

УДК 621.385.6

В аналитическом обзоре рассмотрены и систематизированы данные по структуре, свойствам и технологии получения материалов, поглощающих СВЧ-колебания и применяемых для изготовления внутривакуумных поглотителей СВЧ-энергии

Изложены основные требования к поглощающим материалам, параметры, характеризующие поглощение, физико-химические основы создания. Рассмотрены немагнитные и ферромагнитные поглощающие материалы, приведена их классификация, а также дан краткий обзор работ по исследованиям эффектов поглощения энергии в новых высокотемпературных сверхпроводящих материалах.

Обзор рассчитан на специалистов-материаловедов, конструкторов и технологов, работающих в области исследования, разработки и применения материалов-поглотителей СВЧ-энергии.

Ключевые слова: материалы, поглощающие СВЧ-излучения, внутривакуумные поглотители СВЧ-энергии, классификация, структура, технология, свойства СВЧ-поглощающих материалов, ферромагнитные поглощающие покрытия.

Научный редактор д-р техн. наук Т. В. СИМОНИШВИЛИ

ОБЗОРЫ ПО ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

Серия 6, Материалы

ВЫПУСК 9 (1415)

Л.Ф.Ирющкина, Н.И.Воробьева

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВНУТРИВАКУУМНЫХ
ПОГЛОТИТЕЛЕЙ СВЧ-ЭНЕРГИИ

(по данным отечественной и зарубежной печати за 1959-1988 гг.)

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	2
1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К МАТЕРИАЛАМ ДЛЯ ВНУТРИВАКУУМНЫХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ СВЧ-ЭНЕРГИИ.....	2
2. ПАРАМЕТРЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ПОГЛОЩЕНИЕ СВЧ-КОЛЕБАНИЙ В МАТЕРИАЛАХ...	3
3. КЛАССИФИКАЦИЯ СВЧ-ПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ И ОСНОВЫ ИХ СОЗДАНИЯ.....	5
4. НЕФЕРРОМАГНИТНЫЕ СВЧ-ПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ.....	8
4.1. Однофазные поглощающие материалы.....	8
4.2. Гетерофазные поглощающие материалы.....	8
5. ФЕРРОМАГНИТНЫЕ СВЧ-ПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ.....	19
5.1. Свойства и технологические особенности объемных поглощающих покрытий из железа.....	22
5.2. Физические свойства сплава кантал и технологические особенности изготовления из него поглощающих покрытий.....	23
5.3. Сплав альсифер. Свойства и технологические особенности изготовления поглощающих покрытий на его основе.....	26
6. ЯВЛЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛАХ.....	35
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	36
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	37

ВВЕДЕНИЕ

В технике ЭВП широко применяются материалы, поглощающие СВЧ-колебания. Требования к ним возрастают по мере увеличения мощности приборов. В связи с этим актуальное значение имеют изучение поведения известных материалов в электромагнитных полях СВЧ-диапазона, оптимизация состава, структуры, свойств, технологии получения, а также создание новых высокоэффективных поглощающих материалов.

В настоящем обзоре рассмотрена информация по структуре, свойствам и технологии изготовления немагнитных и ферромагнитных поглощающих СВЧ-колебания материалов, применяемых для изготовления внутривакуумных поглотителей энергии. Изложены основные требования, предъявляемые к поглощающим материалам, описаны параметры, характеризующие поглощение СВЧ электромагнитной энергии в них. Дана классификация материалов, изложены физико-химические основы создания. Описаны явления поглощения энергии в новых высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалах.

1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К МАТЕРИАЛАМ ДЛЯ ВНУТРИВАКУУМНЫХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ СВЧ-ЭНЕРГИИ

Материалы, поглощающие СВЧ-излучения и используемые для изготовления внутривакуумных поглотителей энергии (т.е. размещенных в вакуумной части СВЧ-приборов), предназначены для следующих целей: полного поглощения сигнала, уменьшения уровня отраженного, избирательного подавления нежелательных видов колебаний. При всем разнообразии конструкций, назначения поглотителей в приборах, особенностей структуры каждого из поглощающих материалов все они применяются или в виде объемных деталей, или в виде покрытий (тонкопленочных и объемных), наносимых на диэлектрические подложки или металлические поверхности СВЧ-тракта / 1-5 /.

Необходимость внесения дополнительных потерь с применением поглощающих материалов, локализованных на определенном участке замедляющей структуры, с целью обеспечения заданных ВЧ-параметров и повышения устойчивости работы прибора теоретически обоснована для ЛЕВ / 6,7 /. Большим количеством экспериментальных данных на приборах разного типа (ЛЕВ, ЛОВ, клистронах, магнетронах и др.) подтверждено, что поглотители энергии являются одним из элементов управления их выходными параметрами.

Получение эффективных технологически стабильных поглотителей с высокой повторяемостью их параметров, со своей стороны, во многом предопределяется выбором материала, технологией изготовления поглотителя, анализом возможных

погрешностей и оптимизацией каждой из технологических операций, а также установлением поля допусков на них [I-3, 8]. Требования к материалам-поглотителям [I,3,4, 9-12] не ограничиваются главным - способностью эффективного поглощения ими СВЧ-энергии и высокой теплопроводностью, определяющей отвод поглощенной энергии. Для материалов, предназначенных для изготовления внутривакуумных поглотителей, обязательны также структурная стабильность, низкие значения упругости паров, высокие предельные температуры применения. От них требуются низкий уровень газовыделения, обеспечивающий их работу в приборе без ухудшения вакуума, возможность прочного соединения с другими материалами сваркой, пайкой для объемных поглощающих деталей и хорошее механическое сцепление с материалом подложки для покрытий.

Одно из основных требований к поглотителям - обеспечение минимального отражения падающей волны от границы раздела двух сред: свободного пространства, в котором распространяется электромагнитная волна, и материала, в котором она поглощается. Уровень отражения обусловлен степенью несоответствия волновых сопротивлений этих двух сред: чем больше несоответствие, тем больше величина коэффициента отражения R . Для достижения малых величин R необходимо осуществить согласование поглотителя со средой, в которой распространяется волна, т.е. добиться равенства эффективного входного сопротивления поглотителя и волнового сопротивления свободного пространства. При этом основная задача состоит в том, чтобы обеспечить разумный компромисс между двумя противоречивыми параметрами - коэффициентом поглощения и коэффициентом отражения [7,9]. Она решается не только за счет оптимизации конструкции узла-поглотителя, но и во многом определяется выбором поглощающего материала и его структурой.

2. ПАРАМЕТРЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ПОГЛОЩЕНИЕ СВЧ-КОЛЕБАНИЙ В МАТЕРИАЛАХ

Поведение поглощающих СВЧ-колебания материалов может быть охарактеризовано с привлечением двух комплексных параметров - диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостей [9]: $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$; $\mu = \mu' - i\mu''$.

Комплексные параметры ϵ и μ определяют накопление и рассеяние электромагнитной энергии в среде. Потери энергии обусловлены наличием мнимых ϵ'' и μ'' составляющих диэлектрической и магнитной проницаемостей. Если значениями ϵ'' и μ'' нельзя пренебречь, то материал (среда) обладает свойством поглощать электромагнитные колебания, при этом энергия электромагнитного поля переходит в другие виды, например, выделяется в материале в виде джоулева тепла.

В общем случае, согласно работе [9], при частоте ω величина средней поглощенной энергии Q_1 в металлической частице объемом V_1 может быть определена из формулы

$$Q_1 = \frac{\omega}{2} V_1 (\alpha_E'' + \alpha_M'') |E|^2,$$

где α_E'' и α_M'' - мнимые составляющие электрической и магнитной поляризуемости частицы; E - электрическое поле рассеиваемой волны.

Среднее количество тепла Q , выделяющееся в 1 с в 1 см^3 вещества, при воздействии на него электромагнитного поля с амплитудами напряженностей полей, равными E и H , определяется в СГС по формуле [9]:

$$Q = \frac{\omega}{4\pi} (\varepsilon'' E^2 + \mu'' H^2).$$

Наряду с ε и μ используют также следующие параметры:

1. Тангенс угла диэлектрических потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}.$$
 (2.1)

В работе [9] показано, что в общем случае:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\text{Энергия, поглощенная за половину периода}}{\text{Средняя энергия, накопленная за половину периода}},$$
 (2.2)

а в случае, если потери определяются удельной проводимостью материала σ ,

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\text{Плотность тока проводимости}}{\text{Плотность тока смещения}}.$$
 (2.3)

2. Коэффициент добротности диэлектрика

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta}.$$
 (2.4)

3. Тангенс угла магнитных потерь $\operatorname{tg} \delta_m$, который можно описать аналогично выражению (2.2). Так как $\operatorname{tg} \delta$ является в общем случае функцией частоты ω , то можно сказать, что один и тот же материал может обладать свойствами как проводника ($\operatorname{tg} \delta \gg 1$), так и диэлектрика ($\operatorname{tg} \delta \ll 1$) в зависимости от частоты.

4. Комплексное волновое число (или постоянная распространения) $k = k' - ik''$ или $k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon \mu}$, где k'' - коэффициент затухания, c - скорость света.

При $\varepsilon'' = \mu'' = 0$ величина k - действительное число и электромагнитная волна при распространении в среде не затухает.

Если волна распространяется в диэлектрике ($\operatorname{tg} \delta \ll 1$), то

$$k' \approx \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon' \mu'}; \quad k'' \approx k' \frac{\operatorname{tg} \delta}{2} = \frac{\sigma}{2} Z_0 \sqrt{\frac{\mu'}{\varepsilon'}},$$

где $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0}$ - волновое сопротивление свободного пространства.

Если волна распространяется в проводнике ($\operatorname{tg} \delta \gg 1$),

$$k' \approx k'' \approx \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon' \mu'} \sqrt{\frac{\operatorname{tg} \delta}{2}} = \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \sigma}{2}}.$$

Из этой зависимости следует, что в идеальном проводнике ($\sigma \rightarrow \infty$) коэффициент затухания неограниченно возрастает и, следовательно, электромагнитная волна в глубь проводника не проходит.

Расстояние от поверхности материала, на котором волна затухает в e раз, называется глубиной проникновения $\Delta = \frac{1}{k''} = \sqrt{2 / \omega \mu \sigma}$.

Описанное явление называют поверхностным эффектом (скин-эффектом).

5. Волновое сопротивление (им часто пользуются при расчете коэффициента отражения при падении электромагнитной волны на границу раздела двух сред):

$$Z = \sqrt{\frac{\mu \mu_0}{\varepsilon \varepsilon_0}} = \frac{\omega \mu \mu_0}{k} = \frac{k}{\omega \varepsilon \varepsilon_0}.$$

Для диэлектриков

$$Z = Z_0 \sqrt{\frac{\mu'}{\epsilon'}} \left(1 - i \frac{tg \delta'}{2} \right).$$

Для проводников ($tg \delta' \gg 1$)

$$Z = (1+i) \sqrt{\frac{\omega \mu \mu_0}{2\delta}}.$$

При $\delta \rightarrow \infty$ Z металла - величина бесконечно малая.

6. Показатель преломления (характеризует отношение длины волны в вакууме к длине волны в материале):

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda} = \sqrt{\epsilon' \mu'}; \quad n = n' - i n''.$$

Величина n связана с k соотношением $k = \frac{\omega}{c} n$.

3. КЛАССИФИКАЦИЯ СВЧ-ПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ И ОСНОВЫ ИХ СОЗДАНИЯ

Как видно из рассмотрения приведенных в разд.2 зависимостей, наиболее универсальными параметрами для описания взаимодействия электромагнитных волн СВЧ-диапазона с материалами являются диэлектрическая ϵ и магнитная μ проницаемости. При создании поглотителя необходимо стремиться к тому, чтобы основной вклад в величины эффективных проницаемостей материала давали их мнимые составляющие, значения их были высокими и сохранялись во всем диапазоне рабочих частот и температур. По характеру взаимодействия с электромагнитными СВЧ-полями поглощающие материалы можно разделить на две основные группы [1,4,9]:

- неферромагнитные, взаимодействующие только с Е-полями, имеющие только электрические потери;
- ферромагнитные, взаимодействующие с Е- и Н-полями, имеющие электрические и магнитные потери.

Необходимость создания для мощных ЭВП эффективных материалов, поглощающих СВЧ-колебания и удовлетворяющих целому комплексу требований, предъявляемых к ним в приборах, привела к разработке сложных композиционных поглощающих материалов внутри каждой из этих двух групп. К настоящему времени наряду со ставшими уже традиционными однофазными проводниковыми и полупроводниковыми материалами (простыми веществами, сплавами и химическими соединениями) разработан целый ряд гетерофазных многокомпонентных магнитных и немагнитных поглощающих материалов с заданным сочетанием распределенных по их объему фаз: проводящей, полупроводниковой, диэлектрической. На рис.3.1 представлена условная классификация существующих типов однофазных и гетеро(двух и более) фазных внутривакуумных поглощающих СВЧ-излучения материалов с сочетанием фаз: металл-диэлектрик, сплав-диэлектрик, полупроводник-диэлектрик, металл (сплав)-полупроводник-диэлектрик и т.п.

При создании материалов, поглощающих СВЧ-колебания, необходимо учитывать особенности каждого из классов материалов: проводников, полупроводников, диэлектриков, являющихся составной частью (фазой) поглощающего материала [9].

