

Зависимость коэффициента конденсации висмута от энергии частиц, осаждаемых из ионного пучка на кремниевые подложки

© В.Е. Пуха, И.Ф. Михайлов, А.Н. Дроздов, Л.П. Фомина

Национальный технический университет „Харьковский политехнический институт“,
61002 Харьков, Украина

E-mail: puch@kpi.kharkov.ua

(Поступила в Редакцию 1 апреля 2004 г.
В окончательной редакции 1 июля 2004 г.)

Экспериментально изучена зависимость коэффициента конденсации висмута от энергии частиц, осаждаемых из ионного пучка на кремниевые подложки. Обнаружены резкое увеличение коэффициента конденсации при подаче ускоряющего потенциала на подложку в диапазоне от 0 до 10 В и монотонное его снижение при величине потенциала свыше 60 В. Критическая температура конденсации при осаждении из ионного пучка на 100 градусов выше, чем из потока пара.

Работа выполнена в рамках бюджетной научно-исследовательской программы Украины по теме М5462 „Фуллереновые композиции, формирующиеся из потоков частиц компонентов повышенной энергии“.

1. Введение

Интерес к изучению поведения висмута на поверхности объясняется возможностью его применения в качестве поверхностноактивного вещества (сурфактанта) для осуществления гетероэпитаксиального роста пленок на полупроводниковых кристаллах (Si, Ge и др.) [1]. Для очистки кремниевых подложек от загрязнений и естественного аморфного оксида проводят технологически сложные прогревы в сверхвысоком вакууме [2].

Весьма эффективные для очистки методы ионного распыления, которые при низких энергиях ионов не вызывают радиационных повреждений подложки [3], но могут распылять оксидную пленку и создавать на поверхности активные центры зарождения для наращивания эпитаксиальных слоев. Свидетельством таких процессов служит повышение коэффициента конденсации и увеличение критической температуры осаждения.

В связи с этим целью работы явилось экспериментальное определение зависимости коэффициента конденсации висмута от энергии ионов и температуры подложки.

2. Методика эксперимента

Осаждение низкоэнергетичных ионов висмута производилось в вакууме $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ Па на подогреваемые кремниевые подложки Si (001), покрытые естественным аморфным окислом. Рабочее разрешение обеспечивалось геттероионным насосом типа „Орбитрон“.

Источником ионов висмута служила плазма вакуумной дуги, сепарированная от нейтральной компоненты (атомы, молекулы, микрочастицы) при помощи криволинейного плазмоведа, не допускающего пространственного разделения одно- и двухзарядных ионов (рис. 1). Плотность потока висмута характеризовалась величиной ионного тока на подложку, которая составляла 0.2 mA/cm^2 , что соответствует плотности потока частиц

$1.25 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Энергия ионов измерялась при помощи многосеточного зонда по методике, описанной в [4]; строилось распределение ионов $N(E)$ по энергиям (рис. 2). Средняя энергия ионов в пучке относительно

