

ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК SiO₂ ПРЯМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ПУЧКОВ ИОНОВ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ГАЗОВ

Метод реактивного ионно-лучевого синтеза тонких пленок непосредственно из пучков ионов химически активных веществ является одним из перспективных методов нанесения функциональных слоев в микроэлектронике и оптике в связи с рядом принципиальных достоинств по отношению к существующим методам получения тонких пленок в вакууме. Недостатки наиболее распространенных методов (распыление или испарение материала мишени, плазмостимулированные методы) связаны с ограниченными возможностями управления энергией осаждаемых частиц, переносом вещества к подложке по закону «косинуса» и трудностями контроля количества осаждаемого вещества.

Для управления электрофизическими, оптическими и механическими свойствами формируемых слоев необходимо изменять энергию, величину, состав и направленность потока осаждаемых частиц. Такими возможностями обладает метод осаждения пленок из пучков ионов химически активных газов, отличительными особенностями которого являются:

–ускорение ионов до требуемой энергии и формирование пучка осуществляются в ионно-оптической системе источника ионов, при этом энергия ионов определяется лишь ускоряющим напряжением источника и может составлять десятки и сотни эВ, что позволяет синтезировать тонкие пленки, управление свойствами которых осуществляется изменением энергии ионов пучка;

–пространственная направленность при условии малой расходимости ионного пучка позволяет проводить процессы нанесения пленок на структуры сложного профиля, что важно, например, при создании интегральных схем с многоуровневой металлизацией;

–доля ионной компоненты в потоке осаждаемого вещества достигает 100 %, что позволяет осуществлять строго дозированный перенос вещества к подложке посредством контроля в процессе осаждения плотности тока ионов пучка.

На рис. 1, а представлена упрощенная схема измерения токов пучков заряженных частиц, формируемых торцевым холловским ускорителем (ТХУ), смонтированным в вакуумном объеме установки УРМ 3.279.017 (рис. 1, б). Площадь изолированного электрода составляла $\sim 132 \text{ мм}^2$. Ток зонда измерялся стрелочным миллиамперметром. Ток термокомпенсатора составлял 16 А, расстояние зонд-ТХУ – 80 мм.

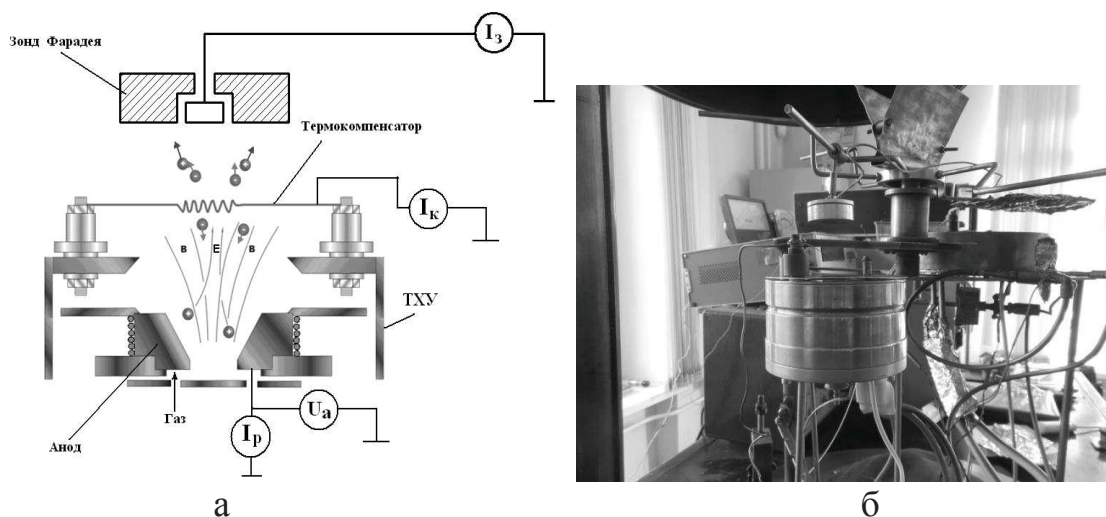


Рисунок 1– Упрощенная схема измерения токов пучков заряженных частиц (а) и внешний вид измерительного комплекса (б)

Проведены исследования электрофизических параметров ионных потоков, формируемых ионным источником. Напряжение анода варьировалось в пределах 20–100 В, ток разряда при этом составлял 0,5–2,5 А. На рис. 2, а представлены вольтамперные характеристики плазменных разрядов в ТХУ при использовании различных газов. Установлено, что при ионизации кислорода можно получить значительные разрядные токи даже при невысоких анодных напряжениях. Это можно связать с особенностями ионизации кислорода, когда происходит интенсивная электронная эмиссия. Ионизация молекулярных газов (CO_2 и CH_4) происходит с меньшей эффективностью.

