Министерство общего и профессионального образования

Российской Федерации

Ангарский Государственный Технологический Институт

Факультет технической кибернетики

Кафедра промышленной электроники и вычислительной техники

Реферат на тему:

История развития

криоэлектроники

**Выполнил:**

Студенты гр. ПЭ-99-3

**Ф.И.О.** Шереметьев А.Н.

Козьмин Ю.Г.

студент гр. ПЭ-99-2

Кузьмин А.А.

**Приняла:**

Терлецкая Л.А.

**Ангарск 1999 г.**

**План:**

стр.

1. Введение 3

# 2.Часть 1

Исторические аспекты криоэлектроники 4

3. Часть 2

Основные направления криоэлектроники 7

## 4. Часть 3

## Микроэлектроника и холод 13

Перспективы применения структур на основе контак-

тов сверхпроводников с полупроводниками в криоген-

ной микроэлектронике 15

## 5. Заключение

## Новые проблемы и пути их решения 17

6. Вывод 20

7. Приложение 21

8. Список литературы 26

1. Введение

Криогенная(от греческого "криос" - холод, мороз) электроника, или криоэлектроника,

направление электроники, охватывающее исследование при криогенных температурах (ниже 120 К ) специфических эффектов взаимодействия электромагнитного поля с носителями зарядов в твердом теле и создание электронных приборов и устройств, работающих на основе этих эффектов, - криоэлектронных приборов.

Криоэлектроника - одна из основных и весьма перспективных отраслей науки. Её интенсивному развитию способствовали, с одной стороны, широкие исследования явлений, происходящих в твёрдом теле при низких температурах, и практическое применение полученных результатов в различных отраслях радиоэлектроники (в первую очередь в космической радиоэлектронике), а с другой - определенные достижения криогенной техники, позволившие на основании как новых, так и ранее известных принципов разработать экономичные, малогабаритные и надежные системы охлаждения.

Значительным стимулом к развитию криоэлектроники послужило также и то немаловажное обстоятельство, что при создании современных электронных устройств - высокочувствительной радиоприемной аппаратуры, быстродействующих электронных вычислительных машин и др. - конструкторы подошли буквально к пределу возможностей радиоэлектроники, принципиально достижимому в обычном интервале температур. Использование низких температур позволяет преодолеть это препятствие и открывает новые пути в разработке радиоэлектронных систем.

Во-первых, глубокое охлаждение способствует значительному улучшению технических и экономических параметров радиоэлектронных устройств - преимущества компактных сверхпроводящих запоминающих устройств большой емкости и быстродействия для ЭВМ, сверхпроводящих магнитов и другой аппаратуры неоспоримы. Во-вторых, возникающие в условиях глубокого охлаждения явления, которые присущи только такому состоянию вещества, позволяют создавать принципиально новые приборы. Именно так, например, был сконструирован мазер, успешно используемый в спутниковых системах связи, радиоастрономии и т.д.

Криоэлектроника изучает особенности поведения радиоэлектронных компонентов и материалов при очень низких температурах ( 0-20 К ), в частности такие необычные явления, как сверхпроводимость.

Для работ в области криоэлектроники характерен большой размах лабораторных исследований. Показательными являются работы по созданию сверхпроводящих накопителей энергии большой ёмкости. Предназначенные первоначально для пузырьковых камер, сверхпроводящие накопители энергии также успешно применяются в качестве генераторов накачки для мощных лазеров и другой радиотехнической аппаратуры. Выходят из стен лабораторий сверхпроводящие линии задержки различного назначения, криоэлектронные запоминающие устройства, охлаждаемые усилители и т. д.

Поскольку криоэлектроника возникла на стыке нескольких различных научных направлений, первые публикации в этой области были связаны с традиционными направлениями. Однако уже с начала 60-х годов начинают появляться специальные издания, целиком посвященные криоэлектронике[[1]](#footnote-1), и первые монографии[[2]](#footnote-2).

# Часть 1

#### Исторические аспекты криоэлектроники

Вопрос о минимально возможной температуре впервые привлек внимание исследователей еще около ста лет назад. Ныне охлаждение до низких температур широко используется на практике в различного рода устройствах и системах, особенно в радиоэлектронной аппаратуре. Это стало возможным благодаря успешному решению проблемы сжижения газов.

Хотя многие газы сжижаются сравнительно легко, первоначально считалось, что некоторые газообразные вещества при любых условиях сохраняют свое состояние неизменным. Однако во второй половине XIX в. ученые добились определенных успехов в исследовании проблемы перехода веществ из газообразного состояния в жидкое. В частности, было установлено. что каждый газ характеризуется некоторой критической температурой, выше которой его невозможно сжижать только путем повышения давления. В 1898 г. впервые был получен жидкий газ (водород), а в 1908 г. голландский физик Камерлинг-Оннес осуществил сжижение гелия, завершив тем самым первый этап работ по сжижению газов.

В последующие десятилетия началось быстрое развитие методов использования новых криогенных жидкостей-сжиженных газов в фундаментальных научных исследованиях в промышленности. От лабораторных экспериментов, которые, кстати, привели к открытию явления сверхпроводимости, перешли к производству сжиженных газов в промышленных масштабах. Их стали выпускать тоннами из смесей газов, например воздуха (разделяя его на состовляющие,—кислород, азот и инертные газы).

Чисто научный интерес и потребности промышленности стимулировали исследования физических свойств материалов при глубоком охлаждении. Такого рода исследования оказались особенно важными для радиоэлектроники, где в 40—50-х годах появилось много новых материалов, в частности полупроводников. Десятилетием позже интерес специалистов по радиоэлектронике к использованию криогенных жидкостей еще более возрос. С их помощью удалось улучшить параметры (в частности, повысить чувствительность) обычных радиотехнических схем и создать принципиально новые радиоэлектронные устройства, например мазер.

Наиболее распространенные охлаждающие агенты (криогены) при нормальном атмосферном давлении имеют следующие температуры кипения: He – 4K; H-20К; N—77 К; О—90 К; CO2 – 195K (симблирует)[[3]](#footnote-3).

Четкого и однозначного определения интервала криогенных (низких) температур нет, но чаще всего его ограничивают областью, простирающейся примерно от 100 К до абсолютного пуля (0 К). Иногда особо выделяется интервал 20 – 0 K, называемый интервалом гиперкриогенных (сверхнизких) температур. Большинство криогенных систем, используемых в радиоэлектронике, работает при нормальной температуре кипения жидкого гелия, то есть приблизительно при 4 К.

Одной из важненейших проблем современной электроники считается проблема уменьшения степени неупорядоченности структуры вещества. Для этой цели применяется глубокое охлаждение.

Материалы, применяемые в электронике, обычно оценивают с точки зрения упорядоченности их химической (чистоты) и геометрической (кристаллической) структуры, а также упорядоченности движения частиц вещества (температуры). Любые факторы, вызывающие отклонения в движении носителей заряда между двумя точками, уменьшают эффективную силу тока. Всякого рода неупорядоченность структуры способствует таким отклонениям, увеличивая тем самым электрическое сопротивление материала. В сложных электронных системах требуется, чтобы электрический сигнал заданной формы проходил через материал без искажения. Однако неупорядоченность структуры материала приводит к уменьшению амплитуды сигнала и изменению его формы, так как ее влияние носит случайный характер. Например, плавное синусоидальное колебание становится искаженным, неровным, и в системе возникают нежелательные сигналы (помехи).

Посмотрим, как различные типы неупорядоченности структуры проводника влияют на его удельное сопротивление.

Нарушения химической структуры, обусловленного присутствием даже незначительного количества примеси, достаточно, чтобы заметно увеличить удельное сопротивление металлического проводника. Так, добавление к меди 0,1% фосфора приводит к уменьшению ее проводимости примерно на 50%, тогда как введение 1% кадмия (для получения сплава большей механической прочности) уменьшает его проводимость лишь немногим более чем на 10%.

В химически чистом материале геометрический порядок его внутренней структуры может быть нарушен за счет остаточных напряжений (деформаций), возникших при механической обработке. Поэтому после холодной протяжки удельное сопротивление меди обычно возрастает на несколько процентов. Подобные нарушения физической упорядоченности, обусловленные остаточными напряжениями, можно устранить или по крайней мере уменьшить путем отжига материала. Влияние различных типов геометрической упорядоченности особенно заметно в несимметричных кристаллах, например в цинке, где различие в удельном сопротивлении для двух взаимно перпендикулярных направлений в кристаллической решетке достигает 4%.

