

Кристаллизационный термометр для сверхнизких температур с охлаждаемым генератором на полевом транзисторе

В.А. Майданов, М.И. Мильченко, Н.П. Михин, А.С. Неонета, А.В. Полев,
В.Н. Репин, С.П. Рубец, А.С. Рыбалко, С.Ф. Семенов, Е.В. Сырников,
В.А. Шилин, Е.О. Вехов

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина
E-mail: maidanov@ilt.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 26 апреля 2005 г.

Проведен анализ существующих методик измерения давления в кристаллизационном термометре, применяемом для измерения сверхнизких температур. Показано, что для повышения чувствительности и точности измерений можно применять метод, основанный на измерении резонансной частоты колебательного контура, включающего в себя емкостной датчик давления. Описан низкотемпературный генератор на полевом транзисторе, позволяющий более чем на порядок повысить чувствительность и точность измерения температуры в диапазоне 0,9 мК–1 К.

Проведено аналіз існуючих методик виміру тиску в кристалізаційному термометрі, який застосовують для виміру наднизьких температур. Показано, що для підвищення чутливості та точності вимірів можна застосовувати метод, який базується на вимірі резонансної частоти коливального контуру, що включає ємнісний датчик тиску. Описано низькотемпературний генератор на польовому транзисторі, що дозволив більш ніж на порядок підвищити чутливість та точність виміру температури в діапазоні 0,9 мК–1 К.

PACS: 07.20.Mc, 07.07.Df

1. Введение

За последние годы термометрия, основанная на зависимости давления плавления ^3He от температуры, стала наиболее распространенной в физических исследованиях в милликельвиновом диапазоне температур. Соотношение между давлением и температурой плавления чистого ^3He является универсальным и в настоящее время стандартизовано с высокой степенью точности. С 2000 г. для лабораторной практики рекомендована новая Международная температурная шкала по кривой плавления ^3He – PLTS-2000, которая охватывает диапазон температур от 0,9 мК до 1 К [1].

В кристаллизационных термометрах, использующих в качестве рабочего вещества смесь жидкого и твердого ^3He на кривой плавления, измерение температуры сводится к соответствующему измерению давления. Невозможность непосредственного изме-

рения давления *in situ* при низких и сверхнизких температурах инициировало создание различных преобразователей давления в исследуемых образцах. На данный момент широкое распространение в физике низких температур нашел емкостной датчик Страти – Адамса мембранного типа [2,3].

Самым простым является метод непосредственного измерения емкости тензодатчика кристаллизационного термометра промышленными автоматическими цифровыми мостами переменного тока типа E8-4, E7-8, E7-12. Как правило, емкостные датчики давления в рабочем диапазоне температур имеют номинальную емкость $C = 30\text{--}40$ пФ. Все перечисленные цифровые измерители емкости имеют разрешение в этом диапазоне емкостей $\sim 0,01$ пФ, т.е. $\Delta C/C \sim 10^{-4}\text{--}10^{-5}$. При обычной чувствительности емкостного датчика давления ~ 1 пФ/атм разрешение по температуре в этом случае составляет около

0,4–0,5 мК (при 100 мК), что не всегда удовлетворяет требованиям к измерению температуры в экспериментальной практике. Кроме того, измерительное напряжение таких мостов (30–40 В и более) приводит к перегреву термометра из-за электромагнитных потерь в датчиках, особенно при температурах порядка нескольких милликельвин.

Современные зарубежные цифровые автоматические мосты для измерения емкости имеют высокое разрешение $\Delta C/C \sim 10^{-6}$ – 10^{-8} при низком измерительном напряжении $\sim 0,1$ – $1,5$ В (например, мосты фирмы Andeen-Hangerling), однако они имеют высокую стоимость. Вот почему развивается альтернативный метод измерения емкости датчиков давления — резонансный, при котором емкостной датчик давления является составной частью колебательного LC -контура. Изменение давления при этом приводит к изменению резонансной частоты контура [4–7], которая с высокой точностью может быть измерена частотомером. Современный частотомер — один из самых точных приборов среди цифровых измерителей, имеет восьмизначковую индикацию и позволяет достичь относительного разрешения по частоте выше $\sim 10^{-7}$.

Цель данной работы — разработка и реализация прецизионного резонансного метода измерения емкости датчика давления кристаллизационного термометра для повышения точности измерения температур в милликельвиновом диапазоне.

