

УДК 621.382.323

ВЛИЯНИЕ ПРЕДОКСИЛИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ПЛАСТИН КРЕМНИЯ НА НИЗКОЧАСТОТНЫЙ ШУМ МДП СТРУКТУР*Г. П. Жигальский, М. Г. Путря, А. С. Федоров*

Проведенные исследования МДП структур, сформированных на пластинах кремния, прошедших различные виды предокислительной обработки поверхности, показали наличие значимой корреляционной связи между спектральной плотностью мощности шума на фиксированной частоте и величиной заряда в окисле. При этом для качественных структур, практически не имеющих токов утечки (плотность тока утечки $J < 10$ нА/см²), наблюдаемый шум объяснен на основе модели Мак-Уортера туннельного механизма возникновения шума и генерационно-рекомбинационных процессов в области пространственного заряда полупроводника.

Настоящая работа посвящена исследованию низкочастотного (НЧ) шума в МДП структурах, сформированных на кремниевых пластинах, прошедших различную предокислительную обработку поверхности (химическую, плазмохимическую, плазмохимическую с последующей химической). При изготовлении МДП интегральных микросхем (ИМС) наиболее важным технологическим процессом является обработка поверхности кремниевых пластин перед окислением, которая в значительной мере определяет качество МДП структур, являющихся основными компонентами микросхем. В последние годы, кроме традиционной химической очистки (ХО) поверхности подложек, используется финишная ионно-плазменная обработка (ПХО) [1, 2], которая благодаря ряду преимуществ находит все более широкое применение в производстве МДП ИМС.

Интенсивное развитие данного метода обусловлено следующими причинами. Традиционная жидкостная (химическая) обработка поверхности не позволяет полностью удалить с нее все загрязнения, поскольку сама является их источником. Кроме того, на поверхности, например, кремния после жидкостной финишной очистки остается достаточно толстый (порядка 3—4 нм) слой естественного окисла, содержащий в больших количествах адсорбированную влагу и посторонние примеси. Собственно приповерхностный слой кремния, содержащий максимальную плотность дислокаций, дефектов и загрязнений, также остается не затронутым.

Достоинством плазмохимической очистки поверхности кремниевых пластин является то, что наряду с удалением неорганических и органических загрязнений она позволяет стравить естественный окисел и часть приповерхностного слоя кремния толщиной 30—40 нм [3]. Насыщение поверхности кремния гологенами после ПХО почти в два раза снижает скорость образования на ней естественного окисла и благотворно влияет на электрофизические характеристики формируемых МДП структур [3, 4]. В значительной степени результат ПХО определяется правильным выбором типа разряда, составом парогоазовой смеси, режимами травления [3, 4].

Большую роль при разработке технологии ПХО играет также поиск и применение новых оперативных и достоверных методов оценки физико-химических свойств как самой поверхности, прошедшей ПХО, так и сформированных на ней структур. Эффективным методом контроля качества предокислительной обработки является измерение избыточного низкочастотного (НЧ) шума МДП структур, сформированных на кремниевых пластинах после прохождения пластинами соответствующей

обработки [5]. Однако вопрос влияния различных видов предокислительной обработки пластин на НЧ шум МДП структур в литературе не обсуждался.

1. Образцы и методика исследований. НЧ шум в МДП структурах измеряли по методике [6] в диапазоне частот 20 Гц—20 кГц. Уровень собственных шумов измерительной установки был не более 10^{-29} — 10^{-28} А²/Гц. Спектральную плотность мощности (СПМ) шума вычисляли по формуле

$$S_I(f) = [\overline{i_\chi^2}(f) / (\pi/2) \Delta f_0] - S_{IN}(f), \quad (1)$$

где $\overline{i_\chi^2}(f)$ — среднеквадратичное значение эквивалентного генератора шумового тока МДП структуры, рассчитанное по измеренному анализатором спектра СКЧ-72 шумовому напряжению с учетом полных проводимостей всех элементов во входной цепи предварительного усилителя; Δf_0 — эквивалентная полоса пропускания анализатора спектра по уровню половинной энергии на измеряемой частоте; S_{IN} — спектральная плотность мощности теплового шума исследуемой структуры, которую рассчитывали по формуле Найквиста:

$$S_{IN}(f) = 8kT\pi f C_\chi \operatorname{tg} \delta / (1 + \operatorname{tg}^2 \delta), \quad (2)$$

