

УДК 538.945

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ПАРАМЕТРЫ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ПЛЕНОК VN-SiO₂

Юзефович О. И., к. ф.-м. н.

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины,
61103, Харьков, Украина*

*International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures,
53-421 Wroclaw, Poland*

yuzephovich@ilt.kharkov.ua

Проведено комплексное исследование транспортных свойств гранулированных золь-гель пленок VN-SiO₂ с контролируемым размером гранул. Определены критические температуры сверхпроводящего перехода, значения верхних критических магнитных полей и критических токов: 7.7К, 13Т, плотность критического тока 10⁷А/м². Для температурной зависимости верхнего параллельного критического магнитного поля пленок VN-SiO₂ обнаружен размерный кроссовер 3D к 2D типа. На ВАХ обнаружено явление аномального гистерезиса (т.е. ток возвращения в сверхпроводящее состояние больше критического тока разрушения сверхпроводимости).

Ключевые слова: сверхпроводимость, гранулированные пленки, золь-гель метод, верхние критические магнитные поля, критические токи, вольт-амперные характеристики, аномальный гистерезис.

НАДПРОВІДНІ ПАРАМЕТРИ ГРАНУЛЬОВАНИХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ПЛІВОК VN-SiO₂

Юзефович О. І., к. ф.-м. н.

*Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України,
61103, Харків, Україна*

*International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures,
53-421 Wroclaw, Poland*

yuzephovich@ilt.kharkov.ua

Проведено комплексне дослідження транспортних властивостей гранульованих золь-гель плівок VN-SiO₂ з контрольованим розміром гранул. Визначено критичні температури надпровідного переходу, визначено верхні критичні магнітні поля та критичні струми: 7,5 К, 13 Тл, щільність критичного струму 10⁷ А/м². Для температурної залежності верхнього паралельного критичного магнітного поля плівок VN-SiO₂ виявлено розмірний кросовер від 3D- до 2D-типу. На вольт-амперних характеристиках (ВАХ) виявлено явище аномального гістерезису (тобто струм повернення в надпровідний стан більший за критичний струм руйнування надпровідності).

Ключові слова: надпровідність, гранульовані плівки, золь-гель метод, верхні критичні магнітні поля, критичний струм, вольт-амперні характеристики, аномальний гістерезис.

SUPERCONDUCTING PARAMETERS OF GRANULAR SOL-GEL VN-SiO₂ FILMS

Yuzephovich O. I., PhD

*B.I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of NAS of Ukraine,
47 Lenina prosp., Kharkov, 61103, Ukraine*

*International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures,
53-421 Wroclaw, Poland*

yuzephovich@ilt.kharkov.ua

The possibility of creation of VN-SiO₂ granulated films with the controlled granule size is demonstrated. The sol-gel method is used. Vanadium nitride is suitable for many uses due to its extreme hardness, excellent oxidative stability, corrosion resistance and high-temperature stability. A comprehensive study of superconducting properties of 60% VN-40% SiO₂ granular films has been carried out. The dependence of resistance R vs temperature has been obtained for the interval 1.8-300K. The ratio R_{300}/R_n is equal to 1. The critical temperature of superconducting transitions are obtained, $T_c = 7.7$ K. The width of the resistive transition is about 0.7K. Resistive transitions in magnetic fields up to 4T are not broadened. The upper critical magnetic fields for the VN-SiO₂ granulated films are very high and equal about 13T.

Therefore this film can be used for the superconducting devices. The crossover from 3D- to 2D-behavior in the temperature dependence of the upper critical magnetic field was found. The coherence length value has been calculated –6nm. Current-voltage characteristics have been measured at different values of magnetic field. The temperature dependence of the critical current has been obtained. The critical current density at $T=0\text{K}$ is about 10^7A/m^2 . The temperature dependence of critical currents is found to reveal the crossover from the linear to the Ginsburg-Landau dependence $I_c \sim (1-T/T_c)^{3/2}$. We believe that at the crossover temperature the coherence length become equal to the average grain size. In perpendicular magnetic field the current-voltage characteristics of VN-SiO₂ granulated films show the abnormal hysteresis (the return current to the superconducting state exceeds the critical current of destruction of superconductivity). The hysteresis has an opposite sign in contrast to a thermal one. Its mechanism is probably associated with the percolation conductivity through the net of multiple intergranular current channels.

