УО БГУИР

Кафедра ЭВС

РЕФЕРАТ

На тему:

"КРИОТРОНЫ, ХЕМОТРОНЫ И ДРУГИЕ СМЭ"

МИНСК, 2008

## 1. Криотроны и другие устройства на основе сверхпроводимости

Криоэлектроника (криогенная электроника) – направление электроники и микроэлектроники, охватывающее исследование взаимодействия электромагнитного поля с электронами в твердых телах при криогенных температурах и создание электронных приборов на их основе.

К криогенным температурам относят температуры, при которых наступает глубокое охлаждение, т.е. температуры от 80 до 0 К. В криоэлектронных приборах используются различные явления:

* сверхпроводимость металлов и сплавов;
* зависимость диэлектрической проницаемости некоторых диэлектриков от напряженности электрического поля;
* появление у металлов при температуре ниже 80 К полупроводниковых свойств при аномально высокой подвижности, носителей заряда и др.

Принципы криоэлектроники используют для построения ряда приборов (криотроны, квантовые и параметрические усилители, резонаторы, фильтры, линии задержки и др.). Наиболее распространенным из этих приборов является криотрон, представляющий собой переключающий криогенный элемент, основанный на свойстве сверхпроводников скачком изменять свою проводимость под воздействием критического магнитного поля.

• Действие криотрона аналогично работе ключа или реле. Криотрон может находится только в одном из двух состояний – либо в сверхпроводящем, либо с малой электропроводностью.

Время перехода криотрона из одного состояния в другое составляет несколько долей микросекунды, т.е. эти приборы обладают высоким быстродействием. Криотроны весьма микроминиатюрные: на 1 см2 площади может быть размещено до нескольких тысяч криотронов. На основе криотронов можно создать криотронные БИС, выполняющие логические функции, функции запоминания с неразрушающим считыванием, управления и межэлементных соединений. Однако необходимость работы в условиях глубокого охлаждения и связанные с этим технологические трудности резко ограничивают применение криотронов. Усилители, принцип действия которых основан на использовании криоэлектронных явлений, главным образом служат для приема слабых сигналов СВЧ. Они обладают ничтожно малым уровнем шумов, широкой полосой пропускания (десятки гигагерц) и высоким усилением (до 10 000). Шумовые температуры криоэлектронных усилителей достигают единиц и долей градуса Кельвина.

Перечислим основные особенности различных типов криоэлектронных усилителей.

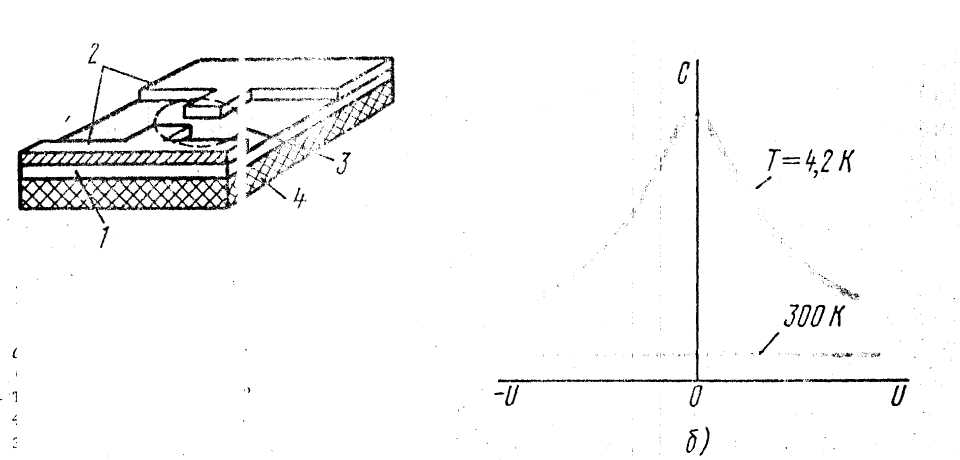
1. Квантовые усилители служат для усиления электромагнитных волн за счет вынужденного излучения возбужденных атомов, молекул или ионов. Эффект усиления квантовых усилителей связан с изменением энергии внутриатомных (связанных) электронов в отличие от ламповых усилителей, в которых используются потоки свободных электронов. Наиболее подходящим материалом для квантовых усилителей радиодиапазона оказались диамагнитные кристаллы с небольшой примесью парамагнитных ионов. Обычно применяют рубин, рутил, изумруд с примесью окиси хрома. Охлаждение квантовых усилителей производят жидким гелием в криостатах.

