КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ
BRIEF REPORTS

УДК 539.216.2

Особенности процесса формирования диэлектрической модулированной по толщине маски на основе локального зондового окисления

С.В. Лемешко[1], И.В. Сагунова[2], В.И. Шевяков[2]

[1]Nanotechnology Instruments Europe B.V., Голландия
[2]Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Peculiarities of Process of Forming Dielectric Mask Modulated by Thickness Based on Local Anodic Oxidation

S.V. Lemeshko[1], I.V. Sagunova[2], V.I. Shevyakov[2]

[1]Nanotechnology Instruments Europe B.V., Netherlands
[2]National Research University of Electronic Technology, Moscow

Описаны особенности формирования на поверхности твердых тел диэлектрической маски, модулированной по толщине, на основе локального зондового окисления. Показано, что это достигается за счет изменения параметров импульса напряжения в процессе сканирования по заданному рисунку окисляемой поверхности сверхтонкой пленки металла. Установлено, что данный процесс расширяет возможности метода локального зондового окисления для нанотехнологий в функциональной электронике.

Ключевые слова: локальное зондовое окисление; диэлектрическая маска; потенциостатический режим.

The data on the peculiarities in formation on the surface of solid bodies of the dielectric mask, modulated by thickness, based on local anodic oxidation, have been presented. This has been achieved due to procedure of changing the voltage impulse parameters in the course of scanning according to the specified pattern of super-thin oxidized metal film. It has been shown that the process expands the capabilities of the local anodic oxidation for nanotechnologies in the functional electronics.

Keywords: local anodic oxidation; dielectric mask; potentiostatic mode.

В отличие от проекционной оптической фотолитографии, эксплуатирующей сверхглубокий ультрафиолет, нанолитография на основе локального зондового окисления является более дешевой, доступной и эффективной как для локальной модификации свойств различных твердых материалов, так и для изготовления и изучения электрофизических свойств ряда активных и пассивных элементов наноэлектроники в лабораторных условиях.

В работах [1–4] продемонстрированы возможности локального зондового окисления в нанометровом диапазоне монокристаллического и аморфного кремния, арсенида галлия,

© С.В. Лемешко, И.В. Сагунова, В.И. Шевяков, 2016

карбида кремния, графена, в [5, 6] дано теоретическое представление о протекании процесса.

Согласно данным о кинетике анодного окисления металлов, толщина образующегося оксида h_{ox} зависит от приложенного потенциала и длительности процесса. В [6] показано, что при потенциостатическом анодировании сверхтонких пленок металлов закон изменения толщины оксида имеет вид:

$$h_{ox}(t) = \frac{\Delta U - \Delta\varphi_0}{E}\left(1 - \exp\left(-\frac{E_\chi}{R_c S}t\right)\right), \quad (1)$$

где ΔU – разность потенциалов, подаваемая между зондом и подложкой; $\Delta\varphi_0$ включает в себя суммарное падение напряжения в электрохимической цепи, за исключением изменения потенциала в самом оксиде; R_c – сопротивление электрохимической цепи; E – напряженность электрического поля в растущем оксиде; $\chi = \frac{A_{ox}}{\rho_{ox} zF}$ – электрохимическая константа процесса окисления; η – выход по току; z – число электронов, необходимых для протекания реакции окисления; A_{ox} – молярная масса образующегося вещества; ρ_{ox} – удельная плотность вещества; S – площадь окисленной поверхности; F – постоянная Фарадея.

Таким образом, согласно (1) скорость процесса модифицирования исходной пленки металла зависит от электрических режимов окисления и от физико-химических свойств рассматриваемой системы, таких как удельное сопротивление металла, соотношение удельных плотностей металла и оксида, напряженность электрического поля в растущем оксиде и электрохимическая константа процесса окисления.

