

УДК 538.945

## СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ПАРАМЕТРЫ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ПЛЕНОК VN-SiO<sub>2</sub>

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-SiO<sub>2</sub> с контролируемым размером гранул. Определены критические температуры сверхпроводящего перехода, значения верхних критических магнитных полей и критических токов: 7.7К, 13Т, плотность критического тока 10<sup>7</sup>А/м<sup>2</sup>. Для температурной зависимости верхнего параллельного критического магнитного поля пленок VN-SiO<sub>2</sub> 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-SiO<sub>2</sub>

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-SiO<sub>2</sub> 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 10<sup>7</sup> А/м<sup>2</sup>. Для температурної залежності верхнього паралельного критичного магнітного поля плівок VN-SiO<sub>2</sub> 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-SiO<sub>2</sub> 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-SiO<sub>2</sub> 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% SiO<sub>2</sub> 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-SiO<sub>2</sub> 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  $10^7\text{A/m}^2$ . 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-SiO<sub>2</sub> 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  $\xi$  – 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-40SiO<sub>2</sub> 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  $250^\circ\text{C}$  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  $1200^\circ\text{C}$ , 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].

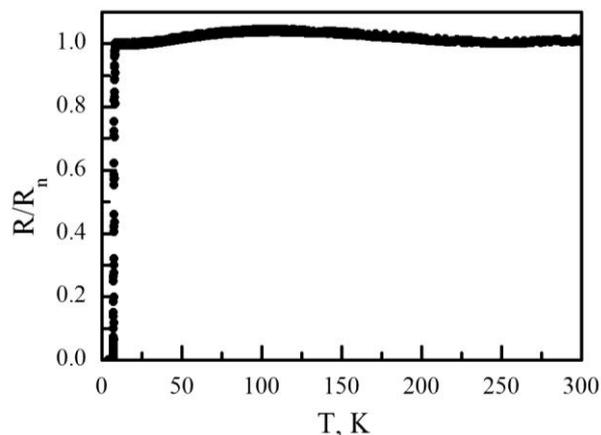


Рис. 1. Температурная зависимость нормированного сопротивления образца 60VN-40SiO<sub>2</sub>

Во многих системах (гранулированных пленках, ВТСП, пленках и кристаллах MgB<sub>2</sub>) 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-40SiO<sub>2</sub> при разных значениях магнитного поля  $H$ , перпендикулярного плоскости пленки. Ширина резистивного перехода  $\Delta T$  ( $\Delta T$  – 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.

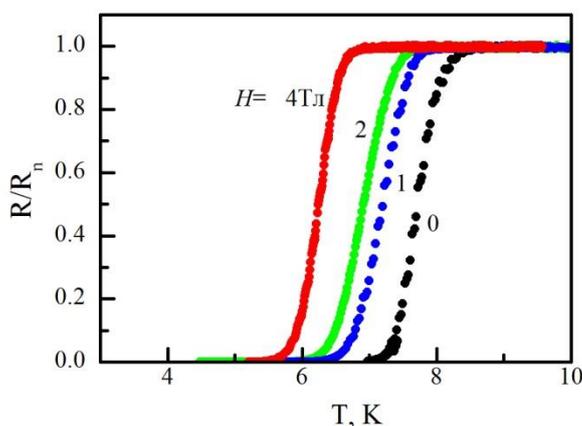


Рис. 2. Температурные зависимости нормированного сопротивления образца 60VN-40SiO<sub>2</sub> в магнитном поле 0 Тл, 1 Тл, 2 Тл и 4 Тл

На рис. 3 представлена температурная зависимость параллельного верхнего магнитного поля для образца 60VN-40SiO<sub>2</sub>. 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.

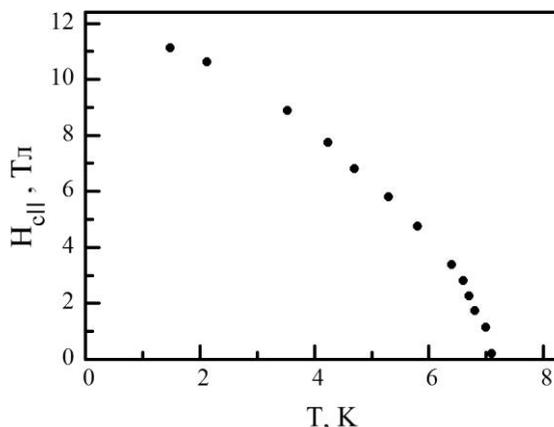


Рис. 3. Температурная зависимость параллельного верхнего критического магнитного поля для образца 60VN-40SiO<sub>2</sub>

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.

