ | \bar{U} /В/ (в 50 циклах -77,4К) | dU /%/ |
|-----------|-----------------------|------------------------|---------------------------------------|---------|
| ан 008 | 0.53594 | 0.76482 | 0.776160 | 0.048 |
| ан 009 | 0.59476 | 0.87980 | 0.879700 | 0.099 |
| ан 015 | 0.60847 | 0.97708 | 0.977070 | 0.034 |
| ан 13 | 0.60867 | 0.88113 | 0.881130 | 0.0068 |
| ан 14 | 0.60887 | 0.88192 | 0.881906 | 0.013 |
| ан 16 | 0.61847 | 0.94855 | 0.948548 | 0.00703 |
| ан 17 | 0.61672 | 1.02107 | 1.021029 | 0.00166 |
| ан 31 | 0.54547 | 0.85230 | 0.852191 | 0.00552 |
| ан 134 | 0.60885 | 0.85048 | 0.851080 | 0.0149 |
| ан 135 | 0.62391 | 0.99821 | 0.997520 | 0.0203 |
| ан 138 | 0.61738 | 1.02570 | 1.025614 | 0.00293 |
| чонь 112 | 0.16211 | 0.39300 | 0.412017 | 1.261 |
| чонь 223 | 0.36511 | 0.97317 | 0.973221 | 0.00401 |
| чонь 224 | 0.35152 | 0.96954 | 0.969572 | 0.0099 |
| чонь 232 | 0.35712 | 0.96955 | 0.969912 | 0.0159 |
| чонь 236 | 0.32403 | 0.96537 | 0.965352 | 0.0077 |
| чонь 237 | 0.35540 | 0.97294 | 0.972984 | 0.0132 |
| чонь 240 | 0.34686 | 0.96948 | 0.969631 | 0.0141 |
| чонь 243 | 0.36927 | 0.97705 | 0.977751 | 0.0227 |
| чонь 244 | 0.35088 | 0.97157 | 0.971483 | 0.00669 |
| чонь 246 | 0.34229 | 0.97125 | 0.971124 | 0.00752 |
| чонь 247 | 0.34732 | 0.96944 | 0.969239 | 0.00969 |
| чонь 264 | 0.31215 | 0.95792 | 0.958110 | 0.0207 |
| чонь 267 | 0.31702 | 0.96397 | 0.963637 | 0.0277 |
| чонь 334 | 0.33164 | 0.96606 | 0.965944 | 0.00621 |
| чонь 336 | 0.33072 | 0.96387 | 0.963946 | 0.0056 |
| чонь 347 | 0.32186 | 0.96464 | 0.964612 | 0.00663 |
| ком 120 | 0.051784 | 0.55700 | 0.557961 | 0.0729 |

Таблица (продолжение)

| ТИП ДИОДА | U _{300k} /В/ | U _{77.4k} /В/ | \bar{U} /В/ (в 50 циклах -77,4К) | dU /%/ |
|-----------|-----------------------|------------------------|---------------------------------------|--------|
| ком 121 | 0.060684 | 0.57295 | 0.572853 | 0.0539 |
| ком 122 | 0.067495 | 0.55043 | 0.552127 | 0.0868 |
| ком 124 | 0.082130 | 0.57192 | 0.572366 | 0.1673 |
| ком 125 | 0.066141 | 0.61653 | 0.618173 | 0.114 |
| ком 138 | 0.079574 | 0.58374 | 0.584035 | 0.0731 |
| ком 151 | 0.072193 | 0.61494 | 0.616117 | 0.0711 |
| ком 152 | 0.078899 | 0.56963 | 0.569645 | 0.0834 |
| ком 154 | 0.049808 | 0.56988 | 0.570959 | 0.0895 |
| ком 210 | 0.37469 | 0.97528 | 0.975180 | 0.0122 |
| ком 230 | 0.53333 | 1.02531 | 1.025430 | 0.0340 |
| ком 242 | 0.55184 | 1.02336 | 1.023425 | 0.0195 |
| кд 104а | 0.42941 | 0.98668 | 0.986142 | 0.0462 |
| кд 105б | 0.38023 | 0.96545 | 0.965781 | 0.0119 |
| кд 503а | 0.48740 | 1.00063 | 0.998594 | 0.1545 |
| кд 512а | 0.56108 | 1.00008 | 0.998595 | 0.147 |
| кд 517а | 0.40961 | 0.70385 | 0.700506 | 0.427 |
| кд 522б | 0.36836 | 0.98994 | 0.98936 | 0.0592 |

