

КРИОТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

В.А.Рахубовский

*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт"
61108, Харьков, ул. Академическая, 1, Украина; тел.0572-40-44-48*

На основе работ, выполненных в институте, показана возможность применения сверхпроводящих переключателей - проволочных свинцово-оловянных криотронов для создания и отработки принципов построения вычислительных и управляющих устройств, а также устройств измерительной и преобразовательной техники. Приведены примеры использования измерительных устройств в физических исследованиях при гелиевых температурах.

ВВЕДЕНИЕ

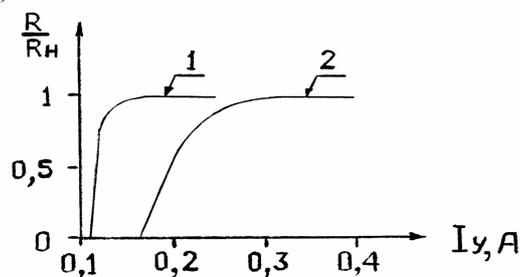
В 1954 г. Д.А.Бак изобрел сверхпроводящий переключатель - проволочный ниобиево-танталовый криотрон [1], предназначенный для построения вычислительных устройств. Позднее, в 1956 году, Я.С.Кан разработал проволочный свинцово-оловянный криотрон [2]¹. Преимуществами этого криотрона, перед предложенным в [1], являлись: лёгкость массового производства; дешевизна используемых при изготовлении материалов; стабильность во времени параметров; удобство сборки из них опытных образцов элементов и узлов. Это позволило построить и экспериментально исследовать в работе целый ряд вычислительных, измерительных и коммутационных устройств на криотронах [3].

КОНСТРУКЦИЯ, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, ПАРАМЕТРЫ КРИОТРОНА

Конструктивно криотрон представляет собой отрезок оловянной проволоки - вентиль диаметром $2 \cdot 10^{-4}$ м, длиной $7 \cdot 10^{-3}$ м, на который навита управляющая обмотка длиной $5 \cdot 10^{-3}$ м из изолированной свинцовой проволоки диаметром 10^{-4} м, содержащая 40 витков. Криотроны соединяются между собой пайкой. В качестве припоя используются ПОС-61 и сплав Вуда. Если такой элемент охлаждён до температуры на $0,05 \dots 0,1$ К ниже T_k для вентиля, то сопротивление последнего будет равно нулю до тех пор, пока он не окажется в магнитном поле (создаваемом током в вентиле и управляющей обмотке) больше, чем H_k для данной температуры. Тогда его сопротивление скачком возрастает до некоторого конечного значения (рисунк, кривая 1). При снятии этого поля вентиль вновь возвратится в сверхпроводящее состояние. Таким образом, криотрон является сверхпроводящим переключателем по принципу действия, подобному электромагнитному реле с нормально-замкнутым контактом.

Основными параметрами криотрона являются: R_H - сопротивление вентиля криотрона в резистивном состоянии; α - статический коэффициент усиления по току; L - индуктивность управляющей об-

мотки; τ - постоянная времени одиночного криотронного контура. Для наших криотронов: $R_H = 10^{-4}$ Ом; $\alpha = 3 \dots 4$; $L = 10^{-7}$ Гн, $\tau = 10^{-3}$ с. Для случая, когда вентиль криотрона изготавливался из сплава $Sn + 1\%Sb$ имеем: $R_H = 2 \cdot 10^{-3}$ Ом; $\tau = 5 \cdot 10^{-5}$ с. При рабочей температуре 3,6 К управляющий и питающий токи лежат в диапазоне $0,15 \dots 0,5$ А.



*Зависимость сопротивления вентиля криотрона от тока в управляющей обмотке при $T=3,6$ К, $R_H = 10^{-4}$ Ом и значениях тока через вентиль:
1 - 0,6; 2 - 0,35 А*

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Являясь активным элементом, криотрон оказался пригодным для построения широкого класса элементов: логических, запоминающих, усилительных. Был разработан полный набор элементов и схем, необходимых для создания криотронных вычислительных устройств [2-4]. На их базе впервые в бывшем Союзе были построены и экспериментально исследованы в работе макеты вычислительных устройств: ЦВМ с программным управлением [5]; кодово-матричного множительного устройства [3]; вычислительной среды [6]; управляющего устройства [7].

Результаты исследований показали практическую пригодность криотронов для целей макетирования устройств, работающих по разным принципам организации вычислительных процессов; надежность их работы в сложной схеме; помехоустойчивость; сохранение работоспособности в широком диапазоне изменения ($\pm 20\%$) питающих и управляющих токов.

¹ Такой проволочный криотрон будем называть в дальнейшем криотрон.

