

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ НА ШУМ $1/f$ В ТОНКИХ
НИОБИЕВЫХ ПЛЕНКАХ

В. О. Злоказов, В. В. Потемкин, А. В. Степанов, Д. Г. Чукин

Исследован шум $1/f$ в тонких ниобиевых пленках, изготовленных по различной технологии и подвергнутых облучению γ -квантами и токовому отжигу. Показано, что условия напыления (материал подложки и температура подложки) сильно влияют на уровень шума. Облучение увеличивает шум пленки, а токовый отжиг приводит к его снижению. Установлено, что токовая зависимость флуктуаций напряжения является нелинейной. В области малых токов флуктуации пропорциональны току, а в области больших токов — квадрату тока, протекающего через образец. Дана трактовка результатов, основанная на связи $1/f$ шума с подвижными дефектами кристаллической структуры.

Данная работа содержит результаты экспериментального исследования зависимости $1/f$ шума тонких ниобиевых пленок от технологии их изготовления, облучения γ -квантами и воздействия электрическим током большой плотности, т. е. от факторов, влияющих на степень совершенства кристаллической структуры пленок (наличие примесей, дефектов и т. п.).

Основной целью являлось изучение шумовых характеристик в области больших плотностей тока, когда механизм шумообразования становится нелинейным, и наблюдаемый шум нельзя описать равновесными флуктуациями сопротивления образца. В литературе результаты таких исследований приводятся редко, хотя они несут дополнительную информацию о связи $1/f$ шума с дефектами структуры тонких пленок и представляют интерес для разработки шумовых методов контроля технологических процессов и качества тонкопленочных изделий, в частности, ниобиевых пленок, которые широко используются в современной микронэлектронике для создания криогенных тонкопленочных элементов.

Экспериментальная установка и образцы. Исследовались низкочастотные флуктуации напряжения, возникающие при пропускании через пленку постоянного тока. Спектральная плотность шума измерялась по корреляционной схеме с помощью цифрового коррелометра Х6-4 и дискретного преобразования Фурье измеренной автокорреляционной функции на микроЭВМ. Уровень шума предварительных усилителей в рабочем диапазоне частот 15 Гц - 5 кГц был не хуже 10^{-18} В²/Гц. При времени усреднения 1000 с и частотном разрешении 5 Гц чувствительность корреляционной установки составляла 10^{-19} В²/Гц. Точность измерения спектральной плотности в рабочем диапазоне частот была не хуже 5 %. Флуктуации напряжения регистрировались по 4-х зондовой схеме при пропускании через образец постоянного тока I в диапазоне от 1 до 10 мА.

Исследовались тонкие ниобиевые пленки, напыленные на кремниевую подложку в вакуумной камере при давлении 10^{-4} Па при скорости напыления 37 нм/мин. Температура подложки при напылении составляла 200° С и 20° С. Пленки были напылены непосредственно на Si подложку и на предварительно сформированные подслои SiO₂, Al₂O₃, SiO₂ + Al₂O₃. Толщина пленок составляла 180 нм, размеры исследованных проводящих мостиков прямоугольной формы составляли 100 × 2,5 мкм и 164 × 5,2 мкм. Сопротивление всех образцов равнялось примерно 200 Ом.

Экспериментальные результаты. В исследованном диапазоне частот (1 Гц - 5 кГц) для всех образцов, независимо от технологии их изготовления, геометрических размеров и величины протекающего тока, спектральная плотность флуктуаций напряжения на образце имела вид $S_u \sim 1/f^{\gamma}$. Показатель степени γ был близок к 1 и оставался постоянным при изменении измерительного тока, облучении и интенсивном токовом воздействии.

Токовая зависимость флуктуаций напряжения для всех образцов имела нелинейный характер. В качестве примера на рис. 1 представлены результаты для пленок, напыленных на подслои Al₂O₃ при 20° С (кривые 1, 2, 3) и при 200° С (кривые 1', 2', 3'). При малой плотности тока, протекающего через образец ($j \sim 10^5$ А/см², $I = 1 + 3$ мА), относительные флуктуации напряжения S_u/U^2 (S_u - спектральная плотность шума, U - постоянное напряжение на образце) не зависели от тока I . В этой области шум можно связать с равновесными флуктуациями сопротивления пленки, не зависящими от протекающего тока. В области

большей плотности тока ($j = 10^6$ А/см², $i = 5 + 10$ мА) относительные флуктуации напряжения возрастали с увеличением тока по закону $S_u/U^2 \sim I^2$. При этом нелинейность вольт-амперной характеристики образцов была незначительной.