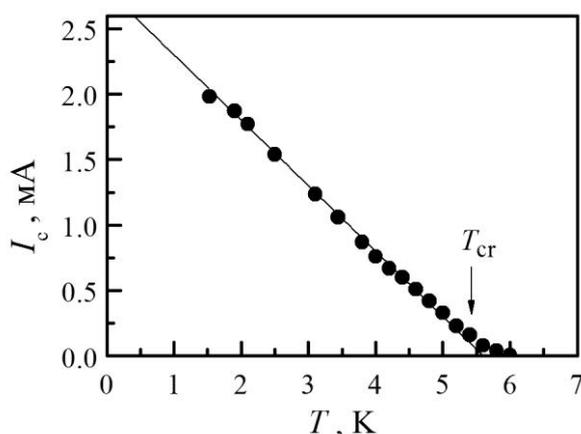


Рис. 4. Температурные зависимости критического тока гранулированной пленки 60VN-40SiO<sub>2</sub>.  
 $H = 0 \text{ Tл}$

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.

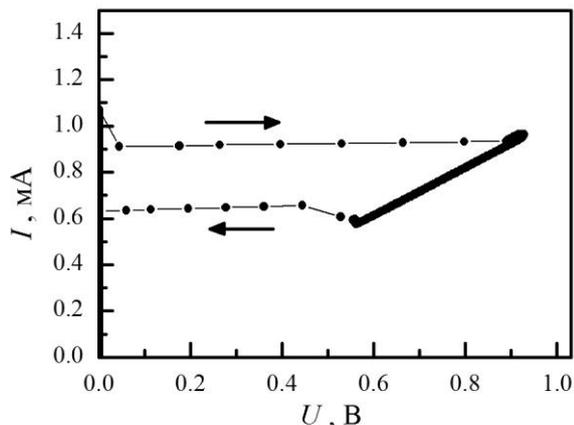


Рис. 5. ВАХ гранулированной пленки 60VN-40SiO<sub>2</sub>.  
 $H = 0$  Тл,  $T = 2$  К

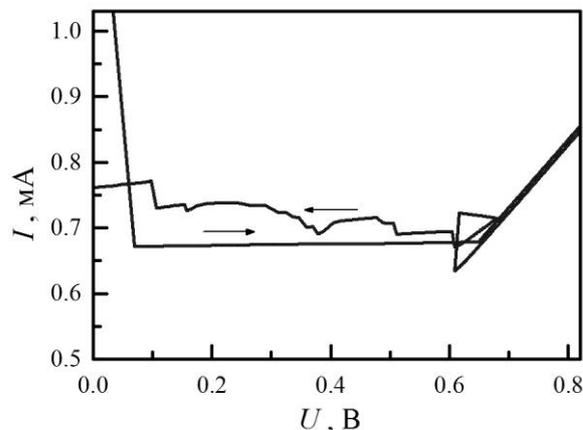


Рис. 6. ВАХ с аномальным гистерезисом  
60VN-40SiO<sub>2</sub>.  $H = 3$  Тл,  $T = 2$  К

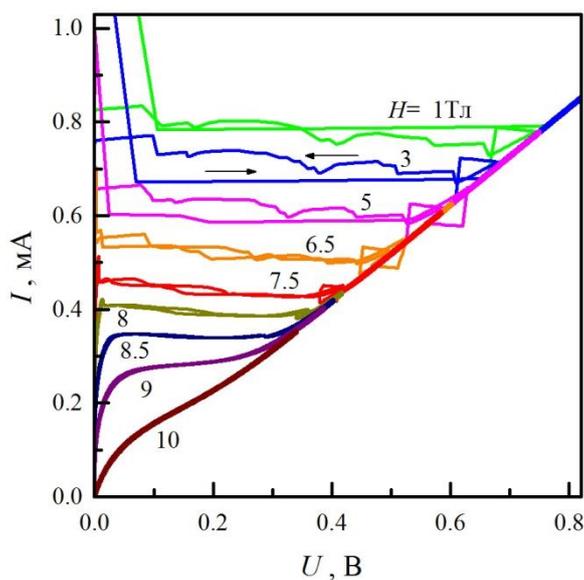


Рис. 7. ВАХ образца 60VN-40SiO<sub>2</sub> при разных значениях магнитного поля.  $T = 2$  К

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-SiO<sub>2</sub> 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%SiO<sub>2</sub>. 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/м<sup>2</sup>. 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<sub>x</sub> 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-SiO<sub>2</sub> Sol-Gel Derived Thin Films / Koscielska B., Yuzefovich 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-20SiO<sub>2</sub> / 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  $\text{TiO}_2$  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- $\text{SiO}_2$  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  $\text{VN}_x$  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- $\text{SiO}_2$  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  $\text{TiO}_2$  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- $\text{SiO}_2$  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 термонапряженное 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.