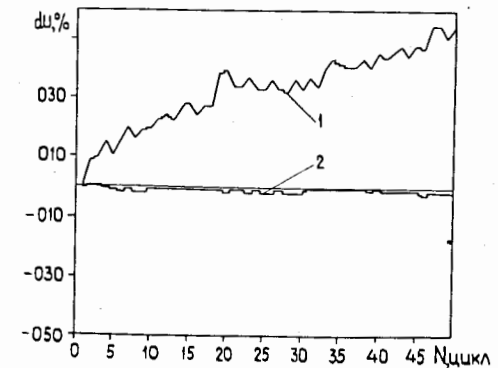


Рис.5. Стабильность прямого напряжения на двух диодах типа Чонь 334 в жидком азоте при термоциклировании.

4. Заключение

Проведенные испытания показали, что при термоциклировании стабилизация VT-характеристики большинства диодов наступает после 15-20 циклов охлаждения в жидком азоте, или на 5-10 циклов больше, чем по рекомендации авторов работы^{11/}. Из диодов производства СССР лучшей стабильностью (0,01%) VT-характеристики обладают диоды типа КД 105Б, из диодов КНДР - типа АН 17 (0,002%). После обработки результатов испытаний выяснилось, что при температуре жидкого азота 124 диода 22 типов из 223 испытанных могут обеспечить точность измерения температуры не хуже 0,5%, из них 71 диод 8 типов - точность не хуже 0,1%.

В дальнейшем авторы публикации планируют провести градуировку выбранных типов диодов в интервале температур 4,2-300 К и результаты оформить в следующей публикации.

Литература

1. Lengeler V. Cryogenics 8 (1974), p. 439-447.
2. Gmelin E. et all. Cryogenics (1990), Vol.30, p. 442-446.
3. Unsworth J. and Rose-Innes A.C. Cryogenics 8(1966), p. 239-240.
4. Яншак Л. Препринт ОИЯИ 13-80-113, Дубна 1980, с.1-10.
5. Вепшек Я. Измерение низких температур электрическими методами. "Энергия", М., 1980.
6. Безверхняя Н.С. и др. ПТЭ, 5, 1976, с.278-279.
7. Логвиненко С.П., Алуф Т.Д., Зарочинцева Т.М. Криогенная вакуумная техника, 1972, вып. 2-69, изд. ФТИНТ, Харьков.
8. Горюнов Н.Н., Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным микросхемам., Изд. Энергия, Москва, 1976.
9. Справочник по полупроводникам. Изд. Промышленность, Пхеньян, КНДР, 1982.
10. Горюнов Н.Н., Носова Ю.Р. Полупроводниковые диоды. "Советское радио", Москва, 1968, с.14-16.
11. Gmelin E. et all. Cryogenics, 9(1990), vol.30, p.442-445.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 апреля 1991 года.

Ким Ун Се, Дацков В.И.

P8-91-173

Стабильность термометрических характеристик полупроводниковых диодов при криогенной температуре

Описана методика измерения долговременной стабильности вольт-токовой (VT) характеристики промышленных диодов СССР и КНДР при термоциклировании. Диоды 45 типов общим количеством 223 шт. были подвергнуты ~50 циклам охлаждения в жидком азоте и отогрева до комнатной температуры. Из отечественных диодов лучшей стабильностью (0,01%) VT-характеристики обладают диоды типа КД 105В, из диодов КНДР - типа АН 17 (0,002%).

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1991

Перевод авторов

Kim Un Se, Datskov V.I.

P8-91-173

Stability of Thermometric Characteristics of Semiconductor Diodes at Cryogenic Temperature

The method of measuring the long-term stability of the volt-current thermometric characteristic of common electronic diodes created in the USSR and DPRK during temperature cycling has been described. 45 types of 223 diodes underwent 50 times temperature cycling in liquid nitrogen in the interval from 77.4 K to 300 K. Type KD 105B made in the USSR has the best stability (0.01%) of the volt-current characteristic and type AN 17 of DPRK has better stability (0.002%).

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1991