

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ

Современные тенденции развития телекоммуникационного рынка приведены в отчете Организации по экономическому сотрудничеству и развитию (ОЭСР):

- сокращение темпов роста абонентской базы и доходов операторов стационарной связи;
- рост качественного уровня и расширение ассортимента услуг в сетях сотовой связи;
- готовность многих абонентов отказаться от проводного телефона в пользу мобильного [1].

Структура телекоммуникационных доходов изменяется – мобильные услуги составляют на сегодняшний день до 40 % всех доходов операторов связи, а число абонентов мобильной связи в 30 странах ОЭСР превысило число абонентов стационарной связи в соотношении 3:1. Поэтому для удержания абонентской базы, повышения конкурентоспособности и доходов операторы стационарной связи внедряют инновационные услуги на основе передачи данных, предоставляя клиентам скоростной выход в Интернет и видео по требованию. Широкополосная передача становится доминирующей технологией доступа к Интернету в зоне ОЭСР; в начале 2008 г. 60 % абонентов в 30 развитых странах для доступа в Интернет пользовались широкополосной (ШП) связью.

Увеличение доли мобильной и широкополосной связи предъявляет все более жесткие требования как каналам и аппаратуре стационарной связи, так и к аппаратуре абонентских терминалов (АТ) и элементам радиотракта базовых станций (БС). Известно, что емкость (число каналов) и зона охвата приемника БС определяется, главным образом, мощностью передатчика АТ и селективностью приемника на линии связи вверх (от АТ к БС). Обычные радиокомпоненты, работающие в частотном диапазоне 800 – 2000 МГц, работают на нижнем пределе характеристик, требуемых для телекоммуникационных систем связи третьего поколения ($f_0 = 2$ ГГц, $Df = 5$ МГц, спад АЧХ – 70 дБ/МГц, др.) [2]. По-видимому, современная полупроводниковая электроника подходит к последней черте, как по допустимой плотности дизайна, так и по тактовой частоте. За этой чертой – будущее, и оно принадлежит новым технологиям.

Одной из таких технологий является применение криогенных и сверхпроводящих компонентов. Применение высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалов с критическими температурами, превышающими 77 К, приводит к упрощению и удешевлению криогенной аппаратуры [3] и способствует ее внедрению в системы как мобильной, так и стационарной связи. В настоящее время в стадии разработки и промышленного внедрения находится множество сверхпроводящих компонентов, однако поскольку сообщения по их применению разбросаны по различным изданиям, возникла необходимость анализа современного состояния и ближайших перспектив применения компонентов криогенной техники в системах связи.

Характеристики ВТСП материалов и устройств

Современные ВТСП материалы способны работать при температурах значительно выше азотных (согласно последним сообщениям – до 200 К), что значительно упрощает разработку криостатов [3]. Так, у пленок $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, имеющих пока наибольшее практическое применение, критическая температура перехода лежит в диапазоне 80-125 К. Есть сообщения и о практическом применении массивных ВТСП проводников, но в стадии одиночных изделий.

Для получения тонких пленок ВТСП керамики технологами применяются три метода напыления на подложку. Промышленное применение получило лазерное и электронно-лучевое испарение для создания пленок $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Качество ВТСП пленки зависит также от подложки. Требования к подложке: высокая диэлектрическая проницаемость, малые диэлектрические потери, химическая инертность и гладкая поверхность. В настоящее время этим требованиям удовлетворяют подложки из $LaAlO_3$, на которых возможно вырастить

пленки $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ керамики толщиной до 600 нм, обладающие низким поверхностным сопротивлением и высокой допустимой рабочей мощностью (до 50 кВт).

Основными параметрами ВТСП пленок являются удельное сопротивление и магнитная восприимчивость и поверхностное сопротивление. Поскольку активное поверхностное сопротивление пропорционально квадрату частоты, то ВТСП материалы сохраняют свое преимущество вплоть до частот 100 – 200 ГГц.

Кроме сверхпроводящих пленок перспективным для применения в связи являются устройства, использующие явление квантования магнитного потока в сверхпроводниках. Для сверхпроводящего кольца поток магнитного поля, создаваемого током в этом кольце, т. е. произведение величины магнитного поля на площадь контура, равен целому числу квантов магнитного потока F_0 ($2,06 \cdot 10^{-18}$ Вб). Устройство квантования магнитного потока называется переходом Джозефсона, из двух последовательно включенных джозефсоновских переходов строится СП компаратор – аналог транзистора, из двух включенных параллельно – квантовый интерферометр. На их основе разработаны высокочувствительные датчики.