здесь k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, C_χ — емкость структуры, $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь. C_χ и $\operatorname{tg} \delta$ измеряли в рабочем диапазоне частот f и напряжений смещения $U_{см}$. В формуле (2) учтена эквивалентная схема замещения МДП структуры последовательно соединенными емкостью C_χ и сопротивлением R , которое определено через тангенс угла потерь,

$$\operatorname{tg} \delta = 2\pi f R C_\chi. \quad (3)$$

Среднеквадратичное значение шумового тока $\overline{i_\chi^2}(f)$ в (1) рассчитывали по формуле

$$\begin{aligned} \overline{i_\chi^2} = \{ & [(\overline{U_{вых}}^2)_{изм} - (\overline{U_{вых}}^2)_{к.з.}] [(G_\chi + G_{вх})^2 + \omega^2 (C_\chi + C_{вх})^2 - \\ & - [(\overline{U_{вых}}^2)_{\chi, \chi} - (\overline{U_{вых}}^2)_{к.з.}] (G_{вх}^2 + \omega^2 C_{вх}^2) \} / K_{и}^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $(\overline{U_{вых}}^2)_{изм}$, $(\overline{U_{вых}}^2)_{к.з.}$ и $(\overline{U_{вых}}^2)_{\chi, \chi}$ — средние квадраты шумовых напряжений, измеренные на выходе усилителя при включении на его входе МДП структуры, при коротком замыкании и холостом ходе усилителя соответственно; G_χ и $G_{вх}$ — активные проводимости МДП структуры и входа усилителя; C_χ и $C_{вх}$ — емкость МДП структуры и входная емкость усилителя; $K_{и}$ — коэффициент передачи измерительной системы по напряжению.

Основная погрешность в значении СПМ шума определяется статистической ошибкой измерения среднего квадрата напряжения шума и оценивается по формуле [7]

$$\sigma = (\pi \tau_{уср} \Delta f_0)^{-1/2}, \quad (5)$$

где $\tau_{уср}$ — эквивалентное время усреднения при измерении. Для используемого анализатора СКЧ-72 полоса частот и время интегрирования были выбраны так, чтобы обеспечить $\sigma \leq 10\%$.

Образцы МДП структур были изготовлены на кремниевых пластинах КДБ-4,5 с использованием технологических операций, применяемых обычно в производстве МДП ИМС. Перед формированием структур пластины проходили различную предокислительную обработку (химическую или плазмохимическую) согласно технологическому маршруту, показанному на рис. 1.

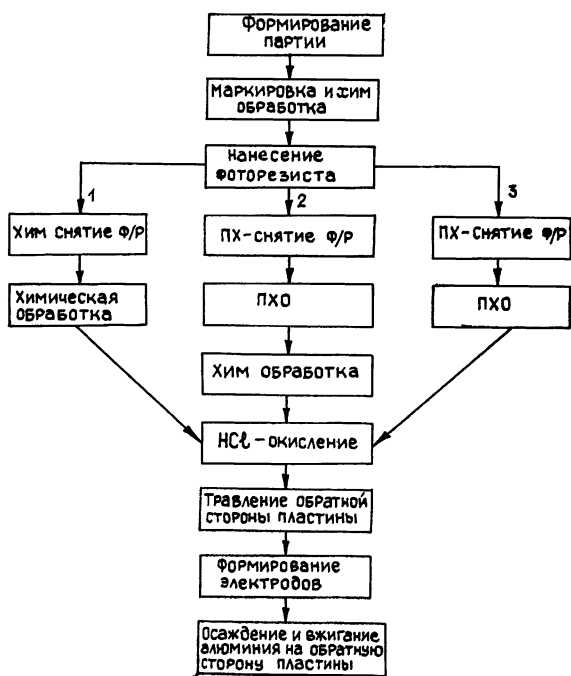


Рис. 1. Схема технологического маршрута прохождения рабочих партий пластин.