Зондовые измерения показали, что при ионизации кислорода, а также в некоторой степени и аргона при увеличении напряжения на аноде имеет место электрон-электронная эмиссия. При ионизации молекулярных газов это явление менее значительное (рис. 2, б).

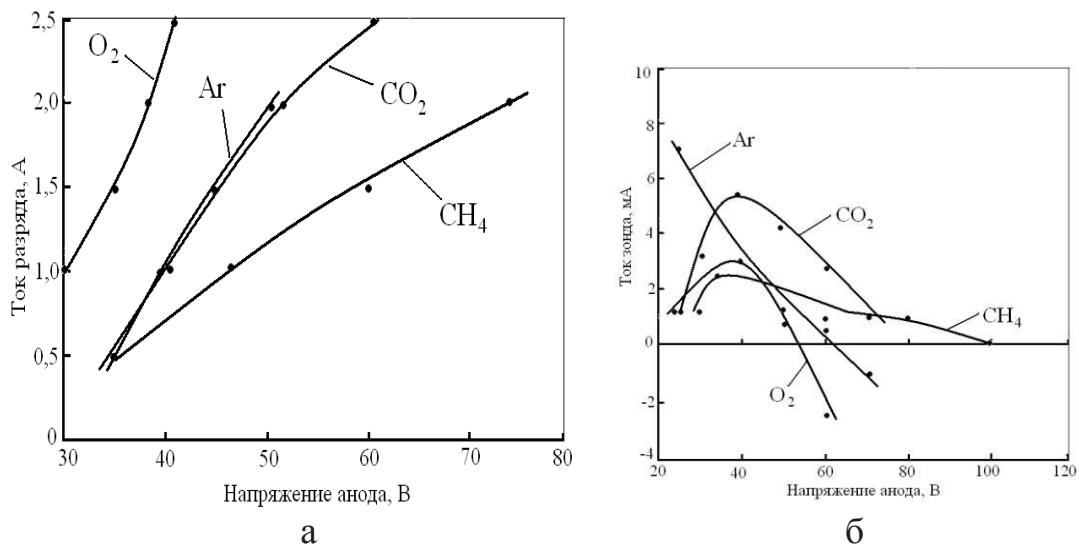


Рисунок 2– Вольтамперные характеристики плазменных разрядов в ТХУ (а) и измерительного зонда (б)

Формирование покрытий из SiOC осуществлялось на подложках из кремния и оптического стекла К8. В качестве рабочих газов использовалась смесь моносилана с аргоном (5 % SiH₄ + 95 % Ar), диоксид углерода и кислород. Остаточный вакуум в процессе нанесения не превышал значения $3,3 \cdot 10^{-3}$ Па. Оптимальные режимы работы ионного источника были следующими: анодное напряжение – 50 – 80 В, ток разряда – 1,5 – 2,0 А, ток соленоида – 1 А, ток эмиттера электронов – 12–13 А.

Толщину полученных покрытий определяли с использованием микроскопа интерферометра МИИ-4. Для измерения электрофизических параметров использовались МДМ структуры. Сопротивление и тангенс угла диэлектрических потерь структур измерялись на частоте 1 МГц с помощью прибора Е7-20. Исследование оптических характеристик покрытий осуществлялось в диапазоне 200–900 нм с помощью спектрофотометра PROSCAN MC-121. Измерение ИК спектров пропускания осуществлялось с помощью FTIR спектрометра Vertex 70 в диапазоне $400 \dots 2500 \text{ см}^{-1}$.

На рис. 3 представлены спектральные зависимости пропускания и поглощения пленок SiOC, синтезированных при температуре подложки 423 К. Пленки имели высокую прозрачность в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. Повышение температуры подложки способствовало улучшению оптических характеристик, что объясняется увеличением подвижности адатомов и стимулированием химического взаимодействия между кремнием и кислородом. На рис. 4, а представлены зависимости тангенса диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$,

электрической прочности $E_{пр}$ и удельного объемного сопротивления ρ_v пленок SiOC от парциального давления CO_2 в рабочем газе.