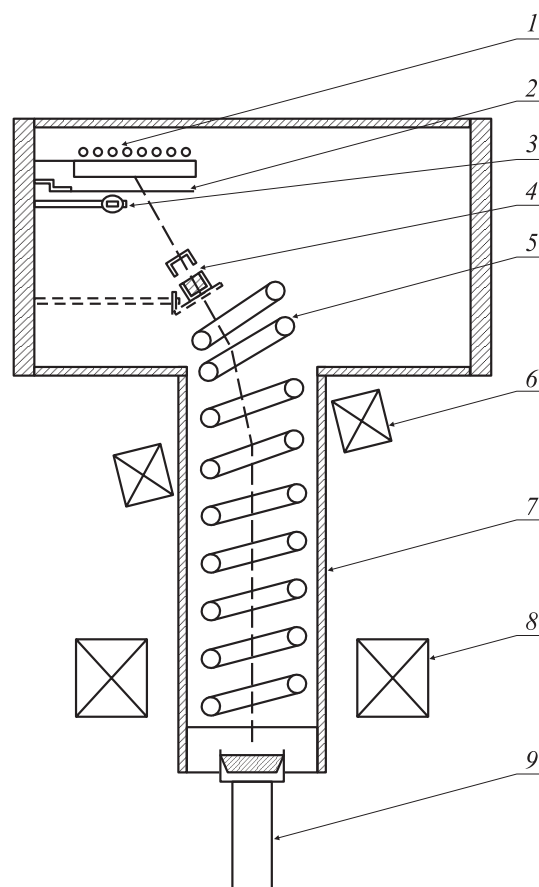


Рис. 1. Схема установки: 1 — подложкодержатель, 2 — шторка, 3 — кварцевый датчик толщины покрытия, 4 — эффузионная ячейка, 5 — плазмовод, 6 — магнитная система поворота ионного пучка, 7 — вакуумная камера, 8 — магнитная система фокусировки ионного пучка, 9 — катодный узел.

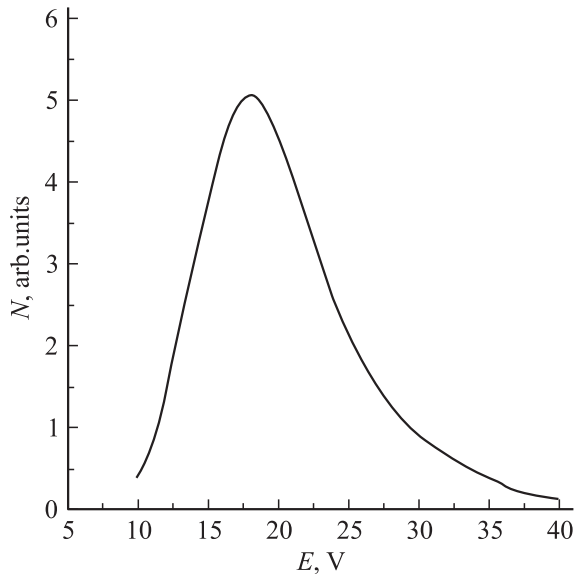


Рис. 2. Энергетическое распределение ионов висмута $N(E)$, генерируемых плазмой вакуумной дуги.

катода составляла $E_0 = 18 \text{ eV}$, а полуширина распределения $\approx 12 \text{ eV}$. Для увеличения энергии осаждаемых частиц на подложку подавался ускоряющий потенциал U в диапазоне от 0 до 100 V. При этом происходило смещение распределения ионов $N(E)$ так, что энергия каждого иона, попадающего на подложку, увеличивалась на величину U и составляла $E = E_0 + U \text{ eV}$. Коэффициент конденсации k определялся по отношению эффективной толщины пленки h , полученной в конкретных условиях, к толщине пленки h_R , осажденной на холодную подложку ($T = 25^\circ\text{C}$) без приложения потенциала при неизменном ионном токе и времени горения ($\tau = 5 \text{ min}$) дуги. Параллельно дуговому испарению проводилось осаждение висмута, испаренного из эффузионной ячейки, причем равенство ионного и парового потоков контролировалось по толщине пленок, осажденных на непогреваемые подложки. Эффективную толщину находили по интенсивности аналитической линии $\text{Bi-L}\alpha$ в спектре рентгеновской флуоресценции на спектрометре „Спрут-2“.

3. Результаты и их обсуждение

Зависимость коэффициента конденсации ионов висмута от величины ускоряющего потенциала можно условно разбить на три области (рис. 3):

I — от 0 до 10 V (резкое возрастание коэффициента конденсации); II — от 10 до 60 V (область постоянного значения коэффициента конденсации); III — от 60 до 100 V (монотонное снижение коэффициента конденсации).

Наличие скачка коэффициента конденсации в области I означает, что на поверхности подложки протекает некий процесс с пороговой энергией, ниже ко-

торой конденсации не происходит, т.е. на подложке задерживаются только те ионы, энергия которых выше критического значения $E > E_{cr}$. Количество таких ионов $K(E_k, U)$ определяется интегралом функции энергетического распределения $N(E)$, в котором нижним пределом интегрирования является пороговая энергия конденсации.