2. Требования к измерительной схеме

Измерительная схема, реализующая резонансную методику, включает параллельный колебательный контур LC и активную часть — туннельный диод или транзистор. В то время как измерительный колебательный LC -контур всегда находится вблизи измерительной ячейки, активный элемент может располагаться либо при низких температурах в непосредственной близости от контура, либо при комнатной температуре. Преимущества последнего варианта очевидны: возможность применять любые активные и пассивные элементы схемы и легкая доступность ее во время настройки и ремонта. Однако длинная линия связи между «теплой» активной частью и колебательным контуром при наличии «микрофонного» эффекта, а также зависимость паразитной емкости линии связи от уровня гелия в дьюаре становятся серьезной проблемой, если речь идет об относительном разрешении по частоте лучше 10^{-6} . Естественный путь преодоления этой проблемы сводится к уменьшению коэффициента связи между LC -контуром и активной частью, в результате чего вносимая емкость линии связи уменьшается, но одновременно уменьшается отношение сигнал/шум

на входе активной части и, как следствие, ухудшается реальная стабильность частоты на выходе генератора.

По этой причине активная часть схемы, так же как и колебательный контур, должна располагаться при низкой температуре.

Проведенные эксперименты показали, что все низкотемпературные элементы схемы нельзя располагать в открытой ванне с жидким гелием, температура которого 4,2 К, так как пузырьки кипящего гелия сильно уменьшают частотную стабильность устройства, по-видимому, как из-за «микрофонного эффекта», так и из-за различия диэлектрических проницаемостей газообразного и жидкого гелия. Во избежание этого все низкотемпературные элементы следует располагать в вакуумной рубашке рефрижератора.

Следующее требование также связано с необходимостью обеспечения высокой стабильности генерируемой частоты. Наши опыты с низкотемпературными генераторами на туннельных диодах показали, что нестабильность (долговременная и краткосрочная) генерируемой частоты определяется в основном нестабильностью напряжения источника питания и связана с большой крутизной и нелинейностью вольт-амперной характеристики туннельного диода в рабочей точке. Лучшей стабильностью ($\sim 3 \cdot 10^{-6}$) [7] обладали обращенные туннельные диоды из арсенида галлия АИ402, вольт-амперная характеристика которых при температурах жидкого гелия в рабочей точке достаточно пологая и близка к линейной. Небольшие усовершенствования схемы генератора [7] и источника питания, а также увеличение частоты генерации позволили в дальнейшем увеличить кратковременную стабильность генератора по частоте в несколько раз. Другие опыты с низкотемпературными генераторами на отечественных полевых транзисторах КП-350 показали, что их частотная стабильность может превышать показатели генераторов на туннельных диодах. Более того, полевые транзисторы значительно менее требовательны к стабильности напряжения питания, чем обращенные туннельные диоды. Однако большинство этих транзисторов разрушалось после нескольких охлаждений.

В данной работе разработана и исследована схема генератора гармонического сигнала на современном двухзатворном полевом MESFET транзисторе NE25118 [8] и показано, что эта схема удовлетворяет перечисленным выше требованиям и при большем относительном разрешении обладает лучшей стабильностью, чем схема, применявшаяся ранее [7].

3. Общее устройство и особенности монтажа

На рис. 1 приведена общая схема всего измерительного устройства и расположение отдельных его элементов в рефрижераторе растворения. Сам кристаллизационный термометр вместе с емкостным датчиком давления располагался на плите камеры растворения.

Схема генератора смонтирована на отдельной плате и вместе с катушкой индуктивности расположена на плите градусной ванны. Выбор места монтажа генератора и, в особенности, катушки индуктивности очень важен, поскольку для достижения высокой стабильности при измерениях все элементы генератора (за исключением емкостного датчика давления) должны находиться при постоянной температуре и иметь достаточный теплоотвод. Тепловыделение генератора составляет $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ Вт, что на порядок меньше холодопроизводительности одноградусной ванны. В то же время холодопроизводительность камеры растворения обычно не превышает нескольких десятков микроватт. Таким образом, наиболее удобное место для установки генератора — плита одноградусной ванны рефрижератора растворения, работающая практически при постоянной температуре.

Катушка намотана на керамический каркас, прикрепленный медным отоженным суппортом к плите одноградусной камеры. Питание генератора осуществляется источником 4 В, стабильность которого не хуже ± 10 мкВ.