В первую очередь они различаются по уровню удельного электросопротивления ρ , механизму проводимости и, следовательно, механизму поглощения в

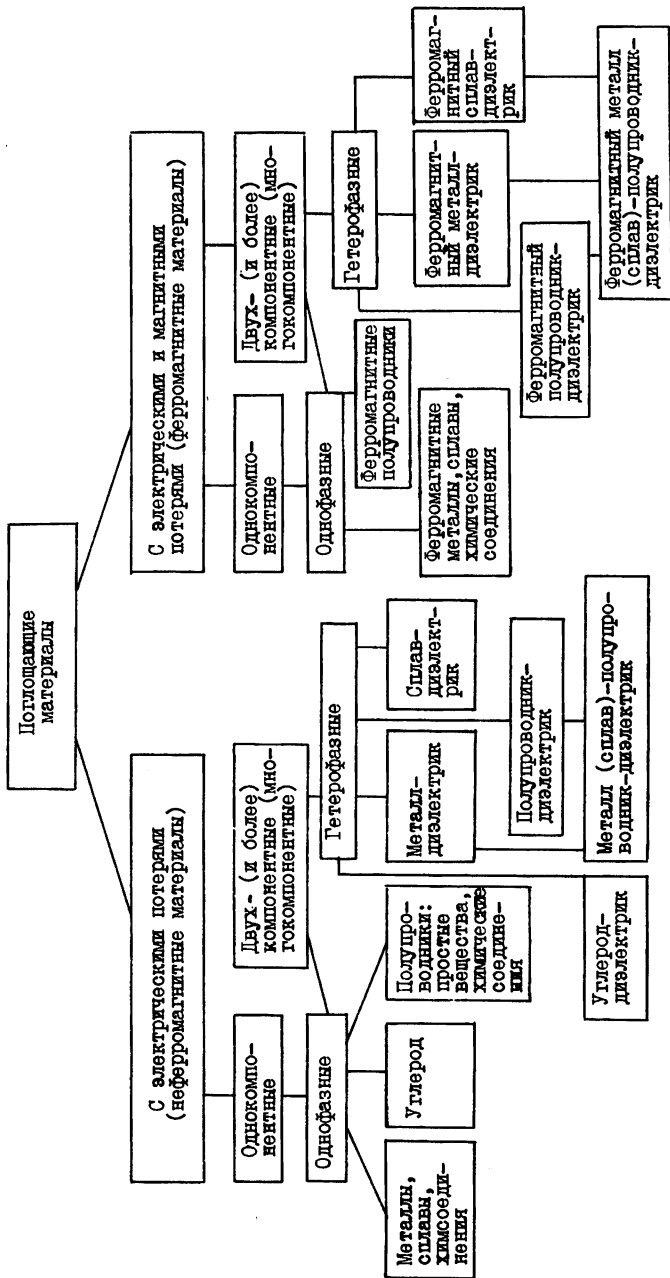


Рис. 3.1. Классификация СВЧ-поглощающих материалов

них энергии. Как известно, проводники имеют $\rho = 10^{-8} + 10^{-5}$ Ом·м, полупроводники - $\rho = 10^{-6} + 10^8$ Ом·м, диэлектрики - $\rho = 10^7 + 10^{16}$ Ом·м.

Поглощение СВЧ-колебаний в немагнитных проводниках осуществляется за счет рассеяния в них энергии в основном на электронах проводимости, а также на дефектах решетки. В ферромагнитных проводниках поглощение происходит более эффективно за счет дополнительно возникающего в них внутреннего магнитного поля, приводящего в свою очередь к дополнительному рассеянию энергии на вращающихся электронных спинах [4,9]. Однако в том и другом случае поглощение в проводниках ограничено весьма малой величиной скин-слоя.

Идеальные диэлектрики прозрачны для СВЧ электромагнитных волн. В реальных диэлектриках поглощение энергии эквивалентно диэлектрическим (а для ферромагнитных диэлектриков и магнитным) потерям, которые обусловлены целым рядом эффектов: сквозной электропроводностью, совокупностью различных механизмов поляризации, резонансным поглощением, неоднородностью структуры диэлектриков (наличием чужеродных атомов, пор и т.п.).

Поглощение электромагнитной энергии в полупроводниках (которые можно рассматривать как диэлектрики с малым электросопротивлением или как проводники с высоким ρ) складывается из тех же эффектов, что и для диэлектриков, с преобладанием потерь за счет сквозной проводимости. Полупроводники, как правило, характеризуются высокими значениями температурного коэффициента электросопротивления, что обуславливает термическую нестабильность поглощения, и при использовании их для создания эффективных СВЧ-поглощающих материалов требуют применения соответствующих компенсирующих технических решений.

Ограничение, которое связано со скин-эффектом при использовании металлов (металлоподобных компонентов), может быть преодолено, если вместо массивного металлического тела использовать гетерогенный материал со структурой металлодиэлектрика. Тем самым можно существенно повысить эффективный объем поглощения путем увеличения проникновения электромагнитной волны в глубь этого гетерогенного материала за счет применения распределенной по его объему металлической (металлоподобной) фазы с размерами частиц, соизмеримыми с величиной скин-слоя и изолированными друг от друга диэлектрической фазой. Технологически наиболее приемлемым является получение подобной гетерогенной структуры методом порошковой металлургии.

Необходимый фазовый состав в одних случаях может быть заложен уже в исходных компонентах, в других - приобретен в процессе изготовления поглотителя за счет диффузии и химических реакций, протекающих при спекании исходных компонентов.

Гетерофазные композиции, полученные спеканием смеси диэлектриков (керамики) и металлов, имеют общее название - керметы. При создании поглотителей из керметов в качестве диэлектрической фазы могут использоваться не только окислы, но и карбиды, нитриды, бориды, силициды, а также стекла.

Одним из путей повышения эффективности поглощающих материалов является использование в них диэлектриков с высокой теплопроводностью.

В то же время следует отметить, что не существует единого рецепта создания поглощающих СВЧ-энергию материалов, которым можно было бы пользоваться в самых разнообразных практических ситуациях. В каждом конкретном случае

необходимо руководствоваться всем комплексом требований и ограничений, предъявляемых к поглотителю электромагнитного излучения данной конструкции в данном приборе.

4. НЕФЕРРОМАГНИТНЫЕ СВЧ-ПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

4.1. Однофазные поглощающие материалы

В первую очередь к этой группе материалов относятся поглотители из немагнитных металлов, их однофазных соединений и сплавов в виде тонких пленок, нанесенных методом испарения в вакууме или катодным распылением на диэлектрическую подложку. Особенности структуры, свойства, а также технология получения подобных пленок, используемых в СВЧ-технике, описаны в монографии [12].

В работе [2] рассмотрены применение в конструкциях узлов-поглотителей СВЧ-энергии и технология получения внутривакуумных пленочных поглотителей: из скандия, титана, ванадия, хрома, родия [13], тантала и нитрида тантала [14], сплава тантала с алюминием [15], карбида титана [16] и др.

Традиционным материалом для поглотителей энергии в электровакуумных СВЧ-приборах является углерод [2,17], который по своим свойствам может рассматриваться как вырожденный проводник.

Сведения об углеродных пленочных поглотителях, способах их изготовления и технологическом оборудовании, систематизированные по данным отечественной и зарубежной печати за 1950-1982 гг., подробно изложены в работе [17]. В ней же рассмотрены физико-химические и электрические свойства графита как поглощающего компонента материала поглотителя, даны физико-химические основы процессов получения пироуглеродных пленок при термическом разложении углеводородов. Приведено описание углеродных пленочных поглотителей в конструкциях электровакуумных СВЧ-приборов [2], дан анализ полей допусков на технологические параметры пироуглеродных поглотителей для ЛБВ [8].

Следует отметить, что во всех случаях применение углерода в качестве материала для поглотителей создает проблему повышенного газоотделения в вакууме. Однофазные объемные поглотители из полупроводниковых материалов, например германия или кремния [2,18], обеспечивают низкий уровень газоотделения. Но их использование ограничено, так как эти материалы характеризуются сильной температурной зависимостью резистивности, характерной для полупроводников.

4.2. Гетерофазные поглощающие материалы

Материалы для объемных поглотителей СВЧ-энергии со структурой углерод-диэлектрик, полученные посредством насыщения пористой керамики жидкими углеводородсодержащими веществами с последующей карбонизацией, нашли применение внутри вакуумных оболочек СВЧ-приборов [2]. Это дало возможность рассеивать большие уровни энергии по сравнению с пленочными поглотителями за счет значительно развитой поверхности углеродного покрытия. Технология изготовле-

ния их достаточно хорошо отработана и описана [2,3,19,20]. Используются пористая аллюмооксидная, аллюмосиликатная, магнивоаллюмосиликатная, бериллиевая керамики, их пропитка осуществляется растворами сахарозы, лактозы, глюкозы. Варьируя пористостью керамики, концентрацией раствора углеродосодержащего вещества, режимами пропитки и карбонизации, можно регулировать объемное электросопротивление материала поглотителя и уровень его поглощающих свойств. Среди указанных керамических материалов бериллиевая керамика вплоть до температуры 800°C обладает повышенной теплопроводностью.

На рис.4.1 приведены сравнительные зависимости теплопроводности от температуры для плотной керамики из Al_2O_3 и пористой из BeO (пористость составляет 25,1 %); на рис.4.2 - свойства углеродной поглощающей керамики на основе BeO (пористость, удельное объемное электросопротивление) в зависимости от температуры ее обжига в пределах 1200-1600°C.

Результаты даны для случая насыщения 50%-м раствором сахарозы и последующей карбонизации

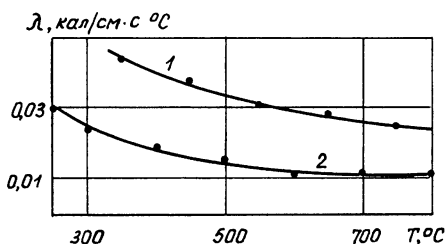


Рис.4.1. Зависимость теплопроводности пористой бериллиевой и плотной спеченной корундовой керамики от температуры:
1 - керамика из BeO (пористость 25,1 %);
2 - керамика из Al_2O_3

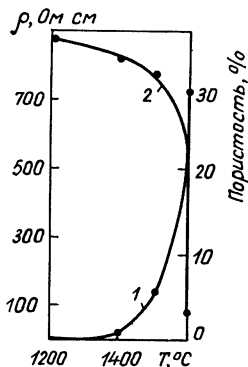


Рис.4.2. Зависимость электросопротивления (1) и пористости (2) углеродной объемной поглощающей бериллиевой керамики от температуры обжига

при температуре 1000°C в среде водорода (т.р. -15 + -20°C).

Авторами статьи [20] разработана технология изготовления объемного углеродного поглотителя на основе керамики из BeO с металлизационным покрытием под пайку твердыми припоями ПСр72 и медью. Она заключается в следующем:

- обжигают керамику при температуре 1200+1600°C (в зависимости от требуемого удельного сопротивления);
- металлизуют керамику $Mo-Mn$ пастой с добавками при температуре 1280+1350°C в формирующем газе;
- насыщают керамику в 60%-м растворе сахарозы;
- карбонизируют сахарозу в сухом водороде при температуре 1000°C.

К недостаткам бериллиевой керамики относятся прежде всего ее токсичность, что создает дополнительные сложности при работе с ней и требует специальных мер по организации безопасных условий труда. Кроме того, поглощающие материалы на основе любой пористой керамики характеризуются повышенным газоотделением в вакууме. При их использовании трудно обеспечить хорошую воспроизводимость поглощающих свойств от поглотителя к поглотителю.

Проблема стабильности свойств поглотителя ограничивает и применение поглощающих материалов на основе двухкомпонентных смесей, где в качестве проводящей фазы берется карбид кремния (полупроводник). Массовое содержание его в таких поглотителях, %: 3+10 [21], 50+80 [22], 5, 20, 60 [23]. В качестве диэлектрической фазы в смеси с карбидом кремния рекомендуются форстерит, высокоглиноземная керамика, окись бериллия или алюминия [3, 21-23].

Значительным шагом вперед в разработке поглотителей для мощных ЭВП явилось создание поглощающего материала типа полупроводник-диэлектрик с заданными большими значениями диэлектрических потерь и электропроводности за счет регулирования свойств керамики путем термодиффузии в нее ионов переменной валентности и создания второй фазы с повышенной проводимостью. В качестве иона, способного изменять валентность и удовлетворяющего комплексу требований, необходимых для синтеза материалов с определенными технологическими свойствами, выбран титан в виде оксида TiO_2 [24].

В табл. 4.1 приведены структурные превращения TiO_2 в зависимости от температуры и среды обработки [25]; в табл. 4.2 - сравнительные данные по структурным изменениям TiO_2 (в виде порошка и прессованных таблеток) после спекания в среде сухого водорода в интервале температур 800+1600°C.

Таблица 4.1

Структурные превращения TiO_2 в зависимости от условий термообработки

Температура отжига, °C	Окислительная среда	Вакуум $10^{-4} + 10^{-5}$, мм рт.ст.	Водород	
			влажный	сухой
700	TiO_2 (анатаз)	-	-	-
800	TiO_2 "	-	-	TiO_2 (анатаз, рутил)
900	TiO_2 "	TiO_2 (анатаз)	TiO_2 (анатаз)	TiO_2 (рутил)
1000	TiO_2 (рутил)	TiO_2 (анатаз, рутил)	TiO_2 (рутил)	Ti_7O_{13}
1100	TiO_2 "	TiO_2 (рутил)	TiO_2 "	Ti_4O_7
1200	TiO_2 "	TiO_2 "	TiO_2 "	Ti_4O_7
1300	-	TiO_2 "	TiO_2 "	Ti_3O_5
1400	-	TiO_2 "	TiO_2 "	Ti_3O_5
1500	-	TiO_2 "	TiO_2 "	Ti_3O_5
1600	-	TiO_2 " Ti_3O_5	Ti_3O_5 -	Ti_3O_5 -

Структурные изменения TiO_2 в порошке и таблетке после спекания в сухом водороде

Температура отжига, °С	Кристаллическая структура, полученная при съёмках		
	порошка	с поверхности таблетки	
		до шлифовки	после шлифовки 0,5 мм
800	TiO_2 (анатаз, рутил)	-	-
900	TiO_2 (рутил)	-	-
1000	Ti_7O_{13}	-	-
1100	Ti_4O_7	-	-
1200	Ti_4O_7	Ti_5O_9	Ti_5O_9
	Ti_3O_5	-	-
1300	Ti_3O_5	$Ti_3O_5^*$	Ti_4O_7
1400	Ti_3O_5	Ti_3O_5	Ti_3O_5
1500	Ti_3O_5	Ti_3O_5	Ti_3O_5
1600	Ti_3O_5	Ti_3O_5	Ti_3O_5

* Начальная стадия восстановления.

