

дисилицида титана с гранецентрированной структурой. Меньшее значение его микротвердости обуславливается более совершенной структурой и низкой дефектностью данных пленок по сравнению с пленками, полученными с применением длительной термообработки.

4. При температурах БТО ниже 720 °С, когда в основном образуется обогащенная металлом фаза силицида титана и основную роль в удельном сопротивлении играют *d*-электроны металла, формируемый силицид имеет более высокое удельное сопротивление. При температуре 720 °С и выше происходит формирование обогащенного кремнием силицида титана, в котором основную роль в удельном сопротивлении играют *s*-, *p*-электроны кремния, что обуславливает минимальное значение его удельного сопротивления.

1. Анищик В.М., Горушко В.А., Пилипенко В.А. и др. Физические основы быстрой термообработки и оборудование. Создание многоуровневой металлизации. Мн., 2000.

2. Технология СБИС / Под ред. С. Зи. М., 1986. Т. 2.

3. Мьюрарка Ш. Силициды для БИС. М., 1986.

4. Таруи Я. Основы технологии СБИС. М., 1985.

5. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов: Пер. с англ. М., 1972.

6. Пилипенко В.А., Пилипенко И.В., Пономарь В.Н., Горушко В.А. // Вакуумная техника и технология. 2000. Т. 10. № 1. С. 21.

7. Пономарь В.Н., Пилипенко В.А., Горушко В.А., Пилипенко И.В. // Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники: Тр. VII Междунар. науч.-техн. конф. Таганрог, 2000. С. 100.

Поступила в редакцию 05.02.2001.

*Пилипенко Владимир Александрович* – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, заместитель директора ГЦ «Белмикроанализ».

*Анищик Виктор Михайлович* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела БГУ.

*Пономарь Владимир Николаевич* – кандидат физико-математических наук, директор ГЦ «Белмикроанализ».

*Пилипенко Ирина Владимировна* – аспирант кафедры физики твердого тела БГУ. Научные руководители В.М. Анищик, В.Н. Пономарь.

УДК 537.612

*В.М. ДОБРЯНСКИЙ, В.Ф. МАЛИШЕВСКИЙ, Н.Б. ФРАНЦКЕВИЧ, В.П. ЯРУНИЧЕВ*

### **ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОКСИДОВ И КУПРАТОВ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ $ZrV_2$ И $Nb_3Sn$**

Oxides and kourates are synthesized on the basis of extraconducting  $ZrV_2$  and  $Nb_3Sn$ . Their temperature dependences of conductivity, of dielectric permeability and of tangent of the corner of dielectric losses temperatures to room ones are taken.

$ZrV_2$  и  $Nb_3Sn$  обладают самыми высокими  $T_k$  в своем классе сверхпроводников [1]. Представляет интерес установление характера температурной зависимости сопротивления соединений, имеющих формулы, сходные с формулами ВТСП-материалов, в состав которых входили бы металлы из названных интерметаллических соединений. С этой целью на основе данных соединений были приготовлены окислы и купраты и исследованы их физические свойства. Исходными реактивами для приготовления образцов служили:  $ZrO_2$  “ч”,  $V_2O_5$  “чда”,  $Nb_2O_5$  “осч”,  $SnO$  “чда”,  $CuO$  “осч”. Смеси окислов, взятых в соотношениях, необходимых для образования предполагаемых соединений  $ZrV_2O_x$ ,  $ZrV_2CuO_x$ ,  $ZrV_2Cu_2O_x$ ,  $ZrV_2Cu_3O_x$ ,  $Nb_3SnO_y$ ,  $Nb_3SnCuO_y$ ,  $Nb_3SnCu_2O_y$ ,  $Nb_3SnCu_3O_y$ , смешивали в яшмовой ступке с добавлением этилового спирта. Синтез образцов проводили по обычной кера-



мической технологии двукратным обжигом с промежуточным перетиранием и перепрессовыванием давлением 2,0 кбар [2]. Первый обжиг проводили в течение 16 ч при температуре 600–840 °С в зависимости от состава. Температура второго обжига составляла 640–770 °С для цирконийсодержащих и 990–1300 °С для ниобийсодержащих составов. Время обжига 1 ч. Для определения оптимальных режимов получения исследуемых соединений проводился дифференциально-термический анализ на дериватографе «Derivatograph-c».