2. В параметрических усилителях роль активного элемента выполняет либо p-n-переход в полупроводнике с высокой подвижностью носителей заряда при температурах не ниже 90 К, либо переход металл - полуметалл (InSb). Этот полуметалл при температурах ниже 90 К приобретает свойства полупроводника, имеющего подвижность носителей заряда в 100-1000 раз выше, чем германий и кремний. В параметрическом усилителе периодически изменяется емкость колебательной системы. Мощность, потребляемая параметрическими усилителями, равна примерно 0,02-0,1 Вт.

3. Свёрхпроводниковые усилители также основаны на принципе параметрического усиления, но в них периодически изменяется не емкость, а индуктивность колебательной системы. Индуктивным элементом такого усилителя служит тонкая пленка сверхпроводника при температуре ниже . В сверхпроводящей пленке возникает так называемая сверхиндуктивность Lк, обусловленная взаимодействием возникающих в ней высокоэнергетических электронных пар. Индуктивность Lк при определенном выборе геометрии пленки может преобладать над обычной индуктивностью L проводника. Внешним электромагнитным полем можно периодически разрушать и восстанавливать такие электронные пары, изменяя их концентрацию пк, и тем самым периодически изменять индуктивность Lк по закону



4. Принцип действия параэлектрических усилителей основан на использовании явления высокой поляризации некоторых диэлектриков (например, ) при низких температурах.



Тангенс угла диэлектрических потерь таких диэлектриков (параэлектриков) при температурах ниже 80 К сильно зависит от внешнего электрического поля. Активный элемент пароэлектрического усилителя представляет собой конденсатор, заполненный параэлектриком, помещенным в электромагнитное поле (накачка). Емкость конденсатора периодически изменяется с частотой накачки, что позволяет осуществить параметрическое усиление (рис.9.30). На рис.9.30, а приведена структура активного элемента параэлектрического усилителя, а на рис.9.30,6 - зависимость его емкости от напряжения при температуре 4,2 К. Пунктиром показана эта же зависимость при нормальной температуре (300 К).

5. Криоэлектронные резонаторы теоретически должны иметь бесконечно большую добротность из-за отсутствия потерь в поверхностном слое сверхпроводящих стенок. Однако практически потери существуют вследствие инерционности электронов. Наибольшая добротность достигается в дециметровом диапазоне волн. При длине волны 3 см добротность криоэлектронных резонаторов равна примерно 107-109. Сверхпроводящие резонаторы обычно работают при гелиевых температурах (Т=4,2 К).

Криоэлектронный фильтр представляет собой цепочку последовательно соединенных сверхпроводящих резонаторов. Избирательность такого фильтра в полосе запирания повышена в раз по сравнению с обычными фильтрами.



Криоэлектронные линии задержки представляют собой тонкий кабель из сверхпроводника, свернутый в спираль и помещенный в криостат. Время задержки определяется длиной кабеля и соответствует единицам или долям миллисекунды.

Для получения времени задержки, измеряемого наносекундами или пикосекундами, используют сверхпроводящие меандры - извилистые линии из узких тонких сверхпроводящих пленок на диэлектрической подложке. Изменяя внешним полем распределенную индуктивность такой линии, можно управлять временем задержки.

Большие перспективы создает использование в микроэлектронике эффектов Джозефсона. Открытие эффекта Джозефсона туннельных переходах двух слабо связанных сверхпроводников сделало возможным создание сверхпроводящих систем обработки информации с высокими значениями параметров. Быстродействие этих систем достигает 10 пс (), а мощность рассеяния 100 нВт (), т.е. показатель качества - произведение быстродействия на мощность - порядка Дж или в миллион раз выше, чем в кремниевых микросхемах. Основная трудность разработки БИС, на основе эффекта Джозефсона связана с получением стабильных, воспроизводимых тонких (порядка 2 нм) изолирующих пленок, а также с работой в условиях глубокого охлаждения.