Взаимосвязь химической и геометрической упорядоченности мы можем наблюдать в экспериментах но получению сплавов меди с золотом. При увеличении концентрации золота удельное сопротивление случайной смеси возрастает. Но если случайную смесь. содержащую около 25% золота, отжигать в течение продолжительного времени, то обнаруживается тенденция к перегруппировке атомов в упорядоченную структуру сплава Cu3Au. Удельное сопротивление резко падает, хотя и остается выше, чем у чистой меди

Говоря о криоэлектронике, основное внимание следует уделить кинетической упорядоченности (упорядоченности движения) частиц, так как понижение температуры обычно позволяет свести эту неупорядоченность к минимуму. В проводнике кинетический беспорядок связан со случайным движением свободных электронов, а в любом твердом теле он обусловлен тепловыми колебаниями атомов в кристаллической решетке. При низких температурах оба типа неупорядоченности значительно уменьшаются.

В некотором отношении тепловое колебание атомов в твердом теле можно рассматривать как своеобразное нарушение геометрического порядка, поскольку в результате таких колебаний нарушается регулярный шаг кристаллической решетки. Как показал де Бройль, движению каждого атома кристаллической решетки можно приписать определенные волновые свойства. Таким образом, в любом твердом теле существуют упругие волны, распространяющиеся со скоростью звука. Эти волны представляют собой как бы локализованные, сосредоточенные пакеты (кванты) тепловой энергии, подобно тому как фотоны являются локализованными пакетами электромагнитной энергии. Кванты тепловой энергии называются фононами; как и фотон, каждый фонон характеризуется энергией hf (где f—частота, соответствующая длине волны фонона) и количеством движения (импульсом). В определенных случаях фонон удобно рассматривать как частицу.

Таким образом, можно считать, что твердое тело содержит хаотично, беспорядочно перемещающиеся фононы различных энергий, которые соударяются с подвижными носителями заряда, создающими в материале электрический ток. При понижении температуры число таких фононов в материале уменьшается и поэтому его удельное сопротивление падает. Фононы играют в веществе определенную положительную роль: в процессе рекомбинации электронно-дырочной пары они обеспечивают сохранение количества движения, благодаря чему становится возможным процесс рекомбинационной люминесценции.

Полупроводники, используемые в электронике, обычно имеют очень высокую степень химической (а часто также и геометрической) упорядоченности. Низкая температура позволяет значительно уменьшить в них нежелательный собственный ток, но для ионизации атомов и, следовательно, образования свободных носителей, как правило, необходимо определенное количество тепловой энергии. Точно так же, чтобы свести к минимуму шумы электронной лампы (то есть обеспечить беспрепятственное движение электронов от катода к аноду), необходимо обеспечить надлежащую геометрию проводников в ее управляющих сетках. Но в то же время общеизвестно, что для нормальной работы лампы катод должен быть разогрет до высокой температуры, а потому ток эмиссии характеризуется высокой степенью кинетической неупорядоченности, которая и обусловливает шумы.

Однако наиболее интересные и потенциально важные особенности радиоэлектроники низких температур сводятся к исключительным, тонким ситуациям, которые возникают только тогда, когда неупорядоченность обычных типов сведена к минимуму.

В сверхпроводниках между парами электронов существует особый вид упорядоченности, благодаря этому сопротивление материала становится равным нулю и внутри него не возникает магнитного поля. Но если температура материала достаточно высока, фононы разрушают эти упорядоченные пары электронов и сверхпроводящее состояние исчезает. Аналогичным образом упорядоченное состояние нарушается и материал возвращается в нормальное состояние и тогда, когда плотность тока или напряженность внешнего магнитного поля превысит критическое значение.

В мазере особая форма упорядоченности проявляется в том, что на более высоком из двух энергетических уровней находится значительно больше атомов, чем на более низком. Однако эта неустойчивая форма равновесия быстро нарушается из-за тепловой неупорядоченности, после чего вновь восстанавливается нормальное равновесное состояние, при котором преобладают атомы с низкими энергиями. Требуемое состояние неустойчивого равновесия можно обеспечить лишь путем подачи в систему энергии извне, причём количество этой энергии тем меньше, чем ниже температура.

Принципы, на которых основываются сверхпроводящие и лазерные системы, известны более полувека, но только в последние десятилетия они получили широкое техническое развитие. Мазер использовался в современных системах радиосвязи, был достигнут значительный прогресс в области применения сверхпроводников в различных радиоэлектронных системах и устройствах: больших электронно-вычислительных машинах, крупных электродвигателях и генераторах, электромагнитах, трансформаторах и линиях передач электроэнергии. Открытия , вроде эффекта Джозефсона[[4]](#footnote-4), также нашли своё применение в области очень низких температур, где беспорядочные тепловые возмущения настолько малы, что становится возможным наблюдать и использовать весьма тонкие, едва уловимые явления.

В последние десятилетия все шире развертывались работы по созданию новых электронных приборов и сложных систем, основанных на свойствах твердого тела при криогенных температурах. Этому способствуют не только успехи в физике низких температур и технике глубокого охлаждения, но и появление новых проблем, которые не решаются другими методами. Криоэлектроника охватывает широкий круг вопросов: от взаимодействия электромагнитных волн с твердым телом при сильном ослаблении тепловых колебаний решетки до методов охлаждения и конструирования криоэлектронных автономных приборов с корпусом-криостатом.

Часть 2

Основные направления криоэлектроники

Каждое новое направление в науке и технике имеет свою историю развития. Есть своя история и у криоэлектроники, которая с первых же шагов открыла пути создания принципиально новых приборов. Явления физики твердого тела при низких температурах, дающих доступ к глубинным квантовым свойствам вещества в конденсированном состоянии, совместно с явлениями физики низких температур, выделившейся в самостоятельную науку, составили научную базу криоэлектроники. Хотя слово «криос» означает просто «холод», криогенными принято считать лишь те температуры, при которых тепловые колебания решетки вещества сильно ослабляются и в веществах начинают проявляться дальний порядок и эффекты, замаскированные тепловым движением частиц при обычных температурах. Это и приводит, в конечном счете, к тем удивительным особенностям сверхпроводников, в которых квантовые эффекты проявляются в макроскопических масштабах, а также к целому ряду качественно новых явлений и эффектов в других материалах. Область криогенных температур, при которых четыре газа (азот, неон, водород и гелий) превращаются в криогенные жидкости, можно условно разделить на четыре температурные зоны: азотную (80 К), неоновую (27 К), водородную (20 К) и гелиевую (~ 4,2 К) Температуры много ниже точки кипения жидкого гелия выделялись в отдельную область «сверхнизких» температур, причем многие эффекты в твердом теле являются характерными только для этой, пока еще экзотической области.

Если попытаться свести в одну таблицу некоторые свойства диэлектриков, полупроводников, полуметаллов, бесщелевых и узкозонных полупроводников, нормальных металлов и сверхпроводников, которые наблюдаются при криогенных температурах, то эта условная таблица имеет следующий вид[[5]](#footnote-5). В таблицу включены в основном свойства, на основе которых начато или ожидается создание принципиально новых криоэлектронных приборов. Весьма внушительным будет перечень новых открытий и эффектов при криогенных температурах, на основе которых еще не создан ни один прибор, но их реализация в электронике может дать много полезного и неожиданного.

Конечно, порой трудно провести четкую границу между низкотемпературными и высокотемпературными явлениями в отдельных материалах, поэтому в таких случаях в табл. №1 подразумеваются те материалы, которые без охлаждения практически неприменимы (полуметаллы, узкозонные полупроводники и др.). Принцип построения табл. № 1 подсказывает принципы деления криоэлектроники на направления в соответствии с типом применяемого материала: например, сверхпроводниковая криоэлектронника на основе сверхпроводников, полупроводниковая криоэлектроника на основе охлажденных полупроводников и полуметаллов и т. д. Так это произошло со сверхпроводниковыми приборами, как бы обособившимися от приборов на базе других материалов в силу фундаментальности явления сверхпроводимости. Однако возможен и другой принцип, пробивающий себе дорогу: по выполняемым криоэлектронными приборами функциям, по диапазонам частот, по технологическим методам, положенным в основу изготовления прибора.

Все криоэлектронные приборы в зависимости от температуры охлаждения, применяемых материалов и явлений в них могут быть разделены на изделия (приборы) азотного, неонового, водородного и гелиевого уровней охлаждения. Уровень охлаждения во многом определяет параметры и области применения криоэлектронных изделий.

Еще в 40-х годах были предприняты попытки создать высокочувствительные, «нешумящие» приемники для индикации слабого теплового излучения в ИК диапазоне.

