

**СТОХАСТИЧЕСКОЕ ТРЕХМЕРНОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
МИКРОРЕЛЬЕФА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ
В МЕТАЛЛ-КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУРАХ**
С.С.Дереченник, О.В.Мороз, В.С.Дереченник

Брестский государственный технический университет
Брест, Беларусь

В данной работе на примере имитационного моделирования микрорельефа структуры металл-кремний, формирующейся при физическом нанесении тонкой металлической пленки на кремниевую подложку, показана возможность применения в микроэлектронике нового класса стохастических моделей технологических процессов, основывающихся на анализе фрактальных свойств указанных структур.

При косинусоидальном пространственном распределении интенсивности потока осаждаемых металлических частиц

$$J(\Theta) = J_0 \cos(\Theta) \quad (1)$$

в предположении прямолинейности их траекторий целесообразно ввести понятие плоскопараллельного «квазиисточника» [1]. Расстояние h от квазиисточника до подложки выбирается существенно меньшим длины свободного пробега частиц в газовой среде, так что траектории частиц в эффективной зоне рассеяния, (в области между квазиисточником и подложкой), можно считать прямолинейными. Рассеяние же частиц на пути от мишени к квазиисточнику учитывается заданием соответствующего распределения интенсивности потока частиц от квазиисточника $J(r, \Theta)$ (рис. 1). Другими словами, квазиисточник представляет собой случайное поле интенсивности J , определяемое распределением пространственной координаты r в плоскости квазиисточника и распределением по углу рассеяния Θ . Эти статистические распределения будут определяться, во-первых, суперпозицией потоков частиц с поверхности реального источника-мишени, во-вторых, возможным кинетическим рассеянием частиц на молекулах газовой среды.

Микрорельеф в пределах некоторого участка подложки с характерным линейным размером L будет формироваться, в основном,

потоком частиц в прилегающей к этому участку области эффективной зоны рассеяния. Как и расстояние h , максимальный линейный размер этой области R ограничен, очевидно, длиной свободного пробега осаждаемых частиц λ . Полагая $\lambda \geq R \gg L \gg a$, где a – размер частиц (при условии, что частицы на пути от квазиисточника до подложки не рассеиваются), можно показать, что доля осажденных частиц от общего числа рассеянных в плоскости квазиисточника определяется отношением R/h :

$$\beta = \frac{F_2}{F_1} = \sin^2 \left(\arctg \frac{R}{h} \right) \quad (2)$$

где F_1 – средняя плотность потока частиц, рассеиваемых с единицы площади квазиисточника в единицу времени, F_2 – средняя плотность потока, осаждающегося на единицу площади подложки в единицу времени.

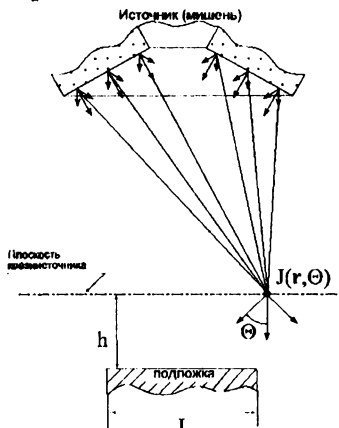


Рисунок 1

$D_s = 2,474 \pm 0,040$
 $D_p = 1,447 \pm 0,034$
 $\beta = 0,996$
 $\langle \tau \rangle = 9,966$

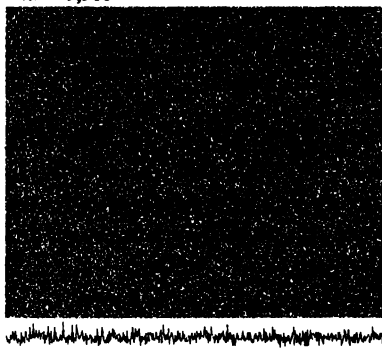


Рисунок 2

Из полученной формулы видно, что относительная доля частиц, осаждающихся на подложку, прямо пропорциональна отношению R/h , достигая 1 в пределе $R/h \rightarrow \infty$. С ростом влияния рассеяния частиц в процессе осаждения длина их свободного пробега уменьшается, — соответственно, должны быть уменьшены h и R . Для поддержания относительной доли осажденных частиц на уровне значения 0,99 (экспериментально установленного) отношение R/h , как следует из (2), должно быть не менее 9,945, т.е. $R \gg h$. Но, вместе с тем, h должно удовлетворять соотношению $h \gg L$, поскольку в противном случае, из-за экранирования внутренних участков моделируемого микропре-

льефа, непропорционально увеличивается его толщина по краям, а сам микрорельеф принимает воронкообразную форму. Заметим, что подобное явление наблюдается при магнетронном распылении в случае относительно малых размеров мишени и обусловлено неоднородностью электромагнитного поля вблизи краев мишени, поэтому размер мишени обычно в несколько раз превышает размер подложки.

Таким образом, выбор параметров h и R произволен, если выполняется соотношение $\lambda \geq R \gg h \gg L \gg a$. Действительно, как показали проведенные численные эксперименты, морфология формируемого микрорельефа, при этом условии, практически нечувствительна к величине отношения R/h и определяется, главным образом, видом траекторий осаждаемых частиц и кинетикой зародышеобразования.

Полученный по методу тоновой визуализации микрорельеф представлен на рис.2 (показан также его профиль) и хорошо согласуется с микрофотографиями реальных металлических пленок, осажженных на холодные подложки. Для таких пленок процесс зародышеобразования не оказывает существенного влияния на морфологию пленок и поэтому не учитывается в данной модели. Для расчетов использовались характерные для магнетронного распыления значения технологических параметров, для которых длина свободного пробега осаждаемых частиц — 5...50 см. Принимая средний размер частиц $a = 1$, выбирались параметры модели: $R = 10^7$, $h = 10^5$, $L = 600$, $\beta = 0,99$, число частиц, рассеянных с квазиисточника — $10 \cdot L^2$.

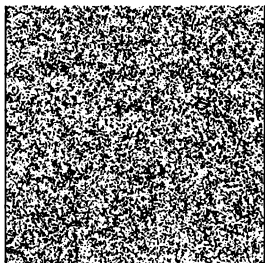


Рисунок 3

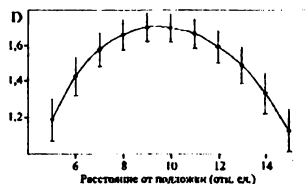


Рисунок 4

Фрактальная размерность микрорельефа D_s и усредненная фрактальная размерность его профиля D_p очень близки к значениям, характерным для систем броуновского типа.

На рис.3 показан также вид продольного среза микрорельефа на уровне, соответствующем его средней толщине $\langle \tau \rangle = 9.966$, а также

зависимость фрактальной размерности D образований, получаемых в результате подобных срезов, от расстояния до подложки. Она имеет четко выраженный максимум и наименьшую погрешность (указана вертикальными планками) на расстоянии, близком к средней толщине микрорельефа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дереченник С.С., Мороз О.В. Стохастическое моделирование процесса формирования тонкопленочных структур металл-кремний// Вестник БГТУ. Машиностроение, автоматизация, ЭВМ. — 2001. — №4(10) — С. 68–72.