

05;07;11;12

Увеличение интенсивности отражения рентгеновского излучения от поверхности при нанесении на нее алмазоподобной углеродной пленки

© А.М. Баранов

Государственный научно-исследовательский институт вакуумной техники,
113105 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 2 сентября 1997 г.)

Экспериментально показана возможность изготовления отражающих поверхностей с шероховатостью, достаточной для рентгеновской оптики.

В последние годы все больше расширяется круг научных и прикладных задач, в которых используется рентгеновское излучение и потоки нейтронов. Примером может служить рентгеновская и нейтронная спектроскопия, микроскопия, рентгеновская литография и т.д. [1]. Для управления этими излучениями используются зеркала скользящего падения и многослойные рентгеновские зеркала. Интенсивность отражения рентгеновского излучения от зеркал сильно зависит от шероховатости их поверхности [2]. Поэтому в рентгеновской оптике для уменьшения потерь на рассеяние используются подложки со сверхгладкой поверхностью. Для получения сверхгладких поверхностей разработано большое число различных типов полировки [3,4]. Однако широко распространенные методы обработки поверхности разрабатывались для оптики видимого диапазона и микроэлектроники и поэтому не всегда позволяют получать требуемое для рентгеновской оптики качество поверхности.

Поэтому проводят дополировку поверхности направленными пучками ионов инертных и химически активных газов: аргона, кислорода и др. Однако ионно-плазменное полирование материалов имеет свои ограничения. Проблема состоит в том, что часто сами обрабатываемые материалы имеют поверхностные микродефекты (дислокации, включения, неоднородность химического состава, поры и др.). Все это приводит к тому, что разные участки поверхности материала травятся с разной скоростью. Из-за этого в зависимости от исходного качества обрабатываемой поверхности всегда имеет место остаточная шероховатость поверхности ($\sigma \approx 3 - 10 \text{ \AA}$, σ — средняя квадратическая высота шероховатость), которую трудно устранить. Рассеяние волн на подобных шероховатостях является одним из важнейших факторов, влияющих на качество рентгеновской и нейтронной оптики. Одним из вариантов уменьшения шероховатости может быть способ, заключающийся в нанесении на исходную поверхность подложки тонкой пленки другого материала (изотропного и однородного по свойствам и структуре), а затем проведения травления уже этой пленки. Тогда можно надеяться получить уменьшение шероховатости в системе подложка–пленка.

В данной работе были исследованы алмазоподобные углеродные пленки, которые при определенных условиях роста могут иметь шероховатость поверхности $\sigma_f < 10 \text{ \AA}$ [5]. Более того, алмазоподобные углеродные пленки легко травятся в плазме кислорода. Следовательно, можно подобрать условия травления алмазоподобной углеродной пленки таким образом, чтобы в процессе травления одновременно происходило и уменьшение шероховатости ее поверхности. Осаждение алмазоподобных углеродных пленок проводилось из газовой фазы в высокочастотном (ВЧ) разряде и магнетронным распылением графитовой мишени [6,7]. В качестве рабочих газов использовались Ar и циклогексан C_6H_{12} . Для контроля процесса осаждения слоев и их последующего полирующего травления к вакуумной камере присоединена система *in situ* рентгеновского контроля толщины и шероховатости поверхности слоев [6–8].

Контроль осуществляется за счет изменения интенсивности зеркально отраженного от системы пленка–подложка рентгеновского излучения ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$) в процессе нанесения пленки или ее травления. Угол падения $\theta = 1^\circ$. По мере изменения толщины слоя на кривой появляются осцилляции, обусловленные интерференцией рентгеновского излучения, отраженного верхней и нижней границами. В качестве подложек использовались полированные пластины кремния с исходной средней квадратической шероховатостью $\sigma_s = 8 \text{ \AA}$.

Об увеличении или уменьшении шероховатости поверхности можно судить по изменению интенсивности отраженного от системы пленка–подложка потока рентгеновского излучения. Действительно, если взять гладкую поверхность, то коэффициент отражения от нее будет максимальным, поскольку весь падающий поток отражается под углом θ , равным углу падения. При наличии рельефа на поверхности ситуация меняется. Часть излучения будет рассеиваться под произвольными углами и не будет регистрироваться детектором. Следовательно, по изменению интенсивности зеркально отраженного излучения можно судить об изменении шероховатости поверхности.

Интенсивность отраженного от системы пленка–подложка рентгеновского излучения J при изменении тол-

щины пленки d изменяется косинусоидально [6]. Форма косинусоиды зависит как от параметров подложки, которые известны, так и от параметров пленки. Изменение шероховатости поверхности пленки σ_f будет приводить к изменению средней интенсивности отраженного излучения $J_{\text{mid}} = J_{\text{max}} + J_{\text{min}}/2$ (J_{max} и J_{min} — максимальные и минимальные значения интенсивности на зависимости $J = f(d)$). Если в процессе осаждения или травления пленочного покрытия σ_f увеличивается по сравнению с σ_s , то J_{mid} будет уменьшаться [7]. Если σ_f уменьшается, то J_{mid} увеличивается.

Вид типичной экспериментальной зависимости интенсивности отраженного излучения от времени проведения процесса осаждения углеродной пленки показан на рис. 1 (кривая 1). Алмазоподобная углеродная пленка была получена из C_6H_{12} в ВЧ разряде ($f = 13.56$ МГц). Электрическая мощность подводилась к электроду, на котором располагалась кремниевая пластина. Из рис. 1 видно, что в процессе роста углеродной пленки зависимость $J_0(t)$ осциллирует. Стрелки на рис. 1 показывают начало (s) и конец (f) процесса нанесения и травления. Интенсивность отраженного излучения в максимумах не превышает интенсивность отражения от чистой подложки $J_s = 1$. После достижения толщины 160 Å процесс роста пленки был остановлен.