Так, появились угольный болометр, охлаждаемый до температуры жидкого гелия, болометр на основе p-Ge, легированного гелием, работающий при 2,15 К, а затем сверхпроводящий приемный элемент на основе тонкой фольги из нитрида ниобия.

Были созданы первые переключатели со сверхпроводящим соленоидом.

В 1954 г. произошло большое событие: Бакк предложил принципиально новый электронный прибор и дал ему имя «криотрон». Вслед за этим прибором на базе механизма возникновения отрицательного сопротивления в полупроводниковом кристалле, охлажденном до такой степени, что примеси в нем были «выморожены», был предложен еще один новый прибор — «криосар».

Проблема использования квантовых резонансных свойств твердого тела при низких температурах для приема сверхслабых СВЧ сигналов привела к созданию квантовых парамагнитных усилителей (мазеров). Мазеры появились вскоре после того, как Н. Г. Басов и А. М. Прохоров предложили так называемый «трехуровневый метод» (метод «накачки») создания избыточной населенности верхнего энергетического уровня, необходимый для получения эффекта «отрицательного поглощения», а Н. Бломберген предложил использовать в качестве активного вещества для таких мазеров парамагнитные кристаллы, находящиеся при гелиевых температурах. Вскоре А. М. Прохоровым, Н. В. Карловым, А. А. Маненковым и др. были созданы резонаторные парамагнитные СВЧ усилители, с помощью которых была продемонстрирована перспективность комплексного использования двух криоэлектронных материалов: парамагнетиков и сверхпроводников. В. Б. Штейншлейгером, Г. С. Мисежниковым и др. были разработаны мазеры бегущей волны, в которых криоэлектронные элементы защиты входа усилителя были построены на полупроводниках. Работы по исследованию вырожденных и невырожденных р-n переходов при низких температурах, широко известные работы по физике низких температур в Институте физических проблем, Физическом институте АН СССР, Институте радиотехники и электроники, Физико-техническом институте АН СССР, работы украинских физиков проложили дорогу электронике к новым явлениям, возникающим при сильном ослаблении тепловых колебаний решетки.

В 1963 г. в СССР вышел в свет первый научно-технический сборник по охлаждаемым электронным приборам и сложным устройствам в корпусе-криостате. Вслед за ним в 1964 г. в США группой в составе Т. Шмидта и др. был также выпущен сборник, в названии которого впервые было напечатано «криогенная электроника». Если до этого применялись различные термины: «радиотехника низких температур», «криотроника», «радиоэлектроника сверхнизких температур» и др., то теперь положение изменилось. Стало ясно, что назрела пора оформления нового перспективного направления электроники, основанного на сверхпроводимости и других явлениях в твердом теле при криогенных температурах, которому окончательно присвоили название «криоэлектроника» или «криогенная электроника». В попытках заглянуть в будущее криоэлектроники, предпринятых за последние 15 лет в ряде обзорных и проблемных работ, можно выделить два крупных этапа. Первый этап относится к 1962—1966 гг., когда в СССР и США появились оптимистические прогнозы вскоре после разработки дискретных криоэлектронных приборов: криотронных пленочных схем, детекторов ИК диапазона и СВЧ усилителей на охлажденных полупроводниковых структурах с р-n переходом. Этому этапу предшествовало создание микроскопической теории сверхпроводимости, установление, ее связи с феноменологической теорией Гинзбурга—Ландау (ГЛ), открытие квантовых макроскопических явлений, включая открытие эффекта Джозефсона, синтез новых сверхпроводящих материалов и разработка квантовых парамагнитных СВЧ усилителей со сверхпроводящим соленоидом в гелиевом криостате[[6]](#footnote-6).

Второй этап прогнозов (1969—1973 гг.) был стимулирован развитием технологии полупроводниковой микроэлектроники, созданием работоспособных сверхпроводящих туннельных, мостиковых переходов на эффекте Джозефсона, структур на узкозонных соединениях (InSb,InAs) и твердых растворах (BiSb, CdHgTe, PbSnTe), а также нелинейных кристаллов-параэлектриков, которые не переходят в сегнетоэлектрическую фазу при низких температурах(SrTiO3), и сегнетоэлектриков с низкой температурой Кюри-Вейсса. Анализ работ по криоэлектронике за последние 10— 15 лет показывает, что основные идеи этих прогнозов подтвердились, хотя огромные успехи микроэлектроники, открывая новые технологические возможности, в ряде случаев поставили под сомнение целесообразность широкого применения некоторых криоэлектронных приборов, например пленочных криотронов. Криоэлектроника стала привлекать не только исследователей, работающих в области электроники, но и специалистов по физике твердого тела, которые ранее электронными приборами не увлекались, специалистов-«комплексников», которые ранее стремились любой ценой избавиться от необходимости внедрения криогенных элементов в аппаратуру, специалистов в области космонавтики и астрономии. Это во многом объясняется успехами космической криогенной техники и тем, что с каждым пятилетием все глубже во все сферы жизни человека проникают средства ИК диапазона волн. Действительно, в наши дни трудно указать область науки и техники, в которой не применялись бы инфракрасные устройства. Специфические особенности ИК излучения как носителя информации ставят его в один ряд со светом и радиоизлучением. Поскольку тепловое излучение тел связано непосредственно с их термодинамическим состоянием, оно содержит полные сведения о температуре источника. Кроме того, спектральный состав излучения зависит от материала поверхности и вида излучаемых различными телами частиц, например газов. Поэтому он несет в себе информацию о веществе и состоянии поверхности источника излучения. Эти качества ИК излучения, позволяющие выявлять внутренние свойства объектов и наблюдать глубинные процессы, протекающие в них, способствуют привлечению его для решения таких задач, в которых получить указанную информацию с помощью других сигналов не удается. Особенно заметный сдвиг в развитии криоэлектронной ПК техники был сделан в связи с изобретением охлаждаемых твердотельных лазеров ИК диапазона и освоением космического пространства. Этот сдвиг был вызван еще и тем, что в космосе имеются идеальные условия для распространения ИК излучения и сравнительно однородный фон неба, отсутствует поглощающая и рассеивающая среда и имеются условия для использования естественного охлаждения приёмных элементов за счет тепловой радиации либо за счет применения отвердевших газов.

Космическая связь, локация и наведение кораблей, поиск и обнаружение теплоизлучающих объектов, дистанционное измерение температур, спектральный анализ атмосферы планет, тепловидение в медицине, промышленности и геологии - все это новые задачи, решать которые призвана криоэлектронная техника ИК диапазона. Другое направление, вызвавшее появление новых средств и криоэлектронных приборов - это дистанционные исследования природных ресурсов Земли и планет во всём спектре ИК волн: от ближнего ИК до субмиллиметрового диапазона[[7]](#footnote-7).

Инфракрасные системы дистанционного зондирования развиваются столь стремительно, что почти все отрасли народного хозяйства, включая промышленность, морской флот, сельское хозяйство, геологию будут получать все больше ощутимой пользы от внедрения этих систем. Не менее быстро развиваются космические радиотелескопы, как автоматические, так и обслуживаемые космонавтами. Для того, чтобы эти телескопы, позволяющие изучать объекты в наименее доступных с поверхности Земли дальнем ИК диапазоне и участке субмиллиметровых волн, могли длительное время работать в космосе, их криоэлектронная приемная часть должна представлять единое целое с криогенной установкой замкнутого цикла. Совсем недавно бортовая криогенная установка даже азотного уровня охлаждения была мечтой, а теперь при полете орбитального научно-исследовательского комплекса «Салют-6»-«Союз-27» на борту станции уже успешно работала криогенная установка, обеспечивающая получение температуры 4,2 К для криоэлектронного приемника субмиллиметрового диапазона волн. Проведение космонавтами Ю. Романенко и Г. Гречко испытания впервые созданной учеными Физического института АН СССР и советскими специалистами по микрокриогенной технике малогабаритной криоэлектронной приемной системы гелиевого уровня, включение, юстировка и осуществление измерений на телескопе открыли новую страницу в криоэлектронике. Мощным дополнительным толчком послужили запуски не только на эллиптические, но и на стационарные орбиты спутников-ретрансляторов, позволившие создать во многих странах спутниковые системы связи и телевидения и начать продвижение рабочих частот спутниковых систем в область все более высоких частот, включая диапазон миллиметровых волн и в перспективе дальний ИК диапазон. Энергетический голод заставил человечество срочно искать новые источники энергии, и взоры обратились к криогенному газу—водороду, являющемуся прекрасным топливом,— назрела пора водородной энергетики. Криоэнергетика, криобиология, криохимия, криомедицина стремительно возникали, усиливая всеобщую тенденцию к использованию в технике свойств веществ при низких температурах.