Слои двуоксида кремния толщиной $h_{\text{ок}} = 60 \div 100$ нм получали термическим окислением пластин в атмосфере сухого кислорода с добавкой газообразного хлористого водорода. Полевые электроды изготавливали из алюминия или поликремния. Толщина слоя алюминия — 1 мкм, поликремния — 560 нм, площадь поликремниевых (алюминиевых) электродов 0,2 мм². Наряду с измерениями избыточного шума производили измерение токов утечки с помощью электрометра ЭД-05М (или вольтметра-электрометра В7-30) и вольт-фарядных характеристик. Шум исследовали на образцах, имеющих ток утечки $I_{\text{ут}} \leq 25$ пА при напряженности электрического поля в диэлектрике $E = 8 \text{ МВ} \cdot \text{см}^{-1}$, т. е. на структурах, не содержащих сквозных макродефектов в диэлектрике. Для этих образцов определяли средние по пластине величины заряда в окисле с помощью измерителя RLC-характеристик Е7-12 стандартными методами анализа высокочастотных вольт-фарядных характеристик (на частоте 1 МГц) [8]. Полученные данные для исследованных пластин приведены в табл. 1.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение. На рис. 2 и 3 представлены зависимости СПМ шума от частоты для структур, прошедших различную предокислительную обработку (изготовленных по маршрутам 1, 3 на рис. 1), в режиме инверсии при напряжении смещения на полевом электроде $U_{\text{см}} = +9$ В. На рис. 2 около экспериментальных точек отложены доверительные интервалы, рассчитанные при доверительной вероятности 0,99 для каждого отдельного измерения СПМ шума [7], соответствующего усредненному значению шума по пластине (усреднение проводили по 10 структурам), а на рис. 3 — для каждого одиночного измерения. Как видно из рис. 2, 3, исследуемый шум имеет спектр вида $1/f^\gamma$, причем показатель формы спектра γ может различаться для разных пластин.

№ пластины	Вид обработки	Толщина окисла, нм	Заряд в окисле $Q_{ок} \cdot 10^8$, Кл/см ²
1	ПХО+ХО	100	21,6
2	ПХО+ХО	100	22,6
3	ПХО+ХО	100	29,9
4	ПХО	100	20,0
5	ПХО+ХО	100	23,3
6	ПХО	100	24,8
7	ПХО	100	20,3
8	ПХО+ХО	100	20,3
9	ПХО+ХО	100	20,4
10	ПХО	100	21,9
11	ПХО+ХО	100	19,8
12	ПХО	100	13,3
13	ПХО+ХО	100	21,6
14	ПХО+ХО	100	16,1
15	ХО	100	29,2
16	ПХО	75	3,7
17	ПХО	75	4,1
18	ПХО	75	4,5
19	ПХО	75	6,3
20	ПХО	75	4,1
21	ПХО	75	4,0

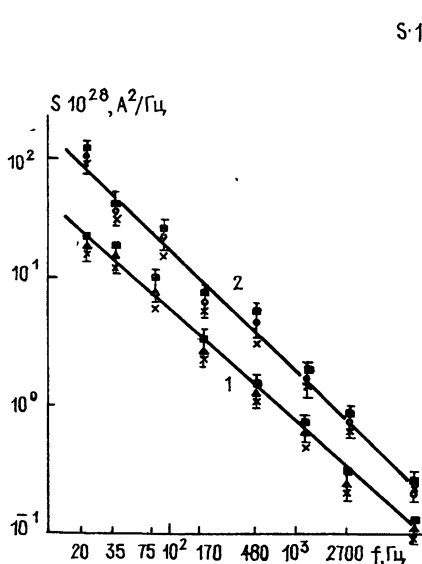


Рис. 2.

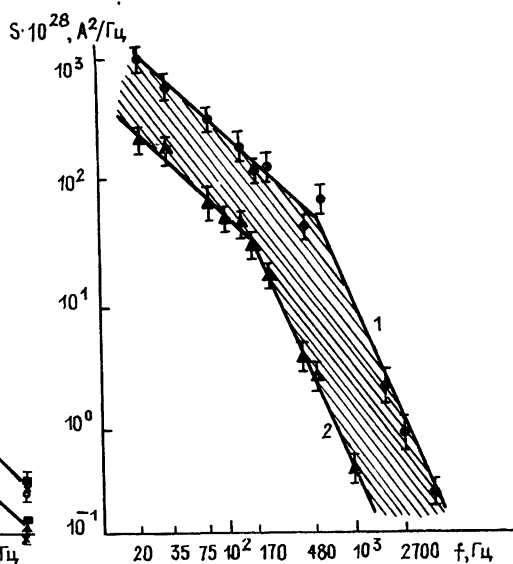


Рис. 3.

