

## „ПОВЕРХНОСТНЫЙ” $1/f$ ШУМ В ПЛЕНКАХ АЛЮМИНИЯ

И.С. Б а к ш и, В.В. П о т е м к и н,  
Е.А. С а л ь к о в, Б.И. Х и ж н я к

Несмотря на исследования последних лет, принципиальный вопрос о локализации источников  $1/f$  шума в металлах до сих пор не решен. Первоначальное предположение о равномерном распределении источников по объему сплошных золотых пленок [1] было подтверждено работами на ряде других металлов [2-4]. Вместе с тем выявлена существенная роль границ зерен в формировании уровня  $1/f$  шума [5-7] и его температурной зависимости [8-10]. Возникновение  $1/f$  шума на поверхности металлических пленок до сих пор считалось маловероятным [7, 11], хотя часть данных работы [7] не противоречит этой гипотезе, а более ранние исследования [1, 3] не могут ее полностью исключить [4]. В данной работе мы приводим первое прямое экспериментальное доказательство существования поверхностного, локализованного на границе с подложкой, источника  $1/f$  шума в металлических пленках.

Методика разделения объемного и поверхностного  $1/f$  шума известна [1, 4, 11] и состоит в выявлении зависимости относительной спектральной плотности флуктуаций напряжения  $S_V(f)/V^2$  ( $V$  — приложенное постоянное напряжение,  $f$  — частота) от толщины пленки  $h$  или сопротивления  $R$  при неизменных длине и ширине. При равномерно распределенных по толщине некоррелированных источниках шума должен выполняться закон

$$S_V(f)/V^2 \propto h^{-1} \propto R/\rho(h), \quad (1)$$

где  $\rho(h)$  — удельное сопротивление. В то время как рассмотрение поверхностных источников, зашунтированных „нешумящим” объемным слоем, приводит к зависимости вида

$$S_V(f)/V^2 = [S_V(f)/V^2]_S (R/R_S)^2 \propto R^2, \quad (2)$$

где  $[S_V(f)/V^2]_S$  — относительная спектральная плотность поверхностного источника шума,  $R_S$  — его сопротивление.

Обычный разброс уровня шума в 3-10 раз для „одинаковых” образцов существенно затрудняет исследование размерных эффектов [11]. В данной работе эта трудность преодолена за счет применения специальной методики утончения образцов.

Эксперименты выполнены на пленках, осажденных электроннолучевым испарением алюминия 99.9999% чистоты со скоростью  $\approx 20$  нм/с в вакууме  $\sim 5 \cdot 10^{-4} - 10^{-3}$  Па на подогретую до  $375 \pm 25$  °С подложку из окисленного кремния с толщиной  $SiO_2 \approx 0.52$  мкм

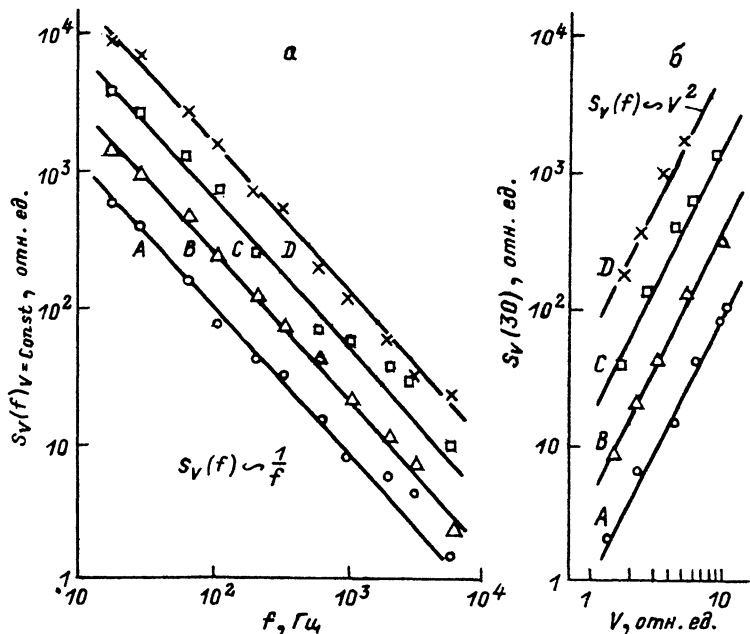


Рис. 1. Зависимости спектральной плотности  $1/f^2$  шума от частоты (а) и напряжения (б) на разных этапах уточнения типичного образца (А – исходные зависимости, ... Д – последние перед переходом в островковую структуру). Данные представлены в относительных единицах. Абсолютные значения – см. рис. 2. Обработка спектров по методу наименьших квадратов дала для тангенса угла наклона всех прямых А...Д значения в пределах  $\beta = 1.10 \pm 0.03$ .