По мере того как в радиоэлектронике назревал коренной поворот, обусловленный развитием технологической базы микроэлектроники, это тяготение к низким температурам охватило и микроэлектронное аппаратостроение. Одна за другой возникали новые проблемы, решение которых известными методами интегральных схем при обычных температурах было в принципе невозможно или настолько затруднено, что их практическая реализация ставилась под сомнение. В то же время одно за другим следовали открытия новых явлений в пленочных структурах при низких температурах, не реализованных в микроэлектронике. Однако криоэлектроника все-таки развивалась не так быстро, как другие ветви микроэлектроники. Причин, тормозивших ее развитие, было немало, прежде всего: недостаточная изученность электронных процессов в охлажденных структурах и пленках на базе твердого тела, недостаточность реальных конструкторско-технологических идей по созданию интегральных электронных приборов на основе этих процессов и особенно надежных, воспроизводимых многоэлементных, многослойных интегральных схем с субмикронными зазорами, а также практических методов снижения удельного веса затрат на охлаждение интегральных приборов до уровня затрат на обычное термостатирование и увеличение срока непрерывного действия охлажденных устройств. Поэтому криоэлектроника является комплексной областью знаний и включает несколько основных направлении: криоэлектронное материаловедение; СВЧ криоэлектронику на объемных компонентах; сверхпроводниковую криоэлектронику; криоэлектронную ИК технику, интегральную криоэлектронику и технику криостатирования. Рассмотрим основные из данных направлений. Криоэлектронное материаловедение охватывает изучение электронных и магнитных явлений в охлажденных твердых телах, в том числе и в отвердевших газах, разработку технологии и синтез новых материалов с заданными свойствами в области криогенных температур с целью создания новых дискретных криоэлектронных элементов, функциональных радиоэлектронных приборов и микроохладителей.

СВЧ криоэлектроника включает создание нового класса микроприборов: охлаждаемых параметрических и транзисторных усилителей, смесителей, детекторов и сложных многофункциональных приемных модулей на объемных сверхпроводящих, полупроводниковых и других компонентах, представляющих сочетание фильтров, усилителей, циркуляторов, конструктивно объединенных в одной оболочке—криостате и связанных с криогенной установкой. СВЧ криоэлектроника на объемных компонентах является большим комплексным направлением и охватывает весьма широкий круг задач: от технологии создания активных и пассивных СВЧ элементов до разработки функциональных приборов и сложных приемных модулей, являющихся по существу самостоятельными радиоприемными устройствами.

Сверхпроводниковая криоэлектроника, начавшаяся с создания криотрона, развивалась по пути разработки дискретных приборов, основанных на сверхпроводимости, с уникальными характеристиками: сверхпроводящих СВЧ резонаторов[[8]](#footnote-8) с добротностью до 109, СВЧ линий задержки и коаксиальных кабелей, практически не имеющих потерь, мощных микромагнитов. Выдающимся достижением стало создание на основе эффекта Джозефсона сверхпроводящих магнитометров, обладающих недостижимыми прежде параметрами, индикаторов сверхмалых напряжений и токов, а также детекторов субмиллиметрового диапазона волн.

Криоэлектронная ИК техника вначале тоже включала дискретные элементы: охлаждаемые тепловые ИК приемники (болометры), спектральный диапазон которых зависит от характеристик оптических фильтров, и фотонные, селективные, ИК приемники, основанные на применении собственных узкозонных и примесных полупроводников, фоторезистивных и фотовольтических свойств охлажденных структур в различных участках ИК диапазона.

Поток открытий и идей в физике низких температур, физике тонких пленок, хлынувший после создания микроскопической теории сверхпроводимости и синтеза низко температурных материалов, успехи технологии распахнули двери и новый мир. Симбиоз новейшей технологии. микроэлектроники с физическими принципами и материалами криоэлектроники привел к переходу от дискретного уникального криоприбора к интегральному криоэлектронному модулю, т. е. к интегральной криоэлектронике. Родились новейшие направления интегральной криоэлектроники со своими проблемами и перспективами, из которых наибольшее развитие получают:

— интегральная криоэлектроника ИК диапазона (приборы с зарядовой связью, многоэлементные ИК приемники, ИК лазеры и др.);

— интегральная СВЧ криоэлектроника (интегральные схемы СВЧ усилителей, циркуляторов, фильтров, смесителей и др.);

* интегральная криоэлектроника на основе слабосвязанных сверхпроводников для вычислительной техники (интегральные схемы логики и памяти) .

Значительное увеличение удельного веса работ по интегральной криоэлектронике отражает суть нового этапа в развитии криоэлектроники, обусловленного успехами технологии пленочных и полупроводниковых схем микроэлектроники. Использование достижений технологии изготовления интегральных схем в криоэлектронике открыло пути комплексной микроминиатюризации ряда электронной приемной аппаратуры при одновременном качественном улучшении ее основных параметров. Такому положению способствуют глубинные процессы, происходящие в электронике.

— интеграция большого числа элементов в одном криостатируемом корпусе;

* создание многокомпонентных гетероструктур, в том числе на основе узкозонных материалов;

— интеграция явлений, функций и разнородных материалов в одной структуре на основе контактов сверхпроводник - полупроводник, параэлектрик - сверхпроводник;

* применение криогенной технологии (крионасосов, криогенного охлаждения подложек, охлаждения химических веществ для проведения уникальных реакций методом туннелирования при низких температурах) для создания криоэлектронных элементов. Исчезновение активного сопротивления в сверхпроводниках при криогенных температурах в широком спектре частот позволяет практически полностью устранить тепловые потери, повысить к. п. д. элементов и создать резонаторы с добротностью до 108—1012 вместо 103—104 на частотах вплоть до 10—30 ГГц. На основе эффекта Джозефсона и явлений в контактах сверхпроводник— полупроводник могут быть разработаны высокочувствительные датчики, измеряющие напряжения 10-16 В, видеодетекторы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн с чувствительностью 10-15 Вт/Гц1/2, тонко-пленочные интегральные схемы памяти и логики с быстродействием 10-11 с, работающие почти без выделения тепла, магнитометры с чувствительностью на 5 порядков выше, чем у наилучших известных приборов.

Вымораживание примеси в полупроводнике при уменьшении тепловой энергии решетки ниже энергии ионизации примеси, устранение собственной проводимости в узкозонных полупроводниках, токов термоэлектронной эмиссии в барьерах Шоттки за счет охлаждения открывают пути для приема излучений в недоступных кремниевым фотодиодам и ПЗС участках спектра, вплоть до дальнего ИК диапазона. Кремниевые ПЗС с барьерами Шоттки при азотных температурах охватывают диапазон до 3,5 мкм, ПЗС на основе InSb и кремниевые ПЗС, легированные In, до 3—5 мкм, гибридные ПЗС с применением HgCdTe, PbSnTe имеют в дальнем ИК диапазоне пороговую чувствительность, приведенную к единичной фотоприемной площадке 1 см2, при азотных температурах порядка 10-10-10-11 Вт/Гц1/2, если отношение сигнал/шум равно 1. Глубокое охлаждение решетки твердого тела приводит к значительному уменьшению тепловых шумов, являющихся принципиальным органичением при повышении чувствительности электронных приборов, особенно в СВЧ и ИК диапазонах. Шумовая температура охлажденных полупроводниковых усилителей может достигать 5—20 К в широком диапазоне частот, а шумовая температура смесителя на контакте полупроводник - сверхпроводник на частотах ~1010 Гц составляет при гелиевых температурах рекордно малую величину — около 13 К, гетеродинный приемник лазерного излучения имеет при 77 К чувствительность около 10-20 Вт/Гц1/2 в ИК диапазоне.

