

ПРОФИЛЬНЫЙ ОЖЕ-АНАЛИЗ МОНОП-СТРУКТУР С ТОНКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

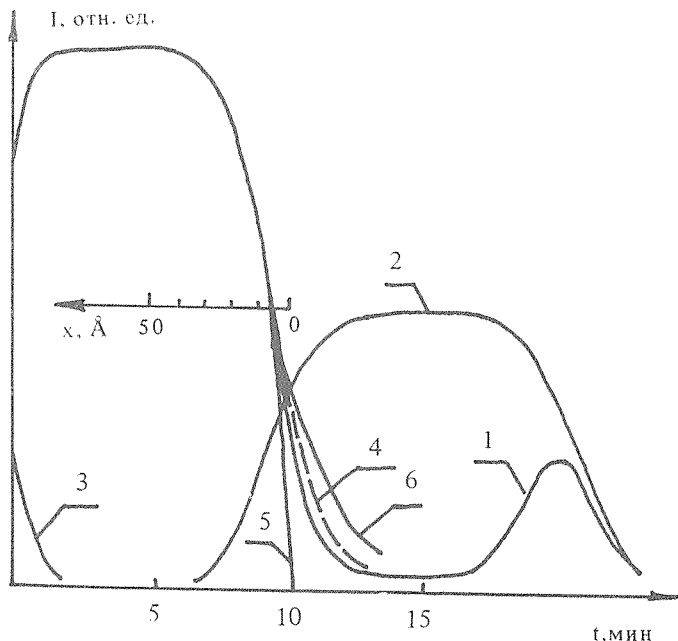
С.В. Кучаев, А.Ф. Плотников, Ф.А. Пудонин, В.Н. Селезнев, Д.Н. Токарчук

Рассмотрен вопрос разрешения по глубине при профильном анализе МОНОП-структур с тонкими диэлектрическими слоями. Оценен вклад различных факторов в уширение профиля. Найден критерий определения толщин слоев по профилям распределения составляющих элементов.

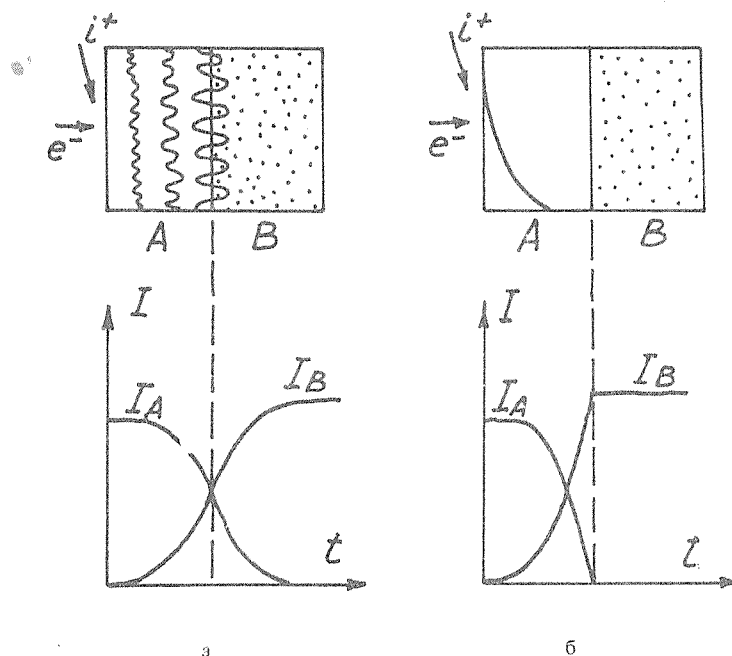
В последнее время большое внимание уделяется исследованию структур металл-окисел-нитрид-окисел-полупроводник (МОНОП) с малыми толщинами диэлектрических слоев Si_3N_4 и SiO_2 (50–100 Å) [1,2]. Для отработки технологии их изготовления и интерпретации результатов электрофизических измерений необходимо определить толщину и состав диэлектрических слоев. С этой целью ниже рассмотрены возможности метода профильной оже-спектроскопии для анализа МОНОП-структур.