Рис. 2. Зависимости СПМ шума от частоты для пластин с различным зарядом в окисле, прошедших ПХО перед окислением; $U_{см} = 9$ В; $T = 300$ К; 1 — $Q_{ок} = 13,3 \cdot 10^{-8}$ Кл/см² (пластина 12), 2 — $Q_{ок} = 20,3 \cdot 10^{-8}$ Кл/см² (пластина 7); ●●●, ▲▲▲ — точки для средних значений шума по пластине для 7-й и 12-й пластин соответственно; ■■■ — точки для структуры с наибольшим уровнем шума по пластине; ××× — точки для структуры с наименьшим уровнем шума по пластине.

Рис. 3. Зависимость СПМ шума от частоты для пластины 15, прошедшей ХО перед окислением: $Q_{ок} = 29,2 \cdot 10^{-8}$ Кл/см², $U_{см} = 9$ В, $T = 300$ К; 1 — для структуры с наибольшим уровнем шума; 2 — для структуры с наименьшим уровнем шума.

Следует заметить, что по шумам МДП структуры даже на одной пластине обладают в известном смысле индивидуальными свойствами, однако на пластинах, прошедших ПХО перед операцией окисления, разброс по уровню шума от структуры к структуре значительно меньше, чем на пластинах, прошедших ХО и ПХО+ХО. Это иллюстрируется рис. 2 и 3. Разброс по уровню шума структур на пластинах, прошедших ХО (рис. 3), был настолько велик, что его нельзя было аппроксими-

мировать одной средней для пластины кривой, как в случае пластин, прошедших ПХО (рис. 2). Это дает возможность сделать вывод о том, что плазмохимическая обработка позволяет получить лучшую однородность очистки пластин и большую стабильность и воспроизводимость структур по пластине. При этом качество очистки определяется режимом ПХО и составом парогазовой смеси (ПГС) [3]. Состав ПГС, время обработки, давление в реакционной камере выбирали в соответствии с результатами, полученными в [2-5]. ПГС формировали путем смешивания в различных пропорциях следующих соединений: CCl_4 , CF_4 , CNF_3 , O_2 , Ar . Время ПХО во всех случаях равнялось 1 мин, давление 20—30 Па. В наиболее оптимальных режимах ПХО удавалось получать МДП структуры с очень малым зарядом в окисле, $Q_{ок} = 40 \div 60$ нКл/см² (см. табл. 1). Эти структуры имеют также и наименьший уровень шума в режиме инверсии. Для качественных структур показатель формы спектра γ приблизительно равен единице во всем диапазоне частот (рис. 2). Вероятно, для этих структур характерен туннельный механизм возникновения шума. При этом наблюдаемый спектр возможно объяснить на основе ловушечной модели, являющейся модификацией модели Мак-Уортера [9, 10]. А именно, вследствие захвата и эмиссии носителей ловушками, расположенными в окисле, концентрация носителей на границе раздела полупроводник—диэлектрик в режиме инверсии испытывает флуктуации вида $1/f$. С другой стороны, представляется очевидным, что величина тока утечки через окисел определяется указанной концентрацией носителей и флуктуации напряжения на МДП структуре будут иметь спектр вида $1/f$.

Структуры, прошедшие ХО, имеют гораздо более высокий уровень шума (рис. 3), чем структуры, прошедшие ПХО. Для структур, прошедших ХО, и характер зависимости СПМ от частоты иной (рис. 3). По-видимому, в этих структурах наряду с туннельным механизмом возникновения шума из-за захвата носителей ловушками в окисле появляется генерационно-рекомбинационный шум [9], обусловленный наличием ловушечных уровней в запрещенной зоне полупроводника, локализованных в приповерхностном слое кремния вблизи границы раздела $Si - SiO_2$. На энергетическом спектре (рис. 3) можно условно выделить два участка с различными значениями показателя γ .