УСТРОЙСТВА НА БАЗЕ МАГНИТО-УПРАВЛЯЕМЫХ КОНТАКТОВ СО СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ОБМОТКОЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ

При исследовании и использовании криотронных устройств возникает проблема сочленения их с внешними устройствами, работающими при комнатной температуре. Так как сопротивление вентиля криотрона в резистивном состоянии мало ($10^{-3} \dots 10^{-4}$ Ом), то коммутировать токи он может только в низкоомной или сверхпроводящей цепи. Кроме того, возникающая при этом на вентиле разность потенциалов составляет 10^{-5} В и её трудно считать обычными электронными устройствами. Одним из путей решения этой проблемы является использование для этой цели магнитоуправляемых контактов (МУК) со сверхпроводящей обмоткой возбуждения, подключаемой параллельно вентилю выходного криотрона. Ниже приводятся разработанные и исследованные в работе устройства на базе МУК: устройство для коммутации токов (УКТ); реле времени (РВ); генератор импульсов (ГИ). УКТ [3] предназначено для коммутации тока 0,5 А при напряжении 30 В в цепях, находящихся при гелиевых температурах. Оно обладает временем срабатывания 0,01...0,1 с и выдерживает до 10^7 переключений. Используется для вывода сигналов из сверхпроводящих цепей и управления электромеханическими исполнительными устройствами, находящимися вне криостата. РВ [8] имеет диапазон выдержек времени $(10 \dots 22) \cdot 10^3$ с при нестабильности выдержек 1%; используется в устройствах автоматического управления и контроля, содержащих сверхпроводящие элементы. ГИ [9] формирует близкие к прямоугольным импульсы тока на нагрузке с индуктивностью $5 \cdot 10^{-4}$ Гн и активным сопротивлением 1 Ом в диапазоне частот 0,1...1,2 Гц. Он используется в качестве источника управляющих импульсов при исследовании криотронных устройств.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Наличие линейной части на характеристике $R(I_y)$ (см. рисунок, кривая 2) и значительная крутизна этой характеристики $(\partial R / \partial I_y)_{I_b} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/А}$ позволяют построить на базе криотронов измерительные и усилительные устройства, работающие в жидком гелии: криотронный генератор релаксационных колебаний (КГРК); мостовой криотронный усилитель (МКУ); низкоомный магазин сопротивлений (НМС); устройство для измерения индуктивности сверхпроводящих контуров на постоянном токе (УИИПТ).

КГРК [3,10,19] предназначен для использования в качестве термометра в интервале температур 3,7...2,3 К с чувствительностью $2 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^3$ Гц/К; сверхпроводящего амперметра с чувствительностью 10^4 Гц/А; преобразователя малых постоянных напряжений. 10^{-5} В в переменные (10^{-2} В); индикатора слабых (0,01 Э) магнитных полей с чувствительностью 10

3 Э; индикатора уровня жидкого гелия в криостате с чувствительностью $5 \cdot 10^{-3}$ м; сверхпроводящего нуля-индикатора.

МКУ [3] предназначен для усиления малых постоянных токов (10^{-5} А) в цепях с малыми сопротивлениями $10^{-6} \dots 10^{-8}$ Ом. Коэффициент усиления по току 7. Чувствительность по напряжению 10^{-11} В. При индуктивности входа 10^{-7} Гн время срабатывания 10 с.

НМС [11] предназначен для расширения диапазона измерения сопротивлений от 10^{-7} до 10^{-10} Ом в цепях, находящихся в жидком гелии.

УИИПТ [8] предназначено для измерения на постоянном токе сверхпроводящих индуктивностей $10^{-6} \dots 10^{-7}$ Гн с погрешностью 5%.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИОТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ В ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ПРИ ГЕЛИЕВЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Так как криотронные измерительные устройства располагаются в той же низкотемпературной среде, что и исследуемый объект (образец, схема), это дает возможность провести физические исследования, осуществить которые другими средствами, подчас, крайне трудно. КГРК, МКУ, НМС, УИИПТ были использованы в ряде физических экспериментов при гелиевых температурах, в частности, для исследования распределения температуры в столбе кипящего гелия [12]; исследования процессов теплопередачи в отверждённых газах [13]; для прецизионных измерений величины электросопротивления границ зёрен [14]; измерения периода структуры промежуточного состояния, создаваемого в сверхпроводнике протекающим током [15]; измерения порогового тока парамагнитного эффекта в сверхпроводниках [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проволочные криотроны инициировали, в своё время разработку криотронов других типов: плёночных, туннельных, сильноточных. Диапазон их практического применения достаточно велик - от элементов вычислительной техники до мощных коммутаторов в устройствах преобразовательной техники [17,18]. Успехи высокотемпературной сверхпроводимости открывают новые возможности для разработки и совершенствования сверхпроводящих устройств, использующих криотронные элементы.