Key words: superconductivity, the granular film, the sol- gel method, the upper critical magnetic field, the critical current, current-voltage characteristics, abnormal hysteresis.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время динамически развивается тематика исследований, связанная с изучением наноразмерных систем, имеющих принципиально новые уникальные свойства и демонстрирующих необычные квантовые эффекты. Для разработки, создания и использования наноструктурированных систем с заданными свойствами и новыми функциональными возможностями требуются химически и физически стабильные материалы. Этим качествам отвечает нитрид ванадия VN, обладающий высокой адгезией и прочностью, химической инертностью, устойчивостью к термоциклированию и высокой температурой плавления. Этот материал является одним из приоритетных в микроэлектронике [1, 2]. Отдельный интерес представляют его сверхпроводящие свойства ввиду высокой для низкотемпературных сверхпроводников критической температуры – около 9К [3, 4], больших значений критических магнитных полей и критических токов (для тонких пленок $J_c \sim 10^7\text{A/cm}^2$). Для тонких пленок наблюдается малая длина когерентности ξ – 4-7 нм и большая лондоновская глубина проникновения магнитного поля $\lambda \sim 180\text{нм}$. Поэтому, ультратонкие однородные пленки VN могут активно использоваться для создания сверхпроводящих детекторов, фильтров, однофотонных транзисторов и антенн.

Структурные и электрофизические свойства пленок существенно зависят от методов изготовления. Внесение в пленку беспорядка с одной стороны приводит к уменьшению критической температуры, а с другой – может повысить такие параметры, как критический ток и критическое магнитное поле. Кроме того, беспорядок является одним из возможных механизмов, приводящих к возникновению таких квантовых эффектов, как переход сверхпроводник-изолятор [5-8], стохастический резонанс [9, 10] и др. Поэтому, как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения, представляет интерес возможность создания гранулированных структур с заданными размерами гранул в изолирующих матрицах. Гранулированные пленки могут состоять из гранул размером от единиц до сотен нанометров и относятся к классу искусственных материалов, в которых можно легко моделировать электронные свойства [5]. Например, подстройкой связи между гранулами система может переводиться из состояния «хорошего металла» или сверхпроводника в состояние «изолятора». Сверхпроводимость в них возникает пошагово. Вначале в сверхпроводящее состояние переходят отдельные гранулы, а затем между ними образуется джозефсоновская связь и наступает сверхпроводящее состояние всей системы в целом.

Среди обычных методов изготовления гранулированных сверхпроводников распространены термическое испарение и магнетронное напыление. В данной работе использована альтернативная технология создания гранулированных пленок – золь-гель технология с последующим термическим нитрированием. Она позволяет синтезировать качественные покрытия, отвечающие высоким требованиям современной техники, и контролировать размеры сверхпроводящих гранул в изоляционной матрице [11].

Здесь приводятся результаты комплексного исследования сверхпроводящих характеристик гранулированных пленок 60VN-40SiO₂ толщиной 450нм, выбранных из серии образцов $x\text{VN}-(100-x)\text{SiO}_2$ (где $x = 90, 80, 70, 60$ and $50\text{ mol}\%$), структурные свойства которых были

детально исследованы нами ранее [12]. Определены критические параметры: критические температуры, верхние критические магнитные поля и критические токи. Обсуждаются явления размерного кроссовера верхних магнитных полей, кроссовера температурной зависимости критического тока и явление аномального гистерезиса вольт-амперных характеристик (ВАХ).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ПРИГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

Пленки $60\text{VN}-40\text{SiO}_2$ были изготовлены методом термического нитридирования золь-гель покрытий $\text{V}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ в среде аммиака. Начальный раствор представляет собой смесь тетраэтоксисилана $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{Si}$ (TEOS, Fluka) и ванадия окситрипроксида $\text{OV}(\text{OC}_3\text{H}_7)_3$ (Aldrich) в молярном соотношении 60 и 40 mol% с добавлением этанола и ацетилацетона в качестве комплексообразующего агента. Раствор наносили на кварцевую подложку методом центрифугирования. Подложки с нанесенной пленкой высушивались 24 часа при комнатной температуре и затем в муфельной печи при температуре 250°C около часа. Данная процедура позволяет получить пленку толщиной около 150 нм. Для получения пленок большей толщины процедуру повторяли необходимое количество раз. После получения покрытия $\text{V}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ пленка подвергалась термическому нитридированию в среде проточного аммиака при скорости нагрева $1^\circ\text{C}/\text{мин}$ до температуры 1200°C , выдерживалась изотермически в течение часа и затем охлаждалась.

Согласно результатам атомно-силовой микроскопии образца $x = 70$, представленным на рис. 1 в работе [12], размер сверхпроводящих наногранул порядка 30 нм. Структурные исследования детально описаны в работах [11, 12].

Транспортные измерения проведены в стандартном гелиевом криостате Oxford Instruments, снабженном сверхпроводящим соленоидом с максимальным магнитным полем 14 Тл, в интервале температур 1.4–300 К. Точность определения и стабилизации температуры в интервале 1.4–10 К не хуже 10^{-3} К, а в интервале 10–300 К–0.05 К.