Интенсивное развитие интегральной криоэлектроники тесно связано с созданием криостатов с жидким и твердым хладоагентом и микрокриогенных систем с замкнутым циклом, не требующих периодического пололнения жидким или газообразным хладоагентом. Создание криостатов с охладителями типа Макмагона—Джиффорда позволило надежно освоить диапазон на стыке водородных и гелиевых температур, появились микрокриогенные системы гелиевого уровня. Криостаты с дроссельными микроохладителями после применения в них газовых смесей становятся конкурентоспособными по сравнению с другими системами. Начинается внедрение гибридных электронных охладителей на основе эффектов Пельтье, Эттингсгаузена. Существенной особенностью этих охладителей является слабая зависимость относительного термодинамического к. п. д. от холодопроизводительности, в то время как соответствующий коэффициент газовых машинных охладителей резко снижается при уменьшении холодопроизводительности. Таким образом, можно будет снять ограничение с минимально достижимой холодопроизводительности, что, в свою очередь, уменьшает размеры всей охлаждающей системы. Именно в области криогенных систем малой холодопроизводительности электронное криостатирование, в задачи которого входит создание криогенных твердотельных электронных микроохладителей на различные уровни температур вплоть до сверхнизких, будет, по-видимому, наиболее конкурентоспособным. Интегральная криоэлектроника позволит в дальнейшем объединить в одном твердотельном модуле электронную охлаждаемую схему с электронным охладителем, что является способом создания полностью твердотельных криоэлектронных интегральных схем. В такой необычной схеме охладительная часть также может быть выполнена методами интегральной технологии и иметь один и тот же источник питания. При этом предварительное охлаждение может осуществляться не электронными методами, что важно для разработки микроэлектронных систем с большой степенью интеграции, например антенных фазированных решеток. Развитие интегральной криоэлектроники как новой отрасли микроэлектронной техники непрерывно ставит перед исследователями новые задачи:

— создание электронных приборов с принципиально новыми свойствами на основе открытых физических низкотемпературных явлений путем использования технологии интегральных полупроводниковых схем;

— изменение физических свойств структур за счет глубокого охлаждения для получения принципиально нового прибора;

— создание новых конструктивных и технологических методов с целью сочетания в одном электронном функциональном модуле свойств криоэлектронного прибора и микроохладителя;

* комплексная микроминиатюризация охлаждаемых многофункциональных узлов аппаратуры с одновременным улучшением ее электрических параметров.

## Часть 3

## Микроэлектроника и холод

Микроминиатюризация в области электронно-вычислительной техники — важнейшее направление научнотехнического прогресса.

На основе полупроводниковых интегральных схем можно было бы создать мощную ЭВМ размером всего со школьный ранец, если бы был предложен эффективный способ отвода тепла от такого устройства. Но это оказалось непосильной для современной техники задачей: устройство должно выделять до киловатта энергии каждую секунду. Решение было найдено с помощью криогеники в сочетании с отказом от полупроводников.

Четверть века назад, а точнее, в 1962 году, английский ученый Джозефсон (в то время он был еще студентом) теоретически предсказал эффект, названный позднее его именем. На основе эффекта Джозефсона было сконструировано электронное устройство, так называемый «джозефсоновский переход». Оно представляет собой два сверхпроводящих электрода, разделенных тончайшим (от 10 до 50 А) слоем диэлектрика. Диэлектрик даже при сверхнизких температурах электрический ток не пропускает. В данном же случае благодаря сверхпроводящему состоянию электродов и в зависимости от приложенных к переходу электрических и магнитных полей электрический ток через изолятор проходит. Причем при температуре 4,2К такой прибор выделяет в 10000 раз меньше тепла, чем обычный транзистор. Иными словами, ЭВМ той же мощности, что и упомянутая выше, но построенная не на полупроводниках, а на сверхпроводящих элементах, выделяла бы всего 0,1 Вт в секунду! А каждый «джозефсоновский переход» может работать и как детектор, и как усилитель, и как ячейка памяти, и как логический элемент. Наиболее стабильны в работе «джозефсоновские переходы» с электродами из ниобия.

Устройства сверхпроводящей электроники уже используются на практике. Так, на их основе созданы сверхчувствительные измерители магнитных потоков и полей, успешно применяемые в медицине (магнитокардиография и магнитоэнцефалография).

Большое внимание наука уделяет сейчас разработки способов получения сверхчистых металлов, анализа их чистоты и изучения их свойств. А надо сказать, что свойства эти поистине удивительные. Например, титан, висмут, вольфрам, хром, молибден, тантал, цирконий долго считались хрупкими. В чистом же виде они оказались пластичными и прочными. И чем выше чистота полученных образцов, тем больше вероятность обнаружения "маскируемых" примесями подлинных свойств металлов.

В лабораториях Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов получены монокристаллы многих сверхчистых металлов — меди и серебра, никеля и кобальта, висмута и свинца, индия, сурьмы, самария. Их проба чистоты чрезвычайно высока — до 99,999999 процента! Такая почти идеальная чистота удовлетворяет требованиям микроэлектроники, где металлы находят все более широкое применение.

Жесткие требования микроэлектроники к чистоте используемых металлических материалов связаны с тем, что сверхчистый металл ведет себя почти как сверхпроводник, помехи электронам проводимости создают «чужие» атомы. А это значит, что при отсутствии таких помех, т.е. при работе со сверхчистыми металлами, не возникает (или, точнее, значительно слабее проявляется) проблема отвода тепла. Кроме того, что очень важно для электронно-вычислительной техники, непрерывно циркулирующий поток информации в виде заряда, волны и пр. в схеме, выполненной из сверхчистых металлов, не встретит препятствий, а это предохранит устройство от сбоев и ошибок.

Получение сверхчистых металлов — тема особая, и мы не будем ее касаться. Скажем только, что сохранить вещество в чистом виде не менее сложно, чем получить. И здесь на помощь опять-таки приходит криогенная техника: один из эффективных способов сохранения чистоты металлических материалов — содержание их в условиях сверхнизких температур (в жидком азоте, а еще лучше — в жидком гелии).

В Советском Союзе разработан метод определения чистоты сверхчистых металлов (при содержании примесей менее 10-4 процентов), основанный на использовании электромагнитных волн особого, типа — геликонов. Эти волны затухают в ряде металлов пропорционально концентрации примесей. Любопытно, что геликоны есть не что иное, как затухание электромагнитных волн, испускаемых плазмой заряженных частиц, что наблюдается лишь в вакууме. Иными словами, сверхчистые металлы проявляют свойства вакуума. Такое же сходство свойств с вакуумом сверхчистые металлы проявили при исследовании «пробега» в них свободных электронов. В сверхчистых образцах индия, например, охлажденных до температур ниже температуры кипения гелия, электроны проходили 8—10мм — как в вакууме! Более того, была доказана возможность с помощью магнитного поля фокусировать и управлять траекториями электронов проводимости внутри образца сверхчистого металла. Важно отметить, что в сверхчистых металлах плотность потока электронов проводимости составляет 1022 электронов в 1 см3, т. е. почти как в вакууме и в сотни тысяч раз больше, чем в полупроводниках.

Отсюда был сделан естественный вывод: использование сверхчистых металлов в конструкциях ЭВМ резко повысило бы эффективность вычислительных и управляющих систем. По мнению директора Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов, члена-корреспондента АН СССР Ч. В. Копецкого, развитие науки и техники в этом направлении может привести к появлению новой отрасли — металлической электроники, или металлотроники. Основным элементом электронных систем, по его мнению, могут стать «триады» из двух сверхчистых металлических монокристаллов, соединенных (или разделенных) микромостиком («длиной» до 100 мкм), изготовленным также из металлического монокристалла особой чистоты. Через такой микромостик при близких к абсолютному нулю температурах можно пропускать электроток огромной плотности — 109— 1010 А/см2 . И мостик при этом даже не нагревается. Это поистине парадоксальное свойство сверхчистых металлов, ведь самый тугоплавкий металл обычной технической чистоты испаряется при плотности тока 105 на квадратный сантиметр.

Одним словом, металлотроника в содружестве с криогенной техникой являются продвижением научно-технического прогресса.