Основные ВТСП компоненты, применяемые в телекоммуникациях

Применение тонкопленочных ВТСП компонентов ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$ на подложке $LaAlO_3$, MgO или Al_2O_3) в приемнике приводит к увеличению чувствительности и селективности тракта приема, уменьшению комбинированных потерь и снижению побочных излучений в тракте передачи [4, 5]. В настоящее время для улучшения радиочастотных характеристик входных цепей приемников используются такие ВТСП компоненты: антенны, фильтры, резонаторы, мультиплексоры, смесители, линии задержки, малошумящие усилители. Пассивные приборы СВЧ-диапазона (фильтры, мультиплексоры, резонаторы, линии задержки, и др.) исторически были первым промышленным применением ВТСП материалов [5]. Основные требования, предъявляемые к этим компонентам, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Пассивный компонент	Требования к ВТСП пленкам	Требования к параметрам компонентов
Резонатор	Низкие диэлектрические потери	Высокая добротность. Низкий уровень фазового шума
Полосовой фильтр	Низкое сопротивление пленок на ВЧ и СВЧ. Возможность интеграции блока фильтров на одной подложке	Малые вносимые потери. Заданная ширина полосы пропускания
Линия задержки	Малая площадь подложки. Малое поверхностное сопротивление (для миллиметрового диапазона)	Высокие КПД и коэффициент передачи

В настоящее время пассивные компоненты составляют свыше 50 % объема как наземных радиоэлектронных систем, так и бортового аэрокосмического радиоэлектронного оборудования. К активным элементам относятся МШУ, коммутаторы и др.

Фильтры

Основные требования, предъявляемые к ВТСП фильтрам при их использовании в мультиплексорах, в мобильных сотовых и спутниковых системах связи, могут быть сформулированы следующим образом [4]: центральная частота $f_0 = 1...4$ ГГц.; относительная ширина полосы частот 0,03 – 2 %; передаваемая мощность – от 10 до 100 Вт; неравномерность АЧХ в полосе пропускания не более 0,01 дБ.

Для полосового фильтра, полностью изготовленного на ВТСП пленке, вносимые потери являются функцией поверхностного сопротивления пленки других параметров, но, в конечном счете, вносимые потери определяются числом элементов фильтра и суммарным значением коэффициента передачи, которые задают полосу пропускания. Наибольшее преимуще-

ство от использования ВТСП – возможность создания фильтров с большим коэффициентом прямоугольности.

Сравнительная характеристика основных параметров традиционных и ВТСП полосовых фильтров приведена в табл. 2.

Таблица 2

Тип фильтров	Центральная частота f_0 , МГц	Полоса частот, % от f_0 , МГц	Вносимые потери, дБ	Затухание в полосе заграждения, дБ	Добротность
ПАВ	5...2000	1...10	0,5...30	40...70	10...100
Кварцевые	0,1...1000	0,1...10	До 3	80...90	103...105
Микрополосковый	До 10000	2...60	До 4	От 20	До 104
Цифровой	10...300	0,05...10	До 0,1	60...80	103...104
ВТСП	0,2...28 000	0,2...15	0,3...1,2	50...100	106...107

Еще в 2001 году американские компании AT&T Wireless и Superconductor Technologies Inc. начали развертывание систем сверхпроводящих фильтров для БС, которые позволяют улучшить качество звука, отсекая городской радиочастотный шум, и увеличить число каналов, поддерживаемых каждой ячейкой. Данные устройства уже используются в малошумящих приемных трактах БС сотовых систем связи GSM (0,8/0,9 ГГц) и PCS (1,8/1,9 ГГц), и сейчас рассматривается возможность их применения в области более высоких частот (до 30 ГГц). Привлекательно использование электрически перестраиваемых ВТСП-фильтров для применения их в адаптивных следящих приемниках БС. Изменяя величину внешнего магнитного поля, можно осуществлять перестройку в заданном частотном диапазоне. Однако до сих пор разработаны только единичные образцы таких фильтров.

Промышленный образец фильтра, выпускаемый серийно фирмой Superconductor Technologies Inc. [6], представлен на рис. 1. Блоки фильтров D и E соответствуют частотным диапазонам сотовой связи PCS в США: 1865-1870 и 1885-1890 МГц соответственно. Каждый фильтр представляет собой цепочку из восьми связанных резонаторов, расположенных на MgO-подложке толщиной 0,5 мм. В рабочей полосе частот передатчика базовой станции данный фильтр ослабляет сигнал более чем на 80 дБ, что соответствует стандартам 3G.