Сопротивление R измерялось четырехзондовым методом, образцы представляли собой двойные холловские кресты. Измерения проводились на постоянном токе. Выходной импеданс источника тока составлял 1 МОм. Направление транспортного тока \mathbf{I} параллельно плоскости пленки при соблюдении условия $\mathbf{I} \perp \mathbf{H}$. Величины критических магнитных полей H_{c2} и критических температур определялись по середине резистивных переходов. Для измерения ВАХ использовано линейно изменяющееся во времени напряжение (0.4 В/мин) с намеренно низким балластом 2 кОм в цепи, соизмеримым с сопротивлением образца. Величины критических токов определялись при уровне напряжения 1 мкВ. Образец помещался в герметичную вставку для криостата, из которой откачивался воздух. Затем вставка заполнялась газообразным гелием до давления 0.2 атм. Внутри вставки размещен нагреватель сопротивлением 75 Ом и полупроводниковый датчик температуры Cernox. Контроллер LakeShore-340 выполнял функции стабилизации температуры либо регулятора скорости ее изменения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлен переход в сверхпроводящее состояние для пленки $60\text{VN}-40\text{SiO}_2$ в нулевом магнитном поле $H = 0$ Тл. Критическая температура начала сверхпроводящего перехода $T_c(0.9) = 8.1$ К, конца - $T_c(0.1) = 7.4$ К, середины - $T_c(0.5) = 7.7$ К и ширина сверхпроводящего перехода $\Delta T_c = \Delta T(T_{0.9}-T_{0.1}) = 0.7$ К, $T_{conset} \sim 8.5$ К. Начало сверхпроводящего перехода определяется появлением сверхпроводимости в объеме гранул, а конец – появлением сверхпроводимости по слабым межгранульным путям. Критическая температура чистого VN составляет порядка 9 К, для наших пленок значение критической температуры немного ниже. Беспорядок может существенно уменьшать величину критической температуры. В идеальной системе гранул фазовая когерентность наступает одновременно во всем объеме, а размытие сверхпроводящего перехода определяется

влиянием флуктуаций параметра порядка. Реальные системы обладают пространственной неоднородностью как размеров гранул, так и толщин диэлектрических прослоек. Для таких систем больше подходят протекательные модели проводимости, согласно которым, при понижении температуры фазовая когерентность устанавливается только в ограниченном количестве кластеров. По мере понижения температуры сверхпроводящие кластеры растут, и образуется бесконечный кластер - сопротивление падает до нуля [13].

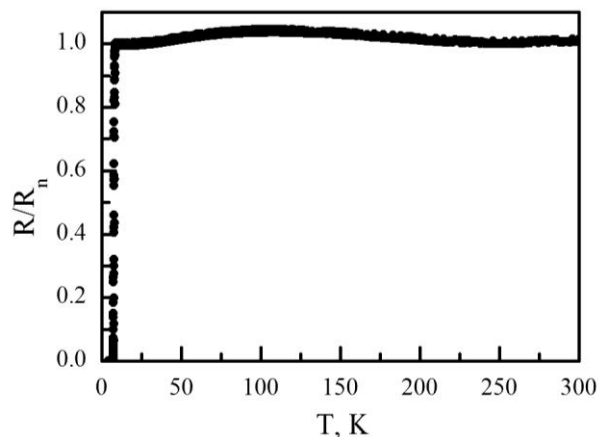


Рис. 1. Температурная зависимость нормированного сопротивления образца 60VN-40SiO₂

Во многих системах (гранулированных пленках, ВТСП, пленках и кристаллах MgB₂) в магнитном поле наблюдается уширение резистивных переходов, которое может быть связано с неоднородностью структуры, флуктуациями сверхпроводящего параметра порядка или крипом магнитного потока. На рис. 2 представлены температурные зависимости нормированного сопротивления пленки 60VN-40SiO₂ при разных значениях магнитного поля H , перпендикулярного плоскости пленки. Ширина резистивного перехода ΔT (ΔT – разница температур, определенных в точках $0.1R$ и $0.9R$) в нулевом магнитном поле порядка 0.7 К и не изменяется при увеличении магнитного поля. Уширение резистивных переходов незначительно.

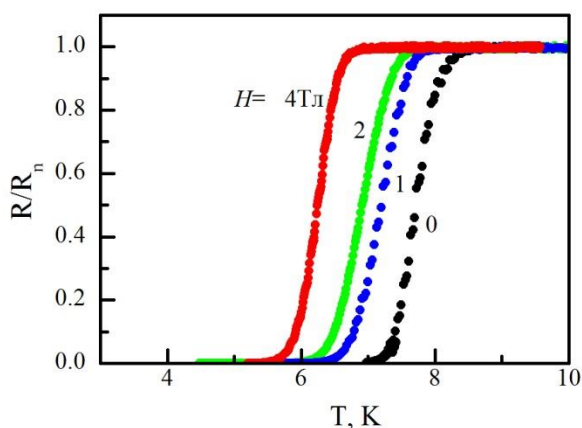


Рис. 2. Температурные зависимости нормированного сопротивления образца 60VN-40SiO₂ в магнитном поле 0 Тл, 1 Тл, 2 Тл и 4 Тл