Толщина пленки алюминия составляла  $108 \pm 4$  нм.<sup>1</sup> Половина пластины была отожжена в атмосфере водорода в течение часа при температуре  $450 \pm 10$  °С. Приведенные ниже данные относятся к отожженным пленкам, если не оговорено противное.

Для шумовых измерений из слоя алюминия вырезали мостики с размерами 1–3 мм x 10–50 мкм аналогично [2, 6]. Толщину уменьшали анодным окислением (анодированием) внешней поверхности пленок в известном электролите, состоящем из 30 г/дм<sup>3</sup> винной кислоты, нейтрализованной гидроксидом аммония до  $\text{pH} \approx 5.5$ . Как показали результаты послойного анализа состава пленок с помощью электронной Оже-спектроскопии, толщина слоя алюминия убывала в ходе анодирования по закону  $h = h_0(1 - U_f/U_f^\infty)$ , где  $h_0$  – начальная толщина,  $U_f$  – напряжение на электролитической ячейке при формировании окисла,  $U_f^\infty$  – коэффициент пропорциональности, значение которо-

<sup>1</sup> Нами установлено существование поверхностного шума и в более толстых пленках. В данной работе мы приводим данные, полученные для одной из технологических партий.

го для пленок данной технологической партии составляет  $U_f^\infty = 12 \pm 5$  В.

При изменении толщины на порядок величины удельное сопротивление изменялось от  $3,8 \pm 0,2$  мкОм·см до  $7,2 \pm 1,5$  мкОм см, а температурный коэффициент сопротивления от  $+(3,85 \pm 0,15) \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  до  $+(2,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ , что удовлетворительно описывается теорией размерного эффекта электропроводности сплошных металлических пленок [12, 13]. Более детально методику уточнения и результаты контроля параметров электропроводности мы опишем в другом месте.

Спектральную плотность избыточного шума измеряли по четырехзондовой методике [6, 9] в звуковом диапазоне частот анализатора спектра С4-48. На всех этапах уменьшения толщины пленок зависимость спектральной плотности от частоты и напряжения хорошо описывалась законом  $S_V(f) \propto f^{\mathcal{J}} V^2$  (рис. 1), причем показатель  $\mathcal{J}$ , типичное значение которого  $\mathcal{J} = 1,10 \pm 0,03$ , не менялся в пределах погрешности в ходе уточнения образцов. Это позволяет характеризовать уровень избыточного шума значением относительной спектральной плотности на фиксированной частоте.

Типичная зависимость спектральной плотности от сопротивления образца при уменьшении толщины показана на рис. 2. Значение показателя  $\omega$  в зависимости  $S_V(f)/V^2 \propto R^\omega$ , определенное методом наименьших квадратов, составляет  $\omega = 1,97 \pm 0,03$ , что хорошо согласуется с квадратичным законом (2) и указывает на поверхностный механизм возникновения шума. С другой стороны, расхождение экспериментальных данных с законом (1) для объемного механизма, кривая для которого представлена на этом же рисунке, довольно наглядно, несмотря на значительную погрешность в определении толщины пленки при уточнении.

Наилучшая прямая, аппроксимирующая экспериментальные данные законом (2), проходит через точку А, представляющую уровень шума в исходной пленке. Следовательно, анодирование не привело к появлению добавочного шума. В неотожженной части пластины уровень шума был на один-два порядка ниже и при анодировании изменялся по закону (1) (см. вставку на рис. 2). Таким образом, вклад границы алюминия с естественным и анодным окислами в наблюдаемый шум незначителен, а обнаруженный поверхностный источник шума сформировался при отжиге и расположен на той поверхности пленки, которая граничит с подложкой.

