

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КРИОГЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ В
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

В.Н. Алфеев, Б.И. Формозов

Современное состояние технологии производства радиоматериалов и принципов конструирования радиоаппаратуры находится на том уровне, когда параметры значительного числа устройств, предназначенных для работы в обычном интервале температур, приблизились к теоретически достижимому пределу. Возможности, определяемые свойствами веществ, из которых изготавливаются компоненты аппаратуры, во многом уже исчерпаны. Появилась необходимость использовать принципиально новый подход в улучшении параметров устройств.

В этой связи многие разработчики обратились к новой области электроники, получившей за последнее время широкое теоретическое и прикладное развитие — электронике низких температур, или криогенной электронике (криоэлектронике). Этому в значительной степени способствовали значительные успехи в области физики низких температур и техники получения охлажденных газов.

Линдкий гелий перестал считаться экзотической жидкостью, а явление сверхпроводимости, проявляющееся в этой среде, начинает широко использоваться для создания принципиально новых элементов и узлов радиоэлектронной аппаратуры и вычислительной техники.

Чрезвычайно низкий уровень шумов, прямоугольность переключательных характеристик, стабильность параметров во времени, возможность использования идеальных сверхпроводящих экранов для борьбы с помехами – на всех этих качествах, проявляющихся вблизи абсолютного нуля, базируется новое направление электроники.

Особенностями криогенной электроники по сравнению с традиционной электроникой являются:

применение материалов, проявляющих свои уникальные свойства только при низких температурах;

использование физических явлений в твердых телах, не имеющих аналогов в области нормальных температур (полное отсутствие электрического сопротивления, идеальный диамагнетизм, эффект Джозефсона и др.);

возможность получения параметров, которые превышают пределы, достижимые в микроэлектронике при обычных температурах.

Криогенная электроника охватывает следующие направления:

1. Низкотемпературная электроника твердого тела и криоэлектронное материаловедение.

2. Интегральная СВЧ криоэлектроника.

3. Интегральная криоэлектроника на тонкопленочных сверхпроводниках для вычислительной техники.

4. Криогенное микромагнитоуправление. Сверхпроводящие соленоиды.

Этот широкий круг проблем невозможно решить без исследований в области физики низких температур, являющейся научным фундаментом криогенной электроники, а также без совершенствования техники глубокого охлаждения.

Создание криоэлектронных приборов невозможно также без развития микроэлектронной технологической базы. Таким образом, криогенная электроника – это прежде всего единство микроэлектроники и криогенной техники.

В данной статье мы остановимся только на одном из направлений криогенной электроники, которое имеет непосредственное отношение к проблеме создания однородных вычислительных систем и сред – интегральной криоэлектронике на тонкопленочных сверхпроводниковых микроэлементах – криотронах.

В простейшей форме криотрон состоит из двух пересекающих-

ся тонких пленок, изготовленных из сверхпроводящих материалов: олова и свинца, разделенных изолирующим слоем [1]. При отсутствии тока через управляющую пленку сопротивление оловянной вентильной пленки тождественно равно нулю. Пропускание через управляющую пленку тока, большего некоторого критического значения, приводит к изменению в вентиле конечного сопротивления.

Криотрон в том исполнении, в котором он был изобретен американским физиком Баком [2], – управляющий соленоид, намотанный на проволочку из сверхпроводника с более низкой критической температурой, – не имеет перспектив применения в вычислительных системах вследствие малого быстродействия и низкой надежности паек. Однако он очень удобен при макетировании различных схемотехнических решений, а также для создания устройств измерительной техники.

Криотроны – активные микроэлементы. Они позволяют реализовать переключательные (логические) и запоминающие функции. К достоинствам пленочных криотронов, кроме малых размеров и ничтожного потребления энергии (в сверхпроводящем состоянии потери энергии отсутствуют вообще), следует отнести высокое быстродействие, идеальность переключательных характеристик, высокое отношение "сигнал-помеха", предельную простоту конструкции, низкую стоимость, высокую плотность компоновки и технологичность при массовом изготовлении. Достоинством криотронных интегральных схем является идеальная гальваническая развязка между входом и выходом, вследствие чего в них отпадает необходимость в принятии специальных мер для устранения обратного хода информации (аналогично опто-электронным устройствам).

Несмотря на длительный период развития криотроники, криотроны до сих пор не вышли из стен исследовательских лабораторий. Причина – отсутствие до недавнего времени развитой технологической базы, позволяющей создавать криотронные большие интегральные схемы (КИС) с однородной структурой. В последние годы появились реальные перспективы создания такой технологической базы, что связывают с первыми сообщениями об использовании метода фотолитографии для изготовления криотронных плат [3]. В связи с этим не случайно резкое усиление интереса к криотронике у наиболее передовых зарубежных фирм, занимающихся микроэлектроникой.

В настоящее время усилия разработчиков криотронных устройств вычислительной техники сконцентрированы в основном в области создания больших систем с высокой степенью однородности. Такие системы состоят из большого числа одинаковых КБИС, содержащих десятки тысяч активных элементов, которые изготавливаются в едином технологическом цикле вместе со всеми межэлементными соединениями. Конструктивно КБИС представляют собой многослойные тонкопленочные структуры из сверхпроводников, разделенные слоями диэлектриков (фоторезистов, кремний-органических полимерных пленок [4]).

В интегральной криотронике сформировалось несколько основных направлений, базирующихся на технологии изготовления КБИС.

1. Разработка оперативных запоминающих устройств ЗУ (ЗУ с произвольной выборкой, или ОЗУ) емкостью до 10^9 бит с временем цикла в несколько мксек.

