

Измерение температуры р–п-переходом

Григорий Зеленов (Московская обл.)

В статье автор кратко рассматривает принцип измерения температуры, в котором в качестве датчика использован р–п-переход. Показана принципиальная возможность измерения температуры р–п-переходом в диапазоне температур –196...+100°С в токовом режиме. Приведена схема источника питания для обеспечения постоянного тока в р–п-переходе.

ВВЕДЕНИЕ

На практике часто возникает ситуация, когда необходимо измерить температуру электронных приборов простым способом. В настоящей статье рассмотрен метод измерения температуры р–п-переходом [1–3], который ранее был опробован в различных исследованиях [4, 5]. Принципы измерения температуры р–п-переходом известны давно [6–9]. В то же время в Интернете встречаются вопросы о том, как измерить температуру с помощью диодов. Кратко рассмотрим теоретические и схемотехнические решения измерения температуры р–п-переходом и сравним наши результаты с результатами измерения температуры, полученными другими методами [6, 7, 9]. В данной статье рассмотрены два режима

измерения температуры р–п-переходом: с использованием резистора (резистивный режим) и генератора тока (токовый режим).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ Р–П-ПЕРЕХОДОМ

Из теории [8, 10] ток через р–п-переход определяется по формуле:

$$I_d = I_o(\exp(eV_d/bkT_d) - 1), \quad (1)$$

где I_d – ток через диод, I_o – обратный ток через диод (const), V_d – напряжение на р–п-переходе, e – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, b – коэффициент идеальности р–п-перехода (const), T_d – температура р–п-перехода. Из (1) следует:

$$T_d = bk/eT_d \ln(I_d/I_o + 1). \quad (2)$$

Из (2) следует, что при $T_d = \text{const}$ и при независимости I_o от температуры, T_d будет линейно связана с напряжением на диоде V_d . Коэффициент пропорциональности этой зависимости обозначим K_T ($K_T = bk/e \ln(I_d/I_o + 1)$) и назовём его чувствительностью градуировочной кривой р–п-перехода. Тогда из (2): $T_d = K_T V_d$. Если I_d и I_o постоянны, то K_T также постоянен. Следовательно, T_d линейно зависит от напряжения на диоде (измеряемый параметр), т.е. должна выполняться зависимость:

$$T_d = AV_d + B, \quad (3)$$

где A и B – постоянные коэффициенты. Назовем (3) градуировочной прямой для р–п-перехода, а коэффициенты A и B – градуировочными коэф-

фициентами р–п-перехода (диода). Тогда при указанных выше предположениях для измерения температуры р–п-переходом достаточно определить коэффициенты A и B . Другие значения температуры T_d р–п-перехода можно будет определять с помощью градуировочной прямой по измеренным значениям напряжения на диоде V_d .

Чтобы определить коэффициенты A и B , достаточно измерить две пары параметров: T_1, V_1 и T_2, V_2 на диоде при постоянном токе через диод (V_1 измеряется при температуре T_1 , а V_2 – при температуре T_2). После этих измерений, решая линейную систему с двумя неизвестными, получаем экспериментальные градуировочные коэффициенты A и B и экспериментальную градуировочную прямую. Процесс получения экспериментальных градуировочных коэффициентов A и B назовём градуировкой р–п-перехода. После градуировки р–п-перехода (диода) его можно использовать в качестве измерителя температуры. Для этого измеряют напряжение на диоде V_d и по формуле (3) вычисляют значение температуры T_d .

РЕЗИСТИВНЫЙ И ТОКОВЫЙ РЕЖИМ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ Р–П-ПЕРЕХОДОМ

Основная схема измерения температуры р–п-переходом, применяемая разными авторами, приведена на рис. 1а [6, 7]. Результаты данной статьи получены в токовом режиме, в схеме которого использован «идеальный» источник тока (рис. 1б). Величина тока I_d через диод постоянна, и этот ток не зависит ни от сопротивления диода, ни от температуры, т.е. выполняется соотношение (2). Если использовать схему измерения, приведённую на рис. 1а, то зависимость между параметрами V_d и T_d будет иметь более сложный вид:

$$T_d = bk/eV_d \ln((E - V_d)/I_o R_{\text{ток}} + 1), \quad (4)$$

что может уменьшить точность измерений.