Количественным изменением соотношения алюминий- и титаносодержащих фаз, а также регулированием степени нестехиометрии (восстановления) окислов титана удалось разработать серии материалов типа КТ / 24-27 /. В табл. 4.3 и 4.4 и на рис. 4.3 и 4.4 даны свойства корундотитанатной поглощающей керамики разных составов.

Таблица 4.3

Значения потерь в поглощающих материалах из корундотитанатной керамики

Марка материала*	$tg\delta \cdot 10^4$	ϵ
КТ-1	80	10,5
КТ-3	250	11,3
КТ-5	500	11,5
КТ-8	750	11,7
КТ-30	4000	25

* Цифры обозначают массовое содержание TiO_2 в шихте в процентах.

Свойства корундотитанатной керамики в зависимости от исходного состава

Массовое содержание TiO_2 , %	γ , г/см ³	σ изг., кгс/мм ²	$\lambda \cdot 10^8$, $\frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}}$
30	3,80	25	16
40	3,72	~20	10
50	3,50	~15	6
70	3,25	8	3
80	2,85	6	2

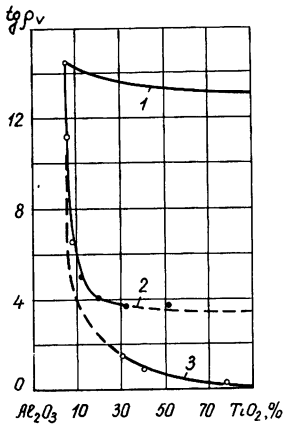


Рис.4.3. Зависимость электросопротивления корундотитанатной керамики от массовой концентрации TiO_2 в шихте и степени восстановления TiO_2 в процессе спекания:
 1 — $Al_2O_3 - TiO_2$; 2 — $Al_2O_3 - Ti_3O_5 - Ti_4O_7$;
 3 — $Al_2O_3 - Ti_3O_5$

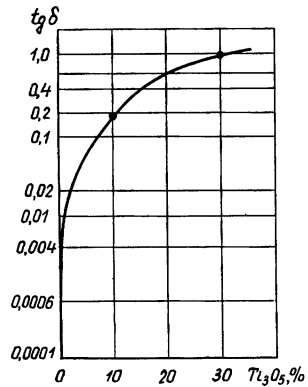


Рис.4.4. Диэлектрические потери в корундотитанатной керамике в зависимости от массовой концентрации Ti_3O_5

Примеры использования этих материалов в конструкциях СВЧ-поглотителей для ЛБВ с ЗС типа связанных резонаторов приведены в работах [26,27]. Объемный поглотитель из материала марки КТ-30 в ЗС спирального типа обеспечил затухание 20 дБ на одну замедленную волну и хорошее согласование с ЗС (КСВН менее 1,05 в полосе шириной 30%), в ЗС типа связанных резонаторов (затухание 60 дБ при КСВН менее 1,15 в полосе шириной 20%). Применение поглотителей из материалов марок КТ (КТ-1, КТ-3, КТ-5, КТ-8) с меньшим уровнем затухания в узкой полосе частот позволило уменьшить величину отраженного от локального поглотителя сигнала в ЗС типа цепочки связанных резонаторов и способствовало получению устойчивого усиления до 60 дБ в двухсекционной ЛБВ.

Из серии этих материалов наиболее универсальными свойствами обладает материал КТ-30 / 26 /:

- ρ_v для этого материала при 100°C составляет 15+150 Ом·см в зависимости от состава восстановительного газа в печи обжига;
- $tq\delta$ при комнатной температуре в сантиметровом диапазоне длин волн около 0,4;
- теплопроводность при 20°C составляет $(15+20) \cdot 10^{-3} \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{°C}}$ (на порядок выше, чем у пористых объемных поглотителей на основе аллюмооксидной керамики);
- механическая прочность при изгибе равна 3000+3500 кгс/см², т.е. как у вакуумно-плотной керамики из окиси алюминия;
- газовыделение в интервале температур 20+900°C примерно такое же, как у вакуумно-плотной керамики 22ХС в тех же условиях.

Керамика КТ-30 практически не содержит стеклофазы, остаточная закрытая пористость не превышает 5 %, благодаря небольшим добавкам окислов двухвалентных Me и режиму термической обработки обладает сравнительно мелкокристаллической структурой и высокой прочностью.

Спекание осуществляется в восстановительной среде контролируемого состава при температуре 1500+1600°C. Материал можно получать горячим литьем под давлением, прессованием, литьем пленки и т.д. Изделия из материала КТ-30 можно металлизировать и затем паять с металлом твердыми припоями, а также методами непосредственной пайки.

Основным недостатком этого эффективного широко применяемого поглощающего материала является невысокая термостабильность поглощающих свойств, что обусловлено полупроводниковой природой поглощающей фазы.

Одним из технологических вариантов получения поглощающего материала на основе корундтитанатной керамики является использование в качестве ингредиентов титаната алюминия Al_2TiO_5 и Al_2O_3 . В патентах / 3,10 / заявляется непористая поглощающая керамическая масса, которая хорошо металлизирована, не расслаивается, способна выдержать высокие температуры без растрескивания, не абсорбирует газы, прочна и не создает газотделения. Состав материала (в процентах по массе) следующий: 77-80 Al_2O_3 и 20 Al_2TiO_5 , добавка в количестве не более 4 SiO_2 ; возможны и другие пропорции ингредиентов, например: 90 Al_2O_3 и 10 Al_2TiO_5 ; 7 Al_2O_3 и 93 Al_2TiO_5 . Материал с содержанием 90 % Al_2O_3 имеет один недостаток: величина вносимого им удельного затухания мала. Поглощающий материал с содержанием 90-93 % Al_2TiO_5 и 7 % Al_2O_3 обладает максимальным удельным содержанием, однако его пористость может превышать 7 %. Но и в этом случае он имеет преимущество перед пористой науглероженной керамикой, минимальная пористость которой составляет около 20 %. Заявляемый материал при содержании в нем ≤ 20 % Al_2TiO_5 практически имеет нулевую пористость.

Образования титаната алюминия можно достичь спеканием в среде влажного водорода смеси окислов Al_2O_3 и TiO_2 , взятых в нужной пропорции. Так,

спекание смеси Al_2O_3 (78 %), SiO_2 (2 %) и TiO_2 (10 %) при температуре 1550°C в течение 30 мин во влажном водороде позволило получить поглощающий материал (в процентах по массе) следующего состава: 22,8 Al_2TiO_5 , 2,2 SiO_2 и 75 Al_2O_3 .

Поглощающий материал можно получить спеканием спрессованной смеси соединений Al_2TiO_5 и Al_2O_3 в восстановительной среде. Вместо титаната алюминия предлагается также использовать титанаты магния, кальция, стронция, цинка и кадмия.

В качестве материалов, поглощающих СВЧ-энергию, исследуются и находят применение гетерофазные материалы из спеченной смеси немагнитного металла (сплава) и диэлектриков - керметы [28-31]. Оценка влияния granulометрического состава частиц порошка на поглощение приведена в работе [28].

Диссипация энергии Q в металлических частицах [28] с привлечением положений, рассмотренных в книге [32], составляет:

для малых частот ω , таких, что $\delta \gg a$,

$$Q = \frac{1}{20\pi} \left(\frac{a}{\delta}\right)^2 \omega;$$

для больших частот, таких, что $\delta \ll a$,

$$Q = \frac{9}{16\pi} \frac{\delta}{a} \omega,$$

где a - средний размер частиц, δ - толщина скин-слоя.

Этими соотношениями можно воспользоваться при оценке влияния на поглощение дисперсности частиц. При фиксированном значении частоты ($\omega = const$) для частиц одного и того же материала $\delta = const$. Тогда Q пропорционально a^2 для малых частиц ($\delta \gg a$) и обратно пропорционально a для крупных частиц ($\delta \ll a$). Таким образом, существует промежуточная область (по обе стороны от значения $a = \delta$), в которой величина поглощенной энергии проходит через максимум (рис.4.5).

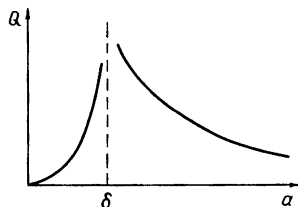


Рис.4.5. Потери Q СВЧ-энергии в металлической частице в зависимости от ее радиуса a

Автор работы [28] выдвигает предположение, что эффективность поглощения в крупных металлических частицах поглощающего материала может быть повышена за счет наличия на их поверхности микронеровностей, роль которых в поглощении в первом приближении такая же, как и роль мелких частиц ($a \ll \delta$). Очевидно, применение частиц осколочной формы увеличивает их поглощающую способность.

В работе [28] проводилось также выявление условий оптимизации поглощающих свойств в композициях типа $Me-Al_2O_3$ за счет выбора металлической составляющей и ее количества.

Объектом исследования служили четыре серии материалов с переменным содержанием компонентов (в процентах по массе): железа и окислов Al_2O_3 (концентрация Fe 10, 20, 30, 40, 50, 55 и 60), никеля и окислов Al_2O_3 , хрома и окислов Al_2O_3 , ниобия и Al_2O_3 (концентрация Ni, Cr, Nb в соответствующих керметах 20, 30, 40 и 50). Поглощение СВЧ-энергии определяли на образцах, помещенных в коаксиальную линию измерительной схемы, позволяющей фиксировать потери энергии в образце с учетом КСВН. Условия эксперимента приближались к случаю, когда $\lambda \gg a \sim \delta$.

На рис.4.6 приведена характерная для широкого диапазона длин волн зависимость величины потерь в материалах от содержания в них металлической составляющей. При содержании металла более 30 % величина потерь резко возрастает. Максимальное значение потерь достигается при содержании хрома, никеля и ниобия 40 %, а железа 50÷55 %. При более высоком содержании этих элементов наблюдаются резкое снижение потерь и интенсивное отражение СВЧ-излучения (аналогичное отражению от массивного металлического образца).

СВЧ-поглощающие свойства спеченных порошковых композиций из смеси хромоникелевой аустенитной стали типа X18H15 с окислом Al_2O_3 приведены в работе [29]. Характер зависимости поглощения от содержания стали аналогичен зависимости для композиции $Fe - Al_2O_3$, но уровень поглощения ниже.

Микроструктурный анализ показал, что при увеличении содержания металлических частиц свыше критических значений наблюдается установление контакта между ними, вследствие чего эффект объемного поглощения практически исчезает, а удельное объемное электрическое сопротивление композиций резко снижается (рис.4.7) [9].

Эффект повышенных значений максимального поглощения в композиции с железом по сравнению с другими металлами объясняется тем, что электрические потери в железе дополняются значительными магнитными потерями.

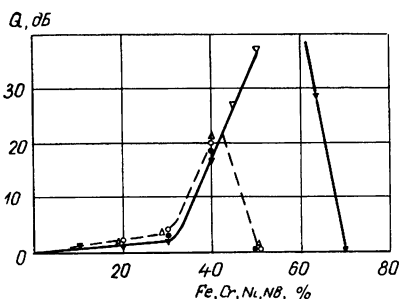


Рис.4.6. Зависимость потерь Q СВЧ-энергии в композиции типа $Me-Al_2O_3$ от массового содержания в ней Me :
 — ∇ — Fe , — — — — — Ni, Cr, Nb

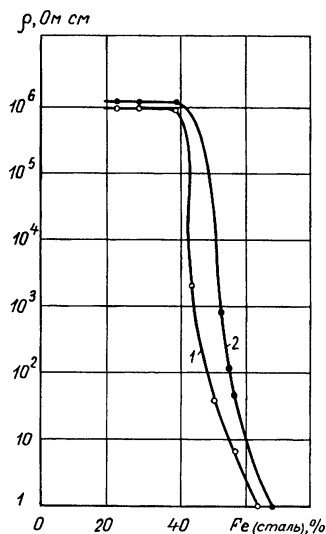


Рис.4.7. Зависимость удельного электросопротивления ρ от массового содержания металлической составляющей в материалах типа металл-окисел:
 1 — $Fe - Al_2O_3$; 2 — аустенитная сталь — Al_2O_3

В патенте [30] описан материал, поглощающий ВЧ-энергию, на основе спрессованной и спеченной смеси порошков вольфрама и окиси алюминия, взятых в соотношении (по массе) 50:50. Для регулирования удельного электросопротивления предложен способ получения поглотителя, состоящий из этапов прессования смеси из порошков вольфрама (49 %), окиси алюминия (50 %) и порошка титана (I %), спекания заготовки при температуре ниже температуры испарения

титана, последующего нагрева твердотельного поглотителя и выдержки при температуре, обеспечивающей удаление части титана и достижение заданного удельного электросопротивления, более высокого по сравнению с электросопротивлением композиции $W-Al_2O_3$. Полученный материал для окончных нагрузок имеет теплопроводность на уровне стали, допускает металлизацию и пайку. Его недостатки: нетехнологичность из-за высокой температуры спекания (до $2000^{\circ}C$) и трудности с равномерным распределением компонентов в массе шликера из-за большой разницы их удельных весов.

Материал объемного поглотителя в виде спеченной смеси порошкового металла с порошком керамики или кварца предложен в патенте [31]. Подходящими металлическими порошками являются хром или молибден. Размер зерен порошка металла должен быть приблизительно равен ожидаемой глубине проникновения электромагнитных волн в тело поглотителя. Керамический порошок может состоять из чистой окиси алюминия или сапфириата. Целесообразно использовать керамику с малой диэлектрической проницаемостью. На частотах 5-6 ГГц материалом поглотителя может служить, например, смесь порошка молибдена с порошком Al_2O_3 , взятых в соотношении (по массе) 1:1. Размер зерен металлического порошка при этом предлагается брать в пределах $2+6$ мкм, а размер зерен керамического порошка - в пределах $2+10$ мкм. Возможно использование порошков металла и керамики одинаковой крупности. Литье в желаемую форму осуществляется с применением биндера (например, поливинилового спирта). Отлитая деталь спекается при $1600+1800^{\circ}C$. Материал можно металлизировать для дальнейшей пайки медью или серебром. Металлизационный слой под пайку (толщиной $10+20$ мкм) получают вакуумным распылением никеля или молибдена.