Известно, что при отжиге алюминиевых пленок, осажденных на окисленный кремний, происходит восстановление  $SiO_2$  алюминием, и освобождающийся кремний мигрирует в пленку алюминия [14]. По данным послышной Оже-спектроскопии, в исследованных пленках алюминия атомы кремния присутствовали в количестве  $\approx 2 \cdot 10^{15}$  ат/см<sup>2</sup> и были расположены на границе с подложкой. В согласии с известной точкой зрения о связи механизма возникновения  $1/f$  шума в металлах с миграцией точечных дефектов [5-11], можно предположить, что диффузия на границе  $Al-SiO_2$  приводит к наблюдаемому

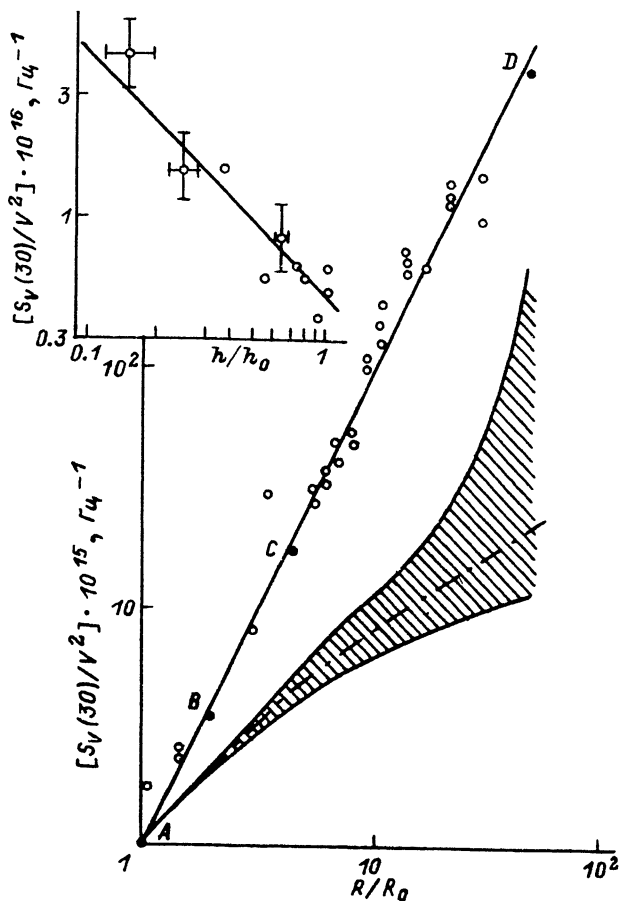


Рис. 2. Изменения относительной спектральной плотности  $1/f$  шума  $S_V(f)/V^2$  на частоте  $f=30$  Гц при уточнении типичной пленки в зависимости от приведенного сопротивления образца  $R/R_0$  ( $R_0$  - начальное значение сопротивления). Размеры образца в плоскости - 2.3 мм x 40 мкм. Открытыми кружками показаны результаты единичных измерений, точками - усредненные по зависимости от напряжения и частоты. Прямая линия - закон (2), характерный для поверхностного механизма шума. Штрих-пунктирная линия - зависимость (1) (изменения удельного сопротивления при уточнении учтены). Штриховка вокруг кривой - размытие расчетной области из-за погрешности определения толщины. На вставке сверху - типичные для неотожженной пленки изменения уровня  $1/f$  шума в зависимости от приведенной толщины  $h/h_0$ . Размеры образца - 2.2 мм x 43 мкм. Прямая линия - зависимость (1).

шуму. Более вероятным, однако, представляется иной механизм, связанный с туннелированием носителей из металлической пленки, захватом их на ловушки диэлектрика и модуляцией проводимости приповерхностного (островкового) металлического слоя [15]. Кроме того, возможно формирование шума и в самой пленке алюминия - в тонком ( $\sim 1-10$  нм) разупорядоченном слое на границе с подложкой.

В любом случае полученные результаты показывают, что  $1/f$  шум, наблюдаемый в металлических пленках, порождается не единственным источником и может возникать как в самой пленке, так и в ее приповерхностном слое.

Авторы благодарны О.А. Якубцову и В.В. Литвиненко за помощь в Оже-спектроскопическом анализе пленок.