Полноту реакций образования соединений контролировали по виду рентгенограмм, снимаемых на рентгеновском аппарате ДРОН-1 в  $\text{CuK}_\alpha$ -излучении.

В качестве образцов для измерений физических свойств использовали диски диаметром 12 мм и толщиной 1 мм и параллелепипеды размером 20x2x2 мм<sup>3</sup>. Индиевые электроды на образцы наносили ультразвуковым паяльником. Сопротивление образцов измеряли по четырехзондовой схеме. Проводимость, диэлектрическую проницаемость и тангенс угла потерь измеряли на частоте  $f=1$  МГц цифровым мостом Е7-12.

Полученные образцы обладали высоким удельным сопротивлением  $\rho = 10^1\text{--}10^8$  Ом·м и не переходили в сверхпроводящее состояние вплоть до гелиевых температур. Более высокое удельное сопротивление при комнатной температуре среди полученных материалов имели ниобийсодержащие соединения –  $\rho \sim 10^6$  Ом·м. Увеличение содержания меди в исследуемых ма-

териалах приводило к понижению их удельного сопротивления, доходившего в ряде случаев до нескольких порядков.

При низких температурах сопротивление исследуемых образцов остается достаточно высоким. Они обладают свойствами, характерными для диэлектриков. Измерения диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ), тангенса угла потерь ( $\text{tg } \delta$ ) и проводимости ( $\sigma$ ) показали, что с увеличением температуры (рис. 1, 2) вплоть до комнатной отмечается резкий рост их величины. При этом в исследуемых соединениях наблюдается полупроводниковый характер зависимости сопротивления от температуры. Следует отметить, что наибольший рост измеряемых величин характеризуется для соединений  $\text{Nb}_3\text{SnCu}_2\text{O}_y$  и

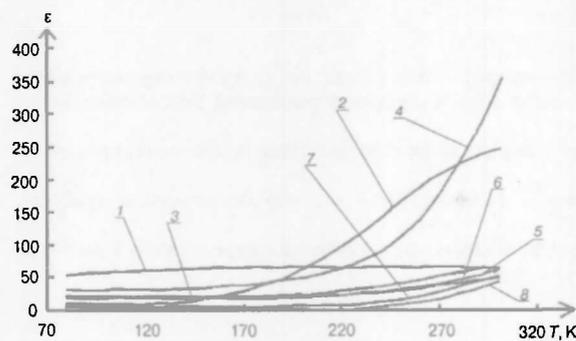


Рис. 1. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры:

1 –  $\text{Nb}_3\text{SnO}_y$ ; 2 –  $\text{ZrV}_2\text{CuO}_y$ ; 3 –  $\text{Nb}_3\text{SnCuO}_y$ ; 4 –  $\text{Nb}_3\text{SnCu}_2\text{O}_y$ ;  
5 –  $\text{Nb}_3\text{SnCu}_3\text{O}_y$ ; 6 –  $\text{ZrV}_2\text{O}_y$ ; 7 –  $\text{ZrV}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ; 8 –  $\text{ZrV}_2\text{Cu}_2\text{O}_y$

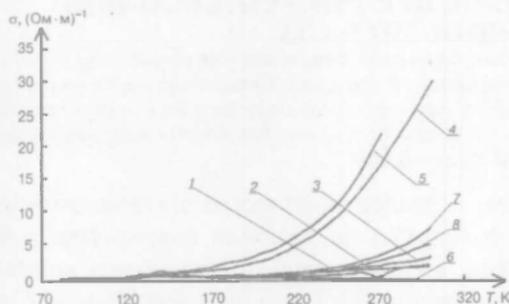


Рис. 2. Зависимость удельной проводимости от температуры:

1 –  $\text{ZrV}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ; 2 –  $\text{Nb}_3\text{SnCuO}_y$ ; 3 –  $\text{Nb}_3\text{SnCu}_3\text{O}_y$ ; 4 –  $\text{Nb}_3\text{SnCu}_2\text{O}_y$ ;  
5 –  $\text{ZrV}_2\text{CuO}_y$ ; 6 –  $\text{Nb}_3\text{SnO}_y$ ; 7 –  $\text{ZrV}_2\text{O}_y$ ; 8 –  $\text{ZrV}_2\text{Cu}_2\text{O}_y$

$ZrV_2CuO_x$ , в то время как у соединения  $Nb_3SnO_y$  эти изменения незначительны.

Аналогичный ход имела и зависимость удельного сопротивления от температуры  $\rho=f(T)$ , полученная на основе измерений сопротивления четырехзондовым методом. Кроме того, у образцов соединения  $ZrV_2Cu_3O_x$  в области температур 80–220 К наблюдался слабовыраженный широкий минимум (рис. 3), а измерения, проведенные индуктивным методом, показали наличие в этих образцах скачка сопротивления при 78,7 К.

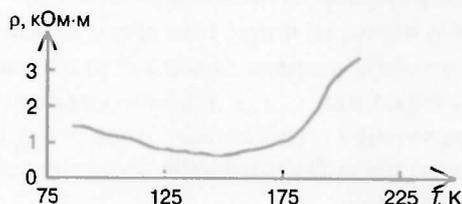


Рис. 3. Температурная зависимость электросопротивления  $ZrV_2Cu_3O_x$

Таким образом, исследования показали, что полученные соединения при комнатной температуре являются полупроводниками с широким диапазоном ширины запрещенной зоны и удельным сопротивлением  $10^7$ – $10^8$  Ом·м. При понижении температуры вплоть до гелиевых они не переходят в сверхпроводящее состояние и лишь в соединении  $ZrV_2Cu_3O_x$  в области температур 80–220 К наблюдается слабовыраженный широкий минимум сопротивления.

1. Вонсовский С.В., Изюмов Ю.А., Курмаев Э.З. Сверхпроводимость переходных металлов, их сплавов и соединений. М., 1977.

2. Луцевич А.Б., Яруничев В.П., Исупов В.А. и др. // Изв. АН СССР. Сер. неорг. мат. 1988. Т. 24. № 12. С. 2040.

Поступила в редакцию 15.12.2000.

*Добрянский Валерий Михайлович* – доктор технических наук, профессор, начальник главного управления высшего образования Министерства образования Республики Беларусь.

*Малишевский Виктор Феликсович* – кандидат физико-математических наук, проректор (БАТУ).

*Францкевич Наталья Викторовна* – инженер НИЛ оптико-электронного приборостроения БГПА.

*Яруничев Виктор Павлович* – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИФТТ и ПП НАН Беларуси).

УДК 621.327.8:535.41

В.А. САЕЧНИКОВ, Э.А. ЧЕРНЯВСКАЯ, Т.П. ЯНУКОВИЧ

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ БРИЛЛЮЭНА В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ ПРИ СИНУСОИДАЛЬНОЙ МОДУЛЯЦИИ СИГНАЛА

The Brillouin scattering in combination with frequency-domain analysis as a sensing technique for distributed measurement of strain and temperature is discussed. Comprehensive theoretical examination of two- and three-wave model of interaction is held. An expression for complex baseband transfer function is obtained. The numerical simulation of response function for single-mode optical fiber with higher temperature and strained regions is held.

В последнее время разработано большое количество оптоволоконных сенсорных систем для измерения различных физических параметров, в частности температуры и деформации. Использование оптического волокна большой длины позволяет создавать распределенные сенсоры. Первым методом для измерений от распределенного источника была рефлектометрия оптического временного домена [1] с использованием обратного релеевского рассеяния для измерения оптических потерь в волокне. Одним их наибо-