

Р. В. Головащенко, В. Н. Деркач, Н. К. Заец, В. Г. Корж, А. С. Плевако, С. И. Тарапов
Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
 12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
 E-mail: derkach@ire.kharkov.ua

КОНТРОЛЬ И СТАБИЛИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ (0,8÷300 К) В КРИОДИЭЛЕКТРОМЕТРЕ ГИГАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

При разработке и создании низкотемпературных радиоспектрометров для измерения диэлектрических параметров материалов в миллиметровом диапазоне длин волн и широком диапазоне температур возникает задача точной стабилизации температуры и ее точного измерения. Термометры для измерений низких и сверхнизких температур, как правило, основаны на температурной зависимости отдельных физических свойств соответствующих веществ. Наиболее удобными для схем измерения и стабилизации температуры в этом диапазоне температур являются электрические термометры сопротивления. В настоящей работе описан разработанный регулятор-стабилизатор температуры – прецизионный автоматизированный блок измерения и стабилизации температуры дискового диэлектрического резонатора, рассчитанный на работу в диапазоне температур 0,8÷300 К для использования в криоэлектронике гигагерцевого диапазона частот. Применена четырехпроводная схема с питанием термодатчиков переменным током. В качестве термодатчиков использованы термометры сопротивления с разным знаком температурного коэффициента сопротивления. Обеспечена точность измерения сопротивления не хуже 0,05 % и точность стабилизации температуры около $\pm 0,01$ К. Приведены результаты тестирования разработанного устройства и результаты измерения диэлектрических параметров материалов с низкими потерями в низкотемпературных экспериментах с его использованием. Ил. 9. Табл. 1. Библиогр.: 17 назв.

Ключевые слова: радиоспектроскопия, диэлектроника, низкие температуры, термометрия.

При разработке и создании установок и стендов для исследования диэлектрических параметров материалов с малыми потерями в миллиметровом диапазоне длин волн возникает задача точной стабилизации температуры и ее точного измерения. Несмотря на то что задачи, связанные с низкотемпературными измерениями решались многими авторами [1, 2], они являются все еще актуальными, поскольку при разработке схемы измерительного устройства необходимо учитывать специфические особенности каждого измерительного комплекса.

Термометры для измерений низких и сверхнизких температур, как правило, основаны на температурной зависимости отдельных физических свойств соответствующих веществ. Такими могут быть, например, давление газа, давление паров в равновесии с жидкостью, объем жидкости, электрическое сопротивление, термоэлектродвижущая сила (ТЭДС), магнитная восприимчивость, скорость звука в газе и т. д. [3].

Наиболее удобными для схем измерения и стабилизации температуры в диапазоне низких температур являются электрические термометры. Обычно используют резистивные (термометры сопротивления), емкостные, индуктивные и термоэлектрические датчики. Из термометров-сопротивлений чаще всего применяют платиновые (для измерения $T = 100 \div 300$ К), угольные ($T = 0,02 \div 100$ К) и полупроводниковые датчики ($T = 1 \div 273$ К) [4]. Чтобы перекрыть диапазон температур от сверхнизких до комнатных, обычно используют комбинацию из нескольких датчиков.

При измерении значений низких температур электрическими методами следует соблюдать требования, связанные с условием тепло-

обмена между термометром и объектом, температура которого измеряется, а именно минимизировать влияние нагрева датчика за счет джоулева тепла. Кроме того, необходимо исключить влияние на точность измерений сопротивления подводящих проводов термометров независимо от величины этого сопротивления. Указанным требованиям удовлетворяют некоторые схемотехнические решения, из которых чаще всего применяют схемы сравнения, модифицированный мост Уинстона и мост Томсона. Указанные схемы могут получать питание от источников постоянного или переменного токов [5].

Главным источником погрешностей в схемах постоянного тока является ТЭДС, которая возникает на контактах проводов термометров с зажимами измерительных приборов. Эти ТЭДС можно убрать, изготовив зажимы из того же материала, что и провод, или поддерживая одинаковую и постоянную температуру зажимов. Возможен вариант, когда в процессе измерения изменяют полярность тока источника питания, при этом необходимо дважды регистрировать показание электросопротивления термометра и вычислять среднее значение.