Как известно [9], каждый из ловушечных уровней, определяющий спектр генерационно-рекомбинационного шума, характеризуется своим временем релаксации τ . Постоянная времени генерационно-рекомбинационного процесса для полупроводника p -типа равна [9, 11]

$$\tau = \tau_0 \exp(-E_a/\varphi_T), \quad (6)$$

где $\tau_0 \approx 1,5 \cdot 10^{-2}$ с — постоянная времени перезарядки для собственного полупроводника; E_a — энергия активизации поверхностной ловушки; φ_T — температурный потенциал ($\varphi_T = kT/e$, где e — заряд электрона). Для исследуемых структур $\tau = 1/(2\pi f_1) \approx 2 \cdot 10^{-4}$ с, где f_1 — частота перегиба в энергетическом спектре шума. После подстановки τ в (6) получим $E_a \approx 0,12$ эВ, что близко по величине к энергии примесных состояний щелочных металлов в кремнии [11] (с. 26). Для определения конкретного вида примесей требуется проведение элементного анализа, например, методом оже-спектроскопии.

На рис. 4 представлены зависимости СПМ шума от частоты для структур на двух пластинах, прошедших ПХО и дополнительную ХО. Можно видеть, что пластины сильно отличаются по уровню шума. Кроме того, повторяемость результатов на пластине 3 от структуры к структуре плохая. Заштрихованная область показывает разброс по уровню шума для структур на пластине 3, прошедшей ПХО и дополнительную ХО. Приведенные результаты позволяют сделать вывод, что дополнительная ХО после ПХО перед термическим окислением ухудшает качество поверхности полупроводника, что, вероятно, обусловлено высадкой на поверхность примесей, содержащихся в жидкостных травителях.

Проведенные нами эксперименты показали наличие сильной корреляционной связи между зарядом в окисле и уровнем шума МДП структур, независимой от способа предокислительной обработки пластин. На рис. 5 приведены в виде точек все полученные из опыта значения случайных величин $Q_{ок}$ и $S_{ш}$ для пластин, прошедших различные виды обработки в соответствии с табл. 1. СПМ измеряли на частоте $f=25$ Гц при $T=400$ К, $U_{см}=0$. (Поскольку уровень шума в структурах с малым зарядом в окисле при небольших напряжениях смещения ($U_{см} \approx 1$ В) был низок и находился на пределе чувствительности аппаратуры, измерение шума производили при нагреве пластины до температур 400—430 К [12].)

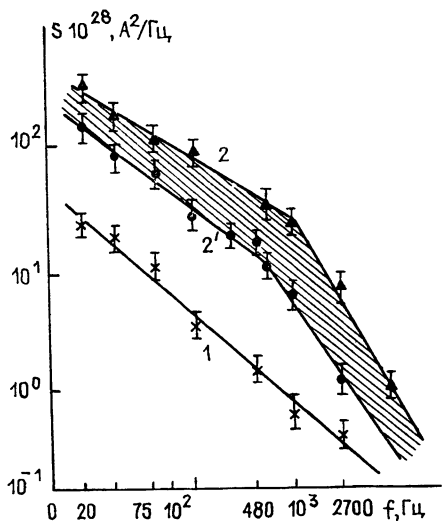


Рис. 4.

Рис. 4. Зависимость СПМ шума от частоты для различных пластин, прошедших ПХО+ХО; $U_{см}=9$ В, $T=300$ К; 1 — для структуры с пластины 12 ($Q_{ок} = 13,3 \times 10^{-8}$ Кл/см²), 2, 2' — для структур с наибольшим (2) и с наименьшим (2') уровнем шума на пластине 3 ($Q_{ок} = 29,9 \cdot 10^{-8}$ Кл/см²).

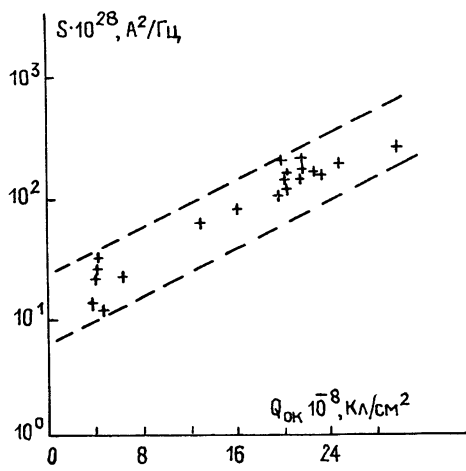


Рис. 5

Рис. 5. Диаграмма рассеяния СПМ шума на частоте 25 Гц относительно заряда в окисле для пластин, прошедших различные виды обработки: $U_{см}=0$, $T=373$ К.