Резонаторы

Это одни из наиболее важных пассивных микронэлектронных компонентов СВЧ-диапазона. Применение ВТСП керамических пленок в резонаторах позволяет снизить шумовой сигнал в 100 и более раз, а полосу пропускания уменьшить более чем в 10 раз. Есть также сообщения, что самой высокой добротностью обладают объемные резонаторы, изготовленные из металлических ВТСП [4], однако пока они находятся в стадии одиночных научных разработок и далеки от промышленного применения.

На рис. 2 показан пример улучшения качества работы ВТСП-резонаторов, который достигнут специалистами американской фирмы SuperConductor Technologies Inc. [6].

Первый модуль резонатора на основе ВТСП керамики был разработан фирмой в 1996 г. С тех пор в результате совершенствования технологии производства тонкопленочных ВТСП и подложек достигнуто значительно улучшение характеристик резонатора. На основе данных резонаторов изготовлен промышленно выпускаемый ВТСП фильтр, который является ключевым узлом БС третьего поколения. Радиочастотный блок БС включает в себя 12 сверхпроводящих полосовых фильтров, преселектор и 6 МШУ. Каждый фильтр состоит из 10 дисковых резонаторов. Спад характеристики АЧХ на границе полосы пропускания составляет 60 МГц/дБ (рис. 2).

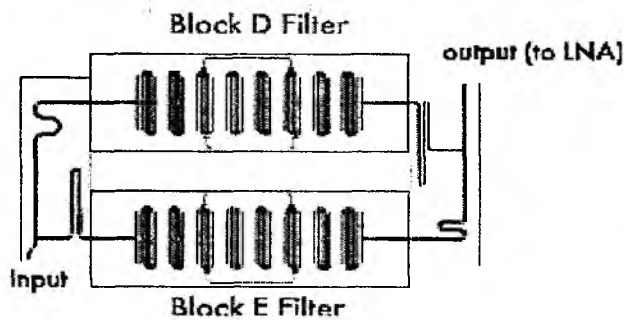


Рис. 1

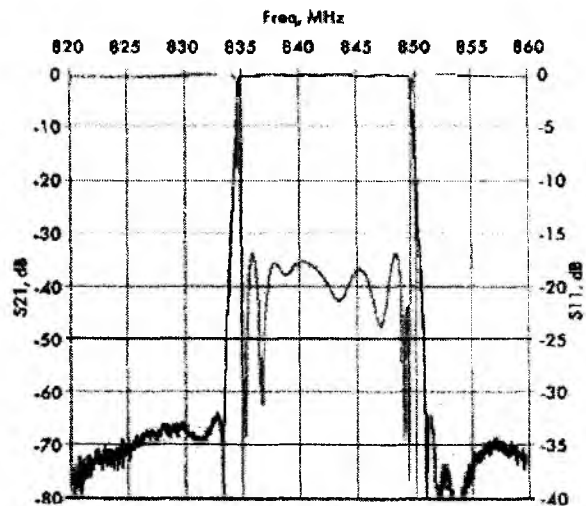


Рис. 2

Фазовращатели

Обычные перестраиваемые фазовращатели разрабатываются на основе сегнетоэлектриков, в частности широко используется SrTiO_3 . Примером сверхпроводящего фазовращателя дискретного типа, осуществляющего постоянный сдвиг по фазе, может служить компонент, в котором высококачественные ВТСП пленки на основе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -х-керамики нанесены на LaAlO_3 -подложки (поверхностное сопротивление пленки на частоте 10 ГГц при 77 К составляет 300 мкОм). Для переключения на разные ветви ответвителя использованы *pin*-диоды.

В магнитоперестраиваемом фазовращателе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -Х микрополосковая линия связана с ферритовым сердечником. Меандровая структура, длина и ширина которой составляет соответственно $2,5$ и $0,5 \text{ см}$, на частоте 10 ГГц при 77 К обеспечивает фазовый сдвиг 70° [6].

Линии задержки

Используются при необходимости обеспечения задержки сигнала от пикосекунд до микросекунд при его минимальном ослаблении. В отрезке линии сверхпроводника ослабление может быть на три порядка ниже, чем в золотом проводнике той же длины и с таким же поперечным сечением. Для получения максимальной задержки в заданном объеме микрополосковые ВТСП линии можно изготавливать в виде меандра или спирали на тонких диэлектрических подложках, а уже из них создавать многоярусную структуру. Чтобы предотвратить перекрестные искажения между отдельными линиями, необходимо формировать одну или даже две поверхности заземления, расположенные симметрично по обе стороны от проводников микрополосковой линии.

