УДК 54.066

МОДЕЛЬ ЛОКАЛЬНОГО ИОННО-ЛУЧЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ ПЛАТИНЫ СФОКУСИРОВАННЫМ ПУЧКОМ ИОНОВ

Д.Г. Лапин, И.С. Овчинников[®]

Московский технологический университет, Москва 119454, Россия @Автор для переписки, e-mail: ivan-ovchinnikov@mail.ru

В работе проанализированы проблемные вопрос, связанные с протеканием процесса локального ионно-лучевого осаждения материала из газовой фазы. Проведенными исследованиями установлено, что при ионно-лучевом осаждении материала из газовой фазы возникает эффект перераспыления, на который значительное влияние оказывает время экспонирования и ток первичного пучка ионов. Обоснована необходимость моделирования процесса ионно-лучевого осаждения, имеющая целью снижение величины области перераспыления. Показано, что существующие модели не учитывают все технологические параметры, оказывающие влияние на процесс локального ионно-лучевого осаждения. Нами предложена уточненная математическая модель прогнозирования скорости осаждения платины из газовой фазы посредством сфокусированного пучка ионов, которая учитывает такой технологический параметр, как величина области перекрытия первичного пучка ионов. На основании проведенного моделирования выявлено, что при увеличении области перекрытия пучка увеличивается скорость осаждения. Найдены значения области перекрытия, при которых процесс осаждения переходит в процесс травления, и получена зависимость, характеризующая ток и область перекрытия пучка, обеспечивающие максимальную скорость осаждения. Показано, что при осаждении структур на максимальной скорости осаждения, определенной при моделировании, величина области перераспыления снижается.

Ключевые слова: сфокусированный ионный пучок, ионно-стимулированное осаждение, наноструктурирование, перераспыление, скорость осаждения.

MODEL OF PLATINUM'S ION BEAM DEPOSITION BY FOCUSED ION BEAM

D.G. Lapin, I.S. Ovchinnikov[@]

Moscow Technological University, Moscow 119454, Russia @Corresponding author e-mail:ivan-ovchinnikov@mail.ru In this paper, the problems associated with the process of local ion-beam deposition of the material from the gas phase is analyzied. It has been established that the ion-beam deposition of a material from the gas causes a redeposition effect, exposure time and the current of the primary ion beam which is significantly influence on it. The necessity of modeling the ion-beam deposition process is substantiated to for reducing the size of the area of redeposition. An analysis of existing models has shown that they do not take into account all the technological parameters influencing the process of local ion-beam deposition. The refined mathematical model for predicting the focused ion beam deposition rate of platinum from the gas phase takes into account the magnitude of the region of overlap of the primary ion beam is proposed in this paper. Investigations of simulation results have shown that the deposition rate increases with increasing of overlap area. The values of the overlap region at which the deposition process passes into the etching process is determine and the relationship characterizing the beam current and the overlap region where deposition rate has maximum is established. It is shown that when the structures are deposited at the maximum deposition rate (determined in the simulation), the size of the region of the redispersion decreases.

Keywords: focused ion beam, ion stimulated deposition, nanostructuring, overspray, deposition's rate.

Введение

Метод локального ионно-стимулированного осаждения материалов из газовой фазы является эффективным технологическим инструментом для решения задач наноструктурирования поверхности [1]. В основе данного метода лежит процесс деления молекул газа прекурсора, адсорбированного на поверхности, на молекулы осаждаемого вещества и летучие компоненты посредством воздействия фокусированного пучка ионов [2]. Основным параметром, характеризующим процесс осаждения, является его скорость V [нм/с].

В процессе формирования новых наноструктур методом ионно-лучевого осаждения происходит избыточное осаждение материала. В работе [3] подобный эффект называют перераспылением. Эффектом перераспыления целесообразно считать избыточное осаждение материала за пределами заданных для формирования границ структуры (т.е. осаждение материала происходит за пределами области ионно-лучевого воздействия). Проявление данного эффекта может существенным образом снизить точность воспроизведения вновь формируемых структур.

Стоит отметить, что процесс ионно-лучевого осаждения материала является частным случаем процесса ионно-стимулированного травления. Теоретические основы процесса локального ионно-лучевого травления изучены на достаточно высоком уровне и описаны в [4]. Однако анализ литературы показал, что моделей, которые описывают процесс ионно-стимулированного осаждения, практически нет.

Целью данной работы являются оценка влияния технологических параметров процесса ионно-лучевого осаждения на величину области перераспыления и разработка уточненной модели прогнозирования результатов осаждения.