Для реализации схемы с генератором тока (рис. 1б) необходим «идеальный» источник тока. Схема такого источника тока показана на рис. 2. В этой схеме ток, протекающий через подключенный диод D , не зависит от напряжения на диоде V_d ($I_d = V_{\text{вх}}/R_{\text{ток}}$). Следовательно, соотноше-

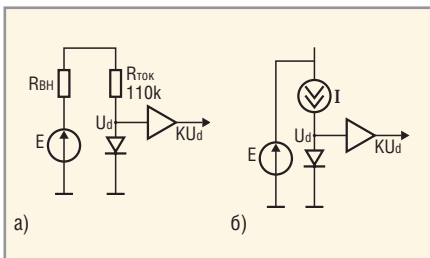


Рис. 1. Резистивный (а) и токовый (б) режимы измерения температуры р-п-переходом

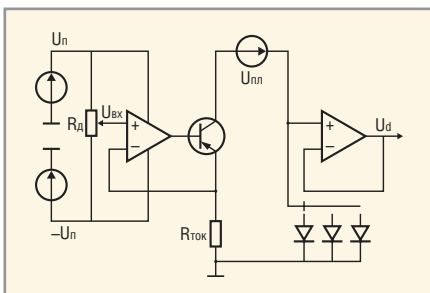


Рис. 2. Источник стабильного тока

Результаты и ошибки измерения температуры р–п-переходом в токовом и резистивном режимах для различных диодов

Режим	Токовый/резистивный режимы			
	Д220	КД522А	КД512А	ГД507А
Напряжение V_d при 273°К, В	0,601...0,603/0,601...0,602	0,596...0,604/0,602...0,603	0,702...0,705/0,699...0,700	0,323...0,329/–
Напряжение V_d при 373°К, В	0,382...0,386/0,249...253	0,385...0,391/0,236...0,237	0,515...0,518/0,389...0,390	0,141...0,146/–
Напряжение V_d при 77°К, В	1,027/1,003...1,027	1,040/1,007	1,120/1,025	0,707...0,708/–
Температуры, используемые для калибровки, °К	373 и 273	273 и 77	373 и 77	373 и 273
Абсолютная ошибка, макс., град.	5,5/81,14*	–3,57/78**	8,5/–44,7**	–18,53/169,2*
Относительная ошибка***, %	1,85/27,41	–1,2/26,3	2,8/–15	6,3/57,1

*При 77°К.

**При 273°К.

***Получена делением максимальной ошибки на весь температурный диапазон.

ние (2) будет выполняться во всём температурном диапазоне.

ГРАДУИРОВКА ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ, ВЫПОЛНЕННЫХ НА Р–N-ПЕРЕХОДАХ

Значениями температур, при которых обычно производится градуировка датчиков температуры, являются температура жидкого азота (77°К или –196°С), температура смеси воды и льда (273°К или 0°С) и температура кипящей воды (373°К или 100°С). Чтобы проградуировать р–п-переход диода, используемого в качестве датчика температуры, достаточно измерить V_d при любых двух значениях температуры.

Как было показано выше, значение тока I_d можно задать достаточно точно с помощью источника тока (рис. 2). При этом I_d при разных температурах меняться не будет, в отличие от обратного тока через диод (I_0), который будет зависеть от температуры. Эта зависимость I_0 от температуры будет определять погрешность измерения температуры (предполагалось $I_0 = \text{const}$). Измерение с использованием градуировочной прямой (3), заменяющей реальную градуировочную кривую, при которой температура измеряется с минимальной ошибкой, приведёт к

ошибкам при измерениях. Эти ошибки будут разными в случае резистивного и токового режимов измерения температуры р–п-переходом.