На точность измерительных схем на переменном токе влияют погрешности, связанные с реактивными сопротивлениями магазинов и других мер сопротивлений. Для уменьшения влияния емкостного и индуктивного сопротивлений элементов схемы обычно используют провода и меры сопротивлений с малыми остаточными емкостью и индуктивностью. Альтернативной мерой являются использования тока источника питания низкой частоты (в пределах 20÷200 Гц). Схемы переменного тока имеют и другие пре-

имущества. Одно из них – возможность использования усилителя переменного тока с большим и постоянным во времени коэффициентом усиления, что позволяет повысить чувствительность схемы и точность измерений. Часто в роли усилителя используют селективный усилитель, который дополнительно уменьшает влияние шумов на точность измерений [6, 7].

В литературе [8–12] имеются описания терморегуляторов, способных работать в широком температурном интервале. Однако часть из них работает на постоянном токе [9, 10], другие, использующие переменный ток, ориентированы либо на работу в узком интервале температур ≈ 1 К [8, 12] с одним типом датчика, либо имеют, на наш взгляд, слишком сложную схему выработки сигнала обратной связи для стабилизации температуры [11].

В настоящей работе предложена схема регулятора-стабилизатора температуры с использованием двух термодатчиков с положительным и отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), для работы в широком диапазоне температур ($T = 0,8 \div 300$ К).

1. Схема регулятора-стабилизатора температуры. Температура рабочей камеры и контрольных точек криодиэлектронметра измеряется с помощью регулятора-стабилизатора температуры в диапазоне $T = 0,8 \div 300$ К. Измерение температуры осуществляется при измерении сопротивления резистивных датчиков. Используется четырехконтактный метод измерения сопротивления на переменном токе, позволяющий исключить влияние подводящих проводов, а также межконтактных разностей потенциалов, которые возникают в местах соединений проводников.

Требуемый температурный диапазон удалось перекрыть за счет применения двух датчиков температуры. В области температур $300 \div 80$ К используется платиновый термометр-сопротивление *HEL-700-U-1* фирмы «Honeywell» с положительным ТКС (обозначено +ТКС) и сопротивлением 1 000 Ом при $T = 300$ К. В области температур ниже 80 К используются угольные резисторы «Speer» или «Matsushita» с отрицательным ТКС (обозначено –ТКС), имеющие соответственно номинальное сопротивление 13 и 22 Ом при температуре $T = 300$ К.

Конструктивно регулятор-стабилизатор температуры (рис. 1) состоит из шести основных модулей: блок питания (БП); блок стабилизации переменного тока (БСПТ); два блока измерения и стабилизации температуры (БИСТ) по резистивному датчику температуры с +ТКС и –ТКС; коммутационная плата (КП) и блок вывода данных на стрелочный и жидкокристаллический индикатор (ЖКИ) – блок индикации (БИ). На ЖКИ ото-

бражается напряжение, пропорциональное измененному сопротивлению, и измеряемое значение температуры.

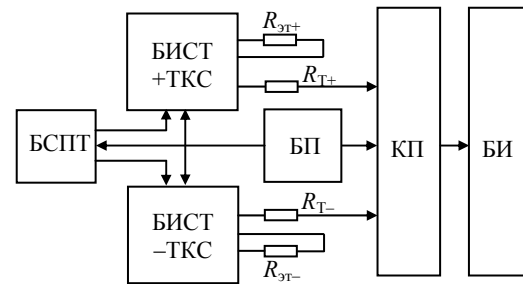


Рис. 1. Блок-схема регулятора-стабилизатора температуры

Структурная схема регулятора-стабилизатора представлена на рис. 2, стабилизатора переменного тока – на рис. 3. Задающий генератор G (рис. 3) вырабатывает синусоидальное напряжение частотой около 37 Гц, не кратной гармоникам сетевого напряжения. Сигнал с генератора поступает на усилитель мощности с регулируемым коэффициентом усиления, регулировка которого осуществляется с помощью резисторной оптопары, включенной в цепь обратной связи. Выход усилителя мощности нагружен на низкочастотный трансформатор с тремя вторичными обмотками. Две из них идентичны и используются для питания датчиков температуры [8]. Напряжение $U_{СД}$ с третьей обмотки используется как опорное для управления синхронными детекторами в схемах измерителей температуры. Датчиками тока, протекающего через датчики температуры, служат прецизионные резисторы R_1 и R_2 , включенные в цепи питания датчиков. Напряжения с этих резисторов, пропорциональные протекающему току, поступают на измерительный усилитель (*AD620*) с регулируемым коэффициентом усиления. Усиленное напряжение поступает на прецизионный выпрямитель и далее на фильтр низких частот (ФНЧ). С выхода ФНЧ напряжение поступает на один из входов дифференциального усилителя. На другой вход усилителя подается напряжение с источника $U_{ОП}$, выполненного на микросхеме *AD780*. Включенный после дифференциального усилителя пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор) воздействует на излучатель резисторной оптопары (и соответственно, на коэффициент усиления усилителя) таким образом, чтобы ток, протекающий через датчик температуры, не изменялся при изменении его сопротивления. Долговременная и температурная нестабильность поддержания заданного тока в такой схеме зависят только от стабильности резисторов R_1 , R_2 и стабильности источника опорного напряжения $U_{ОП}$. Коэффициент стабилизации составляет величину не хуже $1 \cdot 10^4$.