В работе [33] приведены составы новых вакуумно-плотных высокотеплопроводных керметов на основе бинарных смесей нитрида алюминия с железом и молибденом, предназначенных для применения в качестве объемных СВЧ-поглотителей. Определены основные свойства новых материалов: прочность, теплопроводность, термостойкость, электросопротивление, ТКЛР, окисляемость, диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь.

Возможность получения высокоплотных и стойких к окислению при нагревании на воздухе керметов на основе бинарных смесей нитрида алюминия с железом и молибденом показана в статье [34]. Выбор нитрида алюминия в качестве диэлектрической составляющей обусловлен высоким уровнем технических свойств вакуумно-плотной керамики на его основе, теплопроводностью до 120 Вт/(м·К), рабочей температурой в окислительной среде до $800^{\circ}C$, высокой термостойкостью [35].

Установлено, что в структуре поглотителей составов $AlN-Me$ оптимальные средние размеры частиц железа и молибдена должны находиться в пределах $4+8$ мкм [33].

Проведено экспериментальное изучение электропроводности, диэлектрических и поглощающих (на частоте 10^{10} Гц) свойств системы $AlN-Me$ при различном содержании Fe и Mo (рис.4.8-4.11). Зависимость электропроводности исследуемых керметов от содержания Fe и Mo (см.рис.4.8) имеет типичный характер, присущий композиционным материалам типа металл - диэлектрик. Из рис.4.8 следует, что диапазон объемного содержания Fe и Mo , в пределах которого возможно регулирование поглощающих свойств керметов, ограничен 30 %,

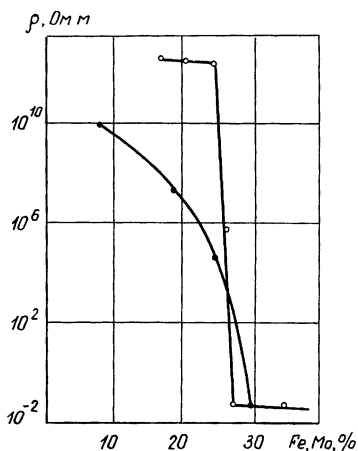


Рис.4.8. Зависимость удельного электросопротивления материалов систем $AlN-Fe$ и $AlN-Mo$ от объемного содержания металлов:
 $\circ - Mo$; $\bullet - Fe$

так как при дальнейшем увеличении содержания металлов электропроводность керметов близка к металлической.

С увеличением содержания металлов коэффициент поглощения L керметов растет до тех пор, пока их электропроводность близка к электропроводности диэлектриков (см.рис.4.9). Почти совпадают значения пороговых концентраций металлов, соответствующих резкому увеличению электропроводности, диэлектрических параметров и уменьшению коэффициента поглощения электромагнитной энергии (см. рис.4.8-4.II). Наибольшими значениями коэффициента поглощения электромагнитной энергии обладают керметы, содержащие (в процентах по объему): 25 (45 % по массе) Fe марки АН-45Ж и 24 (50 % по массе) Mo марки АН-50М (см.рис.4.9). Свойства керметов АН-50М, АН-45Ж и АН-35Ж, разработанных авторами статьи [33], представлены ниже.

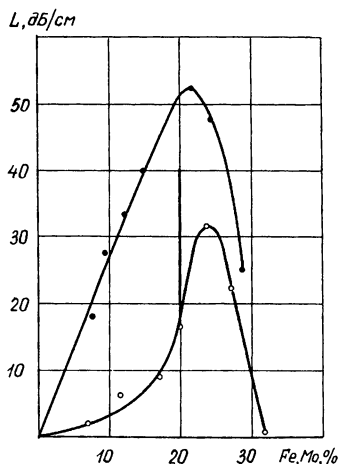


Рис.4.9. Зависимость коэффициента поглощения электромагнитной энергии L материалов систем $AlN-Fe$ и $AlN-Mo$ от объемного содержания металлов:
 $\bullet - Fe$; $\circ - Mo$

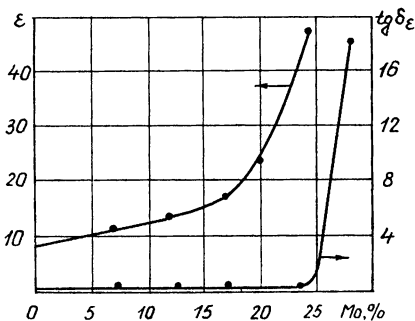


Рис.4.10. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $tg \delta_\epsilon$ материала системы $AlN-Fe$ от объемного содержания молибдена

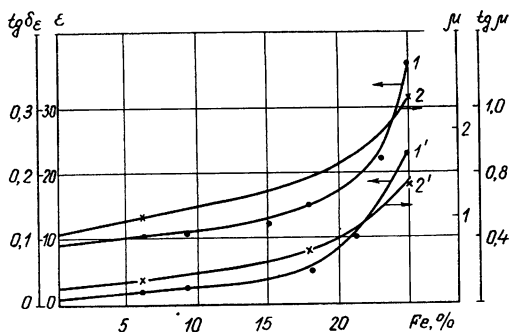


Рис. 4. II. Зависимость диэлектрических (ϵ , $tg \delta \epsilon$) и магнитных (μ , $tg \delta \mu$) свойств материалов системы AN-Fe от объемного содержания железа: 1 - ϵ ; 2 - μ ; 1' - $tg \delta \epsilon$; 2' - $tg \delta \mu$

	АН-50М	АН-45Ж	АН-35Ж
Относительная плотность.....	99,6	99,4	99,5
Водопоглощение.....	0,02	0,04	0,03
Коэффициент теплопроводности при 20°C, Вт/(м·К), не менее.....	70	50	60
Предел прочности при статическом изгибе, МПа, не менее.....	400	350	300
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м, при температуре, °C:			
100.....	10^{12}	10^3	10^6
200.....	10^{11}	10^3	$5 \cdot 10^5$
300.....	10^9	10^3	$2 \cdot 10^5$
400.....	$5 \cdot 10^8$	10^3	10^5
500.....	$5 \cdot 10^7$	10^3	$7 \cdot 10^4$
Диэлектрическая проницаемость на частоте 10^{10} Гц при 20°C.....	48	35	12
Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 10^{10} Гц при 20°C	0,005	0,25	0,03
Максимальная рабочая температура в окислительной среде, °C.....	600	800	800

Кермет АН-50М рекомендован для объемных поглотителей, работающих в вакуумной части ЭВП, а кермет АН-45Ж - для согласованных коаксиальных оконечных нагрузок измерительных приборов. Для согласованных волноводных оконечных нагрузок ($K_{СВН} \leq 1,1$) предложен кермет АН-35Ж. Изделия из этих керметов можно получать методом горячего литья под давлением, металлизировать пастами на основе вольфрама или молибдена.

Условия подготовки шихты и спекания изделий описаны в работе [34].

В заключение следует отметить, что в последние годы много сделано в направлении совершенствования существующих и разработки новых эффективных поглощающих материалов не только за счет применения керамики с высокой теплопроводностью (окиси бериллия, нитрида алюминия), но и за счет использования новых гетерофазных составов проводящей составляющей поглотителя, равномерное распределение которой в диэлектрической составляющей материала обеспечивает его высокие свойства, стабильные в широком интервале температур.

5. ФЕРРОМАГНИТНЫЕ СВЧ-ПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Долгое время существовало мнение, что в поглотителях, особенно тех, которые рассчитаны на поглощение интенсивных излучений, нежелательно использование магнитных материалов из-за сильной нелинейной зависимости их параметров от величины магнитного поля, ярко выраженных температурных и частотных зависимостей, наличия точки Кюри [9]. Однако опыт работы с поглотителями на основе ферромагнитных материалов / однофазных металлических, а также гетерофазных типа ферромагнитный металл (сплав) - диэлектрик / показал несостоятельность такой категоричности суждений.

Ферромагнитные материалы используются во внутривакуумных поглотителях СВЧ-энергии в виде тонкопленочных покрытий, объемных массивных деталей, но наибольшее применение они нашли в виде объемных поглощающих покрытий. При этом искажение основных характеристик поля, как установлено экспериментами, можно предотвратить, регулируя расположение поглотителя в СВЧ-тракте по отношению к силовым линиям магнитного поля в приборе [4,36], частотные зависимости основных параметров - сгладить введением в порошковые композиции частиц разного гранулометрического состава, а температурные - применением ферромагнитных материалов с высокой температурой магнитного превращения.

Во внутривакуумных поглотителях энергии используются следующие ферромагнитные материалы с высокими значениями точки Кюри^{*}: металлы - железо, никель, кобальт; сплавы на основе железа - магнитная сталь (ферритная), ковар, кантал, алсифер. Эти материалы в большинстве случаев в сопоставимых условиях имеют более высокую поглощающую способность по сравнению с немагнитными материалами.

В табл.5.1 приведены результаты измерения ослабления для ферромагнитных покрытий одинаковой толщины, нанесенных на медь, из порошков Fe, смеси по-

Таблица 5.1

Среднее ослабление для покрытий на меди при частоте 1350 МГц

Тип покрытия	Ослабление для покрытия толщиной 0,18 мм на центральном проводнике коаксиальной линии, дБ/м
Порошок вольфрама (6 мкм).....	3,4
Порошок железа (< 147 мкм).....	3,8
Порошок карбонильного железа (6 мкм).....	15,0
Порошок карбонильного железа (6 мкм), подвергнутый часовой выдержке в водороде при 300°C и перед покрытием размолотый и просеянный через сито с размером отверстия 44 мкм.....	4,2
Порошок ковара (< 44 мкм).....	5,9
Смесь равных порций порошкового кобальта (< 44 мкм) и порошкового железа (6 мкм).....	4,8

^{*} В данной работе не рассматриваются ферромагнитные окиси, используемые в невзаимных ферритовых поглотителях СВЧ-энергии, так как их применение в ЭВП ограничено [2].

рошков Co и Fe , порошка кобальта [1]. Для сравнения здесь же представлены данные для покрытия из порошка немагнитного металла-вольфрама. Покрытие из вольфрама дает ослабление примерно в 4,4 раза меньше, чем покрытие из железа, размер частиц и электросопротивление которого приблизительно такие же, как и у покрытия из вольфрама.

Из рассмотрения поглощающих свойств объемных композиций $Me-Al_2O_3$, где $Me - Fe, Ni, Cr, Nb$, сталь марки X18H15, а также $APN-Me$, где $Me - Fe, Mo$, видно, что эффект максимального поглощения для композиций с железом выше по сравнению с другими композициями, изученными в работах [28, 29, 33], в 1,8-2 раза.

Для получения ферромагнитных тонкопленочных СВЧ-поглотителей используют технологии катодного напыления, термического напыления в вакууме, а также электролитическое осаждение [1,2,12]. Примеры использования металлопленочных ферромагнитных поглотителей из Fe, Ni, Co , кобальта в конструкциях внутривакуумных приборов даны в обзоре [2]. Есть сведения о применении в приборах объемных поглотителей из пропитанной никелем пористой керамики [10], объемного поглотителя [2,37] следующего состава (в процентах по массе): 45 порошка никеля, 10 окиси циркония, 45 керамики с содержанием в ней 98 алунда и 2 талька.

При использовании в ЭВМ ферромагнитных объемных СВЧ-поглощающих покрытий перед материаловедами и технологами особенно остро встали проблемы придания механической прочности покрытию, обеспечения его сцепления с подложкой, изучения зависимости стабильности (воспроизводимости) свойств покрытия от его физической структуры, в том числе поверхностной шероховатости и внутренней

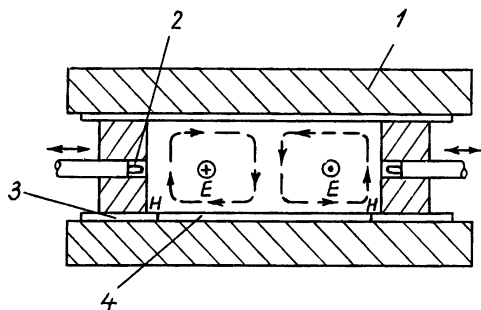


Рис.5.1. Универсальный резонатор СВЧ-диапазона для измерения потерь в ферромагнитных металлах и сплавах и в покрытиях на их основе:

1 - медная пластина; 2 - петля связи; 3 - прокладка; 4 - исследуемый материал

индекс потерь выражается как $\sqrt{\rho_1 \mu_1}$ (ρ_1 - объемное удельное электросопротивление поглотителя относительно меди; μ_1 - эффективная магнитная проницаемость поглотителя относительно меди).

Индекс потерь для покрытий составляет $K\sqrt{\rho_1 \mu_1}$, где K - коэффициент, зависящий как от внутренней структуры покрытия, так и от его поверхностной

структуры покрытия. В работе [4] предложен универсальный разборный резонатор СВЧ-диапазона для исследования физических свойств ферромагнитных металлов и сплавов, а также поглощающих покрытий из них (рис.5.1). Для сравнительной характеристики поглощающих покрытий вводится параметр, обозначенный как индекс потерь или коэффициент, на который добротность медного резонатора Q_0 уменьшается после покрытия его поверхности поглощающим материалом.

Для гладких твердых пластин достаточной толщины индекс потерь

шероховатости. Экспериментально обнаружено, что индекс потерь многих покрытий значительно выше индекса потерь для гладких твердых пластин из тех же материалов. Поэтому способ оценки поглощающих покрытий может быть использован не только для исследований, но и для отработки технологии получения эффективных и стабильных поглощающих покрытий, в которых обеспечивается $K > 1$.