Травление полученной углеродной пленки проводилось в ВЧ разряде в кислороде. Полученная зависимость $J_T(t)$ представлена на рис. 1 (кривая 2). Видно, что зависимость $J_T(t)$ хорошо повторяет в обратном порядке зависимость $J_0(t)$. Однако по абсолютным значениям $J_T(t)$ идет выше, чем $J_0(t)$. Более того, $J_{\text{max}} > J_s$. Это является следствием того факта, что шероховатость поверхности пленки при травлении не только меньше, чем при ее осаждении, но и меньше, чем у исходной подложки. Расчет показал [7], что σ_f в процессе травления имело значение ≈ 6.5 Å. После удаления пленки с поверхности Si коэффициент отражения перестал осциллировать.

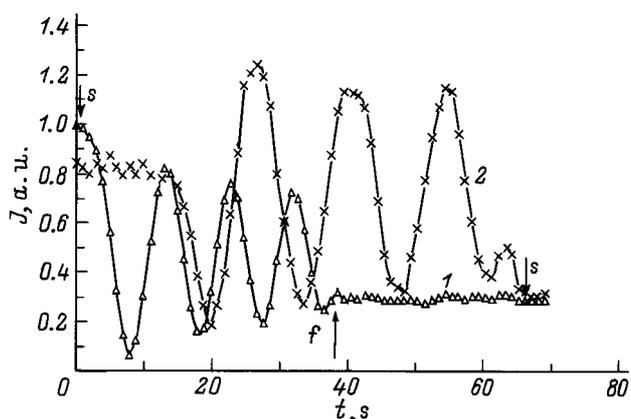


Рис. 1. Зависимость интенсивности отраженного излучения от времени при осаждении (1) и травлении (2) алмазоподобной углеродной пленки.

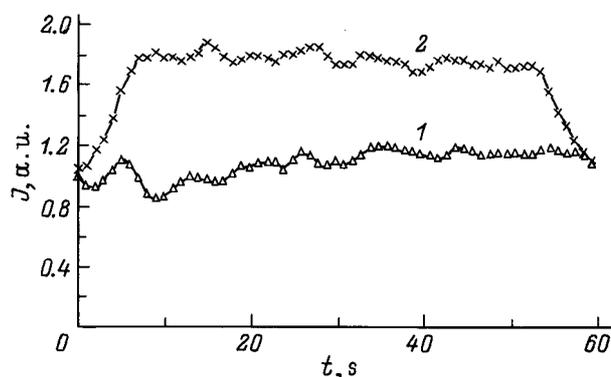


Рис. 2. Зависимость $J_0(t)$ для пленки, полученной магнетронным распылением в среде $\text{C}_6\text{H}_{12}/\text{Ar} = 1/1$ (1) и зависимость $J_T(t)$ (2).

На рис. 2 показаны зависимости $J_0(t)$ и $J_T(t)$ пленки, полученной магнетронным распылением в смеси $\text{C}_6\text{H}_{12}/\text{Ar} = 1/1$. Видно, что в процессе роста пленки на кремниевой подложке зависимость $J_0(t)$ практически не изменяется, а остается приблизительно равной J_s . Такой вид зависимости возможен в случае, если оптические константы пленки и подложки совпадают, а шероховатость поверхности пленки совпадает с шероховатостью поверхности кремния.

При проведении травления осцилляции отраженного излучения также не наблюдается. Однако зависимость $J_T(t)$ идет значительно выше, чем $J_0(t)$. Следовательно, и в этом случае в процессе травления шероховатость поверхности пленки σ_f меньше, чем у кремния, на ≈ 2.5 Å. После удаления пленки с поверхности кремния интенсивность отраженного излучения уменьшается до значения, соответствующего отражению от чистой подложки перед началом процесса осаждения.

Таким образом, можно сделать вывод, что при осаждении из газовой фазы алмазоподобные пленки повторяют рельеф поверхности подложки. Однако их травление в кислородной плазме ведет к уменьшению шероховатости поверхности пленки. По-видимому, это является результатом совместного действия физического и химического механизмов травления. В результате можно вырастить алмазоподобную углеродную пленку определенной толщины, а затем частично ее стравить. В итоге получим подложку с пленкой, у которой шероховатость поверхности меньше, чем у самой подложки. Важно отметить, что толщина пленки может составлять несколько десятков ангстрем.

Данный способ может оказаться полезным, когда полировка поверхности другими методами затруднена (например, если исходная подложка имеет криволинейную форму).

Список литературы

- [1] *Салащенко Н.Н., Платонов Ю.Я., Зуев С.Ю.* // Поверхность. 1995. № 10. С. 5–19.
- [2] Зеркальная рентгеновская оптика. Л.: Машиностроение, 1989. 463 с.
- [3] *Ali I., Roy S.R., Shinn G.* // Sol. St. Technol. 1994. N 10. P. 63–70.
- [4] Обработка полупроводниковых материалов. Киев: Наукова думка, 1982. 256 с.
- [5] *Prioli R., Zanette S.I.* et al. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1996. Vol. 14. P. 2351–2356.
- [6] *Mikhailov I.F., Pinegin V.I., Sleptsov V.V., Baranov A.M.* // Cryst. Res. Technol. 1995. Vol. 30. N 5. P. 643–649.
- [7] *Baranov A., Tereshin S., Mikhailov I.* // Proc. SPIE. 1996. Vol. 2863. P. 359–367.
- [8] *Баранов А.М., Михайлов И.Ф.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 23. С. 60–63.