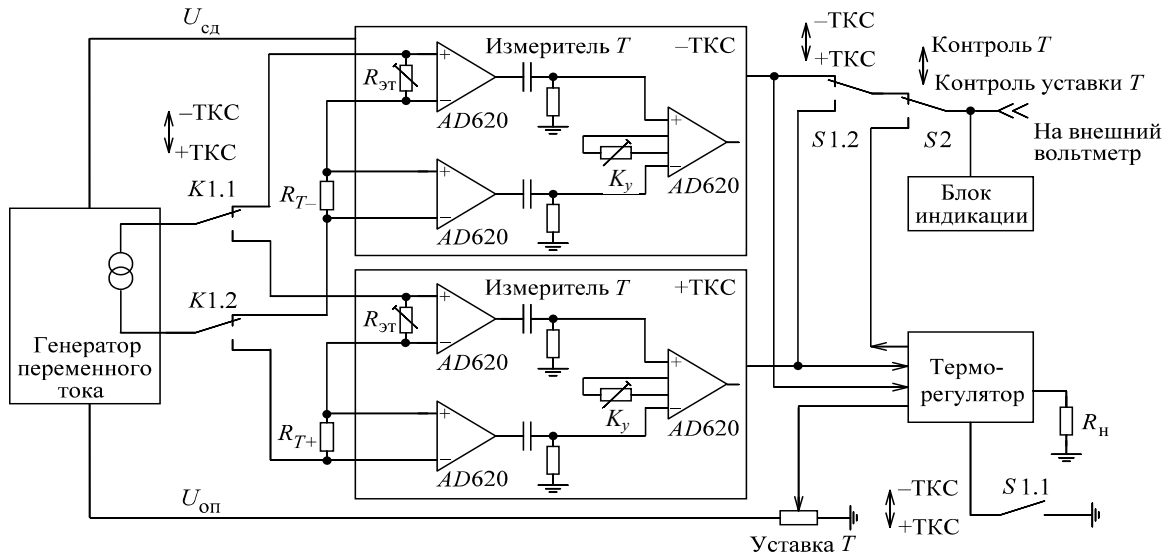


Рис. 2. Структурная схема стабилизатора-регулятора

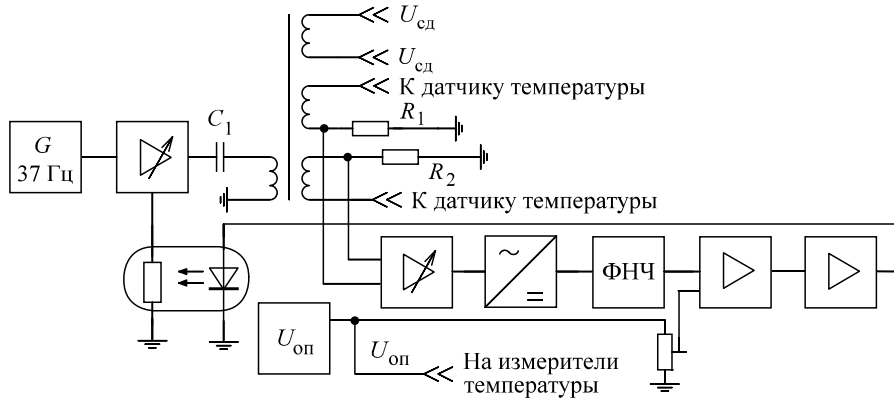


Рис. 3. Структурная схема стабилизатора переменного тока

С целью уменьшения влияния паразитного разогрева датчика температуры, рабочий ток, протекающий через него, не превышает 10 мкА. Погрешность измерения сопротивления датчика порядка 0,01 %.