Работа устройства, предложенного автором статьи [4], осуществляется по принципу плоскопропускного фильтра с петлями связи, введенными внутрь резонатора через специальные переходы. Выбранный тип волны (круглой электрической) — TE_{01} . Устройство достаточно чувствительно, чтобы разграничить по-разному обработанные медные поверхности ($Q_0 \sim 20000$) и в то же время обеспечить измерение экспериментальной шайбы с высоким коэффициентом потерь. При этом желательно, чтобы диаметр шайбы был значительно меньше, чем размер резонатора.

В табл. 5.2 приведены значения магнитных проницаемостей μ_1 для ряда поглощающих материалов по результатам измерений потерь на гладких твердых пластинках из этих материалов в экспериментальном резонаторе (измерения проводились при комнатной температуре, частоте $\nu = 10,5$ ГГц и нулевом смещении поля), а также величины β_1 для исследованных материалов, использованные при расчете μ_1 .

Таблица 5.2

Сравнительные данные магнитных проницаемостей некоторых поглощающих материалов

Металл или сплав (гладкая твердая пластина)	β_1	μ_1	
		в исходном состоянии	после отжига
Сердечник из железа	5,6	21,6	61
Кантал А-1	84	8	8
Нержавеющая сталь 430 (ферритная)	43,4	10	10
Нержавеющая сталь 304 (аустенитная)	41,7	1,9	1,0

Значения μ_1 , полученные для ферромагнитных материалов в виде гладких пластин на частоте 10,5 ГГц, ниже известных значений этого параметра на низких переменных частотах, что объясняется небольшой глубиной скин-слоя на СВЧ-частотах. Обнаружена нечувствительность μ_1 кантала А-1 и нержавеющей стали 430 к отжигу. Результаты, полученные для нержавеющей стали 304, подтверждают: она становится полностью немагнитной только после того, когда полностью снято любое деформационное упрочнение (наклеп); они свидетельствуют, по мнению автора работы [4], в пользу высокой чувствительности предлагаемого ими экспериментального метода исследования ферромагнитных материалов. Как установлено при исследовании тонких покрытий из карбонильного железа на меди с диаметром частиц $d \leq 5$ мкм в экспериментальном устройстве, коэффициент потерь зависит от метода нанесения железного покрытия и от режима спекания. Сопоставление результатов измерения покрытия в этом устройстве на частоте $\nu = 10,5$ ГГц с исследованиями их микроструктуры показало, что значения индекса потерь при этом колеблются от 15,5 до 21 в зависимости от пористости

покрытия: покрытия с меньшими потерями имеют меньшую пористость большими - большую.

В статье [4] также приводятся результаты исследования влияния постоянного магнитного поля на потери в покрытиях из напыленного кантала и железного порошка на частоте $\nu = 9,9$ ГГц. При расположении покрытий параллельно магнитному полю с увеличением поля смещения B_0 индекс потерь уменьшается за счет уменьшения μ_1 . При расположении покрытия перпендикулярно постоянному магнитному полю индекс потерь при увеличении от $B_0 = 0$ до $B_0 = 1000-1200$ Гс возрастал в 1,5+1,9 раза, а при снятии поля значения возвращались к значению потерь при $B = 0$. Для покрытий, сорентированных произвольно относительно поля смещения, алгебраически комбинируются два рассмотренных выше вида потерь в зависимости от B_0 .

5.1. Свойства и технологические особенности объемных поглощающих покрытий из железа

Объемные поглощающие покрытия из порошков железа, нанесенные на медные поверхности СВЧ-тракта с подходящей диэлектрической связкой пульверизатором, либо путем погружения, либо намазкой кистью, предложенные в качестве внутри-вакуумных поглотителей энергии в мощных СВЧ-лампах, по сравнению с тонкими поглощающими пленками из железа имеют значительно большее поглощение (табл.5.3), но обладают плохими вакуумными свойствами [I].

Таблица 5.3

Среднее ослабление для некоторых железных покрытий на меди при частоте 1350 МГц

Метод нанесения покрытия	Ослабление, дБ/м		
	без прокалики	прокалка в вакууме в течение 15 мин при	
		450°C	625°C
Гальваническое покрытие (толщина 0,013 мм)	2,9	-	-
Слой порошка железа, нанесенный пульверизатором (толщина 0,18 мм)	15,0	9,9	3,3
Слой порошка железа с диэлектрическими связками в количестве 2+2,5 %, нанесенный пульверизатором (толщина 0,18 мм)	12+16	7+13	3,2+3,4

Процесс обезгаживания покрытий, нанесенных пульверизатором, при прогреве лампы в вакууме проходит очень медленно (с преимущественным выделением CO и N_2); необходимое обезгаживание покрытий при этом практически недостижимо. Наилучшие результаты по обезгаживанию получены для покрытий, предварительно обработанных в среде влажного водорода. Но во всех случаях выдержка при повышенных температурах приводит к значительному уменьшению потерь из-за спекания между собой частиц порошка железа.

Вакуумные свойства и прочность объемных покрытий сильно зависят от природы связующего вещества. В качестве связок опробовался ряд веществ / I /. Водный раствор силиката калия, обеспечивая наиболее прочную связь, в то же время, как показал масс-спектрометрический анализ покрытия, обладает плохими вакуумными свойствами. Применение нитроцеллюлозы дает покрытие с гораздо лучшими вакуумными свойствами, но при выгорании этой связки во время спекания не сохраняется хорошее сцепление с медью. Добавление в нитроцеллюлозу порошка кварцевого стекла ширекс несколько улучшает сцепление железного покрытия с подложкой. Наилучший результат, по мнению автора работы / I /, достигается при использовании в качестве связки смеси равных частей безводного порошка силиката калия, порошка стекла ширекс и нитроцеллюлозы.

Лучшее сцепление покрытия с подложкой достигается путем увеличения шероховатости ее поверхности за счет механической обработки (пескоструиванием[‡], нанесением насечек) и химической очистки поверхности, обезжириванием ее перед нанесением покрытия. Для компенсации ТКЛР покрытия и медной подложки предлагается / I / перед нанесением покрытия на нее напаять предварительно прокаленную сетку из никелевой или медной проволоки, в состав покрытия добавлять тонкоизмельченное стекло или стальное волокно, а также на подложку наносить промежуточную пасту из смеси порошков железа, никеля и меди.

Предпринимались попытки уменьшить газовыделение объемных покрытий на основе порошкового железа введением в состав веществ, которые могли бы выполнять роль внутреннего газопоглотителя. Такие добавки, как кремний и титан, заметно улучшают вакуумные свойства покрытия. Этому способствует и использование наиболее чистого порошкового железа / I /.

Объемные покрытия из железа, которые по принятой в данном обзоре классификации можно рассматривать как гетерофазную систему металл-диэлектрик (при этом диэлектрическая фаза состоит не только из связующего вещества, но и из пор), не получили широкого применения в мощных СВЧ-приборах. Основным их недостатком является опасность значительного уменьшения поглощающих свойств в результате неоднократных температурных обработок покрытия в процессе изготовления прибора и повышенное газовыделение. Поглощающие покрытия из нержавеющей стали практически не используются из-за технологических сложностей, возникающих при их нанесении на подложку.

Наибольшее распространение в мощных ЭВП нашли ферромагнитные поглощающие покрытия на основе сплавов кантал / 2-4, 38-44 / и альсифер / 5, 36, 45-47/.

5.2. Физические свойства сплава кантал и технологические особенности изготовления из него поглощающих покрытий

В разных странах мира в течение десятилетий в мощных ЭВП используется ферромагнитный сплав кантал для изготовления из него поглощающих покрытий, наносимых на металлические поверхности резонаторов или на периодическую структуру ЗС.

[‡] Практика показала, что пескоструйная обработка приводит к загрязнению поверхности подложки окислами кремния; предпочтительнее дробеструйная обработка (прим. авторов настоящего обзора).

Покрyтия получают методом плазменного напыления, распылением из сопла; наносят кисточкой из взвеси. Составы и свойства сплавов типа кантал зарубеж-ных и отечественных марок приведены в табл. 5.4-5.6 / 48 /.

Таблица 5.4

Характеристики сплавов типа кантал

Марка, страна	Содержание основных элементов кроме Fe, %			Удельное электро-сопротивление ρ , мкОм·м	Предельная рабочая температура, °С
	Cr	Al	Co и др.		
Кантал А-1 (лента), Швеция	22	5,5	0,5 Co	1,45	1375
Кантал А (проволока), Швеция	22	5	0,5 Co	1,39	1330
Кантал DSI (проволока), Швеция	Cr	Al	-	1,35	1150
Кантал А, ВНР	22	5	-	1,39	1330
Кантал А-1, ВНР	22	5	-	1,45	1375
Кантал DSD, ВНР	22	4	-	1,38	1280
Сплав X2305 (проволока, лента, ГОСТ 12766), СССР	21,5-23,5	4,6-5,3	$\leq 0,6 NiSi$ $0,4 Ti$	1,37	1200 (атмосфера воздушная)
Сплав УЮХ-ВИ (прутки, листы) для поглощения СВЧ-мощности	6,7-7,2	6,7-7,2	0,9-1,2 Ge 0,1-0,2 Zr	—	—

Таблица 5.5

Физические свойства сплавов кантал и альсифер

Сплав	Марка	Плотность γ , г/см ³	Температура Кюри, °С	Удельное электро-сопротивление ρ , мкОм·м
Кантал	X2305	7,25	550	1,37
Альсифер	ГОСЮВИ	6,90-7,0	500	0,7-0,8

Таблица 5.6

Механические свойства сплава кантал (X2305) в зависимости от температуры испытаний

T, °С	σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %
20	650	540	23	72
600	372	352	30	79

Кантал А-1 представляет собой сплав, аналогичный ферритной нержавеющей безникелевой стали с содержанием 5,5 % Al. Это обуславливает их расхождение в свойствах. Кантал имеет на своей поверхности очень тонкую пленку Al_2O_3 , которая сохраняется вплоть до температуры плавления сплава 1510°С. Эта пленка скорее всего обволакивает и каждую частичку расплавленного на подложку сплава. При нанесении его на медь возникает проблема сцепления покрытия с медью / 4,42 /.

В работе / 4 / проведено сравнение поглощающих свойств гладких массивных пластин из сплава кантал и напыленных покрытий из него (рис. 5.1). Эксперименты показали, что покрытия из сплава кантал имеют индекс потерь, равный 52, самый высокий из испытанных материалов (отклонения во всех экспериментах составили $\pm 5\%$). Возможно это и определило его предпочтительное использование по сравнению с железом и нержавеющей сталью. Глубина скин-слоя для покрытия из сплава кантал на частоте 10,5 ГГц составляет около 2 мкм (значительно меньше, чем размер застывшей напыленной капельки - частицы этого сплава). Высокие значения индекса потерь определяются не только поверхностной, но во многом и внутренней пористостью покрытия, что было доказано измерениями образцов до и после мягкой полировки покрытия. Поры в поглощающих покрытиях очевидно являются рабочей диэлектрической фазой.

В патенте / 42 / описаны состав специального поглощающего покрытия типа кантал А-I и способ улучшения его адгезии с металлическими подложками. Поглощающий материал кантал А-I, включающий в себя компоненты (в процентах по массе): 5,5 Al, 22 Cr, 0,5 Co и остальное Fe, применяется в виде взвеси. Для улучшения адгезии поглощающего покрытия с металлической деталью предложено предварительно повысить шероховатость детали посредством нанесения специального промежуточного слоя, создающего пористую поверхность. Описывается также технологический процесс нанесения на детали промежуточного и поглощающего слоев. Перед нанесением промежуточного слоя производится очистка деталей, например, мойкой в ацетоне или выпариванием в трихлорэтилене. Материалом промежуточного слоя служит порошок из металлических частиц с размерами по диаметру от 10 до 150 мкм, причем основное количество частиц имеет диаметр в пределах 25-150 мкм. Металлический порошок выбирается из того же металла, из которого изготовлены детали под покрытие. Порошок может состоять из окислов или некоторых смесей металлов: закиси меди, окиси меди, окиси никеля, фосфорно-никелевого сплава, окиси железа и т.п.

Металлический порошок приготавливается в виде пасты: 3000 г металлического порошка смешивается с 300 г биндера, состоящего из 25%-ного раствора этилцеллюлозы в растворителе, представляющем собой смесь (по массе) одной части метанола и трех частей толуола. Указанные компоненты смешиваются затем с 1900 г амилацетата для окончательного формирования пасты.

Промежуточный слой из изготовленной пасты наносится кисточкой или напыляется подходящим способом. После просушки образуется шероховатое покрытие. Спекание его с поверхностью детали осуществляется в восстановительной среде при температуре несколько ниже точки плавления материала порошка и детали. Например, для медных деталей и медного порошка спекание производится при температуре 1000°C в течение 15 мин. Восстановительной средой может быть влажный водород. После спекания формируется слой пористого металла, прочно сцепленного с поверхностью металлических деталей. На промежуточный слой наносится поглощающий слой из кантала А-I кисточкой, распылением из сопла или плазменным напылением. Растекшийся кантал проникает в поверхностные поры промежуточного слоя, что обеспечивает хорошую адгезию. В результате поглощающее покрытие на основе кантала представляет собой пористый гетерофазный материал типа ферромагнитный сплав-диэлектрик. В качестве диэлектрических фаз в данном поглотителе выступают тонкая пленка окисла Al_2O_3 (вокруг частиц сплава)

и поры. Индекс потерь покрытия из этого сплава в 2,5–3 раза выше, чем индекс потерь покрытия из железа.