2. Разработка ассоциативных ЗУ (АЗУ) емкостью 10^6 - 10^7 бит со средним временем ассоциативного обращения порядка 10-30 мксек и с выборкой по различным критериям [5]:

- точное равенство;
- больше или равно;
- меньше или равно;
- в заданных пределах;
- ближайшее большее слово;
- ближайшее меньшее слово;
- максимальное слово в накопителе;
- минимальное слово в накопителе [5].

3. Разработка однородных вычислительных структур (вычислительных сред), на базе которых планируется реализовать сверхвысокую производительность (порядка 10^9 опер/сек и выше) [6,7].

ЗУ первого направления характеризуются большим и сверхбольшим объемом памяти при высоком быстродействии и низкой приведенной стоимости (стоимости одного бита информации с учетом затрат на охлаждение).

Низкая приведенная стоимость обусловлена, с одной стороны, высокой степенью интеграции и однородности КБИС, что позволяет создать технологию массового производства.

С другой стороны, в криотронных ЗУ один формирователь уп-

равляющих импульсов может возбудить в тысячи раз большее количество элементов памяти, чем в обычных магнитных или полупроводниковых ЗУ, что приводит к значительному снижению стоимости всего устройства за счет уменьшения количества внешнего электронного оборудования [4].

Криотронные ассоциативные ЗУ принципиально отличаются от оперативных способностью выполнять не только функции запоминания, но и логические операции ассоциативного сравнения поступающей информации со всем массивом хранимой информации, что позволяет использовать такие устройства в вычислительных системах, предназначенных для параллельной обработки информации.

На основе КБИС можно создавать АЗУ емкостью до 10^6 бит в одном криостате. С технологической точки зрения это уже вполне реальная задача. Применение таких АЗУ в информационно-логических системах позволит получить эффективную производительность порядка 10^9 опер/сек [8].

За рубежом разработке криотронных АЗУ уделяется большое внимание. Например, фирма "Bell Tel. Labs." с помощью "гибридной" технологии, сочетающей вакуумное напыление через трафареты и фотолитографическую обработку, собрала и испытала макет криотронного АЗУ емкостью около 600 бит с временем поиска первого слова, равным 3,2 мксек [9]. Фирма "Texas Instruments", используя полностью фотолитографическую технологию, успешно изготовила и испытала КБИС для создания АЗУ емкостью 250000 бит с временем цикла 2,5 мксек [10].

Одним из новых направлений интегральной криотроники является разработка однородных структур типа вычислительных сред [6,7]. Криотронная вычислительная среда - это система, состоящая из КБИС, представляющих собой совокупность одинаковых универсальных элементов, одинаково соединенных друг с другом и настраиваемых извне программным способом на выполнение логических, запоминающих и соединительных функций. Разработка вычислительных сред на криотронах должна снижать технологические требования к отдельным элементам.

На базе криотронных вычислительных сред с параллельным принципом обработки информации ожидается реализация в будущем сверхвысокой производительности средств вычислительной техники. Первые испытания в жидком гелии макетов криотронных вычис-

лительных сред, в которых было использовано больше тысячи проволочных криотронов, проведенные совместно сотрудниками ИМ СО АН СССР и ФТИ АН УССР, дали обнадеживающие результаты, хотя и не затронули вопросы технологии массового изготовления [11].

Необходимо отметить, что криотронное АЗУ является, по существу, частным случаем вычислительной среды, так как оно представляет собой однородную запоминающую структуру с распределенной логикой.

Расширение фронта работ в области использования явления сверхпроводимости в вычислительной технике уже на базе современной технологии делает реальным создание однородных структур ЗУ и сред с параметрами и возможностями, недостижимыми на иных физических принципах.

Применение методов криогенной электроники уже позволило создать различные радиоэлектронные устройства с параметрами, превышающими параметры устройств, работающих при обычных температурах [12].

Для целей создания однородных вычислительных систем могут оказаться весьма полезными и другие направления криогенной электроники, прежде всего, это интегральная СВЧ криоэлектроника, базирующаяся не только на использовании сверхпроводящих пленок, но и объемных свойств охлажденного твердого тела в диапазоне сверхвысоких частот.

Л и т е р а т у р а

1. BUCK D.A. Proc. IRE, vol. 44, 1956, p.482.
2. BREMER J.W. Electronics, №4, Dec. 9, 1957.
3. ПРИТЧАРД Дж. П. и др., ТИЭР, 10, 1964, 1301.
4. ГЕЙНДИ Р.А., "Электроника", 1969, 22, № 6.
5. HANLON A.G. IEEE Trans. on EC, EC-15, 4, p 15, 4, pp.509-521.
6. ЕВРЕЙНОВ Э.В., КОСАРЕВ Ю.Г. Однородные универсальные вычислительные системы производительности, Новосибирск, "Наука", 1966.
7. БАНДМАН О.Л., Вычислительные системы, -Тр. симпозиума, Новосибирск, "Наука", 1967.

8. Electronic News, 1966, II, № 552.
9. CRANE B.A., LAANE R.R. Bell Labs. Records, 1964, 236, № 3.
10. PRITCHARD J.P. IEEE Spectrum, 1966, 3, № 5.
11. ГУРКО В.Ф. Вычислительные системы, Новосибирск, "Наука" СО, 1969, вып. 33.
12. АЛФЕЕВ В.Н. Радиотехника низких температур, Москва, "Сов.радио", 1966.

Поступила в редакцию
19.XI.1969.