Экспериментальная часть

Метод ионно-лучевого осаждения платины (прекурсор – триметил(метилциклопентадиенил)платина(IV) – C₅H₄CH₃Pt(CH₃)₃) реализовали на двулучевой системе FEI Quanta 3D. Наноструктуры формировали на кремниевой пластине. Оценку области перераспыления производили при изменении следующих параметров, определяющих процесс протекания локального ионно-стимулированного осаждения:

- ток пучка (І_{beam}, пА) – определяет количество ионов Ga⁺, которое будет участвовать в процессе осаждения;

- время осаждения (t, нс) – время взаимодействия сфокусированного пучка ионов с молекулами прекурсора.

Для анализа результатов эксперимента применяли метод сканирующей электронной микроскопиии.

Результаты и их обсуждение

На основании проведенного эксперимента нам удалось сформировать ряд наноструктур. Обращает на себя внимание факт, что в окрестностях каждой структуры имеется область перераспыления (r) с различными геометрическими размерами (рис. 1).



Рис. 1. Наноструктуры из платины на поверхности кремниевой пластины.

Анализ результатов эксперимента свидетельствует о том, что при увеличении тока пучка и времени экспонирования область перераспыления увеличивается. Известно [2], что увеличение тока пучка приводит к увеличению скорости осаждения. Следовательно, время, затраченное на формирование структур с заданными размерами, будет меньше, как и размер образующейся области перераспыления. Отсюда можно сделать вывод, что чем больше скорость осаждения, тем меньше размер области перераспыления при формировании наноструктур заданного объема.

Ранее было показано [5], что интенсивность ионного воздействия удается увеличить не только за счет увеличения тока пучка, но и за счет увеличения области перекрытия пучка. Область перекрытия пучка (OL) – это расстояние между соседними областями экспонирования, ограниченными диаметром пучка (рис. 2).



Рис. 2. Схематичное представление области перекрытия пучка.

Аналитических расчетов, подтверждающих результаты, приведенные в работе [5], нет. В то же время модель, предложенная в [6], позволяет наиболее точно спрогнозировать скорость осаждения. Это *модель локального ионно-лучевого осаждения*. Она учитывает только параметры осаждаемого материала и ток пучка ионов.

Модель локального ионно-лучевого осаждения учитывает одновременное протекание четырех процессов:

• адсорбция газа прекурсора на уже сформированном осажденном слое;

• ионная диссоциация адсорбированных молекул прекурсора на молекулы осаждаемого вещества и летучие компоненты;

• ионное распыление адсорбированного слоя прекурсора;

• ионное распыление осажденного слоя.

Для расчета скорости осаждения предложено использовать выражение, предусматривающее зависимость скорости осаждения от тока пучка и характеристик осаждаемого материала [6]:

$$V = 1.6 \cdot 10^{-27} \frac{M_{w}}{\rho} \frac{i}{S} \left[\sigma n_{0} - \frac{Y'Y'_{g}}{4n_{0}f_{x}xd} i \right]$$
(1)

где $M_{_{\! \rm W}}$ и ρ – молярная масса и плотность осаждаемого вещества, соответственно;

 σ – сечение диссоциации [м²];

S – площадь сформированной фигуры;

n₀ – количество центров адсорбции;

f_x – скорость сканирования, или диаметр пучка ионов;

У' и Y_g' – коэффициенты распыления осажденного материала и газа-прекурсора, соответственно.

При малых значениях тока пучка скорость осаждения, как показано на рис. 3, линейно возрастает и достигает максимального значения (V_{max}) при оптимальном токе пучка (I_{опт}). При пороговом значении тока (I_{гр}), которое в 2 раза больше оптимального, скорость осаждения резко падает до 0. За пределами порогового тока пучка процесс осаждения переходит в процесс распыления со скоростями, пропорциональными скорости осаждения. Максимальная скорость осаждения определяется для каждого осаждаемого материала и зависит только от характеристик материала. Численные расчеты проводятся при условии, что воздействие по всей поверхности равномерно и зависит только от тока пучка.

Для оценки влияния области перекрытия пучка на скорость осаждения уточним данную модель, принимая, что пучок сфокусированных ионов описывается согласно закону нормального распределения [7]. При этом его интенсивность определяется как:

$$F_{\pi}(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{I}}{\mathbf{e}} \cdot \frac{1}{2\pi\sigma_1^2} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_1^2}\right)$$

где I – ток пучка;

- е элементарный заряд;
- х расстояние от центра пучка;
- d диаметр пучка;

(2)



Рис. 3. Зависимость скорости осаждения платины от тока ионного пучка [6].

 $\sigma_1 = d/\sqrt{8\ln 2}.$

Предположим, что время блокирования пучка ионов во время его перемещения вдоль направления сканирования столь мало, что им можно принебречь. Рассмотрим случай, когда пучок первичных ионов в один и тот же момент времени оказывает воздействие на поверхность в точке x_i и x_{i+1}. Подчеркнем, что в зависимости от области перекрытия сумммарная интенсивность ионного воздействия будет изменяться (рис. 4).