Выбор датчиков температуры задается переключателем $S1$ (рис. 2), коммутирующим выходной сигнал выбранного измерителя температуры на блок индикации и терморегулятор. Кроме того, $S1$ воздействует на реле, которое своими контактами $K1.1$; $K1.2$ подключает выходное напряжение генератора тока к выбранному измерителю температуры.

Ввиду довольно значительного изменения сопротивления датчиков в интервале температур (в 100 и более раз) мостовые схемы включения датчиков не использовались. Измерительный ток протекает по последовательно соединенным эталонным резисторам $R_{ЭТ}$ и датчикам R_T . Оба измерительных резистора включены по четырехпроводной схеме. Напряжения с них посту-

пают на измерительные усилители ($AD620$) с одинаковым коэффициентом усиления и далее на усилитель с регулируемым коэффициентом усиления. С выхода последнего сигнал подается на синхронный детектор и ФНЧ (см. рис. 3). В верхнем (по схеме) измерителе температуры в качестве датчика используется угольный резистор, а в нижнем – платиновый. Регулировкой $R_{ЭТ}$ в измерителе температуры с угольным резистором выходное напряжение устанавливается равным нулю при $T = 300$ К, а в измерителе с платиновым датчиком нулевое выходное напряжение устанавливается при $T = 77$ К. Выходное напряжение измерителя температуры подается на вход ПИ-регулятора. Для установки выбранной температуры стабилизации образца служит резистор «Уставка T » с высокой электрической разрешающей способностью (0,001 %). На резистор подается напряжение $U_{оп}$, а часть этого напряжения с ползунка резистора поступает на вход терморегулятора и одновременно, при установке

переключателя $S2$ в положение «Контроль уставки T », отображается на индикаторе блока или внешнем вольтметре. Терморегулятор устанавливает в обмотке нагревателя R_H такую мощность, чтобы разность напряжения уставки и выходного напряжения измерителя температуры стремилась к нулю.

Выходное напряжение измерителя температуры подается на стрелочный индикатор и блок индикации. Ядром блока индикации служит микропроцессор $MSP430F133$, управляющий 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) $ADS8325$. АЦП преобразует выходное напряжение измерителя температуры в цифровой код. В микропроцессоре в цифровом виде проводится усреднение измеренной величины напряжения по нескольким измерениям для повышения точности измерений, пересчет величины напряжения в сопротивление и по полученной величине сопротивления датчика определяется значение измеряемой температуры в соответствии с градуировочной кривой каждого датчика, хранящейся в памяти микроконтроллера. Полученные величины напряжения, сопротивления и температуры преобразуются в коды цифрового индикатора и выводятся на жидкокристаллическую панель.

Фотография регулятора-стабилизатора температуры со стрелочным индикатором и фрагмента электродинамического модуля криоэлектронметра приведена на рис. 4, а, фотография регулятора-стабилизатора с цифровым индикатором в корпусе – на рис. 4, б.



а)



б)

Рис. 4. Регулятор-стабилизатор температуры – фрагмент схемы и модуля криоэлектронметра (а), общий вид (б)

Калибровка разработанного устройства с угольным датчиком (–ТКС) произведена по нескольким реперным температурным точкам, соответствующим температуре таяния льда ($T = 273$ К), кипения жидкого азота N_2 ($T = 77$ К) и жидкого гелия 4He ($T = 4,2$ К). Промежуточные значения определены путем аппроксимации по аналитическим зависимостям, найденным на основании экспериментальных результатов градуировки. Градуировка блока с платиновым датчиком (+ТКС) в диапазоне температур $T = 300 \div 75$ К выполнена по данным фирмы-изготовителя датчика.

После калибровки блока измерения температуры были проведены пробные эксперименты по выбору датчика термосопротивления (термодатчика) для измерения значения температуры в разных температурных диапазонах. На рис. 5 приведена калибровочная кривая для низкоомного датчика «Speer» (–ТКС), используемого при проведении измерений при температурах $T = 80 \div 0,8$ К. Оценка крутизны кривой температурной зависимости нескольких термодатчиков приведены на рис. 6.