### Криоэлектронные приборы

Работа криоэлектронных приборов основана на явлении сверхпроводимости, когда скачкообразно уменьшается сопротивление ряда металлов и сплавов при охлаждении их до температур, близких к абсолютному нулю. Сверхпроводимость наступает, если охладить образец до температуры меньше критической. При этом сопротивление образца будет в 1012 раз меньше, чем при температуре больше критической (практически равно нулю). Известно около 30 элементов (например, индий, таллий, тантал, свинец, висмут, титан и др.) и большое число сплавов и соединений, которые могут служить сверхпроводниками.

Свойства сверхпроводников зависят не только от температуры, но и от электрического и магнитного полей, механических напряжений и наиболее сильно изменяются при воздействии внешнего магнитного поля. При приложении к сверхпроводнику определенного внешнего магнитного поля сверхпроводимость нарушается. Причем чем ближе температура охлаждения к критической, тем требуются меньшие напряженности поля для разрушения сверхпроводимости.

Элементарным прибором, использующим свойства сверхпроводимости, является криотрон, который состоит из отрезка проволоки-вентиля, изготовленного из сверхпроводника с низким значением критического магнитного поля (материал – тантал). Вентиль обмотан проволокой (материал – ниобий) из сверхпроводника с высоким значением критического магнитного поля. Если через обмотку криотрона пропустить требуемый ток, то на поверхности проводника – вентиля появляется магнитное поле, обусловленное этим током, которое превысит значение критического магнитного поля. В результате вентиль переходит в состояние, характеризующееся наличием определенного сопротивления. При уменьшении тока, управляющего переключением вентиля, последний вновь становится сверхпроводящим. Причем значение управляющего тока зависит от значения тока, проходящего через вентиль. Таким образом, криотрон является аналогом обычного электромагнитного реле. Рассмотренная конструкция криотрона проста, дешева, потребляет небольшую мощность, но требует применения устройства охлаждения большого объема.

Если применить пленочную конструкцию криотрона, можно одновременно микроминиатюризировать его и повысить быстродействие. Такая конструкция криотрона изображена на рис.1.

На стеклянную подложку наносят вентильную пленку из олова, затем изоляцию из монооксида кремния и перпендикулярно (в плоскости подложки) к вентильной пленке – управляющую пленку из свинца.

*1*

*2*

*3*

*4*

Рис. 1. Пленочный криотрон:

*1* — управляющая пленка, *2* – подложка, *3 –* вентиль, *4 –* изоляция

Дальнейшего быстродействия криотрона можно достигнуть размещением между подложкой и вентильной пленкой свинцового экрана, который в сверхпроводящем состоянии уменьшает индуктивность криотрона.

На основе криотрона можно изготовить различные устройства (дешифраторы, сумматоры, запоминающие устройства, счетчики импульсов и др.). Базовым элементом логических схем является ячейка на двух криотронах. Для построения запоминающих устройств логические элементы на криотронах объединяют в матрицы.

При соединении двух сверхпроводящих слоев слабым контактом (слоем) из сверхпроводящего или несверхпроводящего материала при определенных условиях можно получить эффект Джозефсона.

В области контакта образуется туннельный переход Джозефсона, в котором осуществляется прохождение электронных пар через тонкий изолирующий барьер. Если на такой переход подать постоянный ток смещения по знамению, меньше порогового тока, то падение напряжения на переходе оказывается равным нулю, что соответствует отсутствию сопротивления. Пороговый ток является функцией напряженности магнитного поля, приложенного к переходу. Меняя напряженность магнитного поля, можно изменить пороговый ток и при постоянном питающем токе, получить падение напряжения на переходе, что соответствует наличию сопротивления. Таким образом, переход Джозефсона может находиться в двух различных состояниях (0 и 1), как и логические схемы.