5.3. Сплав альсифер. Свойства и технологические особенности изготовления поглощающих покрытий на его основе

При исследовании магнитомягких сплавов тройной системы железо–кремний–алюминий (рис. 5.2) были обнаружены сплавы, имеющие вблизи состава (в процентах по массе): 9,5+10 Si ,

5+5,5 Al , остальное Fe , очень высокие значения начальной и максимальной магнитных проницаемостей. Наибольшим значением начальной проницаемости, равным 35000 Гс/э, обладает сплав с содержанием 9,62 % Si, 5,38 % Al , остальное Fe , а наибольшим значением максимальной проницаемости, равным 162000 Гс/э, – сплав с содержанием 9,66 % Si , 6,21 % Al , остальное Fe . Материал получил название сендаст (в отечественной литературе – альсифер). Он имеет повышенную хрупкость, способность быть легко размельченным в порошок, склонность к образованию на поверхности частиц плотной оксидной пленки. Эти свойства предопределили использование сплава альсифер при разработке магнитодиэлектриков для радиочастотной аппаратуры [49]. Исследования

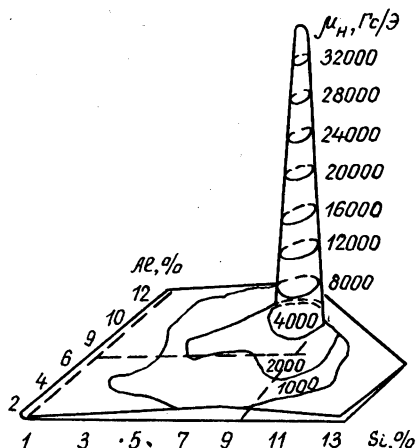


Рис. 5.2. Пространственная диаграмма зависимости начальной проницаемости сплавов системы Fe – Si – Al от состава

показали, что сплавы, содержащие (по массе) 7+8 % Al и 9+11 % Si , обладают более благоприятными для производства магнитодиэлектриков свойствами. Так, сплав, содержащий 7,5 % Al и 10 % Si , выгодно отличается от сплава с содержанием 5,4 % Al и 9,6 % Si (с наиболее высокой магнитной проницаемостью) тем, что небольшие отклонения от состава и режимов изготовления, неизбежные при массовом производстве сплава и магнитодиэлектриков из него, не приводят к значительному изменению его магнитных свойств. Сплав состава 5,4 % Al и 9,6 % Si более критичен к технологическим факторам и, следовательно, менее стабилен по своим магнитным свойствам. Проницаемость сплава альсифер уменьшается при наличии в нем примесей, их суммарное количество не должно превышать 0,1 % , поэтому выплавку сплава рекомендуется проводить в индукционных печах. Для облегчения размалывания сплава предложено выплавленные слитки после выемки их из изложниц погружать в воду.

В работе [50] описано изготовление магнитодиэлектриков из сплава альсифер, выплавленного в вакууме. Слитки дробили в щековой и дисковой дробил-

как, а потом измельчали в шаровой мельнице до размера частиц 75–125 мкм. Порошок нагревали в наклонном желобе до 400–500°C, прокатывали в 150-мм валках при 80°C. После двух проходов получался порошок с толщиной чешуек менее 25 мкм. Затем порошок отжигали при 600°C в течение 1 ч для снятия напряжений. В результате такой обработки поверхность частиц окисляется. Для дополнительной изоляции частиц предложен в качестве связки гидролизанный тетраэтил-силикат в количестве, эквивалентном массовому содержанию 1% SiO_2 . Порошок со связкой прессовали под давлением 140 кг/мм², потом прессовки отжигали в водороде при 650°C и охлаждали на воздухе. Проницаемость при использовании порошка альсифер крупностью 75–125 мкм составила $\mu = 73$, а чешуек – $\mu = 238$.

Известно также [49], что порошки сплава альсифер, предназначенные для производства магнитодieleктриков с высокой проницаемостью, подвергают отжигу в интервале температур 950–1100°C.

В настоящее время отечественной промышленностью производится несколько марок сплава альсифер разного назначения. В табл.5.7 приведен химический состав четырех из них. Сплав альсифер вакуумной плавки имеет плотность $\gamma = 6,9+7$ г/см³, удельное электросопротивление $\rho = 0,7+0,8$ мкОм·м, температуру Кюри 500°C. Структура сплава марки ИОСЮ-ВИ – однофазный твердый раствор, решетка – объемно центрированная кубическая.

Заготовки из сплава альсифер марки ИОСЮ-МП, полученные методом порошковой металлургии, имеют структуру двухфазного твердого раствора, включающего кроме высокопроницаемой металлической составляющей вторую фазу в виде тонкого оксидного слоя, при этом остаточная пористость сплава не превышает 0,5% [48].

Таблица 5.7

Химический состав и назначение промышленных сплавов альсифер отечественных марок

Марка	Массовое содержание элементов, %				Применение	Литература
	Al	Si	Ge	Fe		
ИОСЮ-ВИ	5,2+5,6	9,4+9,8	≤0,1	Остальное	Для полюсных наконечников магнитных головок видеозаписи	[48]
ИОСЮ-МП	5,2+5,6	9,4+9,8	-	"		[48]
Альсифер-1	6,5+7,5	10,5+11,5	-	"	Для ферромагнитных СВЧ-поглощающих покрытий	[51]
Альсифер-2	4,5+5,6	8,5+9,4	-	"		[51]

В табл.5.8 приведены режимы термообработки, рекомендованные для получения максимальной проницаемости сплава альсифер, предназначенных для изготовления полюсных наконечников магнитных головок видеозаписи [48].

Сплавы марок альсифер-1 и альсифер-2 вакуумной плавки предназначены для изготовления ферромагнитных покрытий, поглощающих СВЧ-излучение.

Режимы термообработки сплавов альсифер для получения максимальной проницаемости

Марка сплава	Среда отжига	Температура, скорость нагрева, выдержка	Скорость охлаждения, °С/ч
ГОСЮ-ВИ ГОСЮ-МП	Вакуум с остаточным давлением $<10^{-1}$ Па	1000°С, не более 500°С/ч, 3 ч	До 600°С по 100, с 600 до 200°С по 50, далее произвольно

Технология изготовления СВЧ-поглощающих покрытий из них для применения внутри вакуумной оболочки приборов предусматривает [5, 45-47]:

- приготовление порошков фракций крупностью, мкм : 80-56 (180 меш), 56-45 (280 меш) и менее 45 (311 меш) дроблением выплавленного сплава, размолом крупки и рассевом порошка;
- составление поглощающих шихт путем смешивания порошков сплава альсифер нужных фракций и порошка карбонильного железа, взятых в определенном соотношении;
- составление поглощающей пасты смешиванием шихты с биндером (связующей жидкостью, например, коллоксилином, изоамилацетатом и т.п.);
- составление промежуточной пасты из порошков меди, карбонильных железа и никеля, взятых в соотношении (по массе) 1:1:1 и разведенных в биндере;
- нанесение поглощающей пасты, например, намазкой на подготовленную под покрытие металлическую поверхность деталей* (чаще всего медную), покрытие предварительно тонким слоем промежуточной пасты толщиной 0,03-0,06 мм;
- нанесение поглощающей пасты послойно с промежуточной просушкой на воздухе при температуре 60+100°С перед нанесением каждого последующего слоя;
- спекание покрытия.

Первые опыты применения сплава альсифер в качестве материала, поглощающего СВЧ-колебания в мощных ЭВП, дали обнадеживающие результаты.

Как показали авторы статьи [36], подверженность поглотителя с альсиферовым покрытием воздействию магнитного поля в приборе, при необходимости может быть значительно ослаблена, если поверхности с поглощающим покрытием поместить поперечно силовым линиям магнитного поля. На рис.5.3 приведены зависимости КСВН в диапазоне рабочих частот альсиферового поглотителя с поперечным и продольным расположением нагрузки по отношению к полю.

Однако, несмотря на положительные результаты первых опытов использования сплава альсифер в мощных ЭВП, коэффициент затухания альсиферовых покрытий в начальный период их применения был невысок и составлял около $1,5 \cdot 10^{-5}$ /см. Поглощающие шихты содержали (по массе) 30 % карбонильного железа, толщина покрытий не превышала 0,2 мм.

Поиски путей повышения уровня поглощающих свойств велись по следующим основным направлениям:

* Вопросы подготовки металлической поверхности и проблемы отслоения покрытий от нее, связанные с плохой химической очисткой поверхности, в данном обзоре не рассматриваются.

- варьирование гранулометрическим составом порошка сплава альсифер в покрытиях;
- уменьшение содержания карбонильного железа в шихте;
- увеличение толщины и массы покрытия;
- обработка режимов спекания для шихт с учетом их гранулометрического состава.

При этом выявились нежелательные эффекты: плохая воспроизводимость поглощающих свойств покрытий, осыпание покрытий после спекания, растрескивание и скалывание покрытий после спекания.

Изыскание технологических возможностей существенного повышения уровня поглощения [45], получения шихт с заданным коэффициентом затухания [46] осуществлялось одновременно с выявлением оптимальной структуры покрытия, обеспечивающей не только стабильность поглощения, но и прочность покрытия.

В статье [5] рассмотрены физико-химические основы получения альсиферных покрытий - поглотителей энергии, исследовано окисление порошков сплава альсифер отдельных фракций, предложены конкретные направления работ по увеличению и стабилизации коэффициента затухания покрытий.

Исследования проводились с использованием сплава альсифер-I и шихт на его основе с содержанием (в процентах по массе): 80 альсифера (с заданным соотношением фракций) и 20 карбонильного железа, нашедших наибольшее применение при изготовлении поглотителей энергии. Первоначально температура спекания и время выдержки были выбраны 1000-1040°C и 2 ч с учетом опыта работы со сплавом альсифер на радиочастотах.

Исследования [5,45-47] показали, что при прочих равных условиях:

- уменьшение содержания карбонильного железа в шихте приводит к увеличению коэффициента затухания (при уменьшении массового содержания карбонильного железа с 30 до 20 % было достигнуто увеличение α в 3 раза);
- с увеличением массы и толщины покрытия возрастает коэффициент затухания, но вместе с тем увеличивается и вероятность отслоения от подложки, что нужно учитывать при выборе общей толщины покрытий;
- применяемые порошки сплава альсифер имеют тем большую поглощающую способность, чем более развита их поверхность;
- высокие поглощающие свойства поглотителей типа альсифер достигаются только при реализации в них структуры магнитодиэлектрика;
- диэлектрическая оболочка до спекания обеспечивается связкой (биндером), а после спекания - окислом алюминия Al_2O_3 , образовавшимся на поверхности

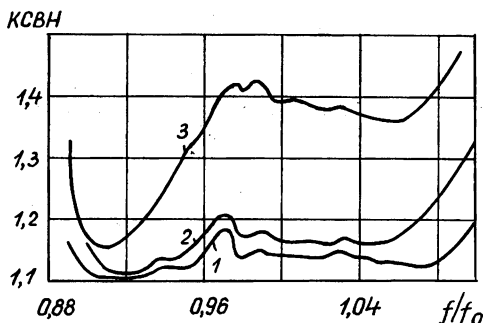


Рис.5.3. Влияние магнитного поля на КСВН поглотителя с альсиферным покрытием: 1 - магнитное поле отсутствует; 2 - продольное магнитное поле 1000 Э; 3 - поперечное магнитное поле 800 Э; f/f_0 - относительное изменение частоты

частиц порошка сплава альсифер за счет окисления части алюминия, содержащегося в сплаве.

Условия образования оксидной пленки при спекании в среде водорода выявлялись с помощью термодинамических расчетов. Структура исследовалась металлографически, наличие окислов определялось химическим и рентгеноструктурными анализами.

Рассмотрением термодинамических характеристик реакций, возможных при спекании покрытия в среде влажного водорода, установлено, что наибольшим средством к кислороду из всех компонентов сплава альсифер обладает Al_2O_3 (табл. 5.9).

Таблица 5.9

Термодинамические характеристики реакций

Реакция	$\Delta F_{1300 K}$, кал/моль	$\lg K$	$\Delta \lg P$	$\lg K - \Delta \lg P =$ $\lg P_0$
$2Al + 3H_2O \rightleftharpoons Al_2O_3 + 3H_2$	-177300	29,8	5,28	24,22
$Si + 2H_2O \rightleftharpoons SiO_2 + 2H_2$	-71350	12,0	3,52	8,48
$Fe + H_2O \rightleftharpoons FeO + H_2$	-950	0,16	1,76	-1,6

$P_0 > 0$ - окисление; $P_0 < 0$ - восстановление.

При спекании в среде водорода с т.р. $+15^\circ C$ при $t'_{\text{выд}} = 1040^\circ C$ сначала идет образование оксида Al_2O_3 , затем SiO_2 . Окислы железа, если они имелись на поверхности частиц шихты, в процессе спекания в данном режиме должны восстанавливаться.

В работе [5] показано, что при спекании из числа возможных реакций с участием углерода в основном имеет место реакция: $C + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2$, приведены данные по газоотделению спеченного покрытия и предложены режимы предварительного обезгаживания покрытия с целью уменьшения его газоотделения (рис. 5.4).

Оптимальная структура поглотителя после спекания во влажном водороде представляет собой механическую смесь четырех фаз: зерен обедненного алюминия (за счет его частичного окисления) сплава альсифер, изолированных оксидными пленками Al_2O_3 , а также пор и частиц карбонильного железа, сообщаемых между собой и с оксидными пленками Al_2O_3 .

Осыпание покрытия является признаком незавершенности процесса спекания и имеет место при недостаточной степени окисления алюминия, когда привес по кислороду мал. Причина растрескивания и скалывания - нарушение сплошности оксидной пленки Al_2O_3 на частицах порошка сплава альсифер из-за полного окисления Al в процессе спекания и начавшегося активного образования шпинелей за счет окисления кремния. При полном окислении содержащегося (по массе) в сплаве альсифер-I алюминия в количестве 7,5 % привес по кислороду составляет 6,7 %.

В табл. 5.10 приведены результаты окисления порошков сплава альсифер фракций, мкм: 80+56 (180 меш), 56-45 (280 меш), <45 (311 меш), в зависимости от времени выдержки при температуре $1040^\circ C$ в среде водорода.