На рис. 3 представлена температурная зависимость параллельного верхнего магнитного поля для образца 60VN-40SiO₂. Значения верхних перпендикулярных и параллельных критических магнитных полей при $T = 0$ К определены методом экстраполяции зависимостей $H_c(T)$. Из линейной зависимости $H_{c\parallel}^2(T)$ следует, что величина параллельного верхнего критического поля составляет примерно 13 Тл. Значение параллельной длины когерентности $\xi_{\parallel}(0)$, определенное из температурной зависимости перпендикулярного критического поля, составляет приблизительно 6 нм.

Как видно из рис. 3, зависимость $H_{c||}$ близка к корневой (2D-поведение) и имеет неявный линейный участок вблизи T_c , т.е. наблюдается кроссовер 3D-2D. Данный кроссовер может быть объяснен в рамках теории Гинзбурга-Ландау и связан с поведением вихревой системы. Вблизи T_c длина когерентности больше, чем размер гранул. При температуре кроссовера зависящая от температуры длина когерентности $\xi_{||}(T)$ составляет 20 нм, т.е. становится соизмеримой с размером гранул – 30 нм.

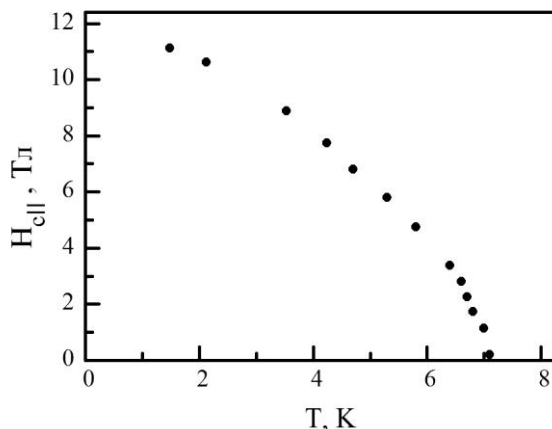


Рис. 3. Температурная зависимость параллельного верхнего критического магнитного поля для образца 60VN-40SiO₂

Зависимость критического тока от температуры представлена на рис. 4. Как видно зависимость является линейной и хорошо аппроксимируется зависимостью $(1-T/T_c)$ [14, 15], что характерно для SNS гранулированных систем. Плотность тока в нуле температур $j_c(0) \sim 10^7 \text{ A/m}^2$. При температуре, очень близкой к критической, наблюдается отклонение от данной зависимости. Наблюдается кроссовер к зависимости Гинзбурга-Ландау $I_c \sim (1-T/T_c)^{3/2}$. Т.е. вблизи T_c реализуется равномерное распределение плотности критического тока по сечению образца. Наблюдаемая форма зависимости, по-видимому, объясняется тем, что при температуре кроссовера длина когерентности сравнивается со средним размером гранул. При дальнейшем понижении температуры пленка ведет себя как совокупность гранул с прямой или туннельной проводимостью межгранульных барьеров. Температуры кроссовера на зависимостях $I_c(T)$ и $H_c(T)$ естественно отличаются ввиду того, что критический ток определялся по уровню напряжения 1 мкВ.

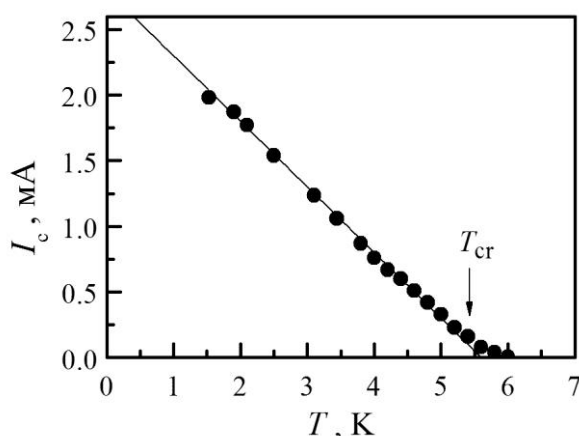


Рис. 4. Температурные зависимости критического тока гранулированной пленки 60VN-40SiO₂. $H = 0 \text{ Tл}$

На рис. 5 представлена ВАХ в нулевом магнитном поле. Как видно, ВАХ N-образная, с гистерезисом. Прямой ход ВАХ лежит выше обратного. По-видимому, данный гистерезис связан с тепловой неустойчивостью и образованием «hot-spot». Возникновение и временная эволюция таких нормальных перегретых областей (доменов) определяется балансом тепла, выделяемого в пленке за счет разогрева током, и тепла, отводимого вглубь подложки. В

режиме заданного тока выделяемая мощность растет пропорционально размеру домена, а тепловая неустойчивость развивается лавинообразно, пока перегретая область не заполняет всю пленку, переводя ее в нормальное состояние. Таким образом, на ВАХ возникает тепловой гистерезис: при увеличении тока до некоторого значения наблюдается скачок напряжения с переходом в нормальное состояние, а возврат в сверхпроводящее состояние при уменьшении тока происходит при меньшем его значении.