Коэффициент корреляции между уровнем СПМ шума на частоте 25 Гц и величиной заряда в окисле для пластин 1—21 из табл. 1, рассчитанный на ЭВМ по стандартной методике [7], оказался равен $R\{S, Q_{ок}\} = 0,86 \pm 8,2 \cdot 10^{-3}$.

В работе был рассчитан также коэффициент корреляции между уровнем СПМ шума на частоте 170 Гц и величиной заряда в окисле для пластин 1—15 из табл. 1 при $T=300$ К и $U_{см}=9$ В (режим инверсии), который равен $R = 0,75 \pm 7,3 \cdot 10^{-3}$. Столь высокие значения коэффициента корреляции R свидетельствуют о несомненной связи между уровнем шума и зарядом в окисле. Вместе с тем очевидно, что уровень НЧ шума определяется не только величиной заряда в окисле. Так, для структур с одинаковым по величине зарядом в окисле шум может различаться в несколько раз (рис. 5). На уровень и характер НЧ шума в МДП структурах оказывает большое влияние состояние приповерхностной области полупроводника: наличие в ней примесей и дефектов кристаллической решетки. Особенно сильно это проявляется в режиме инверсии. При этом генерационно-рекомбинационные процессы в области пространственного заряда (ОПЗ) и на поверхности полупроводника приводят к возрастанию шума в режиме инверсии [12]. Для структур с низкими токами утечки уровень шума в режиме инверсии обычно выше, чем в режиме обогащения, на один—два порядка величины.

Для структур с токами утечки $I_{ут} \geq 0,1$ мкА в наших экспериментах наблюдались близкие по величине значения избыточного шума

в режиме обогащения и инверсии независимо от режима предокислительной обработки (рис. 6). Полученные результаты указывают на то,

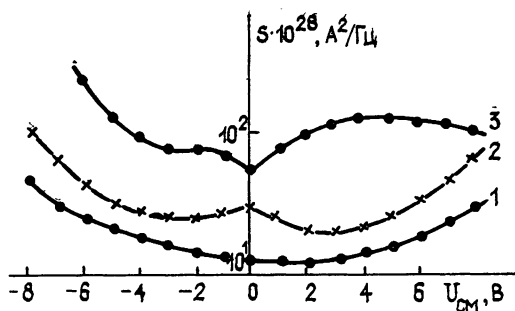


Рис. 6. Зависимости СПМ шума от напряжения смещения для структур с токами утечки; $f = 170$ Гц, $T = 373$; 1 — для структур на пластине, прошедшей ПХО+ХО, 2, 3 — для структур на пластинах, прошедших ХО.

что в данном случае уровень шума определяется прежде всего свойствами самого диэлектрика МДП структуры. Как известно [13, 14], в МДП структурах при большом токе утечки через диэлектрик инверсный заряд не образуется, что объясняется рассеиванием объемного заряда. В этом случае будут отсутствовать и генерационно-рекомбинационные процессы в ОПЗ, приводящие к возрастанию избыточного шума. Механизм возникновения НЧ шума в этих структурах

будет иным, чем в рассмотренных ранее структурах, практически не имеющих токов утечки. НЧ шум в структурах с повышенными токами утечки исследован в [15, 16].

Уровень избыточного шума в структурах с токами утечки на несколько порядков выше, чем в структурах, не имеющих токов утечки. Как показывает эксперимент, для структур с повышенными токами утечки СПМ избыточного шума пропорциональна $I_{ут}^2$. Такая зависимость характерна для МДП структур с макродефектами в диэлектрике типа пор и микротрещин, а также для образцов со сколами — искусственными дефектами, возникающими при раскалывании кремниевых пластин с диэлектрической пленкой [15, 16]. В то же время для структур с малыми токами утечки отсутствует значимая корреляционная связь между СПМ шума и квадратом тока утечки [6]. Этот результат свидетельствует о том, что возникновение НЧ шума в таких МДП структурах не всегда связано с процессами токопрохождения через окисел.

1) Установлено, что уровень избыточного шума в МДП структурах минимален для пластин, имеющих наименьший заряд в окисле. Коэффициент корреляции между спектральной плотностью мощности шума на фиксированной частоте и величиной заряда в окисле равен 0,75—0,85.

