

СУБМИЛЛИМЕТРОВЫЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК

Б.П. Горшунов, Г.В. Козлов, О.И. Сиротинский, И.М. Чернышев

Представлены результаты измерений диэлектрических свойств материалов в диапазоне 150–1030 ГГц и рекомендации по их применению в качестве подложек для ВТСП.

Одним из условий успешного получения и практического использования высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) является правильный выбор подложки. С целью выяснения перспективности использования в высокочастотной технике кристаллов, применяемых в качестве материалов подложек [1], мы предприняли исследование их диэлектрических свойств в диапазоне субмиллиметровых волн (150–1030 ГГц).

Измерения спектров действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей диэлектрической проницаемости производились на ЛОВ-спектрометре "Эпсилон" [2] методом "на пропускание" в температурном интервале 5 – 600 К. Образцы представляли собой плоскопараллельные пластинки сечением $\cong 15 \times 15 \text{ мм}^2$ и толщиной в пределах от 26 мкм до 7 мм, которая оптимизировалась с учетом потерь. Погрешность определения ϵ не превышала 1%, ϵ'' – 5%.

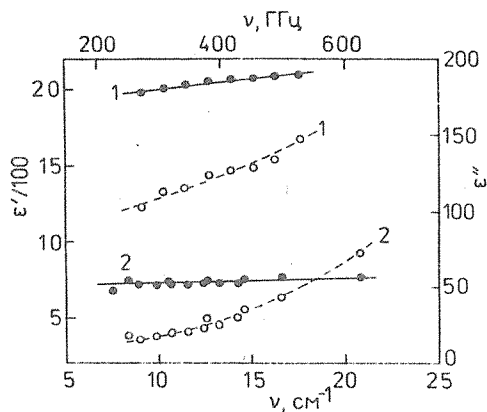


Рис. 1. Диэлектрические спектры ϵ' (темные точки) и ϵ'' (светлые точки) SrTiO_3 при температурах 80 К (1) и 150 К (2).

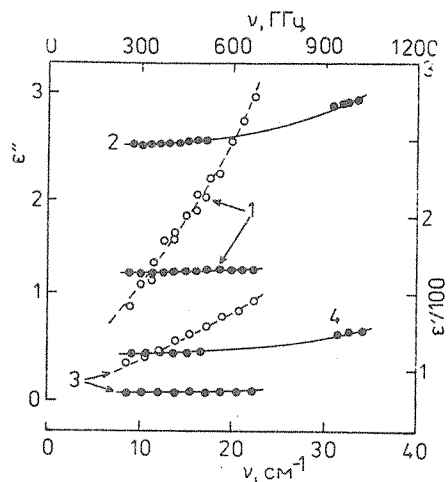


Рис. 2. Диэлектрические спектры ϵ' (темные точки) и ϵ'' (светлые точки) TiO_2 при температурах 296 К (1, 3) и 6 К (2, 4) при поляризациях $E \parallel c$ (1, 2) и $E \perp c$ (3, 4). Для $T = 6 \text{ К}$ значения ϵ' не превышают 0,3 во всем диапазоне частот.

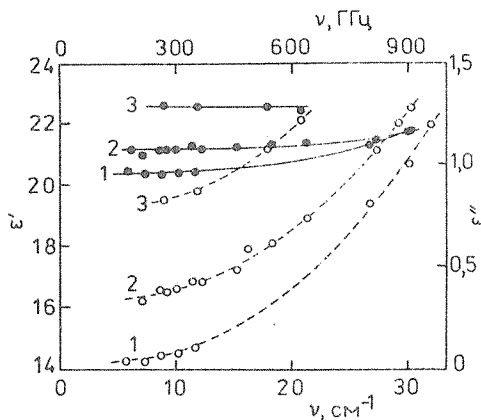


Рис. 3. Диэлектрические спектры ϵ' (темные точки) и ϵ'' (светлые точки) фианита состава 85% $\text{HfO}_2 + 15\% \text{Y}_2\text{O}_3$ при температурах 10 К (1), 296 К (2), 600 К (3).

SrTiO₃. В окрестности 108 К в титанате стронция происходит структурный фазовый переход, сопровождающийся появлением доменов тетрагональной симметрии в объеме кристалла. Монодоменизация образцов при измерении не производилась. Диэлектрические спектры SrTiO₃ представлены на рис. 1. Мнимая часть диэлектрической проницаемости ϵ'' возрастает на порядок с понижением температуры, сильно увеличивается и ϵ' . Это связано с понижением частоты сегнетоэлектрической "мягкой" моды, приближающейся к субмиллиметровому диапазону /3/ со стороны высших частот.

