

УДК 621 391 822.3 : 539.234 : 546.76

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ НА $1/f$ ШУМ ТОНКИХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПЛЕНОК

А. Ф. Андрушко, И. С. Бакши, Г. П. Жигальский

Обнаружено увеличение уровня $1/f$ шума вакуумных конденсаторов алюминия при диспергировании кристаллитов. Этот результат, а также зависимость уровня избыточного шума от величины собственных растягивающих макронапряжений подтверждают влияние микродефектов структуры на шум вида $1/f$.

Практическая потребность в чувствительных и надежных элементах электроники обусловила особый интерес к природе $1/f$ шума в различных физических системах и, в частности, в тонких, металлических пленках. В последние годы была развита теория $1/f$ шума, обусловленного термодинамическими флуктуациями температуры, приводящими к случайной модуляции проводимости пленки из-за температурного коэффициента сопротивления $[1, 2]$, и указаны возможные границы ее применения $[3]$. Вместе с тем экспериментально подтвержден иной механизм возникновения $1/f$ шума, связанный с микродефектами структуры $[4-7]$.

Однако вопрос о влиянии структурных и субструктурных факторов на уровень избыточного шума тонких металлических пленок до настоящего времени не изучен. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию влияния дисперсности зерен и собственных макронапряжений на избыточный шум тонких пленок алюминия.

1. Образцы и методика исследований. Исследовали вакуумные конденсаты алюминия, осажденные при давлении остаточных газов не выше $5 \cdot 10^{-4} - 10^{-3}$ Па в установке УВН-2М-1. Алюминий 99,99% чистоты осаждали из вольфрамового проволочного испарителя на подложки из покровного стекла ГОСТ 6672-59 и термически окисленные пластины монокристаллического кремния (111), прошедшие тщательную химическую очистку.

С помощью прибора КИТ-1 процесс конденсации автоматически прекращался при достижении толщины пленок, равной 100 нм. Температуру подложки при осаждении пленок контролировали хромель-копелевой термопарой и поддерживали равной 400 ± 10 К. Скорость конденсации варьировали в диапазоне 3—10 нм/с.

Шумы контактов исключали, применяя четырехзондовую методику. Электросопротивление исследуемой области пленок было около 50 Ом при длине и ширине 20 и 0,5 мм соответственно.

Спектральную плотность $1/f$ шума измеряли в диапазоне частот 40 Гц — 20 кГц по методике, описанной в $[5]$.

Для измерения собственных механических напряжений и исследования структуры изготавливали тестовые образцы в едином технологическом цикле с образцами для шумовых измерений. Первые из них препарировали на подложки из покровного стекла с размерами $60 \times 4 \times 0,15$ мм, а вторые — на пластины кремния толщиной 0,3 мм

с термически выращенным слоем окисла толщиной 0,5 мкм. Кроме того, в некоторых случаях исследовали структуру образцов, в которых измеряли шум.

Собственные механические напряжения определяли методом изгиба консольно закрепленной упругой подложки с помощью простой оптической системы. В качестве меры деформации использовали смещение свободного конца подложки, происходящее после стравливания пленки. Макронапряжения рассчитывали по формуле Стоуни [8] с учетом коэффициента Пуассона.

Структуру пленок исследовали методами фотографического рентгеноструктурного анализа, электронографии и электронной микроскопии. В совокупности эти методы давали более полное представление об объемной и поверхностной структуре препаратов.

