1958 г. Январь *Т. LXIV, вып. 1*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

КРИОТРОН—СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ЭЛЕМЕНТ БУДУЩИХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

В последнее время в ряде иностранных журналов были помещены сообщения о изобретении так называемого «криотрона» и опубликованы основные сведения об устройстве и работе этого прибора [1]. Название прибора происходит от греческого слова «криос», означающего «холод» (сравни криостат—прибор для получения и сохранения низких температур, криогенная техника—техника глубокого холода и т. д.). Окончание «трон» указывает на то, что прибор предназначается для использования в электронных схемах, конкретно—в вычислительных машинах.

В криотроне используется эффект разрушения сверхпроводимости магнитным полем. Прибор в его практическом выполнении представляет собой трехсантиметровый отрезок танталовой проволоки диаметром немного более 0,2 *мм*, на которую намотан один слой изолированной ниобиевой проволоки диаметром около 80 *мк*. Тантал и ниобий являются сверхпроводящими элементами. Однако в то время как ниобий становится сверхпроводником при сравнительно высокой температуре (при 8° К) и при температуре свободно кипящего жидкого гелия (4,2° К) находится в устойчивом сверхпроводящем состоянии, с танталом дело обстоит иначе. Хотя он при 4,2° К также сверхпроводит, его критическая температура лежит очень близко (около 4,4° К), и достаточно приложить небольшое магнитное поле, в несколько десятков эрстед, чтобы скачком перевести металл в нормальное, несверхпроводящее состояние, обладающее конечным сопротивлением току. Для создания такого поля необходимо через ниобиевую обмотку, являющуюся управляющей цепью криотрона, пропустить ток $\sim{}^1/_4 a$ (при основном токе через танталовую проволоку, примерно вдвое превышающем эту величину).

Особенностями криотрона, отличающими его, например, от электронной лампы, является способность пропускать основной ток в любом из двух возможных направлений, а также независимость «размыкающего» действия управляющего тока от направления последнего. Для работы криотрона существенно, что основной ток больше управляющего (иными словами, «усиление по току» K больше единицы). Поскольку K определяется величиной магнитного поля, создаваемого основным и управляющим токами на поверхности танталовой проволоки, величина K дается простым выражением: $K=\pi dN/l$, где d—диаметр танталовой проволоки, N/l—частота намотки ниобиевой проволоки (~ 10 витков на 1 *мм*). Фактически K имеет величину, несколько меньшую значения, даваемого этой формулой; это, возможно, связано с сужениями сверхпроводящего тока, вызванными сохранением нормальных областей на поверхностных дефектах танталовой проволоки.

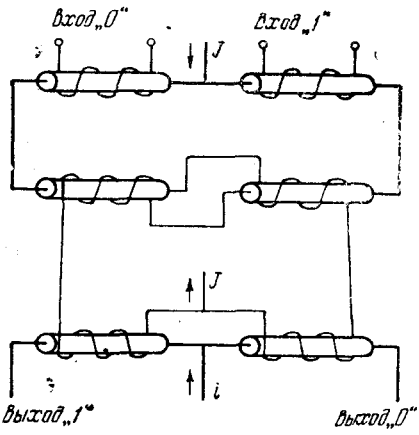
Условие $K>1$ дает возможность использовать основной ток какого-либо криотрона для управления другим идентичным криотроном в той же схеме. Быстрота возможной работы криотрона в схеме определяется отношением R/L сопротивления танталовой проволоки в нормальном состоянии к самоиндукции управляющей обмотки. Анализ зависимости различных характеристик криотрона от его геометрических размеров показывает, что требования уменьшения временной постоянной криотрона L/R и сохранения большого усиления по току являются противоречивыми, и при описанной выше конструкции прибора время L/R не удается сделать очень малым.

Как же работает криотрон в схеме счетной машины? На криотронах можно построить все основные логические схемы, применяемые в вычислительных установках («и», «или» и т. п.). Основным элементом, обеспечивающим «память» в схеме, является такое соединение двух криотронов, при котором в точках входа первого криотрона и выхода второго основной танталовый проводник соединен с соответствующей «своей» управляющей обмоткой, а остальные концы криотронов соединены накрест: обмотка первого криотрона с проводником второго, а проводник первого—с обмоткой второго. Таким образом, ток может идти от входа к выходу двумя путями: либо по управляющей обмотке первого криотрона и проводнику второго, либо, наоборот, через проводник первого криотрона и обмотку второго.

Выбор током одного из этих путей (скажем, первого) исключает использование второго, так как протекающий по обмотке первого криотрона ток «запирает» второй (во втором пути возникает сопротивление «нормального» участка, тогда как первый путь является целиком сверхпроводящим). Таким образом, ток будет продолжать следо-

вать первым путем неопределенно долго, пока не будет переведен на второй путь внешним воздействием («память»). Такое соединение обладает, следовательно, двумя равноправными устойчивыми положениями тока, которые можно считать «нулем» и «единицей» в двоичной системе исчисления.