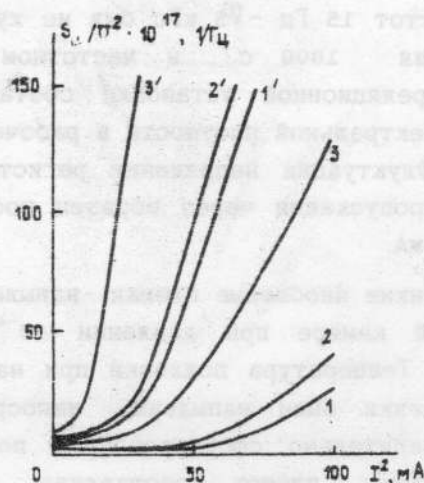


Рис. 1.

Уровень шума сильно зависел от материала подслоя и температуры подложки при напылении. На рис. 2 представлены значения относительных флуктуаций напряжения при токе $I = 8$ мА на частоте 80 Гц для пленок с различной технологией изготовления (Δ - температура подложки при напылении $- 20^\circ$ С, \circ - температура 200° С). Общий разброс по уровню шума составлял ~ 60 дБ, разброс для пленок, изготовленных по одной технологии, ~ 20 дБ. В области нелинейного шумообразования различия пленок по уровню шума были выражены значительно сильнее, чем в области равновесных флуктуаций сопротивления. Наибольший уровень шума наблюдался у пленок, напыленных непосредственно на кремниевую подложку при температуре 200° С, наименьший - у пленок, напыленных на подслой Al_2O_3 при температуре подложки 20° С. Для пленок последней группы уровень шума в области малых токов соответствовал эмпирическому соотношению Хоухе [1]:

$$S_u/U^2 = \alpha/Nf,$$

где $\alpha \sim 10^{-3}$, N - число носителей тока в образце. Для пленок из

технологических групп с меньшим уровнем шума, возрастание относительных флуктуаций напряжения начиналось при больших токах. Для всех материалов подслоя при напылении на горячую подложку (200°C) уровень шума пленок был больше, чем для пленок, напыленных на холодную подложку (20°C).

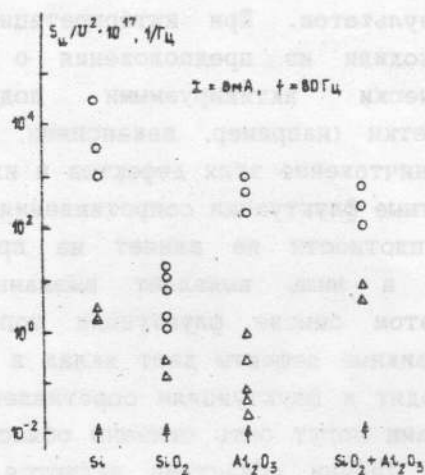


Рис. 2.

С целью изменения степени дефектности изготовленных пленок они были подвергнуты облучению γ -квантами и воздействию током большой плотности. Облучение осуществлялось γ -квантами с энергией 1,25 МэВ, доза облучения составляла $2 \cdot 10^6$ рад. В результате облучения для всех исследуемых типов пленок происходило увеличение уровня шума (кривые 1, 1' на рис. 1 соответствуют исходным образцам, кривые 3, 3' - облученным). Шум возрастал как в области равновесных флуктуаций сопротивления (0,5 - 2 дБ), так и в нелинейной области, причем в последней относительное увеличение шума было всегда более сильным (5 - 10 дБ). Относительное увеличение уровня шума для пленок, изготовленных по различной технологии, было примерно одинаковым.

Облученные пленки в дальнейшем были подвергнуты воздействию тока большой плотности ($j > 10^6 \text{ A/cm}^2$) в течение 10-30 мин. При этом средняя температура пленки не превышала 100°C . В результате воздействия уровень шума пленок необратимо снижался (кривые 2, 2' на рис. 1). Уменьшение уровня шума составляло от 5 до 10 дБ в области нелинейного шумообразования, при этом связи между степенью снижения уровня шума и технологией изготовления пленок зарегистрировано не

было.

Для всех образцов при измерении шума в рабочем диапазоне токов (1-10 мА) температура пленок не превышала 50°C, а вызванное нагревом изменение сопротивления - 1%. Пленки перегорали при пропускании через них тока от 18 до 25 мА. Это соответствовало общему нагреву пленок 200 - 400° С, что очень далеко от температуры плавления ниобия.

Обсуждение результатов. При интерпретации экспериментальных результатов мы исходили из предположения о том, что шум $1/f$ обусловлен термически активируемыми подвижными дефектами кристаллической решетки (например, вакансиями, примесными атомами) [2-4]. Рождение и уничтожение этих дефектов и их диффузия в образце вызывает низкочастотные флуктуации сопротивления. Пропускаемый через пленку ток малой плотности не влияет на процессы генерации и диффузии дефектов, а лишь выявляет вызванные ими флуктуации сопротивления. В этом смысле флуктуации сопротивления являются равновесными. Неподвижные дефекты дают вклад в общее сопротивление пленки, но не приводят к флуктуациям сопротивления. Вместе с тем с неподвижными дефектами могут быть связаны области рождения и стока подвижных дефектов. Такими областями являются, например, границы зерен.