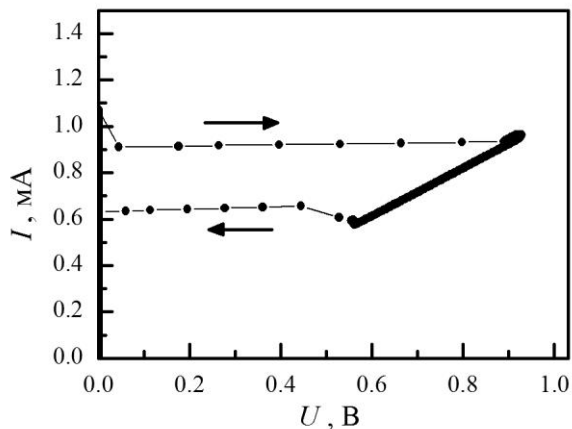


Рис. 5. ВАХ гранулированной пленки 60VN-40SiO₂.
 $H = 0$ Тл, $T = 2$ К

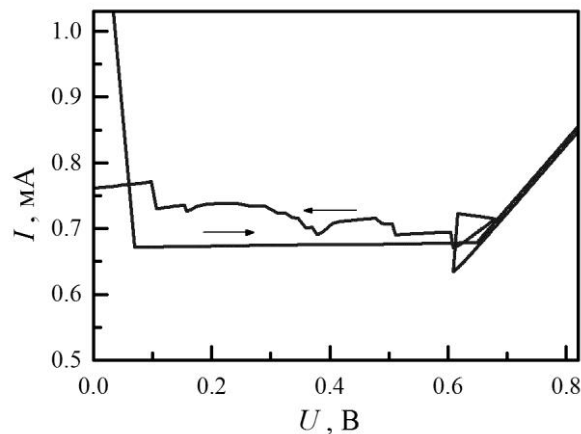


Рис. 6. ВАХ с аномальным гистерезисом
60VN-40SiO₂. $H = 3$ Тл, $T = 2$ К

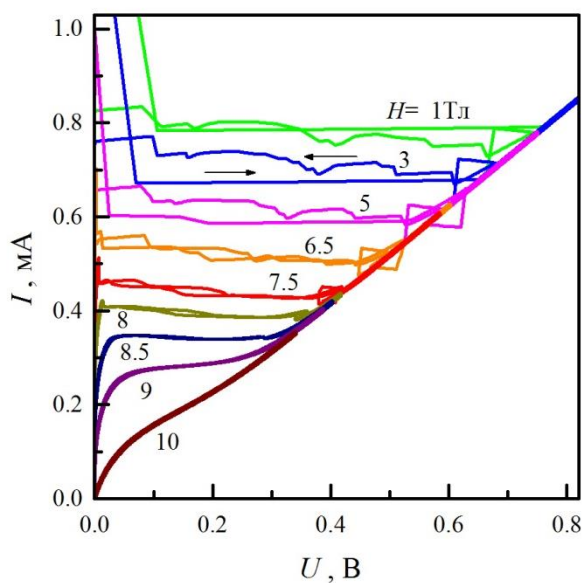


Рис. 7. ВАХ образца 60VN-40SiO₂ при разных значениях магнитного поля. $T = 2$ К

На ВАХ в интервале магнитных полей от 1 Тл до 7 Тл обнаружен аномальный гистерезис, который противоположен обычному тепловому гистерезису, возникающему вследствие перегрева пленок током при переходе их в резистивное состояние с образованием нормальных тепловых доменов (рис. 6). А именно, ток возвращения в сверхпроводящее состояние больше критического тока разрушения сверхпроводимости (рис. 7). В полях выше 5 Тл наблюдается гистерезис смешанного типа. При низких температурах, ток выше критического приводит к развитию тепловой неустойчивости, наблюдаются одновременно аномальный и тепловой гистерезис. В полях, начиная с 8 Тл, гистерезис отсутствует. В полях $H > 10$ Тл, на ВАХ уже нет признаков сверхпроводимости, и она линейна, выполняется закон Ома. Явление аномального гистерезиса не связано с кризисом кипения гелия, поскольку образец помещен в газообразный гелий. Природа аномального гистерезиса, по-видимому, связана с перколяционным типом проводимости, с наличием в пленке многосвязных токовых путей. Такой гистерезис наблюдался и ранее в гранулированных джозефсоновских средах

[16-18]. Предполагается, что данный эффект может быть объяснен с использованием модели динамики магнитного потока в двумерной сверхпроводящей сети со слабыми джозефсоновскими связями, обладающей большим числом близких по энергии метастабильных состояний (фрустрационный потенциал). Данное явление требует более детальных исследований и численных расчетов согласно модели, предложенной в работе [16].