Рентгеноструктурные съемки проводили по методу шлифа и порошка в камере РКД на установке УРС-60 с использованием излучения от трубки с хромовым анодом; электронографические — на установке ЭГ-100А способом «на отражение» при ускоряющем напряжении 60 кВ. При электронно-микроскопических исследованиях применяли метод хромоуглеродных реплик (для пленок, осажденных на стекле, — платиновоуглеродных). Съемку препаратов проводили на просвечивающем электронном микроскопе ИЕМ-6А с увеличением от 10000 до 20000 крат. Чтобы обеспечить более высокий контраст и хорошее разрешение границ мелких зерен, применяли оттенение поверхности хромом под углами, не превышающими 15°. Размеры кристаллов определяли по микрофотографиям с увеличением $\times 20000$. При этом достаточно отчетливо разрешались зерна с линейным размером $l \approx 10$ нм. В дальнейшем будем называть зерна, имеющие размер $l \leq 50$ нм, мелкими. Поверхностную плотность таких зерен n подсчитывали по фотографиям микроструктур на 3—5 произвольно выбранных участках площадью 1 мкм², а затем усредняли. Среднеквадратичное отклонение составляло 3 мкм⁻².

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение. Спектральная плотность мощности избыточного шума в исследованном диапазоне частот хорошо аппроксимируется выражением

$$g(f) = \text{const } I_0^\alpha f^{-\gamma},$$

где I_0 — постоянный ток, протекающий через стенку. Показатель $\alpha \approx 2$ с незначительными отклонениями. Показатель формы спектра изменялся в пределах $\gamma = 1,0 \div 1,3$. Дальнейшие результаты измерения спектральной плотности шума представлены для частоты $f = 120$ Гц при токе через образец 40 мА.

Образцы с различной структурой получали варьированием скорости конденсации [9].

На рис. 1 представлена зависимость спектральной плотности шума $1/f$ от скорости конденсации для пленок Al, осажденных на подложки из покровного стекла и окисленного кремния. Весьма близкие значения шума пленок алюминия, полученных в одинаковых технологических условиях на подложках с суще-

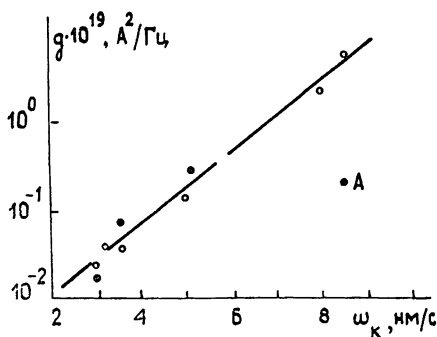


Рис 1 Влияние скорости конденсации на величину спектральной плотности $1/f$ шума образцов, осажденных на подложки из покровного стекла (светлые кружки) и окисленного кремния (темные кружки).

ственно различными коэффициентами теплопроводности, показывают невозможность объяснения результатов с точки зрения теории $1/f$ шума, вызванного термомодуляцией проводимости из-за ТКС [1-3].

Исследования микроструктуры образцов алюминия, осажденного на окисленный кремний, обладающих различным уровнем избыточных

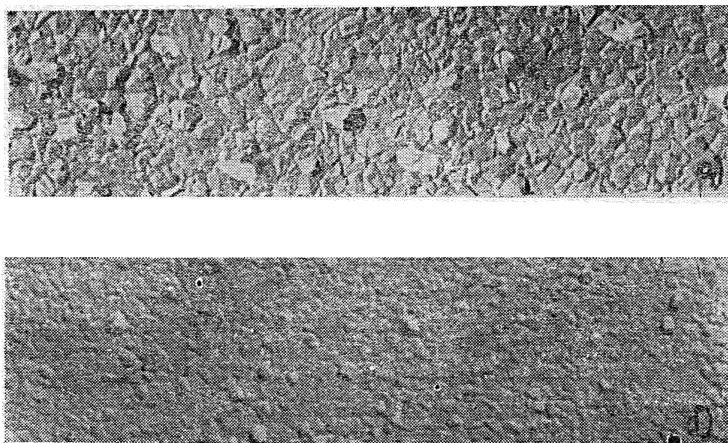


Рис 2. Микроструктура поверхности пленки Al (увеличение 20000 \times):
а) $\omega_k = 3,0$ нм/с, б) $\omega_k = 8,5$ нм/с.

шумов, показали, что размеры зерен, как правило, не превосходят 0,16 мкм (рис. 2), при этом повышенному количеству мелких кристаллитов соответствует больший уровень избыточного шума (таблица 1).