Образцы изготавливались на кремниевой подложке. Термическим окислением выращивался туннельно-тонкий слой SiO_2 (толщина $d_0^1 = 18 \text{ \AA}$), затем пиролизом смеси $SiCl_4$ и NH_3 в потоке водорода при $T = 950 \text{ }^\circ\text{C}$ наносился слой Si_3N_4 толщиной $d_N = 50\text{--}150 \text{ \AA}$. Блокирующий слой SiO_2 толщиной $d_0^2 = 50\text{--}150 \text{ \AA}$ наносился на Si_3N_4 высокочастотным распылением кварцевой мишени. Образцы исследовались на оже-спектрометре LAS-2000, методика измерений описана в [3]. Энергия ионов аргона E_1 при профильном анализе составляла 1 кэВ, угол падения ионного пучка $\alpha = 70^\circ$. Предварительно проведенный профильный анализ МОНОП-структур с толстым диэлектриком $d_N \cong d_0^2 > 500 \text{ \AA}$ показал, что в данном случае относительные скорости травления нитрида и окисла совпадают с хорошей точностью, что существенно облегчает задачу определения толщин слоев по времени травления.

На рис. 1 (кривые 1, 2, 3) показаны амплитуды производной оже-пиков кислорода I_O , азота I_N и углерода I_C в зависимости от времени травления МОНОП-структуры с $d_N = 100 \text{ \AA}$ и $d_0^2 = 100 \text{ \AA}$. Видно, что профили на границе слоев размыты. На рис. 2 схематично показаны два возможных механизма уширения профиля на границе двух веществ А и В: а) — вследствие образования рельефа поверхности при ионном травлении, б) — из-за выхода оже-электронов из более глубоких слоев вещества; количество таких электронов убывает с глубиной x по закону $n(x) = n_0 \exp(-x/\lambda)$, где λ — характерная глубина выхода.



Р и с. 1. Зависимости от времени травления t оже-сигналов кислорода (1,4,6), азота (2), углерода (3). 1, 2, 3, 6 — МОНОП-структура ($d_N = 100 \text{ \AA}$, $d_0^2 = 100 \text{ \AA}$); 4 — структура $SiO_2\text{--}GaSe$; 5 — зависимость $I_O(x)$ в структуре $SiO_2\text{--}Si_3N_4$, полученная без ионного травления.



Р и с. 2. Два критерия определения положения границы раздела двух веществ для двух возможных механизмов уширения профиля: вследствие неоднородности ионного травления (а); из-за конечной глубины выхода оже-электронов из вещества (б); t – время травления.

Из рисунка видно, что критерий определения положения границы по профилю зависит от механизма уширения профиля.

Рассмотрим другие возможные причины размытия профиля /4/: в) нерезкая граница, наличие переходного слоя; г) шероховатость поверхности, при которой различные склоны неровностей находятся в неодинаковых условиях при травлении; д) неоднородное исходное загрязнение поверхности, приводящее к маскированию при ионном травлении; е) эффекты вбивания и перемешивания атомов при травлении.

Оценим вклад каждого из вышеперечисленных эффектов.

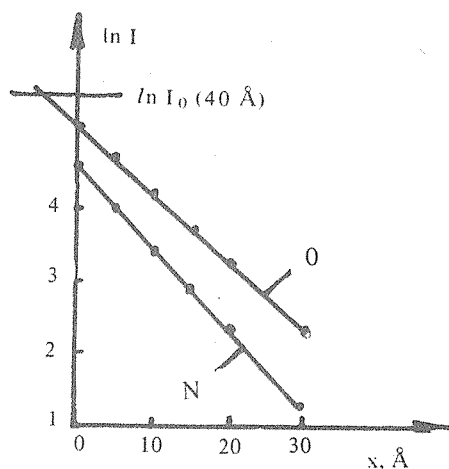
а) При увеличении полной толщины стравленной пленки d размытие профиля Δd должно линейно возрастать, чего не наблюдается вплоть до толщин $\sim 1000 \text{ \AA}$. Кроме того, при профильном анализе аморфных диэлектриков разрешение по глубине $\Delta d/d$ составляет 3% (/4/, стр. 220), что для исследуемых толщин $d = 100\text{--}200 \text{ \AA}$ дает незначительное уширение $\Delta d = 3\text{--}6 \text{ \AA}$.