Важная особенность включения кристаллизационного термометра в LC -контур — соединение неподвижной пластины с катушкой индуктивности, а подвижной пластины — с землей. В этом случае емкость между корпусом и подвижной обкладкой не вносится в LC -контур, что улучшает стабильность частоты генератора.

Датчик давления соединен с генератором коаксиальным сверхпроводящим проводом длиной $\sim 0,5$ м, который имеет тепловые контакты на каждой ступени охлаждения.

4. Генератор на полевом транзисторе

Генератор построен по классической схеме индуктивной трех-точки [9] (рис. 2). Измеряемая емкость кристаллизационного термометра $C_0(T)$ вместе с индуктивностью L определяет резонансную частоту генератора $f_{\text{res}} = 1/2\pi(\sqrt{LC_0(T)})$.

Выбор двухзатворного полевого транзистора NE25118 в качестве активного элемента высокостабильного генератора гармонического сигнала определялся его важными особенностями: регулярным воспроизведением электрических характеристик при каждом охлаждении до гелиевых температур; независимостью вольт-амперной характеристики транзистора от температуры в диапазоне 1–4,2 К, а также низким уровнем собственных шумов.

Для получения высокой точности измерения емкости $C_0(T)$ необходима прежде всего высокая стабильность генератора, которая, в свою очередь, определяется стабильностью питающего напряжения, собственными шумами транзистора и вибрациями. Важные факторы — высокая добротность контура и схема съема с него полезного сигнала для подачи на измерительное устройство. Для повышения добротности катушки необходимо уменьшать активные потери в контуре. Вследствие скин-эффекта существенную роль играет диаметр провода d , из которого навита катушка, и частота генератора. Поскольку с ростом d , с одной стороны, мощность потерь уменьшается как $1/d^2$, а с другой стороны — растут потери на вихревые токи (пропорционально d), всегда

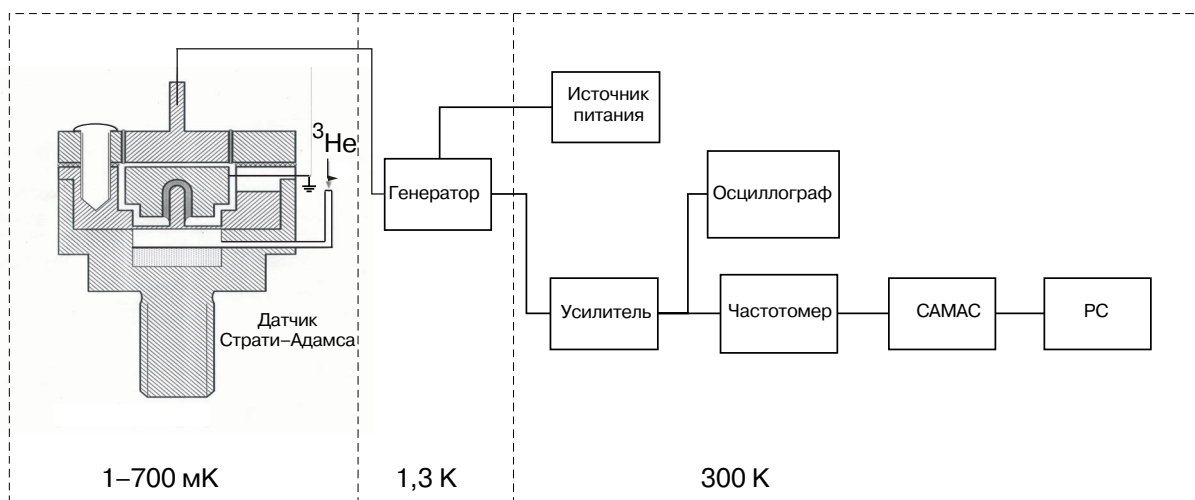


Рис. 1. Блок-схема измерительной системы.

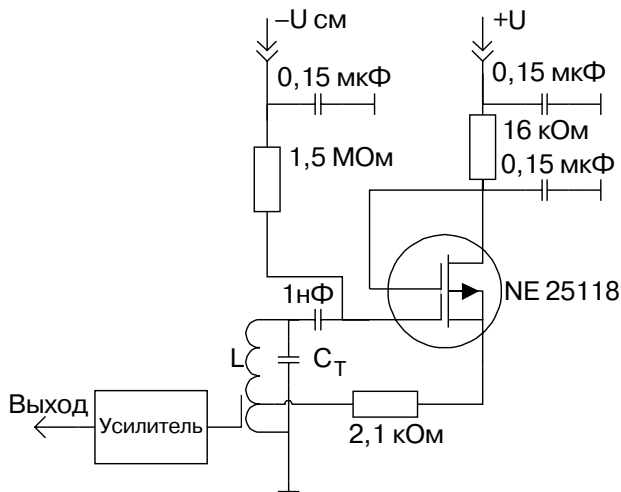


Рис. 2. Электрическая схема генератора на полевом транзисторе.