Для определения погрешности измерения температуры р–п-переходом выбраны диоды Д220, КД512А, КД522А и ГД507А. Для каждого из этих диодов были проведены измерения V_d (T_d) в трёх (или двух) вышеуказанных градуировочных точках и в двух режимах – токовом и резистивном. При $R_{\text{ток}} = 110$ кОм через диод протекал ток $I_d = 50$ мкА (для исключения процесса разогрева р–п-перехода ток I_d нужно выбирать как можно меньше, например, $I_d = 10$ мкА [5, 6]). Ток $I_d = 50$ мкА был выбран для сравнения результатов измерения, полученных в резистивном [7–9] и токовом режимах.

В данной работе была выбрана следующая методика эксперимента: для каждого диода и режима измерения сначала по измеренным при 373 и 273°К вычислялись градуировочные коэффициенты A и B , по ним строилась градуировочная кривая, которая продолжалась до 77°К, и вычислялась ошибка при 77°К. По аналогичной методике вычислялись ошибки при 273 и 373°К.

Результаты измерения температуры р–п-переходом в токовом и резистивном режимах приведены в таблице. Видно, что точность измерения температуры р–п-переходом при токовом режиме выше, чем при резистивном режиме, а германиевый диод ГД507 по сравнению с кремниевыми диодами при измерениях в токовом режиме даёт худшие результаты. Максимальная ошибка при использовании градуировочной прямой (максимальная разность между вычисленным значением по градуировочной прямой и измеренным значением температуры, которая не участвовала в градуировке), вычисляемая по трём измеренным точкам, тем меньше, чем

больше температурный интервал между двумя точками, по которым вычисляются градуировочные коэффициенты (т.е. для градуировки сначала желательно выбрать точки 77 и 373°К, затем 77 и 273°К и, наконец, 273 и 373°К. На рис. 3 показаны графики градуировочных прямых, полученных вышеописанным способом для диода Д220. На них качественно подтверждаются описанные выше особенности, которые получены из табличных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зеленов Г.Я. А.с. № 1817030 «Преобразователь электрического напряжения в ток». 11.10.1992 (заявка № 4785561 от 22.01.1990).
2. Зеленов Г.Я. Патент № 2010415 «Дифференциальное токовое устройство». 30.03.1994 (заявка № 4919386 от 15.03.1991).
3. Зеленов Г.Я. Применение преобразователей напряжения в ток. Радиотехника, 1994. № 11.
4. Зеленов Г.Я., Падалко А.Г., Трифонов В.И. Решётка из InSb как детектор излучения КВЧ-диапазона. Всесоюзный семинар «Новые применения миллиметровых волн в народном хозяйстве». Тезисы. 2–5 сентября, Саратовский филиал ИРЭ АН СССР Москва. 1991.
5. Зеленов Г.Я., Трифонов В.И. Планы антенны КВЧ с анизотропными термоэлементами. 1-й Украинский симп. «Физика и техника ММ и СУБММ радиоволн». Тезисы докладов. Ч. 1. Харьков, 15–18 октября 1991. С. 361.
6. Дмитриенко М.М., Логвиненко С.П., Иванов Н.И., Колот З.М. Термометрические характеристики полупроводниковых диодов. ПТЭ, 1965. № 5.
7. Логвиненко С.П., Бровкин Ю.Н. Датчик и терморегулятор для интервала 4,2...320 К. ПТЭ. 1968. № 1.
8. Смит Р. Полупроводники. М.: Мир. 1982.
9. Справочник по инфракрасной технике. Пер. с англ. под ред. У. Волф, Г. Цисис. М.: Мир. 1989. Том 3.

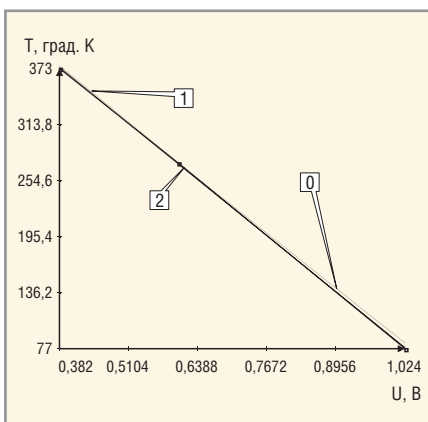


Рис. 3. Зависимость температуры от напряжения на диоде