В [6] отмечено, что титан – один из технологичных металлов для процесса локального зондового окисления. Процесс анодирования осуществляется согласно реакции

$$\mathrm{Ti} + 2\mathrm{H_2O} = \mathrm{TiO_2} + 4\mathrm{H^+} + 4e^-.$$

В [7] предпринята попытка развития процесса локального зондового окисления сверхтонких пленок титана для создания диэлектрической пленки, модулированной по толщине, имеющей многофункциональное назначение. Такую пленку можно использовать как маску при формировании в полупроводниках методом ионного легирования областей со сложным профилем распределения примеси, при создании элементов наноэлектроники, в частности запоминающих сред для устройств записи-считывания информации с помощью микромеханических устройств, где считывающее устройство – многозондовая матрица кантилеверов атомно-силового микроскопа.

В настоящей работе рассмотрены особенности формирования на поверхности сверхтонкой пленки Ti диэлектрической маски, модулированной по толщине, на основе метода локального зондового окисления. В основу метода положено следующее. Процесс зондового окисления позволяет создать локальную диэлектрическую маску одинаковой толщины по всей ее площади. При этом для ее формирования иглой кантилевера сканируют участок поверхности и в каждой точке растра, попадающей в область, соответствующую топологии будущей маски, на иглу кантилевера подают одни и те же импульсы напряжения (фиксированные величина напряжения и длительность импульса напряжения). Очевидно, что для получения диэлектрической маски с различной толщиной в разных ее участках необходимо варьировать параметры импульсов напряжения в различных точках растра. Следует отметить, что данный подход позволяет создать диэлектрическую маску как с дискретно меняющейся толщиной в различных ее частях, так и с непрерывно меняющейся толщиной. По сути, модуляция толщины маски в данном случае определяется задаваемой функцией изменения параметров импульса напряжения в различных точках растра. Такой простой подход тем не менее эффективен для воспроизводимого процесса формирования диэлектрической пленки, модулированной по толщине согласно требованиям.

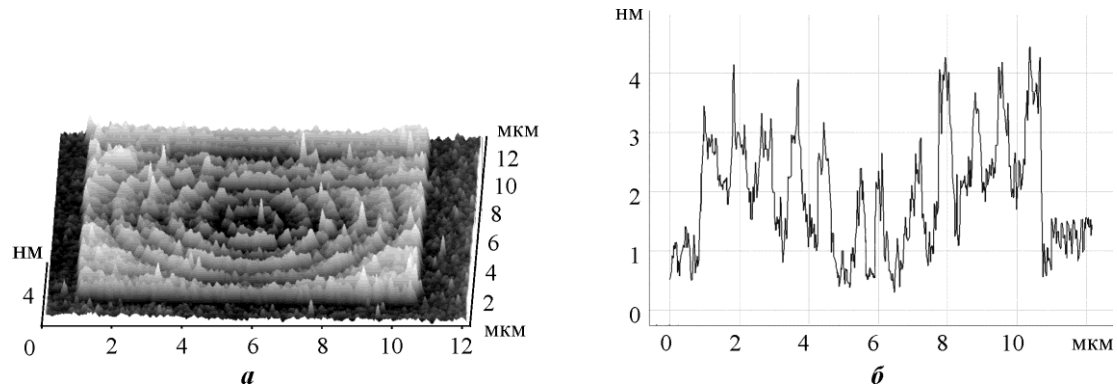
В процессе создания локальной диэлектрической маски возможна следующая последовательность действий. Первоначально в память компьютера загружают растровое изображение

маски, которую необходимо перенести на поверхность (под растровым изображением понимаем трехмерный массив точек, имеющих три координаты *X*, *Y*, и *Z*). Далее осуществляют сканирование поверхности металлической пленки на кремнии в полуконтактном режиме АСМ с целью обнаружения ровного, без дефектов, изображения поверхности пленки. С помощью статистической обработки растрового изображения строится гистограмма распределения значений в пределах 0–100% .

Для переноса изображения на поверхность проводят зондовое окисление поверхности металлической пленки в потенциостатическом режиме (при постоянной величине напряжения), при этом в соответствии с задаваемой функцией варьируют длительность импульса напряжения в различных точках растра.