ЛИТЕРАТУРА

1. D.A.Buck. The cryotron-A superconductive computer component // *I.R.E.* 1956, v.44, N 4, p. 482-493.
2. Я.С.Кан, Е.Г.Крутько, В.А.Рахубовский. Элементы и схемы ЦВМ на криотронах // *Магнитные элементы*. Киев: «Наукова думка», 1964, с. 463-476.

3. Я.С.Кан, В.А.Рахубовский. *Использование проволочных криотронов в вычислительных и измерительных устройствах*: Препринт, Харьков, ХФТИ 74-29. 1974, 22 с.
4. В.А.Рахубовский. Об одном варианте криотронных логических и триггерных элементов с бинарным кодированием информации // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Общая и ядерная физика*, 1980, в. 3(13), с. 78-83.
5. Я.С.Кан, Г.А.Михайлов, В.А.Рахубовский. Макет ЦВМ на криотронах с программным управлением // *Механизация и автоматизация управления*. Киев, 1966, № 3, с. 19-23.
6. Я.С.Кан, В.А.Рахубовский, В.К.Бабайлов. Об одном варианте макета вычислительной среды на криотронах // *Вычислительные системы*, Новосибирск: «Наука», 1971, в. 41, с. 133-143.
7. Я.С.Кан, В.А.Рахубовский. Макет управляющего устройства на проволочных криотронах // *Управляющие системы и машины*, Киев: «Наукова думка», 1974, № 3, с. 64-66.
8. Я.С.Кан, В.А.Рахубовский, В.А.Фролов. Некоторые новые устройства из проволочных криотронов // *Труды конференции по техническому использованию сверхпроводимости*. М.: Атомиздат, 1977, т. 5, с. 102-106.
9. В.А.Рахубовский. Генератор импульсов // *ПТЭ*. 1977, № 3, с. 108-109.
10. Я.С.Кан, В.А.Рахубовский. Об одной возможности расширения температурного диапазона работы КГРК-термометра // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Общая и ядерная физика»*. 1980, в.3(13), с. 84-85.
11. Я.С.Кан, Д.Г.Татишвили. Низкоомный низко-температурный магазин сопротивлений // *ПТЭ*. 1972, № 5, с. 230.
12. Я.С.Кан, В.А.Рахубовский. Криотронный генератор релаксационных колебаний в качестве термометра // *ПТЭ*. 1966, № 3, с. 228-229.
13. Я.С.Кан, В.А.Рахубовский. Исследование работы криотронного генератора релаксационных колебаний в твердых азоте, аргоне и водороде // *Электронная техника. Серия 1: Электроника СВЧ*. 1975, в.3, с. 109.
14. Б.Н.Александров, Я.С.Кан, Д.Г.Татишвили. Влияние границ между кристаллическими зёрнами на остаточное сопротивление олова, кадмия, цинка и индия // *Физика металлов и металловедение*. 1974, т. 37, в.6, с. 1150-1158.
15. Я.С.Кан, В.А.Фролов. О структуре промежуточного состояния, создаваемого постоянным током // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Фундаментальная и прикладная сверхпроводимость»*. 1974, в.1(2), с. 3-7.
16. В.А.Фролов, Я.С.Кан. О пороговом токе пара магнитного эффекта в сверхпроводниках. // *Физика низких температур*. 1979, т. 5, № 5, с.455-460.
17. В.Е.Тонкаль, В.Новосельцев, Ю.В.Скобарихин, С.В.Непогодьев. *Введение в теорию статических сверхпроводниковых преобразователей*. Киев: «Наукова думка», 1990, 180 с.
18. H.M.Kim, J.S.Joon, M.C.Ahn, T.K.Ko, S.G.Lee and T.S.Han. Design, fabrication and testing of a High-Tc Superconducting power Supply with Bi-2223 load // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. March 2002, v. 12, N 1, Itase 9, p. 837-842.
19. В.А.Рахубовский. О некоторых характеристиках криотронного генератора релаксационных колебаний с управляемой частотой // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»* (13). 2003, № 5, с.90-91.

КРИОТРОННІ ПРИБРОЇ

В.А.Рахубовський

На основі робіт, виконаних в інституті, показана можливість застосування надпровідних перемикачів - дрових свинцево-олов'яних криотронів для створення і відпрацьовування принципів побудови обчислювальних і управляючих пристроїв, а також пристроїв вимірювальної і утворювальної техніки. Приведено приклади використання вимірювальних пристроїв у фізичних дослідженнях при гелієвих температурах.

CRYOTRONIC DEVICES

V.A.Rakhubovskij

The results of the work done at the institute show that the superconductive switches - the wire lead - tin cryotrons can be used for developing and improving the principles of construction of computing devices and control units as well as the devices of measuring and converting equipment. The examples of the use of measuring devices for carrying out physical investigations at helium temperatures have been given.