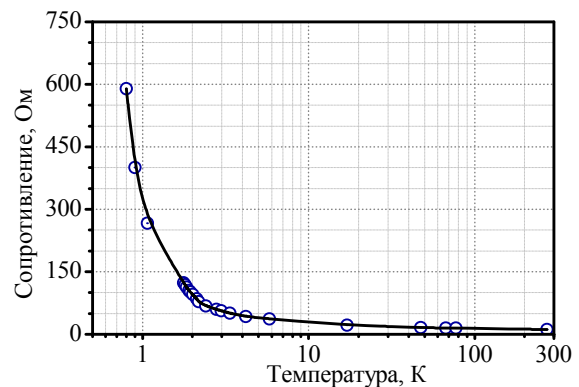


Рис. 5. Результаты калибровки терморезистора «Speer» 13 Ом в диапазоне температур $0,8 \div 300$ К

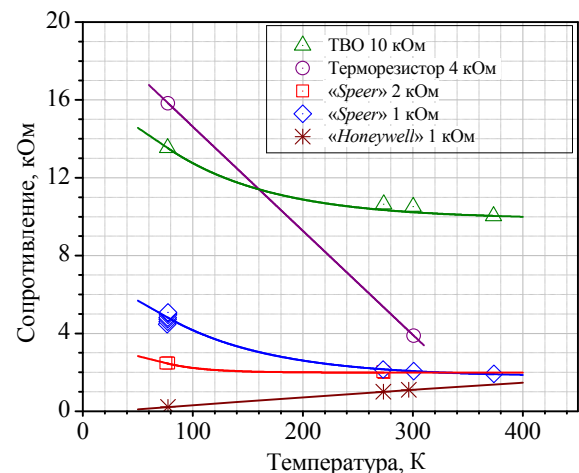


Рис. 6. Зависимость сопротивления термодатчиков в интервале температур $77 \div 373$ К

Для градуировки термодатчиков при температуре ниже гелиевой (4,2 К) разработан и изготовлен специальный модуль (рис. 7). С помощью этого модуля проградуированы полупроводниковый термометр, изготовленный в Физико-техническом институте низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины, терморезисторы «Speer» и «Matsushita».

водниковый термометр, изготовленный в Физико-техническом институте низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины, терморезисторы «Speer» и «Matsushita».

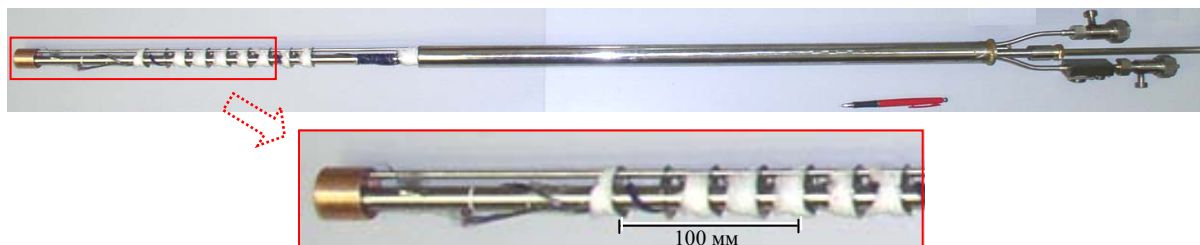


Рис. 7. Фотография низкотемпературного модуля для градуировки термодатчиков

Калибровка проведена с помощью манометра Маклеода путем измерения давления насыщенных паров жидкого гелия при их откачке ($N_{\text{ман}}$). Результаты калибровки приведены в таблице. Данные калибровки в этом диапазоне температур согласуются с данными, полученными другими методами.

Значение сопротивления термодатчиков при сверхнизких температурах

$N_{\text{ман}}$, мм рт. ст.	T , К	R_{Speer} , Ом	$R_{\text{Matsushita}}$, Ом
1,93	1,07	266,00	581,0
13,0	1,77	124,01	492,0
27,0	1,90	104,47	484,9
33,0	2,01	95,29	469,3
47,0	2,18	78,35	468,4
77,0	2,41	68,47	467,5
127,0	2,78	60,00	464,7
197,0	2,97	56,47	462,0
297,0	3,36	50,77	445,7

В режиме повышения температуры в рабочей камере проверены условия стабилизации в точках проведения измерения. Время (в минутах) перехода от одной температурной точки T_1 к другой T_2 и стабилизации температуры с точностью 0,05 К можно описать эмпирической формулой $t_2 - t_1 = (T_2 - T_1) / ((T_i - T_1)(t_i / I_i) + 5)$, где T_i , t_i и I_i – температура, время и ток, протекающий через нагреватель, в момент времени $1 < i < 2$ соответственно. Такая продолжительность по времени обусловлена необходимостью создания одинаковых температурных условий в рабочей зоне. На рис. 8 показан ход кривых изменения сопротивления двух термодатчиков фирмы «Matsushita» при увеличении температуры с использованием двух нагревателей. Датчик R_1 расположен вблизи одного из нагревателей, датчик R_2 – непосредственно на поверхности образца.