Весьма вероятно, что при известном распределении $N(E)$ по экспериментальной зависимости коэффициента конденсации от энергии ионов может быть определена критическая энергия процесса зарождения. Действительно, прикладывая к подложке ускоряющий потенциал, мы смещаем распределение ионов относительно пороговой энергии вправо на величину U . Имея набор значений U , получим систему интегральных уравнений, позволяющую численно определить величину E_{cr} ,

$$K(E_{cr}, U) = \int_{E_{cr}}^{\infty} N(E + U) dE. \quad (1)$$

На рис. 3 представлены результаты численного решения интегральных уравнений при различных значениях E_{cr} . При этом видно, что экспериментальная зависимость хорошо описывается при значении пороговой энергии $E_{cr} = 24 \text{ eV}$.

Согласно [5], до 17% от общего числа заряженных частиц висмута приходится на долю двухзарядных ионов. Таким образом, полученная функция распределения является суммой распределений одно- и двухзарядных ионов. Вид этих распределений не зависит от кратности заряда [5] и может описываться одной и той же функци-

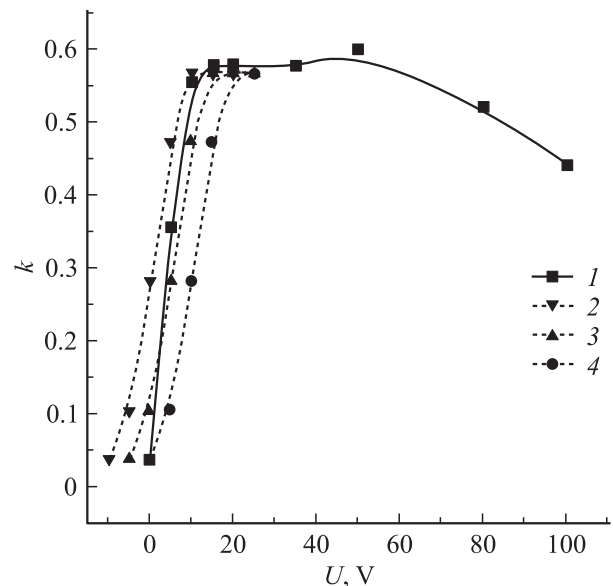


Рис. 3. Зависимость коэффициента конденсации висмута $k = h/h_R$ от величины ускоряющего потенциала U . 1 — эксперимент, 2–4 — результаты численного интегрирования уравнения (1) при значении пороговой энергии $E_{cr} = 20, 25$ и 30 eV соответственно.

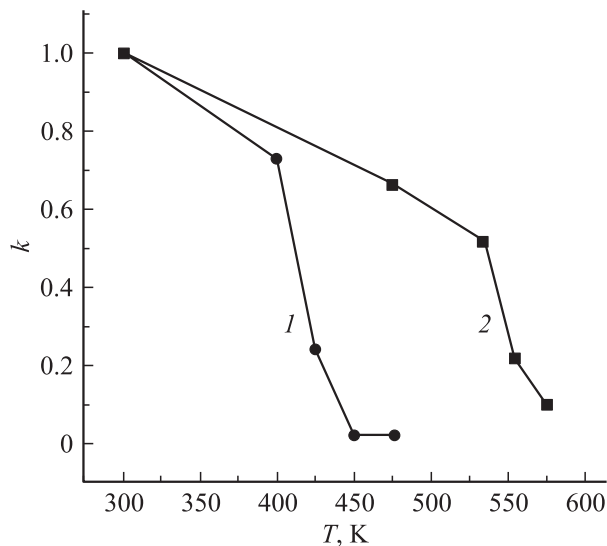


Рис. 4. Зависимость коэффициента конденсации висмута от температуры подложки. 1 — из паровой фазы, 2 — из ионного потока ($U = 10$ В).

