

Смеситель субмиллиметрового диапазона длин волн на основе тонкой пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

Н.С. Каурова, М.И. Финкель, С.Н. Масленников
Ю.Б. Вахтомин, С.В. Антипов, К.В. Смирнов, Б.М. Воронов, Г.Н. Гольцман
Московский Педагогический Государственный Университет, 119435 Москва, Россия
К.С. Ильин

Институт микро- и нанoeлектронных систем, Университет Карлсруэ, D-76187 Карлсруэ, Германия

Для исследования атмосфер планет и межзвездного вещества, для изучения объектов раннего космоса и процесса развития вселенной требуются спектрометры высокого разрешения на основе супергетеродинных приемников, работающие в терагерцовом диапазоне частот. В настоящее время для приема информации, переносимой излучением субтерагерцового диапазона в супергетеродинных приемниках, широко применяются смесители на основе диодов с барьером Шоттки (ДБШ) и структур сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС). Однако их чувствительность резко падает на частотах более 1 ТГц, и наилучшими характеристиками на столь высоких частотах обладают смесители на эффекте электронного разогрева. Сверхпроводниковые смесители на основе ультратонких пленок NbN достигают рекордных характеристик по чувствительности и полосе промежуточных частот, но требуют гелиевых температур, что при длительных исследованиях в космических или самолетных проектах может вызывать дополнительные трудности в их применении. В этих условиях наиболее перспективным направлением представляется разработка смесителей на эффекте электронного разогрева, созданных из тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников. Значительные успехи в исследованиях и разработке таких смесителей уже были достигнуты, в частности по результатам эксперимента ширина полосы преобразования в смесителях на основе тонких пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) составляет более 18 ТГц [1]. Одним из важнейших способов дальнейшей оптимизации YBCO смесителей на горячих электронах является уменьшение толщины пленки, что, согласно двух-температурной модели, может привести к существенному увеличению эффективности преобразования на промежуточных частотах, больших частоты среза болометрического отклика [1]. Требуемая мощность гетеродина для такого смесителя составляет более 8 μW [2]. Однако мощность источников монохроматического излучения на частотах более 1 ТГц ограничена. Таким образом, одним из необходимых условий создания практически работающего смесителя является уменьшение требуемой мощности гетеродина, а следовательно уменьшения объема активного участка сверхпроводящей пленки, что является трудной технологической задачей.

В настоящей работе представлен технологический маршрут осаждения тонких пленок YBCO и изготовления терагерцовых смесителей на их основе,

позволяющий существенно уменьшить размер чувствительного элемента смесителя на основе тонкой пленки YBCO.

Одной из важнейших проблем изготовления подобных смесителей является деградация этих устройств, как в процессе изготовления, так и в процессе измерений. Это обусловлено уходом кислорода из тонкой пленки, что ведет к снижению T_c и расширению сверхпроводящего перехода. Деградация во многом обусловлена малыми размерами рабочего элемента. Конечной целью работы являлась разработка технологического процесса изготовления тонкопленочных наноструктур с малыми размерами в плане, а также получение конечных устройств со значениями сверхпроводящих параметров при тестировании по постоянному току (критический ток и температура, а также ширина сверхпроводящего перехода), близких к их значениям в пленке.

Пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) толщиной 20 и 40 нанометров были изготовлены, при использовании стандартной методики импульсно-лазерного осаждения (PLD). Плотность энергии лазерного импульса на мишени была 900 мДж/см² с частотой импульсов 10 Гц. В качестве подложки использовался монокристаллическая окись магния односторонней полировки толщиной 0.3 мм. Для улучшения теплового контакта подложки крепились к нагревателю серебряной пастой. Остаточное давление в камере составляло порядка 5×10^{-5} мбар. Для улучшения согласования пленка – подложка осаждался дополнительный буферный слой $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (PBCO). PBCO – полупроводник с кристаллической структурой, подобной YBCO, и несоответствие решетки между этими двумя материалами незначительно (< 1.5 %) [3]. Буферный слой PBCO толщиной 20-25 нанометров осаждался на MgO подложку при температуре $T_n=780$ °C и давлении кислорода $P_{O_2}=0.4$ мбар. Затем осаждалась пленка YBCO при $T_n=795$ °C и $P_{O_2}=0.5$ мбар. Для защиты пленки YBCO при различных технологических операциях поверх нее тем же методом PLD осаждался тонкий (10 нанометров) надслой PBCO и dc-магнетронным распылением *in situ* слой золота толщиной 80 нм. В таблице 1 приведены толщины слоев PBCO и YBCO для рассматриваемых пленок. После изготовления пленки критическая температура и ширина сверхпроводящего перехода были измерены при использовании индуктивной методики [4]. Сверхпроводящий переход пленки толщиной 20 нм представлен на рис.1.