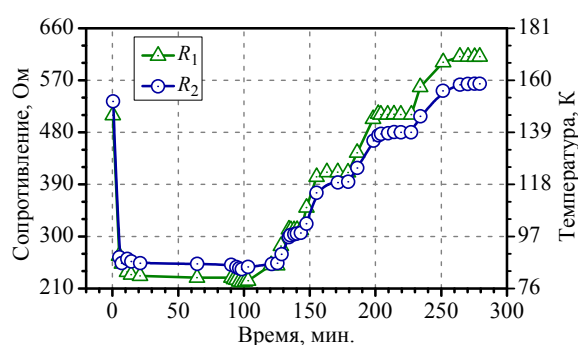


Рис. 8. Зависимости, характеризующие процесс стабилизации температуры в рабочей камере в диапазоне температур 77÷170 К

2. Результаты. Рассмотренный регулятор-стабилизатор использован в составе криоэлектронметра при измерении диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь ($\text{tg} \delta$) диэлектрических и полупроводниковых материалов с малыми значениями потерь в миллиметровом диапазоне длин волн и широком диапазоне температур вплоть до сверхнизких ($T = 300 \pm 0,8$ К) [13–15]. Применен метод дискового диэлектрического резонатора (ДДР) на модах шепчущей галереи. При этом резонатор изготавливается из исследуемого материала. Измеряемыми параметрами являются сдвиг резонансной частоты и изменение добротности резонансных колебаний резонатора при изменении температуры.

ДДР располагается в нижней части вакуумируемой камеры электродинамического модуля криоэлектронметра [13] и крепится на массивной медной рамке. Датчики для измерения и стабилизации температуры расположены на этой же медной рамке в непосредственной близости от него. Для создания теплового контакта они покрыты теплопроводящей пастой и находятся в специальных углублениях. Вблизи датчиков расположены нагреватели, выполненные в виде витков провода с большим удельным сопротивлением.

В ряде экспериментов (исследование свойств квантовых жидкостей) рабочая камера заполняется исследуемой жидкостью – ^4He . Измерение параметров ДДР, изготовленных из исследуемых материалов, проведено в диапазоне частот $58\div 78$ ГГц и диапазоне температур $T = 0,8\div 300$ К [15].

Примеры изменения частоты f и добротности Q резонансных колебаний в ДДР, изготовленном из кремния, легированного золотом (Si: Au), и чистого монокристаллического кремния (Si), приведены на рис. 9 [16].

Кривые характеризуют изменение диэлектрических параметров исследуемых материалов в широком температурном интервале. В частности, высокие значения добротности колебаний ДДР, изготовленного из Si: Au, свидетельствуют о крайне низких потерях электромагнитной энергии в этом веществе. Резкое изменение добротности колебаний в области λ -точки ($T \approx 2,17$ К) ^4He с необходимой степенью достоверности (обеспеченной применением данного блока) указывает на особенности взаимодействия ^4He в сверхтекучем состоянии с электромагнитным излучением [17]. На основании полученных данных (сдвигов резонансной частоты, изменений добротности резонансных колебаний) рассчитаны диэлектрические параметры исследуемых материалов.

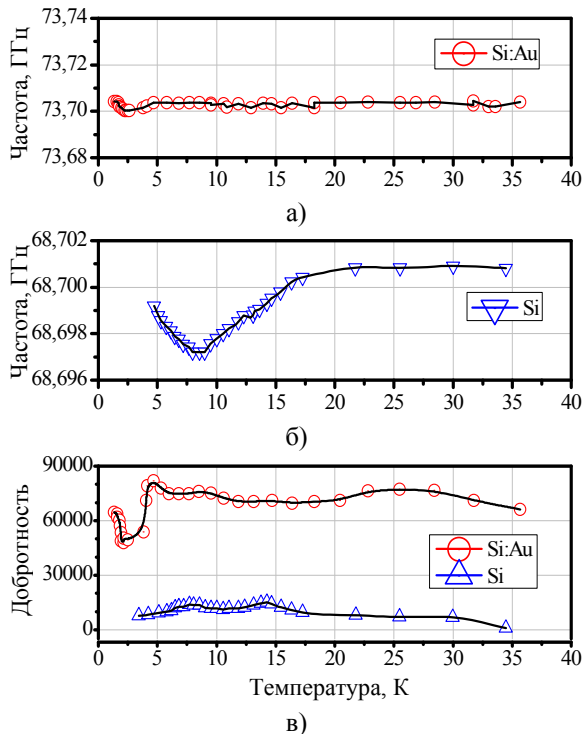


Рис. 9. Частоты (а, б) и добротности (в) мод шепчущей галереи в ДДР из Si и Si: Au в зависимости от температуры