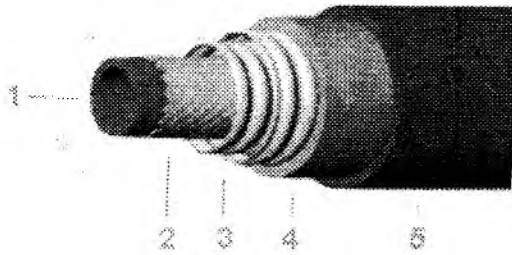
Силовые кабели

В ноябре 2008 г. Газета Wall Street Journal сообщила, что корпорация IBM была выбрана в качестве партнера по работе с несколькими электрогенерирующими компаниями США, для разработки концепции подключения широкополосного доступа в Интернет по электропроводам. Отмечается, что поставщики электроэнергии в США и других странах уже давно стремились к предоставлению ШП доступа в Интернет, но лишь сейчас технология созрела для рыночного использования. С другой стороны, в Интернете появились сообщения [7] о промышленных заказах на применение силовых кабелей на базе ВТСП.

Один из вариантов конструкций таких кабелей (с «теплым» диэлектриком) приведен на рис. 3. Слияние этих двух тенденций, возможно, позволит в будущем применять ВТСП кабели для организации ШП доступа в Интернет.

Улучшение технических характеристик модулей БС. В качестве примера приведем результаты измерений, проведенных для охлаждаемого до 70 К модуля (ВТСП фильтр плюс МШУ), спроектированного для стандарта IS-95 (CDMA) [8].

Для определения выигрыша задались значениями, соответствующими спецификациям IS-95: $f_0 = 830$ МГц, скорость передачи по радиоканалу 1,2288 Мбит/с, скорость передачи данных 9,6 кБит/с, шумовая температура фона 150 К. При этом эквивалентная шумовая температура ВТСП-модуля равна 258 К, а модуля в традиционном исполнении – 395 К. Это означает, что излучаемая мощность АС CDMA может быть уменьшена на 35 % при том же отношении сигнал/шум.



1. Жидкий азот
2. ВТСП токопроводящая жила
3. Криостат
4. Оболочка
5. Экран

Рис. 3

На основе анализа этого и других примеров можно сделать заключение, что применение в ВТСП компонентов позволяет:

- увеличить дальность цифровой и аналоговой связи, увеличить емкость канала CDMA на восходящей линии связи (Up-link);
- увеличить BER на Up-link (величина 3%-го порога BER улучшается на 4,2 дБ); расширить динамический диапазон емкости канала CDMA; уменьшить число пропущенных вызовов на 40 %, уменьшить возникновение сбоев телефонных разговоров; уменьшить мощность, излучаемую АС на величину от 1 до 6 дБ (типовое значение 3 дБ или от 30 %);
- развертывать меньшее число БС; улучшить радиопокрытие в зданиях;
- увеличить скорость передачи данных на 20 %.

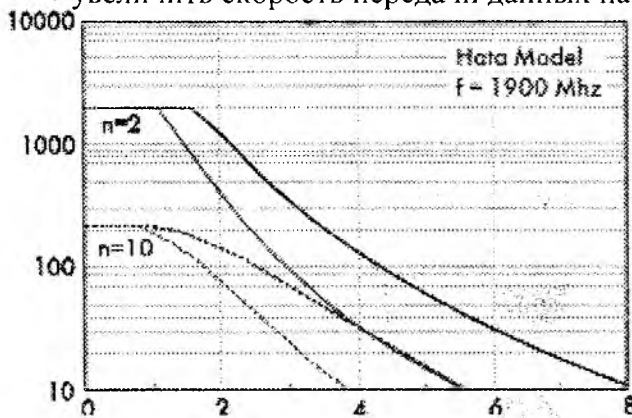


Рис. 4

Согласно модели Хата (Hata model) максимальная скорость передачи данных уменьшается при наличии отражений сигнала в точке приема (n – число отражений) [4]. На рис. 4 представлена зависимость скорости передачи данных от расстояния (км) для двух и десяти отражений в БС 3G с использованием ВТСП фильтра (черная линия – выше) и в БС традиционного исполнения (серая линия – ниже). Из рис. 4 видно, что при любом числе отражений и при длине линии более 1,5 км выигрыш в скорости передачи от применения ВТСП фильтров является достаточно существенным.