### Л и т е р а т у р а

- [1] H o o g e F.N., H o p p e n b r o u w e r s A.M. Physica, 1969, v. 45, N 3, p. 386-392.
- [2] V o s s R.F., C l a r k e J. - Phys. Rev. B, 1976, v. 13, N 2, p. 556-573.
- [3] F l e e t w o o d D.M., M a s d e n J.T., G i o r d a n o N. - Phys. Rev. Lett., 1983, v.50, N6, p.450-453.
- [4] Z i m m e r m a n N.M., S c o f i e l d J.H., M a n t e s e J.V., W e b b W.W. - Phys. Rev. B, 1986, v. 34, N 2, p. 773-777.
- [5] А н д р у ш к о А.Ф., Б а к ш и И.С., Ж и г а л ь с к и й Г.П. - Изв. вузов, Радиопизика, 1981, т. 24, № 4, с. 498-502.
- [6] П о т е м к и н В.В., Б а к ш и И.С., Ж и г а л ь с к и й Г.П. - Радиотехника и электроника, 1983, т. 28, № 11, с. 2211-2216.
- [7] V e r b r u g g e n A.H., K o s c h R.H., U m b a c h C.P. - Phys. Rev. B, 1987, v. 35, N 11, p. 5864-5867.
- [8] E b e r h a r d J.W., H o r n P.M. - Phys. Rev. B, 1978, v. 18, N 12, p. 6681-6693.
- [9] Ж и г а л ь с к и й Г.П., Б а к ш и И.С. - Радиотехника и электроника, 1980, т. 25, № 4, с. 771-780.
- [10] K o s c h R.H., L l o y d J.R., C r o n i n J. - Phys. Rev. Lett., 1985, v. 55, N 22, p. 2487-2490.
- [11] D u t t a P., H o r n P.M. - Rev. Mod. Phys., 1981, v. 53, N 3, p. 497-516.
- [12] F u c h s K. - Proc. Cambridge Philos. Soc., 1938, v. 34, N 1, p. 100-108.
- [13] C a m p b e l l D.S. - The Use of Thin Films in Physical Investigations, ed, by J.C. Anderson, N.Y.: Acad. Press, 1966, p. 299-318.

- [14] P r a m a n i k D., S a x e n a A.N. - Solid St. Technol., 1983, v. 26, N 1, p. 127-133.
- [15] C e l a s c o M., F i o r i l l o F., M a - s o e r o A. - Phys. Rev. B., 1979, v. 19, N 2, p. 1304-1306.

Институт полупроводников  
АН УССР, Киев

Поступило в Редакцию  
15 декабря 1987 г.  
В окончательной редакции  
14 апреля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 13

12 июля 1988 г.

### ПЛАВЛЕНИЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ЭКСИМЕРНОГО ЛАЗЕРА

К.К. Бурдель, А.С. Ахманов,  
В.Н. Макаров, А.Ю. Поройков,  
А.В. Суворов, Н.Г. Чеченин

Как известно, в равновесных условиях ( $p = 1$  атм) карбид кремния не плавится. Высокотемпературные аналоги карбида кремния в 4-й группе периодической системы элементов - это графит и алмаз, которые также не плавятся, а сублимируют при атмосферном давлении. Однако в серии работ (см. [1, 2]) было обнаружено, что облучение графита импульсами рубинового лазера вызывает плавление поверхности. Как показали исследования методом каналирования, в приповерхностной области образуется дефектный слой, наличие которого авторы [2] объясняли формированием поликристаллического материала в процессе ресолидификации расплава. В работе [3] также наблюдалось плавление и графитизация алмаза при импульсном лазерном воздействии.

Нами исследовались образцы  $SiC(6H)$   $n$ -типа, имплантированные ионами  $Ga^+$  с энергиями 40 и 90 кэВ в диапазоне доз  $\Phi = 1 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{16}$   $см^{-2}$ . Лазерное воздействие (ЛВ) проводилось на воздухе моноимпульсами ( $\tau_{\mu} = 30$  нс) эксимерного ( $XeCl$ ) лазера ( $\lambda_{\mu} = 308$  нм) с энергиями  $W = 0.26, 0.5$  и  $1.0$  Дж· $см^{-2}$  (облучались как имплантированные, так и неимплантированные образцы). Анализ проводился методом резерфордского обратного рассеяния и каналирования ионов. Использовался пучок ионов  $He^+$  с энергией 1.5 МэВ. Ориентированные спектры измерялись вдоль оси  $\langle 0001 \rangle$ .

Для неимплантированных образцов никаких изменений ни в оптических характеристиках, ни в ориентированных спектрах ROP не было обнаружено при облучении с  $W = 0.26$  и  $0.5$  Дж· $см^{-2}$ . Однако ЛВ с  $W = 1.0$  Дж· $см^{-2}$  вызывало значительное дефектообразование в