На основе элементарной ячейки, использующей эффект Джозефсона, можно создать логические устройства необходимой сложности (запоминающие устройства, сдвиговые регистры). Устройства, основанные на эффекте Джозефсона, отличаются высоким быстродействием (10-11c), малой потребляемой мощностью и небольшими размерами (десятки микрон). Существуют определенные трудности, связанные с подбором сверхпроводящих материалов для приборов, работающих в широком диапазоне температур, технологической воспроизводимостью характеристик приборов и созданием малогабаритных охлаждающих систем.

Использование явления сверхпроводимости перспективно не только для создания элементов ЭВМ, но и для устройств очень высокой чувствительности и точности.

## 2. Хемотроны и другие функциональные устройства

Хемотроника как новое научное направление возникло на стыке двух развивающихся направлений: электрохимии и электроники.

На первом этапе своего развития хемотроника как техническая отрасль была призвана разрабатывать общие теоретические и технологические принципы построения электрохимических преобразователей. При этом создавались в основном аналоги электронных приборов с той ризницей что носителями заряда были не электроны в вакууме, газе, или твердом теле, а ионы в растворе. Так были созданы электрохимические выпрямители, интеграторы, усилители. Подвижность ионов в растворе намного меньше, чем подвижность электронов в газе, или твердом теле, поэтому электрохимические приборы являются низкочастотными по своей физической природе, однако они и имеют ряд преимуществ перед электронными приборами.

В настоящее время хемотроника сформировалась как наука, изучающая перспективы построения информационных и управляющих систем на основе процессов, протекающих в жидкостях и на границе жидких фаз.

В ряде литературных источников вместо термина "хемотроника" по аналогии с электроникой фигурирует термин "ионика", так как во всех электрохимических приборах используются ионные процессы.

Исследования показали, что жидкостные системы имеют ряд важных преимуществ перед системами на основе твердых тел, прежде всего к ним следует отнести компактность и многофункциональность жидкостных элементов, где в небольшом объеме может происходить одновременно с разной скоростью множество разнообразных физико-химических процессов. Эти системы надежны и обеспечивают возможность изменения своей внутренней структуры, т.е. внутреннего управления. Наиболее характерным примером жидкостной системы является человеческий мозг.

Таким образом, перспектива развития хемотроники - это создание информационных, и управляющих систем на жидкостной основе, а в более далеком будущем - биопреобразователей информации. Для успешного развития хемотроники требуются фундаментальные исследования не только физики жидкости, но так же сложных физико – химических и электрохимических процессов в жидкостях и на границах жидких фаз.

### Хемотронные приборы

Хемотроника возникла на стыке двух наук – электрохимии и электроники. Основой хемотроники являются приборы, использующие принцип электрохимического преобразования в твердых и жидких электролитах. Носителями заряда в этих приборах служат ионы, обладающие малой подвижностью (меньше подвижности носителей в полупроводниках в 106–108 раз), что определяет их область применения.

К основным достоинствам хемотронных приборов можно отнести малую потребляемую мощность, высокую чувствительность по входу, малый уровень собственных шумов, достаточно высокую надежность, невысокую стоимость. Недостатками хемотронных приборов являются малый частотный диапазон (0 – 1 кГц) и большие габариты.

Наиболее перспективны твердофазные и жидкофазные приборы многократного действия. В первых используют образование твердой фазы на электродах или растворение материала электродов при прохождении электрического тока, во вторых, – изменяют концентрацию раствора электролита в приэлектродных областях.

Твердофазный прибор представляет собой герметичный стеклянный капилляр, заполненный двумя столбиками ртути, разделенными промежутком из электролита. В качестве электролита применяется водный раствор йодных солей в йодистом калии. От ртутных столбиков через торцы запаянного стеклянного капилляра сделаны выводы из никеля. При пропускании тока через такой прибор осуществляется перенос ртути с электрода на электрод, что приводит к перемещению электролитного промежутка, по которому регистрируется ток или время его прохождения.

Твердофазные хемотронные приборы используют для построения схем интеграторов тока с временем интегрирования до сотен и тысяч часов, погрешностью 1% и мгновенным неразрушающим считыванием результатов и датчиков неэлектрических величин (механических, акустических и др.), обладающих простой конструкцией, высокими надежностью и чувствительностью. Схемы с такими приборами требуют введения температурной компенсации, что является их недостатком. Интеграторы применяют для счетчиков наработки и контроля различных устройств РЭА, счетчиков импульсов, реле времени, устройств определения заряженности аккумуляторов и др.