Выводы. Разработан и создан прецизионный автоматизированный блок измерения и ста-

билизации температуры рабочей камеры и образца (ДДР), рассчитанный на работу в диапазоне температур $0,8\div 300$ К для использования в криодиэлектрометре гигагерцевого диапазона частот. Применена четырехпроводная схема с питанием термодатчиков переменным током. В качестве термодатчиков использованы термометры сопротивления с разным знаком ТКС. Обеспечена точность измерения сопротивления не хуже $0,05\%$ и точность стабилизации температуры около $\pm 0,01$ К. В основном эти погрешности обусловлены неточностью измерения постоянного выходного напряжения. Регулятор-стабилизатор позволяет выполнять прецизионные измерения диэлектрических параметров перспективных диэлектрических и полупроводниковых материалов в широком диапазоне частот и температур. Измерения проведены на криодиэлектрометре, входящем в состав криомагнитного радиоспектроскопического комплекса миллиметрового диапазона длин волн, имеющего статус Национального достояния Украины (распоряжение Кабинета Министров Украины № 665-р от 27 декабря 2006 г.)

Библиографический список

1. Вепшек Я. Измерение низких температур электрическими методами / Я. Вепшек. – М.: Энергия, 1980. – 224 с.
2. Методы получения и измерения низких и сверхнизких температур: Справочник / Б. И. Веркин, В. Н. Григорьев, В. Г. Иванцов и др. – К.: Наук. думка, 1987. – 232 с.
3. Орлова М. П. Низкотемпературная термометрия / М. П. Орлова. – М.: Изд. стандартов, 1975. – 200 с.
4. Rose-Innes A. S. Low temperature laboratory techniques / A. S. Rose-Innes. – L.: The English Universities Press Ltd., 1973. – 255 p.
5. Kopp J. Thermal contact problems in low temperature thermocouple thermometry / J. Kopp, G. A. Slack // *Gryogenics*. – 1971. – 11, N 1. – P. 22–25.
6. Daneman H. L. Precise resistance thermometry – A review / H. L. Daneman, G. C. Mergner // *Instrumentation Technology*. – 1967. – 14, N 5–6. – P. 51–56, 65–69.
7. Swenson C. A. Differences between AC and DC determinations of germanium thermometer resistances / C. A. Swenson, P. C. F. Wolfendale // *Rev. Sci. Instr.* – 1973. – 44, N 3. – P. 339–341.
8. Рохлин Дж. И. Усовершенствованный терморегулятор для гелиевых температур / Дж. И. Рохлин // *Приборы для науч. исследований*. – 1970. – № 1. – С. 75–83.
9. Игнатъев В. К. Термометрические свойства кремниевого транзистора КТ629А и электронная стабилизация температуры в диапазоне $1\div 300$ К / В. К. Игнатъев, В. М. Пудалов // *Приборы и техн. эксперимента*. – 1983. – № 1. – С. 187–190.
10. Скаржинюк Ф. К. Точный регулятор-стабилизатор температуры / Ф. К. Скаржинюк // *Приборы и техн. эксперимента*. – 1985. – № 3. – С. 208–210.
11. Бруски Л. Прецизионный регулятор температуры для работы с термометрами сопротивления / Л. Бруски, Р. Сторти, Г. Торцо // *Приборы для науч. исследований*. – 1985. – № 3. – С. 87–91.
12. Преобразователь сопротивление-напряжение для низкотемпературных угольных термометров / В. И. Троценко, И. М. Карнаухова, А. А. Луханин, В. Ф. Четченко // *Приборы и техн. эксперимента*. – 1987. – № 2. – С. 189–190.