Рис.5.4. Газотделение спеченного во влажном водороде покрытия на основе сплава альсифер до и после предварительного отжига в вакууме $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст.;
 $t_{\text{анал}} = 600^{\circ}\text{C}$

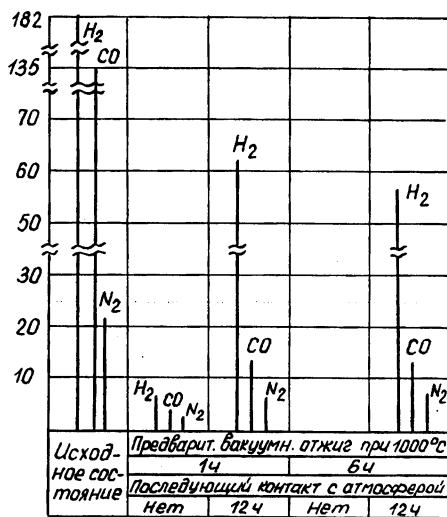


Таблица 5.10

Результаты окисления порошков сплава альсифер

Фракция, мкм	Т.р.водорода, $^{\circ}\text{C}$	Привес по кислороду (в процентах по массе) после выдержки в течение времени τ , ч		
		1	2	10
80+56	+15	2,9	3,4	3,6
56+45	+15	3,8	4,5	5,4
<45 (крупная)	+15	5,1	5,8	7,3
<45 (мелкая)	+15	6,7	7,2	9,2
<45 (мелкая)	-50	-	0,5	-

Как видно из табл.5.10, при одинаковом времени выдержки, что и следовало ожидать, наиболее интенсивно окисляются более мелкие порошки. Увеличение влажности водорода также способствует более интенсивному окислению поверхности частиц сплава. Для наиболее мелких порошков время выдержки может являться критическим с точки зрения нарушения сплошности пленки Al_2O_3 . Эти обстоятельства нужно учитывать при выборе режимов спекания конкретных шихт.

Введение контроля удельной поверхности порошков фракции менее 45 мкм, а также поглощающих шихт [46] позволило получать порошки более точного заданного гранулометрического состава, обеспечить при прочих равных условиях

большую воспроизводимость поглощающих свойств покрытий. Кроме того, это расширило возможности управления технологией изготовления прочных покрытий с заданными поглощающими свойствами за счет оптимизации режимов спекания (температуры, влажности водорода, времени выдержки) шихты с различной удельной поверхностью.

В работе [45] предложен способ повышения коэффициента затухания α за счет увеличения количества сплава в покрытии (при одной и той же толщине) подбором соотношения числа слоев из порошков грубой (n) и высокой (m) дисперсности: при сочетании ($\alpha = 0,3$ мм) слоев $n+m$, равном $4+2$, $\alpha = (3,87+2,51) \cdot 10^{-2}$ I/см, а при сочетании $2+4$ $\alpha = (5,10+3,35) \cdot 10^{-2}$ I/см, и способ увеличения и стабилизации коэффициента затухания путем легирования сплава альсифер титаном.

Существенным фактором, определяющим поглощение энергии в покрытиях типа альсифер, является суммарная площадь диэлектрической поверхности порошковых частиц магнетодиаэлектрика F_1 , составляющих покрытие [46]. В неспеченном покрытии, где каждая частица изолирована от другой биндером, F_1 практически равна исходной суммарной площади поверхности частиц порошковой шихты альсифер $F = S \cdot P$ (S - удельная поверхность шихты, P - масса покрытия). После спекания во влажном водороде $F_1 < F$, причем с увеличением δ разница между F_1 и F становится меньше. Исследованы [46] 20 покрытий с 20 % карбонильного железа, F которых находится в пределах от 800 до 5330 см^2 , полученных за счет вариаций S ($400+650 \text{ см}^2/\text{г}$) и P (2+8 г). На базе исследований дан пример построения номограммы (рис.5.5), позволяющей выбрать необходимую удельную поверхность шихты и ее массу для получения покрытия с заданным α . Анализ результатов показывает, что в исследованном интервале значений α слабо зависит от λ . В пределах извесов покрытий проявляется тенденция к понижению α с увеличением длины волны, при этом тем сильнее, чем больше удельная поверхность порошковой шихты альсифер. Кривые А и Б построены по предельным точкам кривых для λ_1 и λ_5 и ограничивают соответственно пределы максимально и минимально возможных величин α покрытий в исследованном интервале значений F и λ .

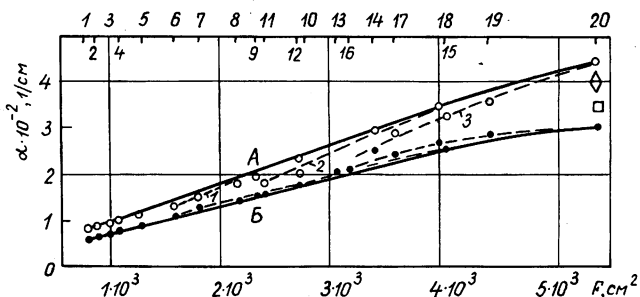


Рис.5.5. Влияние исходной суммарной площади F поверхности частиц порошковой шихты альсифер на коэффициент затухания покрытий α :

○, △, ▽, □, ● - α при $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ соответственно; А, Б - максимально и минимально возможные значения α при λ_1 и λ_5 соответственно; 1-3 - α при λ_1 для покрытий массой 4, 6, 8 г соответственно

Установленные закономерности [46] могут быть полезными при разработке поглотителей типа альсифер с заданным коэффициентом затухания.

В табл.5.11 приведены составы ряда шихт на основе сплава альсифер, обеспечивающих с учетом приведенных выше факторов нормированные значения коэффициента затухания [52].

Наименьшим уровнем затухания обладают шихты с содержанием Fe 40 и 30 %, их $\alpha = 0,5+1,0 \cdot 10^{-2}$ I/см и $1,5+2,5 \cdot 10^{-2}$ I/см соответственно; для шихты № 2 нормированное затухание составляет $(2,5+3,5) \cdot 10^{-2}$ I/см. Мелкодисперсные шихты с большим затуханием содержат 20 и 25 % Fe и имеют $\alpha = 3,4+4,5$ и $2,7+4,5$ соответственно.

В работе [47] изучены состав и структура спеченного покрытия из шихты № 2 с 20 % карбонильного железа, а также проведена оценка его теплопроводности расчетным и экспериментальными методами.

Покрытие относится к грубодисперсным пористым материалам: размеры частиц компонентов покрытия находятся в пределах от 1 до 80 мкм, пористость достигает (по объему) 44 %. До обработки в вакууме поры заполнены в основном оксидом углерода и водорода, после обработки в вакууме обезгажены. По терминологии работы [53] исследуемое покрытие представляет собой промежуточную структуру, являющуюся комбинацией двух основных типов структур - с изолированными (сплав альсифер, обедненный алюминием) и с сообщающимися (Fe , Al_2O_3 , поры) компонентами. Объемная концентрация альсифера, обедненного в процессе спекания алюминием, находится в пределах от 36 до 40 %, а Al_2O_3 - от 7 до 11 %. Карбонильное железо в покрытии составляет 9 % от его объема.

Таблица 5.11

Шихты для поглощающих покрытий (ОСТ II 029.705-80)

Марка шихты	Состав порошков в шихте, масса, г					Коэффициент затухания, 10^{-2} Нп/см	Поверхностное сопротивление, Ом
	Альсифер-1М (мелкий)	Альсифер-1С (средний)	Альсифер-1К (крупный)	Альсифер-2	Fe карбон Р-10 или Р-20		
1	80	-	-	-	20	3,4-4,5	10,0-12,5
2	50	15	15	-	20	2,5-3,5	7,0-10,5
3	70	-	-	-	30	1,5-2,5	4,0-7,0
4	60	-	-	-	40	0,5-1,0	1,0-3,0
5	-	-	-	70	30	-	4,0-6,0
7	75	-	-	-	25	2,7-4,5	7,0-12,5

Состав покрытия и теплопроводность его компонентов представлены в табл.5.12, а результаты расчетов и экспериментального определения теплопроводности покрытия - в табл.5.13 [47].

Таблица 5.12

Состав и теплопроводность компонентов поглощающего покрытия
альсифер с 20 % карбонильного железа

Компонент покрытия	Массовая концентрация твердых компонентов	Удельный вес твердых компонентов, г/см ³	Объемные концентрации Р	Теплопроводность компонентов, кал/см·с·град		
				100°С	500°С	800°С
Альсифер, обедненный алюминием	0,73-0,69	6,75-7,2	0,4-0,36	$4,8 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$5,2 \cdot 10^{-2}$
А ₂ О ₃	0,07-0,11	3,5	0,07-0,11	$1,62 \cdot 10^{-3}$	$7,14 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Карбонильное железо	0,2	7,8	0,09	0,16	0,102	$6,5 \cdot 10^{-2}$
Поры Р=10 ⁻⁷ +10 ⁻⁸ мм рт.ст.	-	-	0,44	→ 0	→ 0	→ 0
Поры (СО+Н ₂) Р=760 мм рт.ст.	-	-	0,44	$5 \cdot 10^{-4}(\text{H}_2)$ $6,6 \cdot 10^{-5}(\text{CO})$	-	-

Таблица 5.13

Теплопроводность альсиферового поглощающего покрытия с 20 % карбонильного железа

Метод определения	Давление, мм рт.ст.	Теплопроводность, кал/см·с·град		
		100°С	500°С	800°С
Расчетный	760	$(1,63+1,75) \cdot 10^{-2}$	-	-
Экспериментальный	760	$1,3 \cdot 10^{-2} \pm 25 \%$	-	-
Расчетный	10 ⁻⁷ +10 ⁻⁸	$(1,63+1,75) \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$(1,04+1,25) \cdot 10^{-2}$

В расчетах применен метод последовательного приведения структуры четырехкомпонентной смеси с сообщаемыми и изолированными компонентами к структуре двухкомпонентных смесей. При этом использовались зависимости эффективной теплопроводности зернистой структуры от теплопроводности и концентрации составляющих ее компонентов [53].

Теплопроводность альсиферового спеченного покрытия при температуре 100°С, судя по расчетам, близка к теплопроводности поглотителя КТ-30. Методика расчета может быть рекомендована для оценки теплопроводности подобных многофазных пористых материалов.

Итак, спеченные ферромагнитные СВЧ-поглощающие покрытия на основе сплава альсифер представляют собой гетерофазные материалы типа сплав-металл-диэлектрик. В качестве поглощающей СВЧ-излучение фазы выступает обедненный алюминием сплав альсифер, поры наряду с А₂О₃ являются рабочей диэлектрической фазой. Карбонильное железо вводится в покрытие в основном для обеспе-

чения его прочности. За счет применения шихт различных составов в покрытиях достигнуты нормированные (с точностью до $\pm 0,5 \cdot 10^{-2}$ I/см) значения коэффициента затухания в общих пределах от $0,5 \cdot 10^{-2}$ до $4,5 \cdot 10^{-2}$ I/см.

6. ЯВЛЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛАХ

В настоящее время в СССР и за рубежом ведется большой объем исследований в области новых ВТСП материалов разных составов на основе оксидов редкоземельных элементов и меди с целью теоретического обоснования явления сверхпроводимости, изучения физических свойств, поисков путей увеличения критического тока и разработки технологии получения этих материалов.

При проведении микроволновых исследований (в диапазоне частот 0,1-35 ГГц, в интервале температур 4-300 К) поликристаллических образцов иттриевой сверхпроводящей керамики $Y-Ba-Cu-O$ / 54,58 / и ряда других подобных соединений $R-Ba-Cu-O$ ($R: Sm, Eu, Er$) / 57,59 /, $La-Cu-O$, $La-Sr-Cu-O$ / 59,60 / обнаружены явления поглощения энергии.

Регистрация СВЧ-потерь осуществлялась по уменьшению добротности резонатора спектрометра ЭПР при помещении в него образца ВТСП керамики малых размеров (для достижения большей чувствительности). При переходе образцов в сверхпроводящее состояние и при дальнейшем понижении температуры добротность резонатора увеличивается / 54,58 /.

Сравнение и анализ результатов исследований на поликристаллических образцах с результатами, полученными на монокристаллах, позволяют считать, что более интенсивное поглощение обусловлено фазовой и структурной неоднородностью ВТСП керамики / 54,57,61,62 /. Повышенные СВЧ-потери в иттриевой керамике наблюдаются при наличии в ней гетерофазной структуры, представляющей собой сетку сверхпроводящей фазы, в ячейках которой имеется большое число пор и несверхпроводящих включений / 54 /.

Наблюдается зависимость поглощения СВЧ-мощности в иттриевых сверхпроводящих керамиках не только от частоты, температуры, но и от модуляции магнитного поля. Физическая природа этого эффекта связана также с особенностями фазового состава ВТСП материала / 54,58,61 /.

В работе / 60 / обнаружено явление гигантского (по определению авторов) поглощения ВЧ электромагнитного поля в диапазоне частот $10^8 \approx \rightarrow 10^{10}$ Гц в соединениях $La_{2-x}CuO_4$ и $La_{1,825}Sr_{0,175}CuO_{4-y}$ при комнатной температуре. Показано, что это поглощение обусловлено дипольными моментами; тем самым установлено новое явление - сегнетоэлектричество на конечных частотах, - по-видимому, связанное с низкочастотной динамикой решетки. Переход в металлическое состояние при легировании куприта лантана стронцием не уничтожает аномально го поглощения, т.е. обнаружено сосуществование сегнетоэлектрических аномалий с металлической проводимостью.

Авторами работы / 59 / исследованы частотные зависимости проводимости $\epsilon(\nu)$ соединений $La_{2-x}Sr_xCuO_{4-y}$ ($0 \leq x \leq 0,4$) и $RBa_2Cu_3O_{7+\delta}$ ($R: Er, Eu, Y$). Обнаружено резонансное уменьшение $\epsilon(\nu)$ при комнатной температуре в области частот 100 МГц + 11 ГГц на 2-3 порядка по сравнению со статическим значением $\epsilon(0)$. Измерения $\epsilon(\nu)$ соединения $YBa_2Cu_3O_{7,\delta}$ при $T \leq T_c \approx 94$ К показали,

что обнаруженные аномалии $\epsilon(\omega)$ в керамиках с металлической проводимостью сохраняются и в сверхпроводящем состоянии. Сделан вывод о том, что сегнетоэлектрические аномалии на конечных частотах и их сосуществование с металлической проводимостью присущи широкому классу проводящих керамических систем.