Номер партии	Подслой РВСО, нм	Пленка YBCO, нм	Надслой РВСО, нм
F61	25	20	10
F49	20	40	10

Методом lift-off электронной литографии из пленки YBCO был сформирован чувствительный элемент смесителя, представляющий собой полосу сверхпроводниковой пленки, заключенную между двумя прямоугольными контактными площадками,

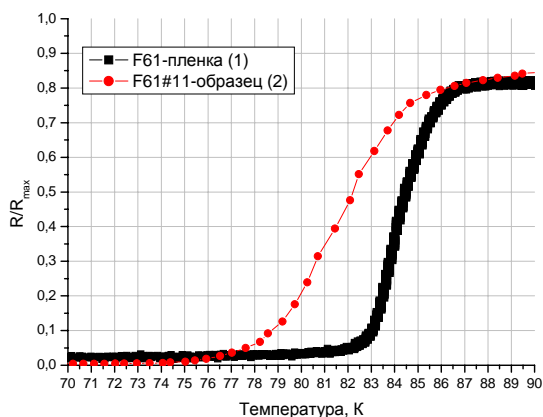


Рис.1 Характерный график сверхпроводящего перехода для пленки YBCO толщиной 20 нм (1) и терагерцового смесителя (2), созданного на ее основе.

интегрированными с логопериодической спиральной антенной. Ключевым моментом изготовления смесителя являлось формирование зазора рабочего элемента. На первом этапе электронной литографией формировались Ti-Au-Ti малые контактные площадки. Затем lift-off электронной и фотолитографией мы изготавливали Gr-Au-Ti спиральную антенну и Ti-Au-Ti внешние контактные площадки. Верхний слой Ti использовался как маска при дальнейшем травлении. Следующим этапом ионным травлением и жидкостным химическим дотравливанием удалялось *in situ* Au с рабочего элемента и по полю. Надслой РВСО защищал YBCO пленку в процессе травления. Для защиты активной области смесителя при удалении пленки YBCO по полю, исключая рабочий элемент, lift-off электронной литографией создавалась маска из монооксида кремния (SiO) толщиной 100 нм. Ширина смесителя определялась шириной SiO маски и указана в таблице 2.

На рис.1 показан характерный вид сверхпроводящего перехода пленки YBCO и терагерцового смесителя, изготовленного на ее основе. Как видно из рисунка, готовый прибор обладает сверхпроводниковыми параметрами, близкими по значению к их значениям в исходной пленке. Результаты измерения

Образец	Размеры образца, мкм.	
	Длина, L	Ширина, W
F61#11	0.2	0.5
F61#13	0.2	0.5
F49#1	0.1-0.12	0.8
F49#2	0.1-0.12	0.8

температуры и ширины сверхпроводящего перехода, а также величины критического тока для образцов, изготовленных на основе пленок толщиной 20 нм и 40 нм, представлены в таблице 3.

Разработанный нами технологический маршрут изготовления образцов позволяет формировать устройства с малым объемом активного участка без существенной деградации свойств исходной пленки. Созданные приборы имеют температуру и ширину сверхпроводящего перехода от 81 К до 83 К и от 2 К до 6.5 К соответственно, при этом плотность крити-

Образец	T _c /ΔT _c пленки, К	T _c /ΔT _c образца, К	Плотность тока при 4.2 К, А/см ²
F61#11	84.5/3	82/6.75	2.3x10 ⁷
F61#13	84.5/3	81.5/6	2.3x10 ⁷
F49#1	89.7/0.5	83.25/3.5	1.0x10 ⁷
F49#2	89.7/0.5	82.75/2.25	1.9x10 ⁷

ческого тока при 4.2 К составляет 1.0-2.3x10⁷ А/см², что позволяет использовать их в качестве смесителей в супергетеродинных приемниках терагерцового диапазона частот.

Дальнейшая работа направлена на уменьшение объема рабочего элемента за счет уменьшения толщины пленки и размеров элемента в плане. Главной проблемой является стабильность YBCO пленки при малых толщинах и размерах. Для решения этой проблемы необходима дальнейшая оптимизация как процесса осаждения пленки, так и других технологических операций изготовления смесителей.

Список литературы.

1. M. Lindgren, M.A. Zorin, V. Trifonov, M. Danerud, D.Winkler, B.S. Karasik, G.N. Goltsman, E.M. Gershenson, Appl. Phys. Lett., vol. 65, No 26, pp. 3398-3400, 1994
2. S. Cherednichenko, F. Ronnung, G. Gol'tsman, E. Kollberg and D. Winkler, 11th Int. Symp. on Space THz Techn., p. 526, Ann Arbor, MI, May 1-3, 2000
3. M. E. Lopez-Morales, D. Rios-Jara, J. Tagüena, R. Escudero, S. La Placa, A. Bezinge, V. Y. Lee, E. M. Engler, and P. M. Grant, Phys. Rev. B **41**, 6655, 1990.
4. K.S. Il'in and M. Siegel, J.Appl.Phys., Vol. 92, No. 1, p. 361, 1 July 2002