Таблица 1

Связь между поверхностной плотностью мелких зерен и величиной спектральной плотности $1/f$ шума в образцах различных технологических партий

№ партии	1	2	3	4
$n, \text{мкм}^{-2}$	13	39	41	54
$g \cdot 10^{20}, \text{А}^2/\text{Гц}$	$6 \cdot 10^{-2}$	2	$2 \cdot 10^{-1}$	4

чески отсутствовала (точка А на рис. 1). Угол разориентации кристаллитов относительно подложки составлял 6—18°.

Таким образом, проведенные эксперименты показывают, что диспергирование кристаллитов приводит к повышению уровня $1/f$ шума, и подтверждают влияние структурной неравновесности конденсата на уровень избыточного шума, при этом большей поверхностной плотности мелких зерен соответствует большее количество областей с нарушенной и деформированной решеткой (большеугловых границ зерен). Концентрация вакансий в этих областях повышена [10]. Локальные флуктуации концентрации вакансий вызывают флуктуации электропроводности пленки, что приводит к возникновению $1/f$ шума на образце при пропускании постоянного тока. Большие времена корреляции, необходимые для объяснения наблюдаемого спектра процесса, вызваны, по-видимому, диффузионным механизмом, приводящим к медленным флуктуационным изменениям конфигурации границ зерен.

Важным фактором структурной неравновесности вакуумных конденсатов являются собственные макронапряжения σ . На рис. 4 приведена зависимость спектральной плотности $1/f$ шума от внутренних механических напряжений. Около экспериментальных точек отложены доверительные интервалы, определенные по погрешностям измерений

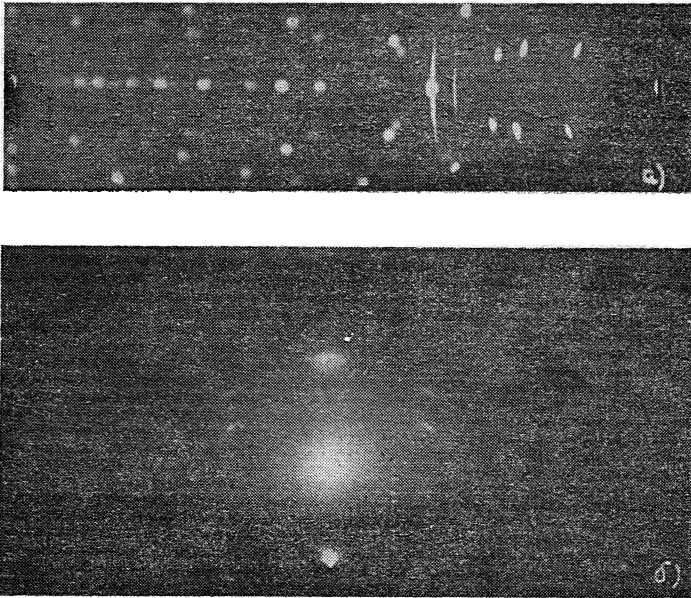


Рис. 3. Типичные рентгенограмма (а) и электронограмма (б) пленки Al с текстурой (111), полученной при скорости конденсации 5 нм/с.

σ . Приведенные данные качественно совпадают с результатами [6] для области растягивающих напряжений. При этом увеличение числа исследуемых образцов в настоящей работе дает возможность провести линейную аппроксимацию зависимости $g = g(\sigma)$, построенной в полупрологарифмических координатах.

Растягивающие напряжения, как известно, увеличивают концентрацию вакансий C_v [11], чем и объясняется повышение уровня $1/f$ шума. Предположив пропорциональную зависимость между g и C_v , получим [11]

$$g = \text{const} \exp(\sigma V_a / kT)$$

(k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура). Активационный объем V_a , вычисленный из аппроксимации данных рис. 4 этой зависимостью, оказывается равным $V_a = 8,6 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3$, что в пять раз превышает объем, приходящийся на один атом в массивном алюминии.