Основными применениями цифровой сверхпроводниковой микроэлектроники являются: аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, высокоточные квантовые магнитометры (SQUID'ы) [9], программируемые генераторы сигналов, телекоммуникационные коммутаторы. Работает масштабный по финансированию проект американского суперкомпьютера с производительностью в 10^{15} операций с плавающей запятой в секунду, в котором будут применяться логические элементы, компараторы, сумматоры и другие, разработанные на базе низкотемпературной сверхпроводимости (НТСП) [10]. Сверхпроводниковые микросхемы, помимо фирмы HYPRES, которая является мировым лидером по производству элементов на базе НТСП, изготавливаются также фирмами NE, TRW, Conductus, ETL и др. Эти микросхемы уже несколько лет применяются в магнитной томографии, в метрологии и в системах сбора данных.

Фотография и структурная схема одного канала 8-миканального сверхпроводящего преобразователя время-цифра (TDC) фирмы HYPRES показан на рис. 5. Разработанный на крио-

лементов на основе эффекта Джозефсона, он позволяет оцифровывать временные интервалы между событиями, но нуждается в дополнительном теплоотводе из-за разности температур между теплой и НТСП частями.

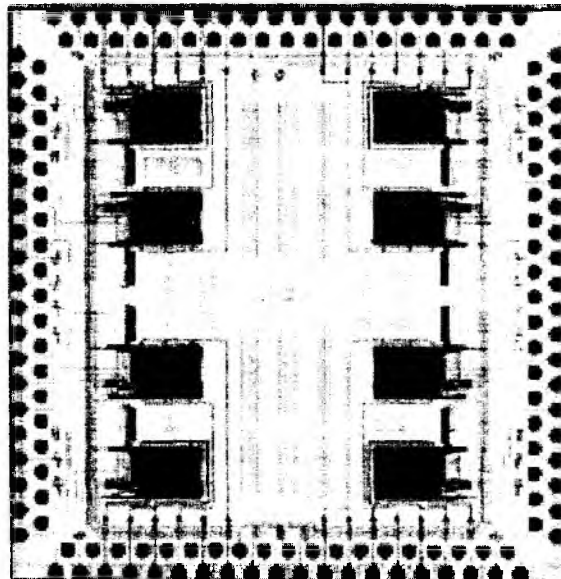
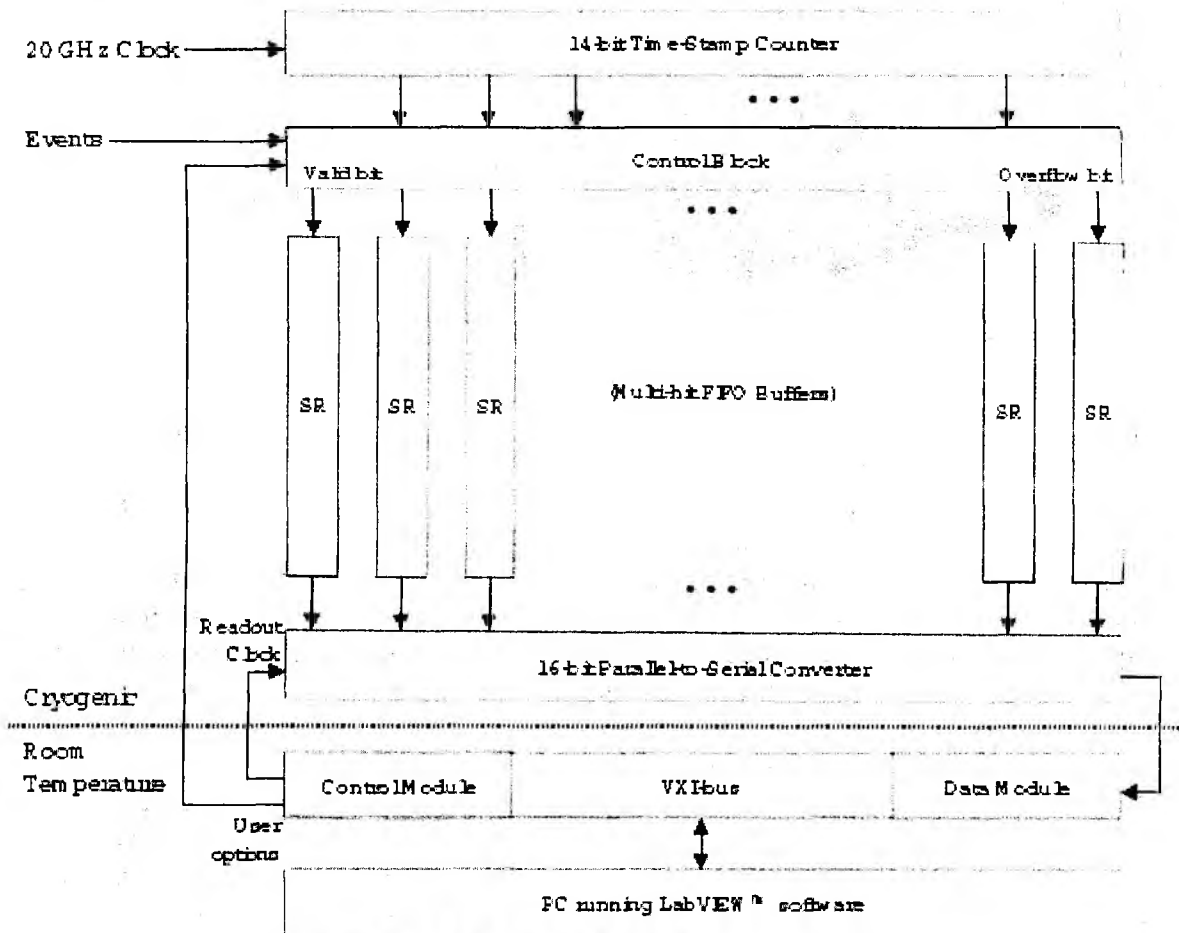