Перспективы применения структур на основе контактов сверхпроводников с полупроводниками в криогенной микроэлектронике

Проблема создания структур на основе контактов С—П, приборов и многофункциональных устройств на этих структурах является комплексной. Нужно пройти большой путь от разработки воспроизводимой технологии получения простейших контактов и приборов, например полупроводникового (как это ни странно звучит) криотрона с джозефсоновским вентилем, сверхчувствительных детекторов дальнего ИК диапазона до криоэлектронных приемных устройств и вычислительных систем, в которых необходимо будет найти разумное сочетание различных рассматриваемых структур. Но в целом этот путь полезный и даёт много нового микроэлектронике. Это можно показать в виде условной схемы на рисунке № 1, в которой представлены не только структуры и приборы, о которых выше упоминалось, но и возможные перспективные приборы.[[9]](#footnote-9) Применение рассмотренных структур на основе контактов сверхпроводников с полупроводниками в криоэлектронике открывает новые возможности для создания различных (функциональных приборов: усилителей, детекторов, преобразователей, ПЗС с внутренним усилением, приемников ИК диапазона, линий задержки, регистров сдвига. Сочетание на одном полупроводниковом кристалле нескольких структур, выполненных в одном технологическом цикле, например структур, имеющих параметрические и детекторные элементы, в принципе позволяет поднять чувствительность криоэлектронных приемников прямого усиления до уровня супергетеродинных. Сочетание сверхпроводящих структур с полупроводниковым барьером, в которых при проявлении эффекта Джозефсона частоты принимаемого сигнала могут охватить практически весь ИК диапазон, с регистром сдвига на структурах с зарядовой связью и малошумящими усилительными элементами позволяет создать многоэлементные приемники с самосканированием, работающие в дальнем и сверхдальнем ИК диапазонах. Возможно создание на этой основе и многодиапазонных ПЗС ИК диапазона. При построении сложных интегральных схем на СВЧ микрополосковые линии и резонаторы усилителей могут быть выполнены непосредственно на той части поверхности полупроводникового кристалла, в которой при температурах Т<Тс наступает «вымораживание» носителей заряда и потери становятся примерно такими же, как и в хороших диэлектриках. На эту часть кристалла может быть нанесено и несколько дополнительных связанных пленочных сверхпроводящих резонаторов, образующих сверхпроводниковые СВЧ фильтры, либо преселекторы — усилители со сверхпроводниковыми резонаторами, предложенные и рассмотренные для мазера с пассивными сверхпроводниковыми резонаторами, либо Сп болометры. Способность работать при любых условиях охлаждения, вплоть до температур, близких к абсолютному нулю, где отсутствуют тепловые колебания, а шумы кристаллической решетки становятся исключительно малыми, причем ассортимент сверхпроводниковых и полупроводниковых материалов существенно расширен, является одним из ценных свойств рассматриваемых структур, которые базируются на передовой технологии БИС. Тенденция к освоению в микроэлектронике свойств твердого тела при криогенных температурах, проявившаяся благодаря успехам в создании различных криоэлектронных приемных систем на базе сверхпроводников, узкозонных полупроводников и других материалов, неуклонно пробивает себе дорогу. Одновременно, как видно из данной работы, появилась и другая тенденция, созревшая но мере развития электронного материаловедения и функциональной микроэлектроники. Это - переход к созданию в едином технологическом цикле уже не только материалов, например полупроводниковых кристаллов, и не только эпитаксиальных пленок из одного материала, но сначала «простых» полупроводниковых гетероструктур, МДП-структур, вплоть до рассматриваемых сложных структур С—П, С—П—С и др. Эти структуры можно назвать функциональными.

Прикладное значение контактов сверхпроводников и полупроводников для микроэлектроники с годами, особенно по мере развития технологии получения сверхтонких однородных полупроводников, сверхпроводников, слоев и субмикронных зазоров, возрастало наряду с возрастанием значения полупроводниковых охлаждаемых гетероструктур.

Новые криоэлектронные структуры на базе контактов сверхпроводников с полупроводниками и полуметаллами так же, как и новые структуры на базе контактов сверхпроводников с нелинейными сегнетоэлектриками в параэлектрической фазе (при Т>Тс) и нелинейными криопараэлектриками, в которых заложены многие новые функциональные возможности, заняли свое место среди новых материалов и структур микроэлектроники. При этом могли появиться приборы как бы с тройной интеграцией: интеграцией элементов, интеграцией материалов и явлений и интеграцией функций в одной твердотельной схеме с корпусом-криостатом.

Полезно обратить внимание на принципиальное различие между энергетической щелью (запрещенной зоной) в полупроводнике и щелью в сверхпроводнике. В полупроводнике минимумы энергии Е(р) определяются кристаллической решеткой и наличие щели приводит при Т==0 К (при отсутствии контакта со сверхпроводником), к нулевой проводимости. В сверхпроводнике минимумы Е(р) определяются взаимодействием электронов внутри электронной системы и наличие щели приводит к бесконечной проводимости.

## Заключение

## Новые проблемы и пути их решения

Криоэлектронику часто относят к микроэлектронике, считая ее высшей ступенью создания интегральных пленочных схем для ЭВМ. Это определение весьма неполное и охватывает только одно из направлений криоэлектроники—интегральную криотронику на тонкопленочных сверхпроводниковых элементах со слабой связью. В целом же интегральная криоэлектроника, базируясь на достижениях технологии современной микроэлектроники, включает более широкий круг проблем, без решения которых невозможно создать приборы, работающие при криогенных температурах и пригодные для серийного производства и постоянной эксплуатации. Дело в том, что криоэлектроника в отличие от полупроводниковой микроэлектроники опирается на новые физические явления, такие как: сверхпроводимость, эффекты Джозефсона, явления в узкозонных полупроводниках, полуметаллах, параэлектриках и др., проявляющиеся только при охлаждении и не реализованные ранее. При этом криоэлектронный микроприбор или интегральная криоэлектронная схема может представлять собой симбиоз охлаждаемой электронной схемы и охладителя (газового, электронного либо радиационного). Развитие интегральной криоэлектроники, как и развитие всей микроэлектроники, знаменует собой новый этап в электронной технике. Внедрение криоэлектронных приборов в народное хозяйство, в технику связи и телевидение, вычислительную, радиолокационную технику и приборостроение не только позволяет в больших системах уменьшить габариты, массу и стоимость аппаратуры при увеличении ее надежности, но и приведет к коренному улучшению электрических параметров этой аппаратуры. Как видно из приведенных материалов, уровень охлаждения в основном определяет параметры и область применения криоэлектронных приборов. Приборы азотного уровня охлаждения, самые дешевые и легкие, могут все шире применяться в массовой мобильной аппаратуре, а приборы гелиевого уровня охлаждения, энергопотребление которых в 25—70 раз больше, находят применение в стационарных, тяжелых объектах или там, где уже есть жидкий гелий. При этом электрические параметры приборов гелиевого уровня, в которых могут использоваться сверхпроводники, будут значительно лучше параметров приборов других уровней охлаждения, где сверхпроводники применить не удается. Границы применения криоэлектронных изделий трудно установить, но совершенно очевидно, что расширение и углубление научных, конструкторских и технологических работ в области криоэлектроники вообще и, в частности, техники криостатирования позволяет решить ряд важных проблем.

Первая проблема — освоение дальнего и сверхдальнего ИК диапазонов для приема естественных и лазерных ИК излучений. Это позволяет расширить спектральные границы систем для изучения природных ресурсов Земли и планет и поставить новые твердотельные охлаждаемые лазеры, эффективно работающие в ИК диапазонах на службу человеку.

Вторая проблема—создание криоэлектронных индикаторов слабого теплового излучения на базе интегральных приборов с зарядовой связью для тепловидения в промышленности, геологии и в медицине. Есть основание полагать, что криоэлектронные индикаторы дадут возможность осуществить раннюю диагностику ряда раковых заболеваний.

Третья проблема—создание массовых малогабаритных сверхчувствительных приемников, воспринимающих с высокой избирательностью по частоте и помехозащищенностью такие слабые радиосигналы, которые обычные приемники даже не в состоянии обнаружить. Эти приборы находят самое широкое применение в системах оповещения, управления, связи, телевидения, телеметрии, пассивной локации и навигации, космической техники, радиоастрономии, приборостроения и системах наведения. При этом, например, дальность обнаружения пассивной локации, связи, телеметрии возрастает в 2—3 раза, защита от помех в 10—100 раз. Прием сверхдальнего телевидения через спутник в любой точке страны в новых высокоинформативных участках СВЧ диапазона возможен непосредственно домашними телевизорами с помощью небольшой коллективной антенны. Разработка твердотельных перестраиваемых и модулируемых лазеров дальнего ИК диапазона и создание нового тина твердотельных СВЧ генераторов, имеющих при высоком к. п. д. стабильность частоты, присущую квантовым генераторам, в десятки и сотни раз большую выходную мощность во всем СВЧ диапазоне, является четвертой проблемой.

Криоэлектроника позволила создать большие и сверхбольшие интегральные схемы нового типа на основе сверхпроводящих пленочных структур для разработки нового класса электронных вычислительных машин со сверхбольшой памятью, меньших по габаритам и в 10— 100 раз более производительных, чем ранее существующие. В результате успешного решения технологических проблем в 1980—1985 гг. были изготовлены ЗУ с емкостью 256 Кбит на кристалле, временем записи и считывания 620 и 340 нс соответственно и потребляемой мощностью 7 мкВт.