2) Структуры на пластине, прошедшие ПХО перед операцией окисления, имеют меньший уровень избыточного шума и меньший разброс по сравнению со структурами, прошедшими ХО. Дополнительная ХО может как улучшать, так и ухудшать шумовые характеристики структур.

3) Для структур с низкими токами утечки НЧ шум в режиме инверсии обычно выше, чем в режиме обогащения, на один—два порядка. В то же время для структур с повышенными токами утечки уровень НЧ шума прежде всего определяется свойствами самого диэлектрика и имеет близкие по величине значения в режиме инверсии и обогащения при одинаковом напряжении смещения, хотя абсолютное значение шума в таких структурах может быть высоким.

4) Метод измерения НЧ шума может быть рекомендован для экспрессной оценки качества предокислительной обработки кремниевых пластин по величине заряда в окисле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виртманис А. С., Микенсон А. Р., Фелтынь И. А. и др. // Изв. АН ЛатвССР. Сер. физ. и техн. 1981. № 1. С. 31.
2. Вишняков Б. А., Неволин В. К., Путря М. Т. и др. // Электронная техника. Сер. 3. 1983. Вып 4 (106). С. 48.

3. Путря М. Г., Вишняков Б. А., Хоббихожин Ш. А. и др. // Физика и химия обработки материалов. 1982. № 5. С. 43.
4. Веселов В. Ф., Вишняков Б. А., Путря М. Г., и др // Электронная техника. Сер. 3. 1984. Вып. 4 (110). С. 80.
5. Вишняков Б. А., Жигальский Г. П., Путря М. Г., Савельев А. А., Федоров А. С. // Электронная техника. Сер. 3. 1984. Вып. 6 (111). С. 21
6. Жигальский Г. П., Беспалов В. П. // Электронная техника. Сер. 3. 1979. Вып. 7 (77). С. 26.
7. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов: Пер. с англ. / Под ред. Г. Я. Мирского. — М.: Мир, 1974 — 464 с
8. Колоско В. М., Каплан Г. Д. Обзоры по электронной технике Сер. 3 Микроэлектроника — М.: ЦНИИ Электроника, 1977. Вып. 2 (465). С. 1—82.
9. Нарышкин А. К., Врачев А. С. Теория низкочастотных шумов — М. Энергия, 1972
10. Christensson S, Lundström I, Svensson C // Sol State El 1968. V. 11. № 9. P. 797.
11. Зи С. Физика полупроводниковых приборов, в двух книгах. Кн. I: Пер. с англ. / Под ред. Р. А. Сурица. — М.: Мир, 1984. — 456 с.
12. Жигальский Г. П., Федоров А. С., Болтнев А. Н. // Изв. вузов. Радиофизика 1983. Т. 26 № 7 С. 888
13. Свойства МДП структур / Под ред. А. В. Ржанова. — М.: Наука, 1976 — 279 с.
14. Сыдоров В. Ф., Ревелева М. А., Алейникова Н. М. и др. МДП структуры — Воронеж: Гос. ун-т, 1975. — 226 с.
15. Нахмансон Р. С., Ройзин Я. О. // Труды XX Международного коллоквиума ВТШ Ильменау (ГДР), 1975. Т. 5.
16. Нахмансон Р. С., Ройзин Я. О. В кн.: Микроэлектроника и полупроводниковые приборы / Под ред. А. А. Васенкова и Я. А. Федотова — М.: Сов. радио, 1978. Вып. 3. С. 159.

Московский институт
электронной техники

Поступила в редакцию
10 мая 1988 г.,
после переработки
3 октября 1988 г.

SILICON PREOXIDIZING ETCHING PROCESS EFFECT ON LOW FREQUENCY PROCESS EFFECT ON LOW FREQUENCY NOISE IN MOS STRUCTURES

G. P. Zhigal'skij, M. G. Putrya, A. S. Fedorov

The research of MOS structures formed on silicon wafers subjected to various kinds of preoxidizing surface processing showed the presence of remarkable correlation between spectral density of noise power at fixed frequency and the quantity of charge in the oxide. Here the noise of the perfect structures having practically no leakage currents (leakage current density $J \leq 10 \text{ nA/sm}^2$) is explained by McWhorter model of noise origin tunneling mechanism and generation-recombination process in the region of semiconductor space charge.