существует оптимальное значение диаметра d_{opt} , которое соответствует минимуму мощности, теряемой в обмотке катушки. Кроме того, оптимальным решением является применение многожильного высокочастотного провода, имеющего развитую поверхность, но маленький диаметр каждого из изолированных проводов.

Проведенный анализ показал, что потери в обмотке однослойной катушки индуктивности минимальны при отношении длины намотки к наружному диаметру катушки равном 0,7. В итоге изготовленный и смонтированный в криостате контур был намотан многожильным высокочастотным проводом ЛЭШО 0,07×7 и при комнатной температуре имел добротность $Q = 230$ при рабочей частоте 5 МГц.

Для достижения оптимального соотношения добротности и коэффициента k связи линии передачи с колебательным контуром $kQ < 1$ внутри каркаса контурной катушки была установлена петля связи, с которой слабый сигнал генератора (2–6 мВ) по коаксиальному кабелю поступает на низкошумящий широкополосный усилитель (см. рис. 1) с коэффициентом усиления по напряжению 70 дБ. Усилитель собран на микросхемах серии 235. Это позволило практически полностью устранить влияние нагрузки на стабильность частоты генерируемых колебаний: даже при изменении температур от комнатных до гелиевых, когда параметры колебательного контура, транзистора и линии передачи изменяются особенно сильно, стабильность генератора практически не изменялась.

Полезный сигнал генератора, усиленный до величины ~ 100 мВ, поступает на частотомер. Форма сигнала и амплитуда контролируются осциллографом. Для дальнейшей регистрации и обработки сигнал с цифрового выхода частотомера подается на

интерфейсный комплекс САМАС с последующим отображением на экране компьютера.

5. Калибровка датчика

Калибровку датчика кристаллизационного термометра производили при температуре $\sim 1,3$ К. При этих условиях ^3He остается жидким во всей области рабочих давлений ($P < 3,8$ МПа). Снимали зависимость частоты генератора от показаний образцового манометра, находящегося при комнатной температуре. Перед началом калибровки была проведена «тренировка» емкостного датчика, которая заключалась в циклическом изменении давления (~ 10 циклов) в рабочем диапазоне. Как показывает практика, это необходимо для того, чтобы убрать возможный гистерезис при увеличении (уменьшении) давления.

Для удобства дальнейшего использования полученные данные калибровки описывались полиномом пятого порядка. Типичный график зависимости частоты от давления приведен на рис. 3.

Таким образом, зная значение частоты, можно однозначно определить давление в кристаллизационной камере термометра после блокировки заполняющего капилляра. Температуру холодной плиты рефрижератора в диапазоне 0,9 мК–1 К можно определить с помощью уравнения, связывающего давление плавления ^3He с температурой [10]. Применение сверхпроводящих реперных точек [11] в широком диапазоне температур позволяет уточнить эту связь и исключить постоянную ошибку измерения температуры, связанную с погрешностью манометра.

Из анализа калибровочных данных легко рассчитать разрешение по температуре для данного устройства с учетом того, что изменение давления на одну атмосферу ($\sim 10^5$ Па) приводит к изменению резонансной частоты $\Delta f = 25$ кГц.

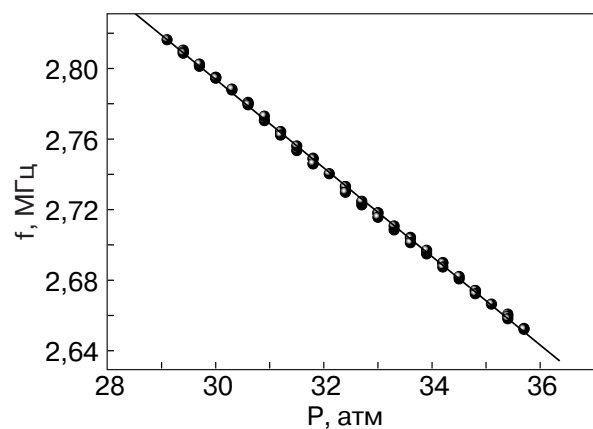


Рис. 3. Калибровочный график зависимости частоты генератора от давления. Сплошная линия — результат обработки данных калибровки методом наименьших квадратов.