Необходимо отметить, что ни в одной из рассмотренных работ [54-62] не предлагается использовать ВТСП гетерофазные материалы для поглотителей энергии. Феноменологические исследования находятся в самом начале, но обнаруженные явления поглощения СВЧ-энергии могут оказаться отправной точкой для создания в будущем поглотителей на основе этих новых материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные по структуре, свойствам и технологии получения внутривакуумных материалов, поглощающих СВЧ-излучения и применяемых внутри вакуумной части ЭВП, показывают что в развитии этой области материаловедения отражаются тенденции электронного приборостроения к увеличению удельных нагрузок на элементы конструкций приборов, в том числе и на поглотители. Поэтому актуальными в области поглотителей являются задачи создания материалов с высокими и термостабильными поглощающими свойствами, удовлетворяющих при этом всему комплексу требований, предъявляемых к ним в приборе. Наиболее перспективны для решения этих задач - многокомпонентные материалы с сочетанием проводящих (в том числе ферромагнитных) и диэлектрических фаз.

1. Стил. Материалы для поглотителей в мощных сверхвысокочастотных лампах // Техника электронных ламп. М., 1963.
2. Поздняков Л.В. Поглотители энергии в электровакуумных СВЧ-приборах. Ч.Ш. Конструкции ВЧ-поглотителей в линиях замедления спирального и штыревого типов: Обзоры по электрон. технике. Сер. I, Электроника СВЧ. - Вып.2(695). - М.: ЦНИИ "Электроника", 1980.
3. Поздняков Л.В. Поглотители энергии в электровакуумных СВЧ-приборах. Ч. IV. Конструкции ВЧ-поглотителей в резонаторных линиях замедления и частотно-селективных поглотителей: Обзоры по электрон. технике. Сер. I, Электроника СВЧ. - Вып.3(696). - М.: ЦНИИ "Электроника", 1980.
4. Карп А. Microwave physics of flame-sprayed Kanthal and other circuit loss coatings // Int. Electron Device Meet., Washington, D.C., Dec. 1-4, 1985. Techn. Dig. N.-V. 1985. P. 354-356.
5. Исследование некоторых свойств покрытий-поглотителей энергии-на основе сплава "Альсифер" / Т.В.Симонишвили, Б.В.Симонов, Л.Ф.Ирющкина и др. // Электрон. техника. Сер. I4, Материалы. 1968. Вып. I.
6. Поздняков Л.В., Селихова Т.Ю. Поглотители энергии в электровакуумных СВЧ-приборах. Ч. I. Устойчивость работы ЛБВ с локальным поглотителем: Обзоры по электрон. технике. Сер. I, Электроника СВЧ. - Вып.2(217). - М.: ЦНИИ "Электроника", 1978.
7. Поздняков Л.В., Селихова Т.Ю. Поглотители энергии в электровакуумных СВЧ-приборах. Ч. II. Методика расчета и измерения: Обзоры по электрон. технике. Сер. I, Электроника СВЧ. - Вып.3(518). - М.: ЦНИИ "Электроника", 1978.
8. Поздняков Л.В., Мильтин Д.Д. Поглотители энергии в электровакуумных СВЧ-приборах. Ч. VI. Теория допусков: Обзоры по электрон. технике. Сер. I, Электроника СВЧ. - Вып. I(999). - М.: ЦНИИ "Электроника", 1984.
9. Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения. М., 1982. 164 с.
10. Пат. 3534286 США. Microwave attenuator comprising aluminium oxide and aluminium titanate usable in a microwave tube / R.L.Holm, R.F.Bracken. - Опубл. 13.10.70.
11. Winslow L. RF loss as design parameter in traveling-wave tubes // Int. Electron Devices Meet., Washington, D.C., 1974, Techn. Dig. N.-V., 1974. P. 374-376.
12. Слущая В.В. Тонкие пленки в технике СВЧ. М., 1967.
13. Пат. 3544832 США. Traveling-wave tube with evaporated nickel attenuator coating and method of manufacture thereof / J.Brous. - Опубл. I.12.70.
14. Пат. 3474284 США. High frequency tantalum attenuation in traveling-wave tubes / R.P.Anand. - Опубл. 21.10.69.
15. Пат. 3818976 США. Ta-Al alloy attenuator for traveling-wave tube and method of making same / J.M.Chilton, D.Jaffe. - Опубл. 25.06.74.
16. Пат. 3548345 США. Brazed dielectric-to-metal joints for slow-wave structure assemblies / L.R.False. - Опубл. 15.12.70.

17. Поздняков Л.В. Поглотители энергии в электровакуумных СВЧ-приборах. Ч.У. Углеродные пленочные поглотители, способы изготовления и технологическое оборудование: Обзоры по электрон. технике. Сер. I, Электроника СВЧ. - Вып. 2(924). - М.: ЦНИИ "Электроника", 1983.
18. Пат. 1160857 Великобритания. A slow-wave circuit for an electron tube / Tohru Matsuoka. - Оpubл. 06.08.69.
19. Логинов А.Г., Зарубин Г.С., Кудряшова Е.Н. Изготовление объемных поглотителей СВЧ-энергии // Электрон. техника. Сер. I, Электроника СВЧ. 1967. Вып. 12.
20. Смоля А.В., Попова В.П., Занегина М.М. Керамический объемный поглотитель СВЧ-энергии на основе окиси бериллия // Электрон. техника. Сер. I4, Материалы. 1968. Вып. 7.
21. Пат. 3221204 США. Traveling - wave tube with trap means for preventing oscillation at unwanted frequency / W. Hunt, M. Kreismanis. - Оpubл. 30.11.65.
22. Пат. 3123736 США. Severed traveling - wave tube with external terminations / W. H. Christoffers, J. E. Nevins. - Оpubл. 03.03.64.
23. Пат. 3324338 США. Traveling - wave tube with oscillation preventing and gain shaping means including an elongated lossy ceramic element / L. M. Winslow. - Оpubл. 06.06.67.
24. Батыгин В.Н., Иноземцева А.В., Иванова Г.А. Регулирование диэлектрических свойств керамических материалов // Тез. докл. научно-техн. конф. Вакуумно-плотная керамика и ее спай с металлами. Сер. 7. Технологии. Организация производства и оборудование. - М.: ЦНИИ "Электроника". 1972.
25. Изучение процесса восстановления двуокиси титана / В.Н. Батыгин, А.В. Иноземцева, М.П. Москалева, А.М. Решетников // Электрон. техника. Сер. I4, Материалы. 1971. Вып. 6.
26. Объемные поглотители для мощных ЛВБ / В.Н. Батыгин, Н.В. Ефимова, А.В. Иноземцева, Л.Г. Мазурова // Электрон. техника. Сер. I, Электроника СВЧ. 1970. Вып. 11.
27. Подавление паразитных колебаний в ЛВБ с замедляющей системой "цепочка связанных резонаторов" / Г.В. Курилов, Н.В. Антохина, В.Н. Батыгин, А.В. Иноземцева // Электрон. техника. Сер. I, Электроника СВЧ. 1978. Вып. 7.
28. Ковнеристый Ю.К. Поглощение СВЧ-излучения в гетерогенных сплавах // Физика и химия обработки материалов. 1970. Вып. 6.
29. Ковнеристый Ю.К., Шафир Н.М. Немагнитные сплавы железа со сверхвысокочастотными поглощающими свойствами // Высокопрочные немагнитные сплавы. М., 1973.
30. Пат. 3097421 США. High - frequency energy absorbing material. - Оpubл. 16.07.63.
31. Пат. 982170 Великобритания. Improvements in or relating to wave absorbers for electron tubes. - Оpubл. 03.02.65.
32. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М., 1959.
33. Бухарин Е.Н., Власов А.С., Алексеев А.А. Новые высокотеплопроводные объемные СВЧ-поглотители // Электрон. техника. Сер. 6, Материалы. М., 1988. Вып. 6(235).
34. Бухарин Е.Н., Власов А.С., Алексеев А.А. Керамика на основе нитрида алюминия и металлов // Стекло и керамика. 1985. № 2.

35. Нитрид алюминия - новый высокотеплопроводный диэлектрик / В.Г.Аветиков, М.Д.Бершадская, Э.Е.Неделько и др. // Электрон. техника. Сер.6, Материалы. 1984. Вып.6(191).
36. Зарубин А.Т., Купфер А.М., Юзефович Т.А. Внешний поглотитель СВЧ-энергии для мощных электронных приборов // Электрон. техника. Сер.1, Электроника СВЧ. 1969. Вып.9.
37. Пат. 3257576 США. Attenuation for crossed - field devices / F.W.Crapuchettes.- Опубликовано. 21.06.77.
38. Пат. 3268761 США. Traveling-wave tube slow-wave structure including multiple helices interconnected by spaced conductive plates / M.M.Mann - Опубликовано. 23.08.66.
39. Пат. 3360679 США. Electron discharge device having lossy resonant elements disposed within the electromagnetic field pattern of the slow wave circuit / R.R. Rubert. - Опубликовано. 26.12.67.
40. Пат. 3453491 США. Coupled - cavity traveling - wave tube with improved voltage stability and gain vs frequency characteristic / R.S.Cerko. - Опубликовано. 01.07.69.
41. Пат. 3454817 США. Coupled cavity high - frequency electron discharge device with means for reducing the Q at undesired region without overloading the Q in the operating regions / J.F.Shively. - Опубликовано. 08.07.69.
42. Пат. 3475707 США. Porous intermediate layer for affixing lossy coating to R.F. tube circuits / M.Feineib. - Опубликовано. 23.10.69.
43. Пат. 3502934 США. High frequency electron discharge devices having improved mode suppression means for cavities with re-entrant drift tubes / F.J.Friedlander, P.J.Spallas. - Опубликовано. 24.04.70.
44. Пат. 3594605 США. Mode suppression means for a cloverleaf slow-wave circuit / E.E.Blinn. - Опубликовано. 20.07.71.
45. Влияние состава сплава "Альсифер" и дисперсности порошка на степень окисления и коэффициент затухания покрытий - поглотителей энергии / Т.В.Симонишвили, Б.В.Симонов, Р.А.Тивоненко и др. // Электрон. техника. Сер.14, Материалы. 1968. Вып.2.
46. Влияние исходной суммарной площади поверхности частиц порошковой шихты "Альсифер" на коэффициент затухания покрытий - поглотителей энергии / Т.В.Симонишвили, Б.В.Симонов, Н.М.Синева, В.А.Сыромятников // Электрон. техника. Сер.14, Материалы. 1971. Вып.1.
47. Симонишвили Т.В., Симонов Б.В., Ирюшкина Л.Ф. Оценка теплопроводности альсиферовых поглощающих покрытий - поглотителей энергии // Электрон. техника. Сер.14, Материалы. 1975. Вып.6.
48. Прецизионные сплавы. Справочник / Под ред.Б.В.Молотилова. М., 1983.
49. Рабкин Л.И. Высокочастотные ферромагнетики. М., 1960.
50. Джонс В.Д. Основы порошковой металлургии. М., 1965.
51. ОСТ П 029.700-80. Сплав альсифер для поглощающих высокочастотную энергию покрытий.
52. ОСТ П 029.705-80. Шихты поглощающие для поглощающих высокочастотную энергию покрытий.
53. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность многокомпонентных смесей // Инженерно-физ. журн. 1976. Т.12. № 4.

54. Особенности СВЧ-потерь сверхпроводящей керамики в магнитном поле / В.В.Кведер, Т.Р.Мчедлидзе, Ю.А.Осипьян, А.И.Шалыгин // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 46.
55. Электрические, магнитные СВЧ-свойства системы $Y-Ba-Cu-O$ / А.А.Буш, С.Н.Гордеев, И.С.Дубенко и др. // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 46.
56. Поверхностное сопротивление керамики $Y-Ba-Cu-O$ в диапазоне ВЧ-СВЧ / М.Бельски, О.Г.Вендик, М.М.Гайдуков и др. // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т.46.
57. Микроволновые исследования высокотемпературных сверхпроводников / В.И.Александров, А.Г.Бадалян, П.Г.Баранов и др. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 47. Вып.3.
58. Власенко Л.С., Семенченко М.Г., Степанов Ю.П. Особенности поглощения микроволновой мощности в соединениях $Y-Ba-Cu-O$ в магнитном поле // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 13. Вып. 23.
59. Гигантское поглощение мощности высокочастотного электромагнитного поля в высокотемпературных сверхпроводниках / А.С.Шербаков, М.И.Кацнельсон, А.В.Трефилов и др. // Физика металлов и металловедение. 1987. Т. 64. Вып.4.
60. Сегнетодиэлектрические аномалии на конечных частотах в La_2CuO_4 и $La_{1,825}Sr_{0,175}CuO_{4-y}$ / А.С.Шербаков, М.И.Кацнельсон, А.В.Трефилов и др. // Физика металлов и металловедение. 1987. Т. 64. Вып.4.
61. Микроволновое поглощение в монокристаллах $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ в магнитном поле / С.В.Богачев, Г.А.Емельченко, В.А.Ильин и др. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 47, Вып. 3.
62. Микроволновая спектроскопия высокотемпературных сверхпроводников / В.И.Александров, А.Г.Бадалян, П.Г.Баранов и др. // Физика твердого тела. 1987. Т. 29. Вып. 29.
-

ОБЗОРЫ ПО ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

Серия 6. Материалы

Людмила Федоровна Ирюшкина
Нина Ивановна Воробьева

**МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ ВНУТРИВАКУУМНЫХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ
СВЧ-ЭНЕРГИИ**

Редактор *Г. Г. Гуськова*
Технический редактор *А. М. Гритчина*
Корректор *Т. Л. Петракова*

Т-21904

Подписано к печати 21.11.88

Формат 60×90/16

Печать офсетная

Усл. печ. л. 2,5

Уч.-изд. л. 3,1

Тираж 1750 экз.

Заказ № 1357

Цена 62 к.

Индекс 4852

Издательство ЦНИИ «Электроника». Москва, 117415