ей $N(E)$. В этом случае уравнение (1) приобретает вид

$$K(E_{cr}, U) = \int_{E_{cr}}^{\infty} N(E + U) dE + \int_{E_{cr}}^{\infty} N(E + 2U) dE. \quad (2)$$

Численное решение системы уравнений (2) наилучшим образом описывает экспериментальную кривую при величине $E_{cr} = 25$ eV, которая и соответствует пороговой энергии процесса.

Эта пороговая энергия может быть связана с активацией поверхности вследствие разрушения аморфного окисла и создания центров зарождения. Согласно [6,7], энергия диссоциации аморфного окисла SiO_2 составляет $U_0 = 8$ eV на молекулу. По оценкам, проведенным в соответствии с [8], при температуре 270°C энергия диссоциации окисла уменьшается до 7.6 eV на молекулу. Пороговая энергия распыления оценивается по формуле $E \approx 4U_0$ [9], т.е. для SiO_2 составляет около 30 eV, и вполне соответствует найденной величине E_{cr} . Дальнейшее повышение энергии ионов не приводит к существенным изменениям коэффициента конденсации и его значение не превышает 0.6 при данной температуре подложки ($T_s = 270^\circ\text{C}$). Снижение коэффициента конденсации на третьем участке кривой обусловлено процессами отражения и самораспыления атомов висмута с подложки при повышенных энергиях осаждаемых ионов. Сравнение температурных зависимостей коэффициентов конденсации для пленок висмута, полученных осаждением из ионных и термоиспаренных потоков, показывает, что для ионов висмута со средней энергией 30 eV критическая температура конденсации примерно на 100 градусов выше, чем при осаждении из паровой фазы, и достигает 300°C (рис. 4). Такое повышение критической температуры может быть обусловлено сменной доминирующего механизма зародышеобразования за

счет проникновения ионов висмута в приповерхностный слой подложки и создания активных центров зарождения.

4. Заключение

1) Обнаружен скачок коэффициента конденсации при повышении энергии ионов, который может быть связан с разрушением естественного аморфного окисла на поверхности кремния. Пороговая энергия начала конденсации равна $E_{cr} = 25$ eV.

2) Обнаружено монотонное понижение коэффициента конденсации ионов висмута при величине ускоряющего потенциала свыше $U = 60$ В, обусловленное процессами отражения и самораспыления висмута с поверхности роста.

3) При конденсации висмута с энергией ионов свыше 30 eV критическая температура конденсации повышается до 300°C вследствие смены механизма зародышеобразования.

Подобное поведение коэффициента конденсации свидетельствует об активации поверхности вследствие очистки от загрязнений и разрушения аморфного окисла. Результаты данной работы могут быть полезны при получении нанослоев висмута и создания потенциальных зародышей для наращивания эпитаксиальных слоев.

Список литературы

- [1] К. Sakamoto, К. Kyoya, К. Miki, Matsuhata. Jpn. J. Appl. Phys. **32**, 2A, L204 (1993).
- [2] С.Ю. Булавенко. Канд. дис. КНУ, Киев (2002).
- [3] М.Д. Габович, Н.В. Плешивцев, Н.Н. Семашко. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. Энергоатомиздат, М. (1986). С. 117.
- [4] Н.И. Ионов. ЖТФ **34**, 769 (1964).
- [5] Г.А. Месяц, С.А. Баренгольц. УФН **172**, 10, 1113 (2002).
- [6] Г.В. Самсонов. Физико-химические свойства окислов. Металлургия, М. (1978). 456 с.
- [7] И.Т. Горонковский, Ю.П. Назаренко, Е.Ф. Некряч. Краткий справочник по химии. Наукова думка, Киев (1965). 836 с.
- [8] С.И. Исаев. Курс химической термодинамики. Машиностроение. М. (1975). 256 с.
- [9] Физическое распыление одноэлементных твердых тел / Под ред. Р. Бериша. Мир, М. (1984). С. 253.