Согласно прогнозам давних лет сверхпроводниковая ЭВМ могла бы быть изготовлена к 1990 г., причем память большой емкости - к 1983—1985 гг., а Центральный криоэлектронный процессор - к 1985—1987 гг. Однако из-за необходимости охлаждения сверхпроводниковые вычислительные устройства имеют ограниченные специальными целями применения. Значительный прогресс в разработке и выпуске, холодильных устройств (криостатов и рефрижераторов с замкнутым циклом на температуру 4,2 К) существенно удешевляет затраты, связанные с охлаждением. Действительно, ЗУ емкостью 108 бит состоит из 5\*103 пластин размером 1 см2 содержащих каждая 2\*104 бит. Мощность, потребляемая одной платой 10-4 Вт, полным ЗУ—0,5 Вт.

В эти же годы, по прогнозу, должны были быть созданы комбинированные (с газовым каскадом) и электронные твердотельные микроохладители на различные уровни криогенных температур, вакуумные и твердотельные приборы со сверхпроводящими соленоидами для освоения новых СВЧ диапазонов (миллиметровых и субмиллиметровых волн), измерительные приборы с разрешающей способностью и чувствительностью в 100—1000 раз лучше существующих.

Характерной чертой электроники являлось разнообразие материалов, применяемых в электронной технике. Наряду с диэлектриками и широкозонными полупроводниками все большую роль в электронике играли узкозонные полупроводники, материалы с температурой Кюри, лежащей в области криогенных температур, и сверхпроводящие материалы. Если ранее широкому внедрению сверхпроводников в электронику препятствовало то, что сверхпроводимость в них наступала при очень глубоком охлаждении, близком к абсолютному нулю, то теперь положение коренным образом изменилось. Синтезированы новые материалы, которые уже при Т~20 К становятся сверхпроводниками, созданы узкозонные полупроводниковые твердые растворы, полуметаллы, тонкие пленки, гетеро- и варизонные структуры на их основе, параэлектрические пленки на SrTiO3 с высокой нелинейностью, примесные пленки. Для выполнения столь обширной программы в области криоэлектроники необходима консолидация научных сил, занимающихся низкотемпературным материаловедением, низкотемпературной электроникой твердого тела и криогенным приборостроением, а также проведение фундаментальных работ по основным направлениям криоэлектроники, без которых нельзя ликвидировать создавшийся разрыв между большими открытиями в физике низких температур, прежде всего по сверхпроводимости и свойствам узкозонных полупроводников, полуметаллов и параэлектриков при криогенных температурах, и возможностью их широкого практического использования. Вместе с тем очевидно, что развитие криоэлектроники обогащало научно-техническую оснащенность страны, способствовало более быстрому развитию физики, химии, радиотехники, связи, автоматики, приборостроения. С каждым годом увеличивалось влияние криоэлектроники на другие области электронной техники. Это обусловлено тем, что непрерывное улучшение параметров электронных приборов постепенно приближает их к теоретически возможному пределу при обычных температурах. Глубокое охлаждение позволяет намного перешагнуть эти пределы и применять охлажденные приборы в едином модуле с криоэлектронными, что приводит к комплексной микроминиатюризации сложной радиоэлектронной аппаратуры.

Приборы криоэлектроники, как и приборы вакуумной, полупроводниковой, квантовой электроники и микроэлектроники, должны непрерывно дополнять и расширять возможности электроники. Это открыло огромные перспективы. На рубеже 1985—1995 гг. планировалось осуществить разработку и выпуск многоспектральных криоэлектронных приемных устройств, перекрывающих средний, дальний и сверхдальний ИК диапазоны для комплексов изучения природных ресурсов Земли и планет. А также следующее:

* промышленный выпуск приемных и приемопередающих ИК и СВЧ криоэлектронных модулей с твердотельными и электронными охладителями, которые находят широкое применение во многих наземных, космических и орбитальных системах связи, в радиолокации, телеметрии, управлении, автоматике, приборостроении, ракетной технике;
* широкое внедрение криоэлектронных приборов, обеспечивающих непосредственный прием через космос многих программ телевидения в любой точке Земли домашними телевизорами, а также прием сверхдальнего телевидения в салонах самолетов дальних рейсов, поездах и пароходах дальнего следования, в автомобилях. Возможен прием в любой точке Земли цветного телевидения, передаваемого как земными телецентрами, так и телецентрами других объектов;

— Возможно также создание крупных орбитальных криогенных вычислительных центров единой системы навигации и прогноза погоды; сооружение криогенных вычислительных центров на Луне и других планетах, а также комплексов, работающих в открытом космическом пространств с охлаждением за счет радиации и твердых газов;

— приближение к. п. д. многих электронных приборов СВЧ к 100%; освоение новых участков спектра в дальнем ИК диапазоне;

— разработка массивов криотронных микропереключателей с внутренней логикой для создания автоматической телескопной связи, охватывающей в единой системе народное хозяйство и население страны. Одной из причин, вынуждающих уже сегодня все шире применять криоэлектронные приборы, является резкое усложнение условий, в которых должны работать электронные приборы. С каждым годом область рабочих температур непрерывно расширяется, и если когда-то температура —80°С была пределом для интегральной схемы, то теперь рабочие температуры понижаются до —200°С и даже —270°С, т. е. почти до абсолютного нуля. Космическое пространство с его условиями вакуума, холода, радиации, а также ракетные криогенные жидкости (жидкий кислород, водород) гелий и отвердевшие замороженные газы - вот примеры сред, в которых должны функционировать современные приборы электроники.

Развитие в мире нового вида энергетики, основанного на промышленном использовании криогенного водородного топлива (газа, жидкой и твердой фазы) вместо минерального топлива и электроэнергии, стремительное освоение космоса делают все более обычным внедрение криоэлектронных изделий в народное хозяйство.

В заключение необходимо отметить, что развитие криоэлектроники, конечно, не приводит к замене существующих методов создания электронных приборов, а лишь расширяет возможности электронной техники, особенно там, где не требуется сверхминиатюрность, а высокие электрические параметры интегральных устройств являются определяющим фактором.

Вывод

Применение криогенных температур в электронике в промышленных масштабах началось в 50-х гг. ХХ в. в СССР, США и др. странах, когда были получены важные для радиоэлектроники практические результаты исследований низкотемпературных явлений в твердом теле и достигнуты успехи в области криогенной техники по разработке малогабаритных, экономичных и надежных систем охлаждения. Существенную роль в развитие криоэлектроники сыграли потребности радиоастрономии и космической связи в радиотелескопах и земных станциях, обладающих высокочувствительными приемными трактами, с помощью которых можно было бы компенсировать затухания радиоволн при распространении на протяженных трассах. Применение криогенного оборудования позволило снизить собственные тепловые шумы входных цепей радиоэлектронных устройств, предназначенных для работы при малом отношении сигнал-шум. В СССР результатом комплексных исследований свойств охлажденного твердого тела стало создание в 1967 системы земных станций космической связи "Орбита" для приема программ центрального телевидения через спутник связи "Молния" в диапазоне частот около 1 ГГц. В составе приемной аппаратуре земных станций применялся многокаскадный широкополосный малошумящий параметрический усилитель, первые каскады которого охлаждались жидким азотом. Важным этапом в развитие криоэлектроники явились разработка в СССР первого в мире приемника субмиллиметрового диапазона длин волн с гелиевым охлаждением и его успешные испытания в 1978 на борту научно-исследовательского комплекса "Салют-6" - "Союз-27". Установленный в 1979 на радиотелескопе АН СССР (РАТАН-600) криоэлектронный радиометр вывел этот радиотелескоп в разряд одного из самых чувствительных в мире и позволил на порядок увеличить объем информации о радиоизлучении Галактики. В 1984-86 в процессе реализации многоцелевого международного проекта "Венера - комета Галлея" криоэлектронный параметрический усилитель в составе радиоприемной аппаратуры обеспечил прием с расстояния более 100 млн. км радиолокационного изображения планеты Венера и крупномасштабных телевизионных изображений кометы Галлея с космических аппаратов "Венера-15","Венера-16","Вега-1","Вега-2".

