

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 621.372

ЧАСТОТНАЯ ПЕРЕСТРОЙКА ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ СВЧ ЭЛЕКТРОНИКИ С ПОМОЩЬЮ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ВТСП-ПЛЕНОК

© 2020 г. В. А. Шахунов*

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация*

*E-mail: val1621@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.06.2019 г.

После доработки 04.06.2019 г.

Принята к публикации 15.08.2019 г.

Исследование вольт-амперной характеристики структурированных высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) пленок на основе $YBa_2Cu_3O_{7-x} - YBa_2Cu_3O_{7-x}$ показало, что критический ток пленочной структуры площадью $10.0 \times 10.0 \text{ мм}^2$ удается уменьшить с 10 А до 100 мА. На примере ВТСП-резонатора показано, что в миллиметровом диапазоне длин волн, при ширине резонансного отклика $2\Delta f = 20 \dots 30 \text{ МГц}$ по уровню 0.5 его амплитуды, структурированная пленка, использованная как “земляная” плоскость, позволяет осуществлять перестройку резонатора в полосе не менее 300 МГц.

DOI: 10.31857/S003384942006025X

ВВЕДЕНИЕ

Среди различных методов частотной перестройки высокотемпературной сверхпроводящей (ВТСП) микрополосковой элементной базы СВЧ-электроники (механические, магнитные, электрические и т.п.) наибольшего интереса заслуживают два из них. Это, во-первых, использование зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической подложки от напряженности электрического поля и, во-вторых, возможность варьирования емкостными связями СВЧ-устройств за счет пропускания тока через отдельные ВТСП-элементы микрополосковых линий передачи (МПЛ) и вывода МПЛ из сверхпроводящего состояния.

Оба способа перестройки имеют существенные недостатки. При использовании сегнетоэлектрической подложки требуются большие, порядка 10^6 В/см^2 , напряженности электрического поля, а при выводе МПЛ из сверхпроводящего состояния – величины тока более 10^6 А/см^2 .

В данной работе приведены результаты исследования ВАХ структурированных пленок $YBa_2Cu_3O_{7-x} - YBa_2Cu_3O_{7-x}$ на подложках $Al_2O_3 + CeO_2$ и показано, что использование такой структуры в качестве “земляной” плоскости микрополоскового СВЧ-устройства позволяет эффективно осуществлять его перестройку при значительном снижении управляющего тока.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Снижения управляющих токов для перестройки СВЧ МПЛ можно добиться двумя основными способами: существенным уменьшением толщины ВТСП-пленки или уменьшением геометрических размеров МПЛ. В СВЧ- и мм-диапазоне длин волн эти возможности ограничены, с одной стороны, эффективной диэлектрической проницаемостью подложки $\epsilon_{эф}$, которая определяет линейные размеры элементной базы, а с другой, лондоновской глубиной проникновения поля (для пленок ВТСП $\lambda_L = 0.33 \text{ мкм}$), которая накладывает ограничение на толщину пленки ВТСП ($d = 2 \dots 3\lambda_L$). Последнее ограничение может быть устранено при использовании структурированной пленки, состоящей из двух слоев, различающихся по толщине в несколько раз.

2. СТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПЛЕНКИ ВТСП

Пленки состава $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ на подложках $Al_2O_3 + CeO_2$ размером $10 \times 10 \text{ мм}^2$ получали с помощью лазерного напыления. Процесс напыления включал три этапа.

На первом этапе, проводилось напыление пленки толщиной 0.7...0.8 мкм на всю поверхность подложки. На полученной пленке с помощью фотолитографии был изготовлен дисковый резонатор диаметром 3.5 мм с подводящими МПЛ шириной 0.25 мм и зазорами связи шири-

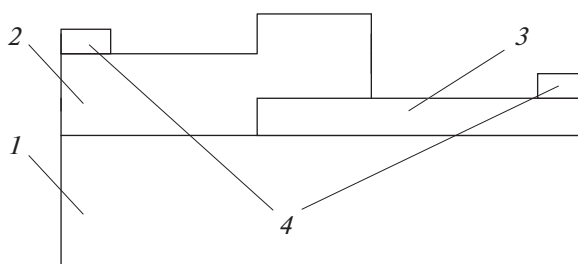


Рис. 1. Структурированная пленка $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ – $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ на подложке $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CeO}_2$: 1 – подложка $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CeO}_2$, 2 – пленка $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ толщиной 0.6...0.7 мкм, 3 – пленка $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ толщиной 0.1 мкм, 4 – контакты из золота шириной 1 мм.

ной 0.25 мм. Параметры резонатора были рассчитаны на частоту 37 ГГц по формулам из работы [1]. Более подробно технологические вопросы разработки резонаторов мм-диапазона длин волн приведены в [2].