13. Криволинейный комплекс для измерения сверхмалых потерь в диэлектриках в миллиметровом диапазоне длин волн / Р. В. Головащенко, В. Н. Деркач, В. Г. Корж и др. // 13-я Междунар. Крымская конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2003): материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2003. – С. 679–680.
14. Measurement of loss tangent of dielectric and semiconductor materials at millimeter waves and temperatures 0.9 – 300 K / V. N. Derkach, R. V. Golovashchenko, S. V. Nedukh et al. // Joint 30th Intern. Conf. on Infrared and Millimeter Waves (IRMMW–THz 2005): Conf. Digest. – Williamsburg, 2005. – P. 192–193.
15. Temperature control and stabilization in the cryodielectricometer for temperatures 0.5 – 300 K / V. N. Derkach, R. V. Golovashchenko, N. K. Zaetz et al. // 8th Intern. Kharkov Symp. on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2013): conf. proc. – Kharkov, 2013. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Загл. с этикетки диска. – Paper WT-15. – P. 118–120.
16. Измерение диэлектрических параметров материалов при низких температурах в миллиметровом диапазоне длин волн / В. Н. Деркач, Р. В. Головащенко, Е. В. Горошко и др. // Сб. науч. работ ФМИ НАН Украины. Сер. Физические методы и средства контроля качества материалов и изделий. – Львов, 2005. – Вып. 10. – С. 149–158.
17. Использование диэлектрического миллиметрового диапазона длин волн для исследования динамических характеристик жидкого гелия / В. Н. Деркач, Р. В. Головащенко, С. В. Недух, А. С. Плевако, С. И. Тарапов // 15-я Междунар. Крымская конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2005): материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2005. – С. 836–837.

Рукопись поступила 29.07.2013 г.

R. V. Golovashchenko, V. N. Derkach, M. K. Zaetz,
V. G. Korzh, A. S. Plevako, S. I. Tarapov

CONTROL AND STABILIZATION OF TEMPERATURE (0.8÷300 K) IN THE CRYODIELECTROMETER OF THE GIGAHERTZ FREQUENCY BAND

The problem of accurate temperature stabilization and its accurate measurement arises during the design of low-temperature radiospectrometers for measurement of dielectric parameters of materials in the millimeter waveband and for wide temperature range. Thermometers for measurement of low and ultralow temperatures are usually based on the temperature dependence of special properties of intrinsic material. Electric resistance

thermometers are most widespread for design of the schemes for measurement and stabilization of temperature under the above-mentioned conditions. The temperature controller-stabilizer – the precision automated block for measurement and stabilization of temperature of the disk dielectric resonator, is designed for the operation in the 0.8 K÷300 K temperature range. The block is designed for cryodielectricometer of gigahertz band. The four-wire scheme with alternative current is applied. The specialized resistive sensors with different sign of temperature coefficient of resistance were tested. The accuracy of resistance detection about 0.05 % is achieved. The accuracy of stabilization of temperature is higher than ±0.01 K. Results of test experiments devoted to measurement of the material parameters of low loss dielectrics at low temperatures are presented.

Key words: radiospectroscopy, dielectrometry, low temperatures, thermometry.

Р. В. Головащенко, В. М. Деркач, М. К. Заець,
В. Г. Корж, О. С. Плевако, С. І. Тарапов

КОНТРОЛЬ І СТАБІЛІЗАЦІЯ ТЕМПЕРАТУРИ (0,8÷300 К) У КРІОДІЕЛЕКТРОМЕТРІ ГІГАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ

При розробці та створенні низькотемпературних радіоспектретрів для вимірювання діелектричних параметрів матеріалів у міліметровому діапазоні довжин хвиль і широкому діапазоні температур виникає завдання точної стабілізації температури та її точного вимірювання. Термометри для вимірювань низьких і наднизьких температур, як правило, засновані на температурній залежності окремих фізичних властивостей відповідних речовин. Найбільш зручними для схем вимірювання та стабілізації температури в цьому діапазоні температур є електричні термометри опору. У даній роботі описано розроблений регулятор-стабілізатор температури – прецизійний автоматизований блок вимірювання і стабілізації температури дискового діелектричного резонатора, розрахований на роботу в діапазоні температур 0,8 ÷ 300 К для використання у кріодіелектрометрі гігагерцового діапазону частот. Використано чотирихвостову схему з живленням термодатчиків змінним струмом. Як датчики використано термометри опору з різним знаком температурним коефіцієнтом опору. Забезпечено точність вимірювання опору не гірше 0,05 % і точність стабілізації температури близько ±0,01 К. Наведено результати тестування розробленого пристрою та результати вимірювання діелектричних параметрів матеріалів з низькими втратами в низькотемпературних експериментах з його використанням.

Ключові слова: радіоспектроскопія, діелектрометрія, низькі температури, термометрія.