ВЫВОДЫ

Продемонстрирована возможность создания гранулированных золь-гель пленок VN-SiO₂ с контролируемым размером гранул. Нитрид ванадия VN обладает высокой адгезией и прочностью, химической инертностью, устойчивостью к термоциклированию и высокой температурой плавления и, таким образом, является одним из приоритетных в микроэлектронике.

Измерена температурная зависимость сопротивления в широком интервале температур 1.8–300 К для гранулированной пленки 60%VN-40%SiO₂. Отношение R_{300}/R_n равно 1. Критическая температура сверхпроводящего перехода пленки составляет 7.7 К. Уширение резистивного перехода - 0.7 К. Верхние критические магнитные поля высоки и достигают 13 Тл. Длина когерентности в нуле температур равна 6 нм. Обнаружен кроссовер от 3D- к 2D-поведению параллельного верхнего критического поля, связанный с соизмеримостью длины когерентности при температуре кроссовера 20 нм с размером гранул 30 нм.

Измерены ВАХ при разных температурах. Определена температурная зависимость критического тока. Плотность критического тока составляет 10^7 А/м². Температурная зависимость критического тока проявляет кроссовер от линейной зависимости к зависимости Гинзбурга-Ландау вблизи T_c . Такой кроссовер характерен для SNS структур с джозефсоновской связью. На ВАХ обнаружено явление аномального гистерезиса (т.е. ток возвращения в сверхпроводящее состояние больше критического тока разрушения сверхпроводимости), механизм которого связан с перколяционной проводимостью системы через сеть многосвязных токовых каналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Oyama S. T. Preparation and catalytic properties of transition metal carbides and nitrides/ S.T. Oyama // Catal. Today. – 1992. – V.15, Issue 2. – P. 179-200.
2. Kwon H. Vanadium nitride catalysis: synthesis and evaluation for n-butane dehydrogenation / H. Kwon, S. Choi, L.T. Thompson // J.Catal. – 1999. – V. 184, №1. – P. 236-246.
3. Zhao B. R. Superconducting and normal-state properties of vanadium nitride / Zhao B.R., Chen L., Luo H.L., Jack M.D., Mullin D.P. // Phys. Rev. B. – 1984. – V.29, №4. – P. 6198-6202.
4. Gray K. E. Superconducting properties of VN_x sputtered films including spin fluctuations and radiation damage of stoichiometric VN / Gray K.E., Kampwirth R.T., Capone D.W., Vaglio R., Zasadzinski J. // Phys. Rev. B. – 1988. – V. 38, №4. – P. 2333-2341.
5. Beloborodov I. S. Granular electronic systems / Beloborodov I.S., Lopatin A.V., Vinokur V.M., and Efetov K.B. // Rev.Mod.Phys. – 2007. – V.79, №2. – P. 469-518.
6. Гантмахер В. Ф. Квантовый фазовый переход сверхпроводник-изолятор / В.Ф. Гантмахер, В.Т. Долгополов // УФН. – 2010. – Т. 180, №1. – С. 3-53.
7. Koscielska B. Superconducting Properties of NbN-SiO₂ Sol-Gel Derived Thin Films / Koscielska B., Yuzepovich O.I., Bengus S.V., Witkowska A. // Acta Physica Polonica. A. – 2010. – V. 2010, №8. – P. 383-386.
8. Юзефович О. И. Сверхпроводимость гранулированных пленок 80NbN-20SiO₂ / Юзефович О.И., Костельска Б., Бенгус С.В., Витковска А. // ФНТ. – 2010. – Т. 36, №12. – С. 1312-1319.
9. Glukhov A. M. Stochastic resonance-based input circuits for SQUIDs / Glukhov A.M., Turutanov O.G., Shnyrkov V.I., and Omelyanchouk A.N. // ФНТ. – 2006. – Т. 32, №12. – С. 1477-1484.
10. Glukhov A. M. Superconducting Quantum Interference in Fractal Percolation Films. Problem of 1/f Noise / Glukhov A.M, Pokhila A.S., Dmitrenko I.M., Kolinko A.E., Panchekha A.P. // Physica B. – 1997. – V. 240, №3. – P. 242-253.