На *втором* этапе на обратную сторону подложки напыляли тонкую пленку, толщиной не более 0.1 мкм, при этом один край подложки перекрывался пластинкой из NdGaO_2 размером $4 \times 15 \text{ мм}^2$. Таким образом получалась тонкая пленка ВТСП размером $6 \times 10 \text{ мм}^2$.

На *третьем* этапе пластину NdGaO_3 сдвигали на другой край подложки и напыляли пленку, толщиной порядка 0.6...0.7 мкм.

В результате получали структурированную пленку $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, схематически изображенную на рис. 1. Ширина области пересечения двух пленок составляла 2 мм, а резонатор на противоположной стороне подложки был расположен в области над толстой пленкой.

Основная трудность при получении структурированной пленки ВТСП состояла в том, чтобы тонкая пленка имела максимально возможное омическое сопротивление при комнатной температуре, сохраняя параметры сверхпроводящего перехода. Проведенные исследования показали, что при снижении частоты следования импульсов лазерного излучения, длительностью 10 нс, до 2...3 Гц, удавалось получить сверхпроводящую пленку с сопротивлением порядка 120 Ом. Последующее напыление толстой пленки не вызывало трудности. Пленка имела сопротивление при комнатной температуре 20...30 Ом.

На рис. 2а, 2б приведена динамическая вольт-амперная характеристика ВАХ структурированной пленки при подаче напряжения треугольной формы на ее контакты. Генератор напряжения треугольной формы обеспечивал период следования импульсов $T = 1...10 \text{ с}$ и регулируемую амплитуду напряжения $U = \pm 12 \text{ В}$ при максимальном токе $\pm 1 \text{ А}$. Из рис. 2а видно, что при начале роста

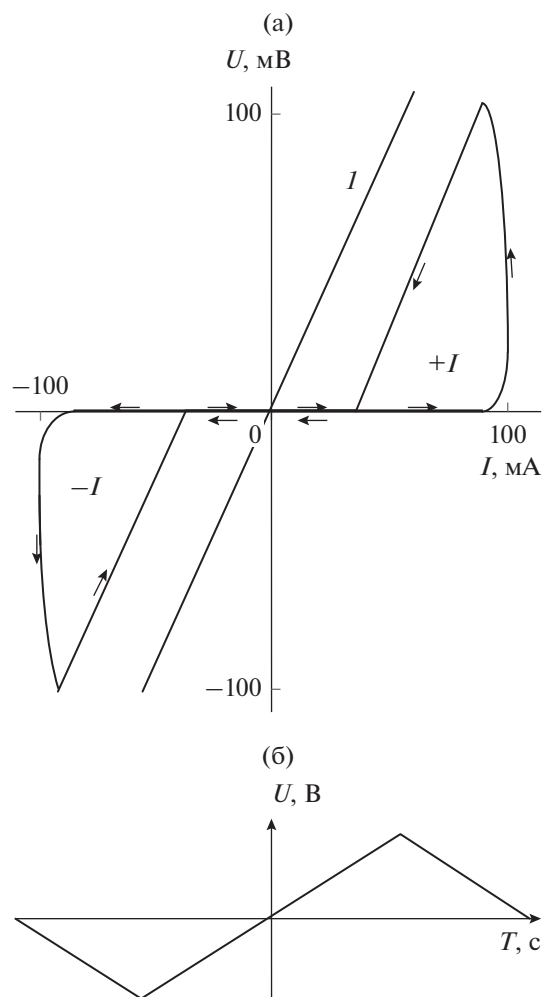


Рис. 2. ВАХ структурированной пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ – $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ на подложке $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CeO}_2$ (а): +I и –I – области при токах через структурированную пленку до $\pm 100 \text{ мА}$ (стрелками показано направление изменения тока), I – ВАХ при токах больше $\pm 100 \text{ мА}$; (б) зависимость напряжения U от времени T генератора напряжения треугольной формы.

напряжения ток через структурированную пленку увеличивается (область +1), и при достижении им +100 мА начинает расти напряжение с последующим снижением тока. Такой ход зависимости объясняется процессом нагрева кристаллографической решетки тонкой пленки и началом ее выхода из сверхпроводящего состояния. При снижении напряжения начинает восстанавливаться сверхпроводящее состояние пленки и при отрицательном напряжении процесс повторяется (см. рис. 2а, область –1). При этом толстая пленка остается в сверхпроводящем состоянии и выходит из него при амплитудах треугольного напряжения более $\pm 100 \text{ мВ}$. При увеличении напряжения токовый участок ВАХ между областями +1 и –1 начинает уменьшаться и в момент выхода тол-



Рис. 3. Корпус ВТСП-резонатора с коаксиальными выводами для подключения измерителя КСВН и генератора напряжения треугольной формы.

