

Введение Разработка механизмов высокой точности и плавности перемещений требует минимальных значений коэффициента трения между подвижными деталями узлов. Это достигается за счет использования триботехнических материалов, либо применения триботехнических покрытий на поверхностях трущихся деталей. Низкий коэффициент трения характерен для покрытий на основе таких материалов, как графит, фторопласт, дисульфид молибдена, серебро, свинец, никель, а также сплавов и композиций на базе них [1-3]. Среди перечисленных материалов минимальным коэффициентом трения в условиях работы трущихся деталей в вакууме обладают покрытия на основе дисульфида молибдена (MoS_2) [4], однако данные покрытия по прочности уступают износостойким. Причиной низкой износостойкости пленок на основе MoS_2 , как следует из работы [5], является колончатая структура покрытия. Подобная структура образуется в ходе осаждения с некоторой критической толщины пленки (100-300 нм), с которой нарушается структурная целостность и приводит к уменьшению прочностных характеристик. Избежание колончатого роста пленок возможно при использовании промежуточных слоев на основе соединений (нитридов, карбидов) металлов. В настоящее время существует большое количество методов нанесения триботехнических покрытий на детали изделий. Наиболее широкими возможностями обладают методы вакуумных ионно-плазменных технологий. Эти технологии основаны на физическом осаждении потока частиц сублимированного материала мишени, сублимация которого происходит в результате воздействия на мишень ускоренных пучков ионов. Прочная адгезия покрытия с подложкой достигается при высокой степени чистоты поверхности. Традиционная жидкостная химическая очистка подложек перед вакуумным циклом не позволяет удалять полностью загрязнения. Ионно-плазменная обработка поверхности обеспечивает очистку поверхности на молекулярном уровне [6].

Определение условий ионной очистки. Для эффективной очистки поверхности подложки отношение потоков ионов и тепловых молекул остаточного газа на указанную поверхность, по оценкам [6], должно быть больше 100:1. Для расчета режима ионной очистки полагаем, что адсорбирующим газом является остаточный воздух, который мы принимаем за идеальный газ. Расчет характеристик ионного пучка, необходимого для эффективной очистки подложки представлен ниже. При этом принимаем, что $j_i > 100 j_r$, где j_i плотность ионного тока, j_r поток частиц остаточного газа, выраженный в токовом эквиваленте, и получаем уравнение граничного случая для неравенства (1):

$$(1) \quad e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл заряд электрона; } p \text{ парциальное давление адсорбирующегося воздуха; } k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К постоянная Больцмана; } T = 298 \text{ К средняя температура воздуха; } M_v = 28,98 \text{ а.е.м. молярная масса воздуха; } M_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг масса протона.}$$

График зависимости ионного тока от парциального давления остаточного воздуха представлен на рис.1. Область выше прямой линии на данном рисунке соответствует эффективным плотностям

ионного тока для осуществления очистки подложки в среде остаточного воздуха. Парциальное давление воздуха определяется предельным остаточным давлением, создаваемым вакуумным насосом, значение которого составляет порядка $10^{-7} \dots 10^{-4}$ Па [7] при высоковакуумной откачке. Рис. 1 Зависимость эффективной плотности ионного тока от парциального давления остаточного воздуха для очистки подложки. При этом значение плотности тока, бомбардирующей поверхность ионов, для давления 10^{-4} Па составит более $5 \cdot 10^{-3}$ А/см². Для оценки средней энергии ионного пучка E_i , требуемой для осуществления очистки, исходим из предположения: энергия адсорбции частиц на поверхности подложки меньше энергии связи частиц материала подложки. Следовательно, для удаления загрязнений достаточно энергии ионов, способных распылить материал подложки. Распыление материалов под действием бомбардирующих частиц начинается с определенной пороговой энергии ионов (порядка 20 эВ). Оптимальной, с точки зрения энергозатрат по отношению к коэффициенту распыления, является энергия ионов порядка 300...500 эВ. Таким образом, для осуществления эффективной очистки подложек необходим источник ускоренных ионов со следующими характеристиками: $E_i = 300 \dots 500$ эВ.

Расчет параметров процесса распыления дисульфида молибдена

Экспериментальные данные по параметрам процесса катодного распыления MoS₂ отсутствуют. Согласно работе [4], мишень MoS₂ распыляется и переносится к подложке в виде молекул, следовательно коэффициент распыления S материала мишени можно рассчитать в соответствии с эмпирической формулой (2) [6]: (2) где K_n эмпирический параметр; $\lambda = 102 / (\pi R^2 N)$ длина свободного пробега иона аргона в кристаллической решетке подложки (здесь: R радиус сечения взаимодействия ионов аргона и молекул дисульфида молибдена; N концентрация молекул мишени дисульфида молибдена); $\theta = 0$ град средний угол падения ионов относительно нормали к поверхности мишени в магнетроне; $M_{Ar} = 40$ атомарная масса аргона; $M_{MoS_2} = 160$ молекулярная масса дисульфида молибдена; E_0 энергия бомбардирующих ионов. Значение параметра K_n определяем по формуле (3) [6]: (3) где $H \sim 9$ эВ энергия сублимации MoS₂. Исходя из изложенного, коэффициент распыления S составит значение порядка $1,7 \cdot 10^{16} E_0$. График зависимости коэффициента распыления от энергии ионов представлен на рис. 2. Рис. 2 Зависимость коэффициента распыления MoS₂ от энергии ионов Ar. Значение массовой скорости распыления мишени MoS₂ с 1 см² от плотности ионного тока, бомбардирующего поверхность, определяем в соответствии с уравнением (4) [6]: (4) График зависимости плотности ионного тока от массовой скорости распыления мишени для значений $E_0 = 370$ эВ, $S \sim 1$ и с поправочным коэффициентом $k = 0,3$ представлен на рис. 3. Поправочный коэффициент учитывает несоответствие расчетных величин скорости распыления с экспериментальными данными. Рис. 3 Зависимость массовой скорости распыления мишени MoS₂ от плотности ионного тока. Таким образом,

итоговые оценки параметров нанесения композиционного триботехнического покрытия на основе дисульфида молибдена являются исходными данными для проектирования технологических устройств и оборудования осаждения подобных покрытий. Требуемые характеристики ионного пучка могут быть осуществлены в ускорителе ионов с замкнутым дрейфом электронов, а распыление дисульфида молибдена может быть осуществлено при помощи ВЧ магнетронной распылительной системы.