Концентрация подвижных дефектов определяется распределением энергий активации и температурой пленки. Повышение температуры увеличивает число активированных дефектов и приводит к возрастанию шума. Распределение энергий активации определяется микроструктурой пленки и, следовательно, зависит от технологии ее изготовления. С этой точки зрения качественно объясняются наблюдавшиеся различия в уровне шума пленок, изготовленных по различной технологии, и повышенный уровень шума облученных пленок за счет появления дополнительных дефектов.

Объяснение нелинейной токовой зависимости флуктуаций напряжения и снижение уровня шума облученных пленок, подвергнутых действию тока большой плотности, может основываться на предположении о локальных перегревах образца на дефектных участках. В результате обтекания током дефекта, обладающего повышенным сопротивлением, плотность тока на границе дефекта превышает среднюю плотность тока в образце. Следовательно, за счет джоулева нагрева температура участков с повышенной плотностью тока (и самого объемного дефекта, обтекаемого током) превышает среднюю температуру образца. Наличие значительных

локальных перегревов подтверждается сильным отличием средней температуры пленок в момент перегорания от температуры плавления ниобия.

При достижении определенной плотности тока температура локально перегретых участков становится достаточной для активации дополнительных подвижных дефектов, что приводит к увеличению уровня шума по сравнению с равновесными флуктуациями сопротивления. При этом общий разогрев образца и обусловленные им увеличение сопротивления и нелинейность вольт-амперной характеристики будут незначительны (что и наблюдалось в экспериментах). Если считать, что пленки с большой концентрацией подвижных дефектов (и большим уровнем шума) имеют и большее количество неподвижных дефектов, влияние локальных перегревов для таких пленок должно быть наиболее заметным. Это проявлялось в том, что возрастание относительных флуктуаций для пленок с повышенным уровнем шума начиналось при меньших плотностях тока.

Отметим, что хотя наблюдаемый шум при всех значениях тока обусловлен подвижными дефектами микроструктуры, в нелинейной области проявляются и перегреты неподвижные дефекты. За счет этого различие уровней шума образцов с разной степенью дефектности выражено в нелинейной области гораздо сильнее, чем в области равновесных флуктуаций сопротивления.

При дальнейшем увеличении плотности тока температура локально нагретых участков и общий нагрев пленки повышается настолько, что в образце происходит необратимое изменение микроструктуры, приводящее к уменьшению концентрации подвижных дефектов (токовый отжиг дефектов) и снижению шума. Такое необратимое уменьшение шума наблюдалось также другими авторами при температурном отжиге металлических пленок [4, 5].

Полученные результаты исследования шума $1/f$ тонких ниобиевых пленок подтверждают, что шум $1/f$ обусловлен подвижными дефектами кристаллической структуры. Показано, что при большой плотности тока процесс шумообразования является нелинейным за счет локальных разогревов дефектных участков образца. В этом случае на низкочастотный шум влияют и неподвижные дефекты структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hooge F.N., Kleinpenning T.G.M., Vandamme L.K.J. // Rep. Prog. Phys. 1981. V. 44. P. 479.

2. Robinson F.N.H. //Phys. Lett. 1983. V. 97A. N 4. P. 162.
3. Eberhard J.W., Horn P.M. //Phys. Rev. 1978. V. B18. N 12. P. 6681.
4. Pelz J., Clarke J. //Phys. Rev. Lett. 1985. V. 55. N 7. P. 738.
5. Жигальский Г.П., Бакши И.С. //Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25. N 4. С. 771.

Московский государственный
университет

Поступила в редакцию
13 июня 1991 г.

THE INFLUENCE OF STRUCTURE DEFECTS ON THE $1/f$ NOISE IN THIN NIOBIUM FILMS

V.O. Zlokazov, V.V. Potemkin, A.V. Stepanov, D.G. Chikin

The $1/f$ noise in thin niobium films manufactured in various technological conditions has been investigated and the effects of dc current annealing and γ -irradiation on the noise have been studied. It is shown that the noise level strongly depends upon underlayer material and substrate temperature during the evaporation. The noise level increases after irradiation and decreases as a result of the current annealing. A linear current dependence of voltage fluctuation is observed. The fluctuations are proportional to the dc current in the region of small currents and to the square of the current in the region of large currents. The interpretation of experimental results based on the relation between the $1/f$ noise and the mobile defects of crystal structure is presented.