стой пленки из сверхпроводящего состояния трансформируется в линейную ВАХ (см. рис. 2а, область 2).

2. ЧАСТОТНАЯ ПЕРЕСТРОЙКА РЕЗОНАТОРА мм-ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Для исследований процесса частотной перестройки резонатора мм-диапазона длин волн использовался панорамный измеритель коэффициента стоячей волны (КСВН) и отражений с полосой перестройки частоты от 24.5 до 38.5 ГГц. ВТСП-резонатор размещался в корпусе коробчатого типа с коаксиальными выводами для подключения к коаксиально-волноводным переходам измерителя КСВН (рис. 3). МПЛ резонатора припаивали к коаксиальным выводам с помощью

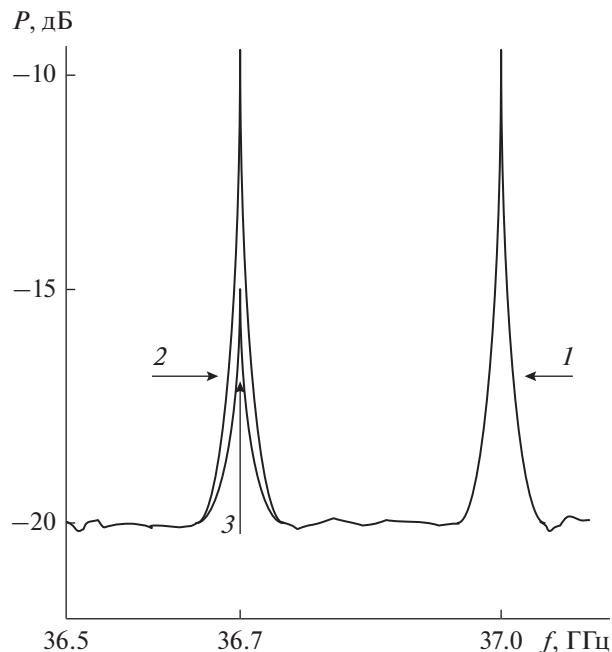


Рис. 4. Зависимость потерь мощности излучения P от частоты f в ВТСП-резонаторе: 1 – резонансный отклик при токе через структурированную пленку $I = 0$; 2 – резонансный отклик при токах до ± 100 мА; 3 – резонансный отклик при токах более ± 100 мА.

индия. Структурированную пленку использовали в качестве “земляной” плоскости. При этом контакт толстой пленки припаивали индием непосредственно на корпус, а контакт тонкой пленки – к дополнительному центральному проводнику коаксиального вывода, который расположен на широкой стенке корпуса и на который подавалось напряжение треугольной формы. Корпус с резонатором закрывался верхней и нижней крышками с использованием индиевых прокладок, что предотвращало возможность попадания жидкого азота на резонатор.

После подключения резонатора к панорамному измерителю КСВН всю конструкцию помещали в пенопластовую емкость, которую заливали жидким азотом и охлаждали до температуры 77 К. На экране индикатора генератора КСВН можно было наблюдать появление резонансного отклика резонатора с центральной частотой 37 ГГц и шириной $2\Delta f = 30$ МГц по уровню 0.5 его амплитуды. При включении генератора напряжения треугольной формы можно наблюдать плавное смещение резонансного отклика на частоту 36.7 ГГц при токах до ± 100 мА. На рис. 4 приведена зависимость потерь СВЧ-мощности P от частоты f в ВТСП-резонаторе с “земляной” плоскостью из структурированной пленки. При увеличении тока частотная перестройка прекращается на частоте 36.7 ГГц и амплитуда резонансного отклика 2 уменьшается на 5 дБ (кривая 3). Резонансный от-

клик Z полностью не затухает, поскольку пленка резонатора находится в сверхпроводящем состоянии, а роль “земляной” плоскости играет нижняя крышка коробчатого корпуса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что структурированная ВТСП-пленка может эффективно использоваться для частотной перестройки элементной базы СВЧ-электроники. При этом не нарушаются условия для топологии элементов, ограниченной диэлектрической проницаемостью подложки $\epsilon_{эф}$, и сохраняется условие для лондонской глубины проникновения поля λ_L . Токи

для управления частотной перестройкой удастся снизить с 10 А до 100 мА при смещении резонансных частот в мм-диапазоне длин волн на 300 МГц.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вольман В.И.* Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств. М.: Радио и связь, 1982. Гл. 3.
2. *Губанков В.Н., Котелянский И.М., Меркурова С.П. и др.* // РЭ. 2002. Т. 47. № 1. С. 115.