В качестве образца для проведения локального зондового окисления использована сверхтонкая (~ 50 нм) пленка титана, нанесенная на кремниевую подложку магнетронным способом (установка SSP-3000 Suga, Япония). Импульсы напряжения величиной 8 В варьировали в диапазоне 0–20 мс. В качестве кантилеверов выбраны кремниевые кантилеверы с покрытием W_2C, задаваемая геометрическая фигура представляет собой концентрические окружности, имеющие общий центр. Длительность импульсов напряжения при анодировании снижали от периферии к центру от 20 мс до 0. При последующем сканировании в полуконтактном режиме АСМ исследовали морфологию поверхности структуры.

На рисунке приведено АСМ-изображение данной условной фигуры и профиль ее поперечного сечения.



а *б*

АСМ-изображение поверхности после зондового окисления поверхности титановой пленки (*а*) и профиль сечения наноструктуры (*б*)

Как следует из представленных данных, у структуры наблюдается наноразмерный рельеф. Определенные искажения в приведенном поперечном сечении структуры связаны с наличием развитого рельефа в исходной пленке титана.

Таким образом, данный пример иллюстрирует возможность создания на основе локального зондового окисления сверхтонкой диэлектрической пленки, модулированной по толщине за счет изменения параметров импульса напряжения в процессе сканирования по заданному рисунку окисляемой поверхности. Это расширяет возможности метода локального зондового окисления для нанотехнологий в функциональной электронике.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-38-00070).

Литература

1. ***Jung-Joon Ahn, Kyoung-Sook Moon, Sang-Mo Koo.*** Nano-structure fabrication of GaAs using AFM tip-induced local oxidation method: different doping types and plane orientations // Nanoscale Research Letters. – 2011. – Vol.6 – P. 550–558.

2. Crystallographic plane-orientation dependent atomic force microscopy-based local oxidation of silicon carbide / ***Jung-Joon Ahn, Yeong-Deuk Jo, Sang-Cheol Kim et al.*** // Nanoscale Research Letters. – 2011. – Vol.6 – P. 235–239.

3. ***Masubuchi S., Machida V.*** Atomic force microscope tip-induced local tunable oxidation of graphene // Nanoletters. – 2011. – Vol. 11. – P.4542 – 4546.

4. ***Pichon L., Rogel R., Demami F.*** Fabrication of amorphous silicon nanoribbons by atomic force microscope tip-induced local oxidation for thin film device applications // J. Semicond. Sci. Technol. – 2010. – Vol. 25. – P. 5–11.

5. ***Jen Fin Lin, Chih Kuang Tai, Shuan Li Lin***. Theoretical and experimental studies for nano-oxidation of silicon wafer by atomic force microscopy // J. Appl. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 99. – P. 054312-1 – 054312-11.

6. ***Belov A.N., Gavrilov S.A., Sagunova I.V., Shevyakov V.I.*** Kinetic of local oxidation of ultrathin metal films of V, Nb, Ta, Ti, TiN, W // Semiconductors. –2010. – Vol. 44. – №. 13. – P. 1709–1713.

7. The factors influence investigation on a tip-induced oxidation process and its applications for nanoscale image creation / ***S. Lemeshko, V. Bykov, S. Saunin et al.*** // 12-th International Conference on Scanning tunneling microscopy // J. Spectroscopy and Related Techniques. Netherlands. – 2003. – Vol. 9. – P. 83.

Поступило
30 марта 2016 г.

Лемешко Сергей Владимирович – кандидат технических наук, Nanotechnology Instruments Europe B.V, Голландия. *Область научных интересов*: наноэлектроника, сканирующая зондовая микроскопия.

Сагунова Ирина Владимировна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры интегральной электроники и микросистем (ИЭМС) МИЭТ. *Область научных интересов*: сканирующая зондовая микроскопия, нанотехнологии.

Шевяков Василий Иванович – доктор технических наук, главный научный сотрудник кафедры ИЭМС МИЭТ. *Область научных интересов*: технология микро- и наноэлектроники, сканирующая зондовая микроскопия. **E-mail: shev@dsd.miee.ru**