Рис. 4. Суммарная интенсивность ионного воздействия:

а) при величине области перекрытия -50%; б) при величине области перекрытия -130%.

Если ограничить интенсивность ионного пучка согласно правилу трех σ , то отрезок Δx , на котором соседние пучки ионов будут оказывать влияние друг на друга, вычисляется как:

$$\Delta \mathbf{x} = \left(\boldsymbol{\mu}_{i} - \boldsymbol{\mu}_{i+1}\right) + 6\sigma \tag{3}$$

где μ_i и μ_{i+1} – математические ожидания.

Исходя из вышесказанного, интенсивность ионного излучения на отрезке $\Delta x(F_{\Delta x})$ имеет вид:

$$F_{\Delta x}(x) = F_i(x) + F_{i+1}(x)$$
(4)

где \mathbf{F}_i и \mathbf{F}_{i+1} – интенсивности пучка в соседних точках воздействия, при этом $\mathbf{F}_i = \mathbf{F}_{i+1},$ тогда

$$F_{\Delta x}(x) = 2 \frac{I}{e} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mu_i + 3\sigma}^{\mu_{i+1} - 3\sigma} e^{-x^2/2} dx$$
(5)

где

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mu_i+3\sigma}^{\mu_{i+1}-3\sigma} e^{-x^2/2} dx = \Phi(\Delta x)$$
(6)

Общая интенсивность ионного воздействия Φ_{000} на отрезке, который характеризует степень воздействия ионного излучения на всей линии сканирования, будет:

$$\Phi_{\rm offm} = \Phi_{\rm n} + \Phi_{\Delta \rm x} \tag{7}$$

Таким образом, скорость осаждения материала равна:

$$V = 1.6 \cdot 10^{-27} \frac{M_w}{\rho} \frac{2IS\Phi_{o6ut}(\mu_i + 3\sigma)}{e} \left[\sigma n_0 - \frac{Y'Y'_g}{4n_0 f_x x d} \frac{2I\Phi_{o6ut}(\mu_i + 3\sigma)}{e} \right]$$
(8)

Расчет интенсивности Φ_{obut} проводили с использованием таблиц нормального распределения. Для каждого значения тока пучка определяли пороговое значение области перекрытия, а также максимальную скорость осаждения платины. Используя результаты расчетов, определяли зависимость скорости осаждения от интенсивности ионного излучения при различных областях перекрытия и токах пучка (рис. 5). Результаты моделирования позволили модифицировать методику формирования структур из платины посредством процесса локального ионно-лучевого осаждения.

Для подтверждения аналитических расчетов проводили следующий эксперимент. Методом осаждения из газовой фазы, при различных значениях тока пучка и области перекрытия, наносили наноструктуры из платины на кремниевую пластину. Скорость осаждения определяли с помощью измерения их линейных размеров методом сканирующей электронной микроскопии. Полученные результаты эксперимента продемонстрировали высокую степень достоверности предложенной модели прогнозирования скорости осаждения, учитывающей область перекрытия пучка ионов (рис. 5).

Область перекрытия пучка оказывает влияние на скорость осаждения, следовательно, используя меньшие токи пучка, можно получить максимальную скорость формирования заданной структуры.

Анализ результатов моделирования позволил установить зависимость, характеризующую ток и область перекрытия пучка, при которых достигается максимальная скорость осаждения. Интерполируя полученные данные многочленом Лагранжа третьей степени, получим выражение, которое позволяет определить область перекрытия пучка для конкретного значения тока, при котором скорость осаждения будет максимальной:



Рис. 5. Зависимость скорости осаждения (травления) от области перекрытия.

 $OL = -9,1521 \cdot 10^{-7} \cdot I^{3} + 0,00139 \cdot I^{2} - 0,6602 \cdot I - 45,615$ (9)

Полученное выражение имеет большую практическую значимость для оптимизации процесса ионно-лучевого осаждения.

Предложенная модель позволяет повысить эффективность метода локального ионно-лучевого осаждения за счет уменьшения времени осаждения формируемых структур. Эксперименты, характеризующие влияние тока пучка на область перераспыления, проводили при одинаковой области перекрытия: -150% (см. рис. 1). Однако, как следует из результатов моделирования, для каждого конкретного тока пучка скорость осаждения будет максимальна при определенной области перекрытия (рис. 5). Сделанный вывод подтвердил соответствующий эксперимент, проведенный при других значениях области перекрытия.