Известно, что микронапряжения в зернистых структурах распределены неравномерно и в межзеренных границах могут значительно превосходить измеряемое макроскопическое значение [12]. Это может

объяснить отличие экспериментально найденного значения V_a от объ-

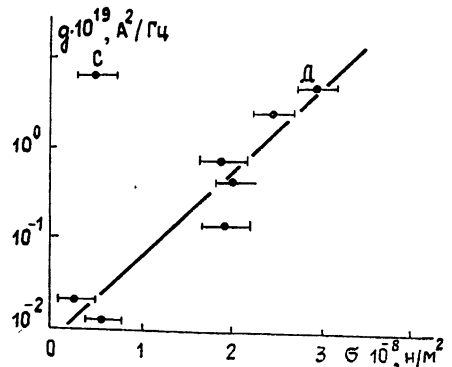


Рис. 4. Влияние уровня собственных растягивающих макронапряжений на величину спектральной плотности $1/f$ шума

ема образования вакансий в массивном металле. Другой причиной указанного различия, возможно, является образование комплексов вакансий на границах зерен.

Выброс точки *C* на рис. 4 получает объяснение в рамках приведенной интерпретации. Исследования микроструктуры образцов *C* и *D*, обладающих сравнимыми уровнями $1/f$ шума при различных макронапряжениях, показали существенно различную поверхностную плотность мелких зерен (47 и 16 мкм^{-2} соответственно), влияние которых на уровень $1/f$ шума обусловлено выше.

Приведенные экспериментальные результаты, а также данные работ [4-7] показывают, что только при совместном учете ряда структурных и субструктурных факторов (дисперсности зерен, макро- и микронапряжений, концентрации вакансий) можно дать качественную оценку уровня $1/f$ шума в вакуумных конденсатах металлов. Все указанные результаты допускают возникновение $1/f$ шума вследствие флуктуации концентрации микродефектов.

Авторы выражают благодарность А. И. Отрезову за проведение измерений внутренних механических напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Voss R F, Clarke J. — Phys. Rev. Lett, 1976, 36, № 1, p. 42.
2. Voss R F., Clarke J — Phys. Rev. B, 1976, 13, № 2, p. 556.
3. Kleinpenning T. G. M. — Physica, 1976, 84BC, № 3, p. 353.
4. Жигальский Г. П., Федоров А. С. — Сб. научных трудов по проблемам микроэлектроники Сер. Полупроводниковые приборы и интегральные схемы. — М: МИЭТ, 1976, вып. 27, с. 147.
5. Жигальский Г. П., Бакши И. С. — Радиотехника и электроника, 1980, № 4, с. 771.
6. Жигальский Г. П., Соков Ю. Е., Томсон Н. Г. — Радиотехника и электроника, 1979, № 2, с. 410.
7. Eberhard J. W., Horn P. M. — Phys. Rev. B, 1978, 18, № 12, p. 6681
8. Stoney G. G. — Proc. Royal Soc, 1909, Ser. A, 82, p. 172.
9. Палатник Л. С., Фукс М. Я., Косевич В. М. Механизм образования и субструктура конденсированных пленок. — М: Наука, 1972
10. Глейтер Г., Чалмерс Б. Большеугловые границы зерен. — М.: Мир, 1975.
11. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах. — М: Металлургия, 1978.
12. Гегузин Я. Е. Макроскопические дефекты в металлах — М: Металлургиздат, 1962.

Московский институт электронной
техники

Поступила в редакцию
28 мая 1980 г.

AN EFFECT OF STRUCTURE FACTORS ON $1/f$ NOISE OF THIN AL FILMS

A. F. Andrushko, I. S. Bakshee, G. P. Zhigal'skij

An increase of the level of $1/f$ noise in vacuum Al condensates in crystallite dispersion has been detected. This results as well as a dependence of the level of the intrinsic noise on the value of natural stretch macrostresses confirms the effect of the structure microdefects on the noise of the form $1/f$.