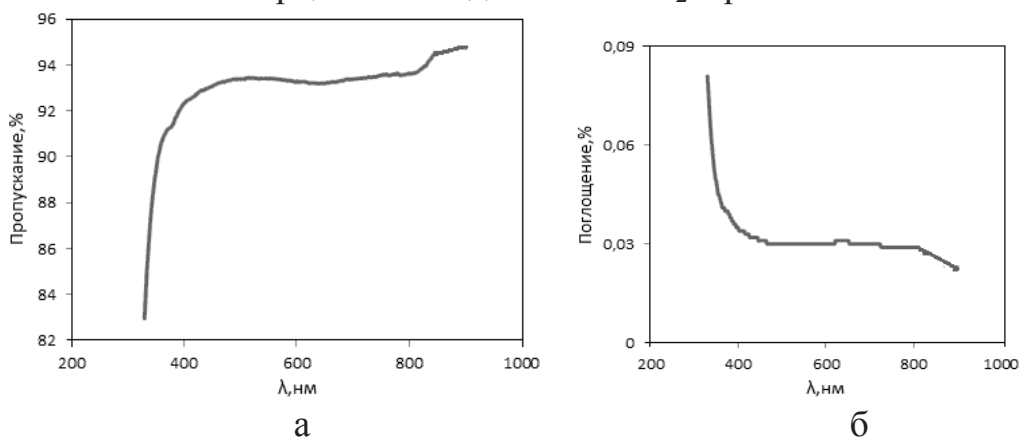


Рисунок 3– Спектры пропускания (а,) и поглощения (б) пленок SiOC, полученных при $p_{CO_2}=4 \cdot 10^{-2}$ Па и при температуре подложки 423 К

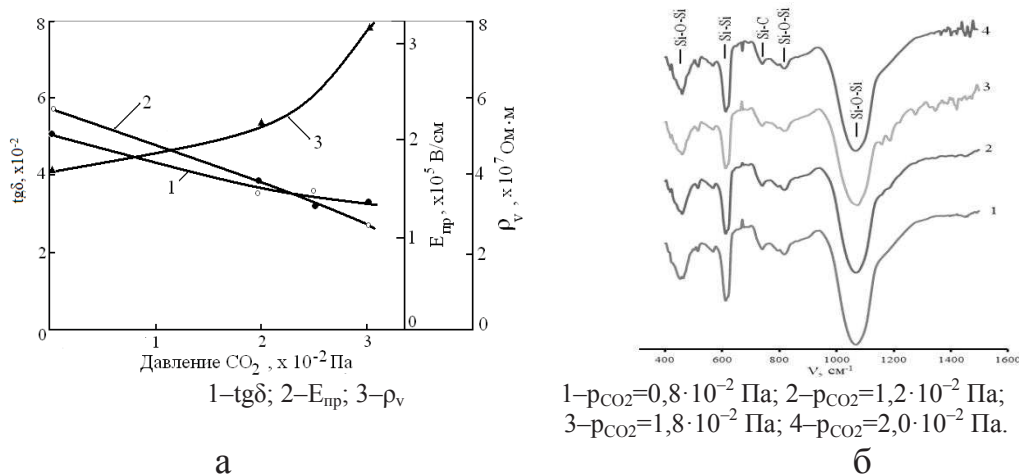


Рисунок 4 – Зависимость $tg \delta$, $E_{пр}$ и ρ_v пленок SiOC (а) и ИК спектров пропускания (б) от парциального давления диоксида углерода

Полученные пленки имели низкие уровни $E_{пр}$ и ρ_v , что может быть связано с недостаточным окислением кремния. Последнее можно объяснить невысокой температурой подложки и недостатком кислорода в рабочем газе.

На рис. 4, б представлены ИК спектры пропускания пленок SiOC. На спектре имелись следующие три характерные полосы поглощения SiO_2 : $\nu_{as} = 1085 \text{ см}^{-1}$, $\nu_s = 820 \text{ см}^{-1}$, $\delta_{as} = 450 \text{ см}^{-1}$. Также на спектре имеется полоса поглощения кремниевой подложки с частотой $\sim 607 \text{ см}^{-1}$. Наблюдалось наличие полосы поглощения карбида кремния Si-C на частоте $\sim 740 \text{ см}^{-1}$. Поглощения на $\nu = 1020\text{--}1090 \text{ см}^{-1}$ связи Si-O-C (оксикарид кремния) обнаружено не было.