11. Kościelska B. Electrical and Mechanical Properties of Nitrided Sol-gel Derived TiO_2 and $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ films / Kościelska B., Murawski L., Wicikowski L. // *Mat.Sci.* – Poland. – 2005. – V. 23, №1. – P. 93-100.
12. Kościelska B. Superconducting Properties of VN- SiO_2 Sol-Gel Derived Thin Films / Kościelska B., Yuzepovich O.I., Bengus S.V., Winiarski A., Sadowski W. and Lapinski M. // *Acta Physica Polonica. A.* – 2012. – V. 121, №4. – P. 832-835.
13. Белевцев Б. И. Сверхпроводимость и локализация электронов в двумерных металлических системах / Б.И. Белевцев // *УФН.* – 1990. – Т. 160, №1. – С. 65-98.
14. Clem J. R. Granular and superconducting-glass properties of the high-temperature superconductors / John R. Clem // *Physica C.* – 1988. – Vol. 153-155, Part 1. – P. 50-55.
15. Darhmaoui H. Crossover effects in the temperature dependence of the critical current in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ / Darhmaoui H. and Jung J. // *Phys. Rev. B.* – 1996. – V. 53, №21. – P. 14621-14630.
16. Бевза Ю. Г. Аномальный гистерезис на ВАХ неоднородных сверхпроводящих пленочных структур / Ю.Г. Бевза, И.М. Дмитренко, А.В. Лукашенко, О.Г. Турутанов // 21-е Всесоюзное совещание по физике низких температур. Тезисы докладов. – Ч. I. – Харьков : ФТИНТ АН УССР. – 1980. – С. 185-186.
17. Богомолов В. Н. Вольт-амперные характеристики регулярной системы слабосвязанных сверхпроводящих частиц / В.Н. Богомолов, В.В. Журавлев, А.И. Задорожний и др. // *Письма ЖЭТФ.* – 1982. – Т. 36, Вып. 8. – С. 298-300.
18. Романов С. Г. Разрушение током сверхпроводящего состояния в трехмерной решетке слабосвязанных гранул индия в опале // С.Г. Романов, Д.В. Шамшур // *ФТТ.* – 2000. – Т. 42, Вып. 4. – С. 581-588.

REFERENCES

1. Oyama, S.T. (1992), "Preparation and catalytic properties of transition metal carbides and nitrides", *Catal. Today*, vol. 15, issue 2, pp. 179-200.
2. Kwon, H., Choi, S. and Thompson, L.T. (1999), "Vanadium nitride catalysis: synthesis and evaluation for n-butane dehydrogenation", *J.Catal.*, vol. 184, no.1, pp. 236-246.
3. Zhao, B.R., Chen, L., Luo, H.L., Jack, M.D. and Mullin, D.P. (1984), "Superconducting and normal-state properties of vanadium nitride", *Phys. Rev. B.*, vol. 29, no. 4, pp. 6198-6202.
4. Gray, K.E., Kampwirth, R.T., Capone, D.W., Vaglio, R. and Zasadzinski, J. (1988), "Superconducting properties of VN_x sputtered films including spin fluctuations and radiation damage of stoichiometric VN", *Phys. Rev. B.*, vol. 38, no. 4, pp. 2333-2341.
5. Beloborodov, I.S., Lopatin, A.V., Vinokur, V.M., and Efetov, K.B. (2007), "Granular electronic systems" *Rev.Mod.Phys.*, vol. 79, no.2, pp. 469-518.
6. Gantmakher, V.F. and Dolgopopov, V.T. (2010), "Superconductor-insulator quantum phase transition", *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 53, no. 1, pp. 1-49.
7. Kocielska, B., Yuzepovich, O.I., Bengus, S.V. and Witkowska, A. (2010), "Superconducting Properties of NbN- SiO_2 Sol-Gel Derived Thin Films", *Acta Physica Polonica. A.*, vol. 2010, issue 8, pp. 383-386.
8. Yuzepovich, O.I., Bengus, S.V., Kościelska, B. and Witkowska, A. (2010), "Superconductivity of $80\text{NbN-}20\text{SiO}_2$ granular films", *Low Temperature Physics*, vol. 12, issue 36, pp. 1058-1063.
9. Glukhov, A.M., Turutanov, O.G., Shnyrkov, V.I., and Omelyanchouk, A.N. (2006), "Stochastic resonance-based input circuits for SQUIDS", *Low Temperature Physics*, vol. 32, issue 12, pp. 1123-1130.
10. Glukhov, A.M., Pokhila, A.S., Dmitренко, I.M., Kolinko, A.E. and Panckekha, A.P. (1997), "Superconducting Quantum Interference in Fractal Percolation Films. Problem of $1/f$ Noise" *Physica B.*, vol. 240, no. 3, pp. 242-258.
11. Kościelska, B., Murawski, L. and Wicikowski, L. (2005), "Electrical and Mechanical Properties of Nitrided Sol-gel Derived TiO_2 and $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ films", *Mat.Sci.-Poland*, vol. 23, no. 1, pp. 93-100.
12. Koscielska, B., Yuzepovich, O.I., Bengus, S.V., Winiarski, A., Sadowski, W. and Lapinski, M. (2012), "Superconducting Properties of VN- SiO_2 Sol-Gel Derived Thin Films", *Acta Physica Polonica. A.*, vol. 121, no. 4, pp. 832-835.
13. Belevtsev, B.I. (1990), "Superconductivity and localization of electrons in disordered two-dimensional metal system", *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 33, issue 1, pp. 36-54.
14. Clem, J.R. (1988), "Granular and superconducting-glass properties of the high-temperature superconductors", *Physica C*, vol. 153-155, part 1, pp. 50-55.
15. Darhmaoui, H. and Jung, J. (1996), "Crossover effects in the temperature dependence of the critical current in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ", *Phys. Rev. B*, vol. 53, no. 21, pp. 14621-14630.