Приложение

## Таблица № 1

## Некоторые свойства веществ при криогенных температурах.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Газы  («криогенные») | Диэлектрики, параэлектрики, сегнетоэлектрики | Полупроводники, полуметаллы, безщелевые и узкозонные полупроводники | Нормальные металлы | Сверхпроводники |
| Ожижение азота | Фазовые переходы | Изменение подвижности и концентрации носителей | Увеличение проводимости при Т<<QD | Исчезновение активного сопротивления |
| Отвердевание азота | Аномальный рост e и изменения tg d у ионных кристалов вблизи температуры Кюри – Вейсса | Ударная ионизация при kT< Ei  Эффекты шнурования тока  Магнитно-диодный эффект | Аномальный скин-эффект на СВЧ  Спонтанное возникновение ферромагнетизма у металлов с низкими температурами Кюри | Идеальный диамагнетизм, макроскопические эффекты  Квантование магнитного потока  Вихревая структура у сверхпроводников 2 рода и пленок |
| Отвердевание кис-лорода, парамагнетизм кислорода  Ожижение и отвердевание неона | Возникновение спонтанного электрического дипольного момента | Вымораживание примесей  Образование примесных зон и явления перескока  Наведенная сверхпроводимость | Резонансные явления  Изменение теплоемкости и теплопроводности | Взаимодействие внешнего поля с энергентической щелью  Реактивность поверхностного импеданса  Критические параметры  Скачки теплоемкости и теплопроводности |
| Ожижение и отвердевание водорода  Ожижение гелия |  | Эффект «отрицательного сопротивления объема»  Образование экситонов  Появление проводимости в примесной зоне |  |  |
| Сверхтекучесть гелия |  | Рост подвижности  Аномалии теплопроводности и теплоемкости |  |  |
| Аномалия теплоемкости и теплопроводности | Дисперсионные явления в ИК диапазоне | Резонансные явления  Магнитоплазменные волны, геликоны | Квантовые осцилляции поверхностного импданса | Поверхносная сверхпроводимость |
| Аномалии распространения звука в гелии | Влияние нулевых колебаний  Отклонение от закона Кюри-Вейсса | Туннелевое прохождение  Электронный парамагнитный, ядерный магнитный и циклотронный резонансы |  | Неравновесная сверхпроводимость  Генерация и детектирование фонов больших энергий |
|  |  | Электронный термомагнитный эффект |  |  |
|  |  | Изменения границ поглощения ИК области |  |  |
|  |  | Поглощение ИК волн «мелкими» примесными уровнями |  |  |
|  |  | Аномалии эффектов, связанных с переносом зарядов (гальваномагнитный, термоэлектрический, гальванотермомагнитный) | Геликоны |  |
|  | Уменьшение потерь  Релаксационные механизмы при воздействии СВЧ облучений | Увеличение электронов фононами | Наведенная сверхпроводимость | Явления "пиннинга"  "Туннельный эффект" |
|  |  | Образование "горячих носителей" и плазменных явлений |  | Стационарный и нестационарный эффекты Джозефсона |
|  | Электрокалорические явления  Аномалии теплопроволности | Сверхпроводимость при наличии давления |  |  |
|  |  | Сверхпроводимость в вырожденных материалах | Туннельные эффекты в пленочных структурах с диэлектрической прослойкой |  |
|  |  | Инверсии подвижности и типа проводимости |  |  |
|  | Сверхпроводимость при наличии большого давления | Охлаждение ультразвуком |  | Нелинейные явления в слабосвязанных сверхпроводниках |

(Рис. 1) Типы возможных структур и интегральных устройств на основе контактов сверхпроводниковых материалов с полупроводниками:

Запоминающие устройства

Приемники сверхдальнего ИК диапазона

Усилители- преселекторы

Приемники радиовидения

Интегральные гене-раторные схемы с перестройкой

**У С Т Р О Й С Т В А**

С-П лазеры

Детекторы и и преобразователи СВЧ

Гибридные ПЗС дальнего ИК

С-П интегральные СВЧ фильтры

Приемники и генераторы фононов

С-П криотрон-ные БИС с Джо-зефсоновскими переходами

М а т е р и а л ы

Сверхпроводники (С) Полупроводники (П)

С полупроводниковой мембраной

С-П-С

П-С-П

Широкозонные

П-С

Полуметаллические П-С

Узкозонные П-С

На сверхпроводящих П-С

**С Т Р У К Т У Р Ы**

Трехмерные сверх-

решетки

Слоистые высокотемпературные

Планар-ные

Туннельные

На основе Сп (А-15)

Двухмерные сверхрешетки

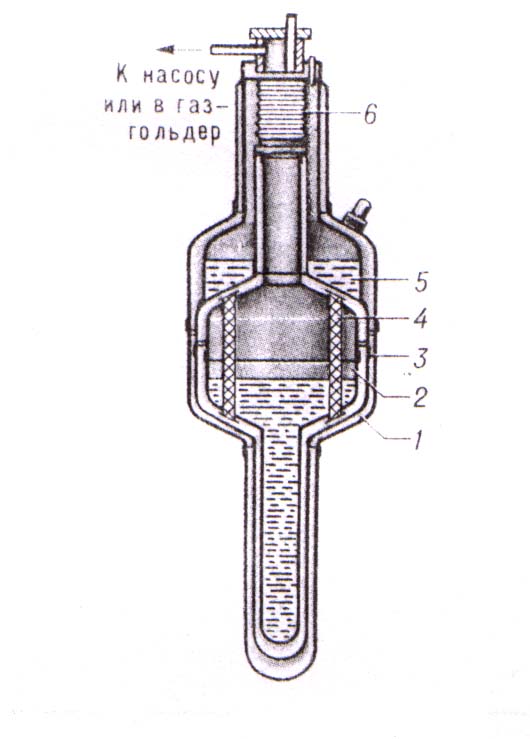
###### (Рис.2)

###### Криоэлектронные приборы и устройства используются в различных областях электроники, метрологии и стандартизации, для создания вычислительной техники, в интересах обороны, освоения космического пространства и радиоастрономии, а также других отраслей промышленности, морского флота, сельского хозяйства, геологии.

Космическая связь, локация и наведение кораблей, поиск и обнаружение теплоизлучающих объектов, дистанционное измерение температур, спектральный анализ атмосферы планет, тепловидение в медицине, промышленности и геологии - все эти задачи может успешно решать криоэлетронная техника.

\*\*\*\*\*\*\*\* Здесь было два рисунка(американский спутник и криогенная лаборатория)\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

(Рис. 3) Металлические гелиевые криостаты



Криостат ( от крио… и греч. Statos – стоящий, неподвижный), термостат, рабочий объем которого поддерживается при криогенных температурах за счет постороннего источника холода. Обычно в качестве источника холода (хладагента) применяют сжиженные или отвержденные газы с низкими температурами конденсации ( азот, водород, гелий и др.). По уровню поддерживаемой температуры и роду используемого хладагента различают криостат гелиевого, водородного и азотного уровней охлаждения. Температуру помещенного в криостат объекта регулируют изменением давления паров хладагента либо с помощью системы терморегулирования, установленной между источником холода и объектом.

(Рис. 4) Сверхпроводящий криоэлектронный резонатор

-резонатор с высоким значением добротности (до 1011)



Список литературы

1. Алфеев В.Н. "Радиотехника низких температур", М., 1966г.
2. Алфеев В.Н. "Полупроводники, сверхпроводники и параэлектрики в криоэлектронике", М., 1979г.
3. "Большая советская энциклопедия", М., 1985г.
4. Вендак О.Г., Гарин Ю.Н. "Криогенная электроника, М., 1977г.
5. Губанков В.Н. "Итоги науки и техники, серия радиоэлектроника, т.38", М., 1987г.
6. Джалли У.П. "Криоэлектроника", М., 1975г.
7. " Криогеника", М., 1986г.
8. Интернет: сервер NASA (www.nasa.gov)
9. " Электроника: Энциклопедический словарь", М., 1991г.

1. Proceeding of the IEEEE, №10, 1964 [↑](#footnote-ref-1)
2. В.Н. Алфеев, Радиотехника низких температур, М., изд-во "Советское радио", 1964 [↑](#footnote-ref-2)
3. Точнее: 4,216 К (гелий); 20,39 К (водород); 77,3 К (азот), 90,2 (кислород).—Прим. перев [↑](#footnote-ref-3)
4. Эффект Джозефсона - протекание сверхпроводящего тока через тонкий слой изолятора, разделяющий два сверхпроводника ( так называемый контакт Джозефсона). Если ток не привышает критического значения то падение напряжения на контакте отсутствует, если привышает то возникает падение напряженияи контакт излучает ЭМ волны. [↑](#footnote-ref-4)
5. Приложение (таблица № 1 ) [↑](#footnote-ref-5)
6. См. приложения: рис. 3 [↑](#footnote-ref-6)
7. См. приложения: рис. 2 [↑](#footnote-ref-7)
8. См. приложения: рис. 4 [↑](#footnote-ref-8)
9. Приложение (Рисунок 1) [↑](#footnote-ref-9)