TiO₂. Рутил является одноосным кристаллом. С учетом этого диэлектрические спектры снимались для двух ориентаций вектора электрического поля волны: вдоль и перпендикулярно оптической оси с. Диэлектрические спектры рутила представлены на рис. 2. Видно, что с повышением частоты при всех температурах происходит монотонный рост ϵ' и ϵ'' . Он связан с резонансными модами, лежащими за верхней границей исследуемого диапазона (172 и 189 см⁻¹ при T = 300 К) /4/. При охлаждении образца частоты

Т а б л и ц а 1

Характеристики материалов подложек для сверхпроводящих пленок

Материал	SrTiO ₃	MgO	TiO ₂ (большинство данных взято из /8/)	Фианит
Точечная группа симметрии	m3m при T > 108 К	m3m	4/mmm	m3m
Постоянная решетки, Å	3,9049	4,213	a = 4,594 c = 2,96	5,15
Плотность, 10 ³ кг/м ³	5,122	3,58	4,26	5,85– 9,65*
Точка плавления, °С	2080	2800	1820	2700– 2850*
Коэффициент линейного теплового расширения, 10 ⁻⁶ К ⁻¹	9,4 при T > 120 К	11,2 при 300 К	a = 7,14 c = 9,19	10,5
Удельная теплоемкость, Дж/кг·К		875	703	
Теплопроводность, Вт/м·К		58,6	12,6 c 8,8 ⊥ c	25,5
Модуль Юнга, 10 ¹⁰ Н/м ²	26,5	24,8	35,1	3,85
Диэлектрическая проницаемость ϵ' на 10 кГц	306	9,65	200 c 86,4 ⊥ c	31– 39*
Растворимость в воде	не растворяется	0,0086 г в 100 г при 30 °С	не растворяется	не растворяется

* Зависит от состава.

этих мод несколько понижаются. Этот процесс сопровождается резким повышением добротности мод, что в конечном счете и приводит к понижению диэлектрических потерь TiO_2 при низких температурах /5/.

С понижением температуры от комнатной до гелиевой диэлектрические потери уменьшаются более чем на порядок для обеих ориентаций на частотах выше 500 ГГц. Диэлектрическая проницаемость ϵ' при $E \perp c$ увеличивается на 30%, а в продольной ориентации — в 1,5 раза.

MgO. Согласно полученным данным диэлектрическая проницаемость ϵ' окиси магния в исследуемом диапазоне частот при комнатной температуре может быть описана линейной функцией: $\epsilon' = 9,77 + 0,13 \times 10^{-3} \nu$ (ν в ГГц). При $T = 5 \text{ K}$ $\epsilon' = 9,47$; ϵ'' всюду меньше, чем 0,01.

Фианиты. Мы исследовали свойства монокристаллов двуокиси гафния и циркония, стабилизированных окисью иттрия. Оба базовых типа фианита обладают сходными диэлектрическими свойствами. Спектры ϵ' и ϵ'' фианита состава $85\% \text{HfO}_2 + 15\% \text{Y}_2\text{O}_3$ показаны на рис. 3. В отличие от титаната стронция и рутила ϵ' фианита слабо меняется с понижением температуры, а ϵ'' , как и у рутила, уменьшается почти на порядок при частотах ниже 300 ГГц. С увеличением частоты ϵ' фианита незначительно растет. Дисперсия $\epsilon''(\nu)$ весьма необычна: будучи, как и в других обсуждаемых кристаллах, возрастающей функцией частоты, при комнатной температуре $\epsilon''(\nu)$ не экстраполируется в нуль при $\nu \rightarrow 0$. Это означает, что кроме "крыльев" фононных мод, в $\epsilon''(\nu)$ дает вклад дополнительный низкочастотный механизм дисперсии. Специфической особенностью структуры фианитов является наличие в решетке значительного числа вакансий по кислороду и связанная с этим ионная проводимость. Именно этим и обусловлены, по нашему мнению, дополнительные низкочастотные потери. Подтверждением данного заключения является рост низкочастотного вклада в $\epsilon''(\nu)$, наблюдаемый при повышении температуры и коррелирующий с увеличением ионной проводимости кристаллов /6/.

Таким образом, исследованные материалы располагаются в порядке возрастания диэлектрических потерь в субмиллиметровом диапазоне частот в окрестности температур 90 K (перехода в сверхпроводящее состояние $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) следующим образом: MgO , TiO_2 , фианит, SrTiO_3 . Монокристаллы последнего, получившие в настоящее время наибольшее распространение в качестве материалов подложек, обладают очень высокими потерями в субмиллиметровом диапазоне, и это ограничивает область практического использования сверхпроводящих пленок на SrTiO_3 . Перспективным материалом для подложек является окись магния MgO , которая обладает прекрасными диэлектрическими свойствами и позволяет получать сверхпроводящие пленки достаточно хорошего качества. Кроме диэлектрических потерь для выбора материала подложки существенен и целый ряд других параметров, таких как механическая прочность, теплопроводность, диэлектрическая проницаемость, тепловое расширение, растворимость. Некоторые из этих параметров приведены в табл. 1.

Авторы благодарны А.А. Волкову и В.В. Воронкову за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Laibowitz R. V. et al. J. Phys. В+С, 148, No. 1–3, 182 (1987).
2. Волков А. А. и др. Электронная техника, сер. Электроника СВЧ, 11, 38 (1984).
3. Быстров В. П. и др. Известия АН СССР, сер. физ., 41, 485 (1977).
4. Gervais F., Kress W. Phys. Rev. B, 28, No. 6, 2962 (1983).
5. Волков А. А., Ирисова Н. А., Козлов Г. В. ЖТФ, 44, 886 (1974).
6. Александров В. И. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 3, 3 (1975).
7. Быстров В. П. и др. ЖТФ, 56, 10, 2016 (1986).
8. Воронкова Е. М. и др. Оптические материалы для инфракрасной техники. М., Наука, 1965.

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 13 октября 1988 г.

*Информация о свойствах в субмиллиметровом диапазоне других диэлектрических кристаллов (кварца, сапфира, кальцита, некоторых щелочно-галогидных и щелочно-земельных кристаллов, которые могут оказаться подходящими в качестве материалов подложек, приведена в работе /7/.