Основываясь на экспериментальных данных, мы построили зависимость области перераспыления от тока пучка при стандартных значениях области перекрытия и при значениях области перекрытия, при которой скорость осаждения максимальна (рис. 6). Размеры формируемых структур в обоих случаях одинаковы.



Рис. 6. Величина области перекрытия при скорости осаждения, не учитывающей области перекрытия (стандартная), и с учетом изменения области перекрытия (максимальная).

Таким образом, для снижения проявления эффекта перераспыления при формировании новых структур методом ионно-стимулированного осаждения необходимо устанавливать максимальную скорость осаждения, определяемую на основании модели прогнозирования скорости осаждения.

Заключение

Выполненное исследование позволило сделать ряд существенных выводов:

1) существует взаимное влияние соседних областей экспонирования в области их перекрытия, влекущее увеличение интенсивности ионного воздействия;

2) область перекрытия пучка влияет на скорость осаждения материала из газовой фазы;

3) при токе пучка менее 80 пА, несмотря на увеличение области перекрытия, процесс осаждения не переходит в процесс травления, а при токе, большем или равном 1000 пА, всегда доминирует процесс травления.

Получен ряд практически значимых результатов. Определено выражение, позволяющее выбрать значение области перекрытия, при котором скорость осаждения максимальна. Выявлена возможность уменьшения области перераспыления в процессе формировании новых структур при максимальной скорости осаждения.

Литература:

1. Bassim N., Scott K., Lucille A. Recent advances in focused ion beam technology and applications // Mater. Res. Soc. 2014. V. 39. P. 317–325.

2. Utke I., Hoffmann P., Melngailis J. Gas-assisted focused electron beam and ion beam processing and fabrication // J. Vacuum Sci. & Technol. 2008. V. 26. P. 1197–1276.

3. Lundquist T., Thompson M. Circuit Edit at First Silicon // Microelectronics Failure Analysis. Desk Reference Sixth Edition. 2011. P. 594–606.

4. Боргардт Н.И., Волков Р.Л., Румянцев А.В., Чаплыгин Ю.А. Моделирование распыления материалов фокусированным ионным пучком // Письма в ЖТФ. 2015. № 12. С. 97–104.

5. Dai J., Chang H., Maeda E., Warisawa S., Kometani R. Approaching the resolution limit of W–C nano-gaps using focused ion beam chemical vapour deposition // Appl. Surface Sci. 2017. V. 427. P. 422–427.

6. Rüdenauer F., Mozdzen G., Costin W., Semerad E. Quantitative model of FIB deposition // Adv. Eng. Mater. 2007. V. 9. P. 708–711.

7. Ertl O., Filipovic L., Selberherr S. Three-dimensional simulation of focused ion beam processing using the level set method // Proceed. of the Int. Conf. on Simulation of Semiconductor Processes and Devices, 2010 (SISPAD 2010), Bologna, Italy, 6–8 September, 2010. IEEE, 2010. P. 49–52.

References:

1. Bassim N., Scott K., Lucille A. Recent advances in focused ion beam technology and applications // Mater. Res. Soc. 2014. V. 39. P. 317–325.

2. Utke I., Hoffmann P., Melngailis J. Gas-assisted focused electron beam and ion beam processing and fabrication // J. Vacuum Sci. & Technol. 2008. V. 26. P. 1197–1276.

3. Lundquist T., Thompson M. Circuit Edit at First Silicon // Microelectronics Failure Analysis. Desk Reference Sixth Edition. 2011. P. 594–606.

4. Borgardt N.I., Volkov R.L., Rumyantsev A.V., Chaplygin Yu.A. Simulation of sputtering materials by focused ion beam // Pis'ma v ZhTEF (Technical Physics Letters). 2015. V. 12. P. 97–104. (in Russ.).

5. Dai J., Chang H., Maeda E., Warisawa S., Kometani R. Approaching the resolution limit of W–C nano-gaps using focused ion beam chemical vapour deposition // Appl. Surface Sci. 2017. V. 427. P. 422–427.

6. Rüdenauer F., Mozdzen G., Costin W., Semerad E. Quantitative model of FIB deposition // Adv. Eng. Mater. 2007. V. 9. P. 708–711.

7. Ertl O., Filipovic L., Selberherr S. Three-dimensional simulation of focused ion beam processing using the level set method // Proceed. of the Int. Conf. on Simulation of Semiconductor Processes and Devices, 2010 (SISPAD 2010), Bologna, Italy, 6–8 September, 2010. IEEE, 2010. P. 49–52.

Об авторах:

Лапин Дмитрий Геннадьевич, аспирант кафедры наноэлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Овчинников Иван Сергеевич, аспирант кафедры наноэлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About authors:

Dmitriy G. Lapin, Postgraduate Student, Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

Ivan S. Ovchinnikov, Postgraduate Student, Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).