Разберем не очень сложную схему с записью и запоминанием нуля и единицы и с прочитыванием этой записи (см. рис.). Допустим, что входящий сверху основной ток питания I от первого разветвления идет вправо (это соответствует положению «0»).



Он проходит два танталовых проводника, находящихся в сверхпроводящем состоянии, и две ниобиевые обмотки. По «левому» пути (влево от первого разветвления), соответствующему «1», никакого тока при этом не проходит. Пара криотронов в нижнем ряду схемы служит для определения направления течения тока. Для этой цели через танталовые проводники этих криотронов пропускают «прочитывающий» импульс тока i. Ввиду того, что левый криотрон заперт током I, импульс i проходит только направо, прочитывая «нуль».

Для изменения состояния схемы необходимо пропустить импульс тока через вход «единица». Проследим, что при этом произойдет. Этот импульс разрушит сверхпроводимость танталового проводника правого криотрона верхнего («записывающего») ряда. В результате оба возможных пути для основного тока I становятся равноправными (так как на каждом из них находится по одному танталовому проводнику в нормальном состоянии). Поэтому ток разветвится: половина пойдет по правому, половина по левому пути. При этом, очевидно, через каждую из управляющих обмоток среднего («запоминающего») ряда криотронов пойдет ток величины $I/2$, и если $I/2$ меньше критического тока, соответствующего разрушению сверхпроводимости танталовых проводников, оба эти проводника окажутся в сверхпроводящем состоянии. Однако в «правом» пути имеется криотрон записывающего ряда, удерживаемый в нормальном состоянии записывающим импульсом, и основной ток I избирает сверхпроводящий левый путь, запирая правый криотрон запоминающего ряда. Теперь записывающий импульс уже не нужен и может быть убран, а ток I будет идти по левому пути («единица»), пока схема не будет вновь обращена импульсом, поданным на вход «нуль».

Нетрудно видеть, что заменяя одиночные входные криотроны верхнего ряда несколькими последовательно соединенными криотронами, мы получаем схему, действующую по правилу «или»: подача импульса на любой из этих криотронов вызовет обращение тока в запоминающем устройстве. Напротив, параллельное соединение входных криотронов даст схему, работающую по правилу «и», так как для обращения запоминающего ряда необходимо разрушить сверхпроводимость одновременно всех байпасирующих друг друга входных криотронов.

Авторы изобретения испытали криотроны также в схеме мультивибратора. Для этой цели запоминающие элементарные схемы A, B и C были соединены таким образом, что выходные криотроны схемы A заставляли схему B принять положение, противоположное A (например, «1», если A находится в положении «0»); аналогичным образом схема B воздействовала на C, а C на A. В этом случае схемы A, B, C, очевидно, будут занимать следующую последовательность положений: 001 (т. е. в исходном положении состояния A и B «нуль», состояние C—«единица»); 011;, 010; 110; 100; 101; 001; 011 и т. д. Таким образом, вся схема совершает циклический процесс. Частота его экспериментально оказалась равной от 100 до 1000 *гц*. Последняя частота соответствует длительности отдельного переключения ~150—200 *мксек*. Это скорость срабатывания, превосходящая быстроту работы электромеханических реле, однако значительно уступающая скорости работы электронных ламп и транзисторов.

Основными достоинствами криотрона как прибора для вычислительных устройств авторы изобретения считают: легкость и дешевизну изготовления; малость объема, занимаемого схемой на криотронах (по их подсчетам, криотроны большой цифровой вычислительной машины займут объем порядка одного кубического фута); малую потребляемую мощность, связанную с тем, что за исключением моментов переключения ток течет по сверхпроводникам и не выделяет джоулева тепла (мощность, выделяемая в схеме большой цифровой машины, оценивается в 0,5 *вт*). Предполагается, что в связи с работой при гелиевой температуре стабильность схемы, а также уровень шумов будут вполне удовлетворительными, хотя эти вопросы специально не изучались.

Несколько необычной является необходимость работы при гелиевой температуре, но в настоящее время ожижение гелия давно уже не является проблемой. Заметим, что

мощность в 0,5 *вт*, рассеиваемая на криотронах, соответствует расходу ~ 1 *л* жидкого гелия в час. Однако приведенные выше оценки объема и мощности являются несколько условными, так как не учитывают объема криогенного оборудования, а также неизбежных потерь жидкого гелия, связанных с несовершенством тепловой изоляции. В целом же можно заключить, что криотрон представляет собой во многих отношениях интересный и многообещающий прибор. Вполне возможно, что он явится первым серьезным техническим применением явления сверхпроводимости.

Р. Ченцов.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. D. A. Buck, Proc. IRE **44**, 482, 558 (1956); Proc. Amer. Power Conf., Chicago, 1956, 18, 505 (1956); E. Roessler, Elektron. Rundschau **10**, 338 (1956); G. O. Jones, Science progress **44**, 593 (1956).