Жидкофазный прибор является диодом с двумя инертными платиновыми электродами, помещенными в герметичную ампулу, заполненную электролитом, образующим с материалом электродов обратимую окислительно-восстановительную систему. Обратимые реакции протекают непрерывно и одновременно в двух противоположных направлениях. Электролитом служит водный раствор йодида калия с добавкой кристаллического йода.

При отсутствии внешнего напряжения на электродах устанавливается динамическое равновесие, когда скорости реакций восстановления (присоединение электронов атомами, молекулами, ионами) и окисления (отдача электронов атомами, молекулами, ионами) выравниваются и концентрация компонентов не изменяется.

При подаче напряжения на электроды (электролизе) динамическое равновесие нарушается. На аноде преобладает процесс окисления, когда отрицательно заряженные ионы отдают во внешнюю цепь электроны, а на катоде – процесс восстановления, при котором электроны поступают из внешней цепи. Таким образом, во внешней цепи проходит ток. Чтобы избежать побочных эффектов внешнее приложенное напряжение должно быть 0,5 В.

В электролите происходят медленные диффузионные процессы, направленные на выравнивание нарушенного равновесия и разностей концентраций, которые возникают у электродов из-за скопления ионов одного знака. Появляется собственная эдс, называемая концентрационной, так как процесс электролиза всегда сопровождается поляризацией. Эта эдс противоположна эдс, действующей извне. На переменном токе процессы диффузии ограничиваются поверхностью электрода, а поляризация уменьшается во много раз.

Жидкофазные хемотронные приборы обладают существенным недостатком, связанным с узким температурным диапазоном (0 – 50 °С), так как используются водные растворы электролита. Применение других растворов затруднительно. Более перспективны для использования не двухэлектродные жидкофазные хемотронные приборы, а четырех-, пяти - и шестиэлектродные, так как это позволяет улучшить параметры приборов и расширить их функциональные возможности.

Жидкофазные хемотронные приборы используют для интегрирования малых токов (нано - и микроамперного диапазона), хранения информации в течение нескольких часов с малой погрешностью, построения усилителей постоянного тока с малым дрейфом нуля и небольшим уровнем шумов из-за узкого частотного диапазона (от 1 до 100 Гц), схем сравнения и моделирования биопроцессов.

В автоматике применяют электрохимическое управляемое сопротивление с активной жидкой средой – мимистор, который представляет собой две металлические пластины с электролитом между ними. Одна пластина является резистивным электродом с двумя выводами, а другая – управляющим электродом. При изменении полярности управляющего сигнала на резистивный электрод осаждается металл или растворяется часть его слоя, что ведет к изменению сопротивления мимистора. Мимистор выполняет роль переменного сопротивления, ячейки памяти, реле времени.

Одним из новых направлений в области дальнейшего развития хемо-тронных приборов является создание оптохемотронных приборов, использующих явление электрохемилюминесценции – свечения, возникающего в области электродов при прохождении тока через растворы некоторых электролитов. Оптохемотронный прибор состоит из инертного корпуса с электролитом и двумя инертными электродами, вывода для излучения и имеет два канала управления – оптический и электрический. В состав электролита входит активатор (люминесцирующее органическое вещество), сопровождающий (фоновый) электролит и растворитель. Раствор электролита образует с материалами электродов обратимую окислительно-восстановительную систему.

Оптохемотронные приборы могут быть использованы в качестве новых излучателей и индикаторов, преобразователей неэлектрических величин в электрический сигнал, в биофизике – для моделирования процессов живого организма.

# ЛИТЕРАТУРА

1. Петров К.С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника: Учебное пособие для вузов. – СПб: Питер, 2003. – 512 с.
2. Опадчий Ю.Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника: Учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров; Под. ред. О.П. Глудкина. М.: Горячая Линия – Телеком, 1999. – 768 с.
3. Акимов Н.Н. и др. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справочник / Н.Н. Акимов, Е.П. Ващуков, В.А. Прохоренко, Ю.П. Ходоренок. Мн.: Беларусь, 2004. – 591 с.