Поскольку долговременная стабильность частоты генератора при низких температурах равна ± 1 Гц, минимально разрешимое изменение давления составляет ± 4 Па. Из этого значения можно оценить точность измерения температуры на любом участке температурного интервала в зависимости от наклона dP/dT кривой плавления ^3He . Например, разрешение при 100 мК ($dP/dT = -2,16$ МПа/К [10]) составляет 2 мК. Это более чем на два порядка лучше, чем при традиционных измерениях емкости датчика кристаллизационного термометра промышленными измерительными мостами E8-4, E7-8, E7-12.

Проведенные многократные охлаждения до температуры 1 К выявили хорошую работоспособность и воспроизводимость криогенного генератора на базе полевого транзистора в сочетании с емкостным датчиком кристаллизационного термометра. Данная методика представляется перспективной как для термометрии сверхнизких температур, так и для физических исследований, связанных с прецизионными измерениями давления или электрической емкости при сверхнизких температурах.

Авторы благодарны Э.Я. Рудаевскому и В.Н. Григорьеву за интерес к работе.

Работа поддержана Украинским фондом фундаментальных исследований 02.07/00391 (проект № Ф12-7/286-2004).

1. R.L. Rusby, M. Durieux, A.L. Reesink, R.P. Hudson, G. Schuster, H. Kuhne, W.E. Fogle, R.J. Soulen, and E.D. Adams, *J. Low Temp. Phys.* **126**, 633 (2002).
2. G.C. Straty and E.D. Adams, *Rev. Sci. Instr.* **40**, 1393 (1969).
3. A.A. Scribner and E.D. Adams, *Rev. Sci. Instr.* **41**, 287 (1970).
4. H. Chester, *Rev. Sci. Instr.* **39**, 719 (1968).
5. J. Janis, *Phys. Rev.* **170**, 320 (1968).
6. C.T. Van Degriff, *Rev. Sci. Instr.* **46**, 599 (1975).

7. В.А. Михеев, Г.Р. Мовсесян, К.З. Бабаян, Р.Т. Мина, В.А. Майданов, Н.П. Михин, В.К. Чаговец, Г.А. Шешин, *ПТЭ* №1, 226 (1989).
8. General Purpose Dual-Gate Ga-As MESFET NE25118, Exclusive North American Agent NEC RF, Microwave & Optoelectronic Semiconductors, California Eastern Laboratories, Headquarters, 4590 Patrick Henry Drive, Santa Clara, CA 95054-1817.
9. В.А. Котельников, А.Н. Николаев, *Основы радиотехники*, Гос. изд-во литературы по вопросам связи и радио, Москва (1950), с. 57–70.
10. Б.И. Веркин, В.Н. Григорьев, В.Г. Иванцов, В.А. Коваль, Э.Я. Рудаевский, А.А. Голуб, Н.М. Звягина, *Методы получения и измерения низких и сверхнизких температур*. Справочник, Наукова думка, Киев (1987).
11. S. Schottl, R. Rushby, H. Godfrin, M. Meschke, V. Goudon, S. Triqueneaux, A. Peruzzi, M. de Groot, R. Jochemsen, W. Bisch, Y. Hermier, L. Pitre, C. Rives, B. Fellmuth, and J. Engert, *J. Low Temp. Phys.* **138**, 941 (2002).

The ultralow temperature melting curve thermometer with a cold tunnel diode oscillator

V.A. Maidanov, M.I. Milchenko, N.P. Mikhin, A.S. Neoneta, A.V. Polev, V.N. Repin, S.P. Rubets, A.S. Rybalko, S.F. Semenov, Ye.V. Syrnikov, V.A. Shilin, and Ye.O. Vekhov

The existing methods of measuring pressure in the ultralow temperature melting curve thermometer are analyzed. It is shown that the sensitivity and accuracy of measurement can be improved by using the method of measuring resonance frequency of the LC tank involving the capacitance pressure gauge. The low-temperature FET oscillator is described which made it possible to improve more than by the order of magnitude the sensitivity and accuracy in the range 0.9 mK–1.0 K.