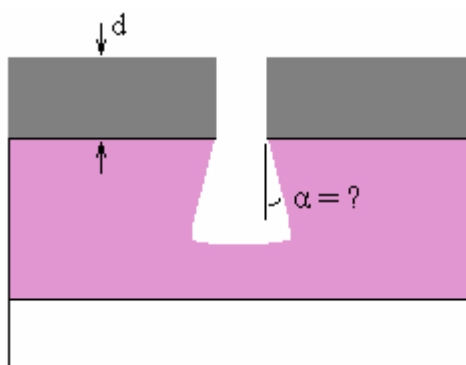


## Плазменное травление

Одним из методов создания микро- и наноструктур и микросхем является метод плазменного травления. На подложку наносят слой субстрата (обычно металла), из которого требуется получить нужную структуру (рис. а.). Затем поверх субстрата наносят маску – своеобразную копию нужной структуры (рис. б.). Метод применим тогда, когда создать копию структуры из материала маски проще, чем саму структуру. После нанесения маски образец помещают в плазму, находящуюся в электрическом поле (субстрат иногда служит одним из электродов, создающих поле), и происходит травление. Ионы плазмы реагируют с субстратом, расщепляя его, но не расщепляя маску. В итоге получается требуемая структура (рис. в.).



Одна из технических трудностей заключается в том, что ионы плазмы участвуют в хаотическом тепловом движении и «бомбардируют» субстрат не в одном направлении, а беспорядочно. Поэтому «стенки» субстрата получаются не вертикальными (как на рис. в), а наклонными. Упрощённый вид «стенки» показан на следующем рисунке.



Пусть травление происходит в ионизированном атомарном кислороде при температуре  $T = 300$  К, а толщина маски равна  $d = 2$  мкм. Образец помещён между электродами, к которым приложено напряжение  $U = 1000$  В, расстояние между которыми равно  $L = 1$  см. Электрическое поле, в котором находится образец, можно приближённо считать однородным (по крайней мере, в начале травления). Силовые линии поля направлены вверх. Субстрат бомбардируется ионами  $O^+$ .

Оцените (вычислите приближённо) угол  $\alpha$ , образующийся между стенками субстрата и вертикалью, в начале травления (**5 баллов**).

Указание. Считайте, что ионы кислорода начинают движение с высоты  $d$  над субстратом (в начале травления), имея начальную скорость, равную среднеквадратичной скорости движения данных ионов в плазме (это приближение допустимо для оценки), и до взаимодействия с субстратом не сталкиваются с другими частицами.

Рассмотреть все возможные направления начальной скорости.

Какими способами можно преодолеть указанную техническую трудность, т.е. как сделать так, чтобы «стенки» получались как можно более вертикальными (**2 балла**).

*Какие наноструктуры можно получать с помощью различных модификаций метода плазменного травления? Опишите процесс получения (по 1 балл за пример, максимум 5 баллов).*