Рис. 5

Однако промышленное применение созданных в научных лабораториях образцов холодной сверхпроводниковой микроэлектроники, также, как и создание на их основе сверхпроводящего суперкомпьютера, связано с разрешением ряда технологических проблем, в ча-

тности с разработкой дешевых криостатов и, главное, тепловых интерфейсов между охлаждаемой и теплой частью приборов.

Заключение

Мобильная связь и системы ШП доступа являются перспективными областями практического применения сверхпроводимости. Существующие сверхпроводниковые компоненты пока не получили широкого распространения в странах СНГ, единственным исключением являются образцы криогенных кабелей, производимые на опытных заводах. Однако в нескольких странах ВТСП оборудование уже сегодня помогает операторам связи обеспечивать качество предоставляемых услуг, способствует расширению территориального охвата БС, увеличению емкости сети и скорости передачи данных, значительному улучшению качества сигнала, а также уменьшает излучение БС и облучение пользователей. Анализ перспектив показывает, что при переходе к более высокочастотному диапазону, к более высоким критическим температурам, к более совершенным и дешевым системам охлаждения, преимущества от применения ВТСП и даже НТСП компонентов станут более заметными, что будет способствовать широкому применению, по крайней мере, ВТСП компонентов.

Список литературы: 1. *Информационно-коммуникационные технологии, OECD, Перспективы коммуникаций ОЭСР 2007* // <http://www.oecd.org/dataoecd/12/23/38989837.pdf>. 2. *Перспективы внедрения систем мобильной связи третьего поколения в России* // Мобильные телекоммуникации. 2001. 3. *Track E., Hypres, Inc. USA, Cryocoolers for Superconducting Electronics: Past, Present, and Future* // Applied Superconductivity Conference Chicago, Illinois USA August 17 – 22, 2008. 4. *Архаров И., Емельянов В. Применение ВТСП элементов в базовых станциях сотовых сетей* // Мобильные телекоммуникации МС/РЕ. 2002. №1. С 54 - 58. 5. *Alfredo C. Anderson, Hui Wu, A. Barfknecht, Transmit Filters for Wireless Basestations* // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 9, No 2, June 1999, P. 4006–4009. 6. *Balashov, D.; Niemeyer, J. Passive Phase Shifter for Superconducting Josephson Circuits* // Applied Superconductivity, IEEE Transactions on Volume 17, Issue 2, June 2007, С 142 - 145. 7. <http://www.technologyreview.com/8. IEEE Std 802.16-2004. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems> // IEEE, 2004. October. 9. *Vadim S Zotev, etc.// Jr SQUID-based instrumentation for ultralow-field MRI, Supercond. Sci. Technol. No 11, 2007, С. 367-373.* 10. *Daren K. Brook, HEPRES Inc., RSFQ-technologies. Circuits and Systems* // <http://www.hypres.com/papers/Brock-RSFQ-CirSys-Rev01.pdf>, С 6 - 47.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 12.10.2008