16. Bevza, Yu.G., Dmitrenko, I.M., Lukashenko, A.V. and Turutanov, O.G. (1980), "Abnormal hysteresis in CVCs of non-uniform superconducting thin-film structures", *21-ye Vsesoyuznoye soveshchaniye po fizike nizkikh temperature. Tezisy dokladov* [21th All-union conference on cryogenics. Theses of lectures], FTINT AN USSR, Kharkov, part I, pp. 185-186.
17. Bogomolov, V.N., Zhuravlev, V.V., Zadorozhnii, A.I., Kolla, E.V., and Kumzerov, Y.A. (1982), "Voltage-current characteristics of a regular system of weakly coupled superconducting particles", *JETP Lett.*, vol. 36, issue 8, pp. 365-367.
18. Romanov, S.G. and Shamshur, D.V. (2000), "Suppression of the superconductivity in 3-dimensional lattice of weakly coupled indium nanoparticles in opal", *Solid State Phys.*, vol. 42, issue 4, pp. 594-602.

УДК 539.377

ТЕРМОНАПРУЖЕНИЙ СТАН ЦИЛІНДРА ЗА НЕПОВНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРИПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ, ЯКЩО ВІДОМІ ПОВЕРХНЕВІ КОЛОВІ НАПРУЖЕННЯ

Яцків О. І., м. н. с.

*Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України,
вул. Наукова, 3б, м. Львів, 79060, Україна*

viktsya@gmail.com

Досліджено термонапружений стан довгого циліндра за неповної інформації про теплофізичні властивості приповерхневого шару. Зведені параметри тепловіддачі та теплоємності шару входять у записані неklasичні нестационарні граничні умови задачі, які враховують вплив тонкого приповерхневого шару на теплопровідність циліндра. Розроблений раніше автором метод ідентифікації теплофізичних параметрів за відомою в дискретні моменти часу температурою поверхні поширено на випадок задання поверхневих колових напружень. Побудоване спеціальне подання для напружень через температуру поверхні в цьому разі перетворюється в інтегральне рівняння типу Вольтерра на температуру поверхні циліндра. Невідомий теплофізичний параметр визначається як результат дії отриманого інтегро-диференційного оператора на знайдену з інтегрального рівняння температуру. Здійснено уточнення визначеного параметра перебором його околу і знаходженням такого, для якого середнє квадратичне відхилення поверхневих напружень, обчислених як розв'язок прямої задачі, від заданих буде найменшим. Досліджено стійкість оберненої задачі ідентифікації теплофізичних параметрів щодо малих похибок вхідних даних.

Ключові слова: термопружність, циліндр, приповерхневий шар, неklasичні нестационарні граничні умови, теплофізичні параметри, інтегральне рівняння Вольтерра, ідентифікація параметрів, похибка ідентифікації.

ТЕРМОНАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЦИЛИНДРА ПРИ НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ О ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ, ЕСЛИ ИЗВЕСТНЫ ПОВЕРХНОСТНЫЕ ОКРУЖНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Яцкив А. И., м. н. с.

*Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України,
ул. Научная, 3б, г. Львов, 79060, Украина*

viktsya@gmail.com

Исследовано термонапряжённое состояние длинного цилиндра при неполной информации о теплофизических свойствах приповерхностного слоя. Приведенные параметры теплоотдачи и теплоемкости слоя входят в неклассические нестационарные граничные условия, которые учитывают влияние приповерхностного слоя на теплопроводность цилиндра. Разработанный ранее автором метод идентификации теплофизических параметров при известной в дискретных моментах времени температуре поверхности распространен на случай, если заданы поверхностные окружные напряжения. В этом случае построенное для напряжений специальное представление через поверхностную температуру превращается в интегральное уравнение типа Вольтерра на температуру поверхности цилиндра. Неизвестный теплофизический параметр определяется в результате действия полученного интегро-дифференциального оператора на найденную из интегрального уравнения температуру.