Для оценки вклада эффектов в) и г) был проведен дополнительный эксперимент. На подложку из свежесколотого слоистого кристалла GaSe, поверхность которого представляла собой совершенную атомную плоскость, что контролировалось по дифракции медленных электронов, методом высокочастотного распыления наносился слой SiO_2 толщиной 100 \AA . Данный метод характеризуется низкими температурами подложки ($T \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$), малыми энергиями распыляемых частиц (несколько эВ) и высокой однородностью наносимой пленки. Таким образом, предполагается, что исследуемый образец представлял собой однородную пленку SiO_2 с резкой границей между пленкой и идеально плоской подложкой. Профильный анализ (рис. 1, кривая 4) не обнаруживает улучшения разрешения по глубине, и, следовательно, эти факторы также не являются определяющими.

д) Сравнение профилей распределения кислорода и азота с профилем углерода, связанного с поверхностным загрязнением образца (рис. 1, кривые 1-3), однозначно отвергает данный механизм как основной.

Оценим вклад механизмов е) и б). Так как глубины выхода оже-электронов с одной и той же энергией в разных соединениях могут существенно отличаться (/4/, стр. 143), было проведено определение λ для оже-электронов N и O, для чего на предварительно очищенную ионным травлением пленку Si_3N_4 наносились слои SiO_2 толщиной $X = 0\text{--}40 \text{ \AA}$. Зависимости $I_N(X)$ и $[I_0(40 \text{ \AA}) - I_0(X)]$ хорошо спрямляются в полулогарифмических координатах (рис. 3), давая значения $\lambda_N = 8,7 \text{ \AA}$ и $\lambda_0 = 10 \text{ \AA}$, хорошо

согласующиеся с универсальной кривой пробегов электронов $\lambda(E)$ /4/. Экстраполяция зависимости $\ln [I_0(40 \text{ \AA}) - I_0(X)]$ к значению $\ln I_0(40 \text{ \AA})$ дает оценку "остаточной" толщины окисла, связанного с подождением нитрида при таком приготовлении образцов, около 3 \text{ \AA}. Таким образом, полученные без ионного травления описанным выше способом зависимости $I_N(X)$ и $I_0(X)$ характеризуют форму профилей распределения азота и кислорода вблизи границы окисел-нитрид для близкой к идеальной МОНОП-структуры, причем вклад в уширение профиля вносит только механизм б (рис. 1, кривая 5 — кислород, азот не показан). Разница между результатами профильного анализа МОНОП-структуры и вышеуказанными зависимостями $I_N(X)$ и $I_0(X)$ состоит в размытии заднего фронта профиля после стравливания границы. Наиболее вероятная причина этого — эффекты вбивания и перемешивания атомов. Это подтверждается, в частности, тем, что при увеличении энергии ионов с 1 кэВ до 3 кэВ задний фронт профиля становится более размытым (рис. 1, кривая 6). Поэтому можно утверждать, что наблюдаемое размытие передних фронтов профилей на границе определяется в основном конечной глубиной выхода оже-электронов, а задний фронт размыт из-за эффектов перемешивания и вбивания атомов при ионном травлении.



Р и с. 3. Определение характерной глубины выхода оже-электронов в системе $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$.

Поэтому для определения положения границы слоев блокирующего окисла и нитрида и, следовательно, толщины слоя окисла проводилась экстраполяция к нулю наиболее крутого участка профиля распределения кислорода, а толщину слоя нитрида можно определять по полувысоте профиля азота. Так как от образца к образцу из-за погрешностей настройки ионной пушки скорость травления может меняться, то в случае, когда ни одна из толщин слоев заранее не известна, проводилось дополнительное напыление слоя двуокиси кремния или кремния известной толщины для калибровки скорости травления.

Для проверки предлагаемого метода определения толщин по профилям распределения элементов был проведен анализ серии тестовых образцов с известными толщинами $d_N = 50, 100, 150 \text{ \AA}$ и $d_0 = 50, 100, 150 \text{ \AA}$. Точность определения толщин данным методом составила около 15%, что вполне достаточно для решения ряда практических задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Suzuki E. et al. IEEE Trans. ED-30, 122 (1983).
2. Голтвянский Ю. В. и др. Препринт ФИАН № 91, М., 1985 г.
3. Кучаев С. В., Селезнев В. Н., Плотников А. Ф. Поверхность, № 7, 103 (1984).
4. Методы анализа поверхностей. Под ред. А. Зандерны. М., Мир, 1979.

Поступила в редакцию 16 декабря 1985 г.