

02;10;11;12

Влияние процесса ионного распыления на статистические характеристики поверхности

© А.В. Меркулов¹, О.А. Меркулова²¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 10 июля 1997 г.)

Исследовалась модификация поверхности арсенида галлия во время облучения тяжелыми ионами цезия Cs⁺ путем измерения распределения высот поверхностей образцов атомно-силовым микроскопом. Наблюдалось как увеличение, так и уменьшение интегрального параметра σ -среднеквадратичной высоты. Установлено, что в латеральном диапазоне 1–100 nm шероховатость поверхности арсенида галлия увеличивается для всех исследуемых образцов. Анализ структурной функции позволил оценить характерные латеральные размеры поверхностных структур, возникающих в процессе ионного травления.

Введение

Ионное травление в комбинации с поверхностно-чувствительными методами является одним из основных методов, используемых при исследовании распределения основных и примесных элементов полупроводниковых приборов по глубине. Однако ионная бомбардировка приводит к изменению поверхностной топографии. При низкоэнергетичном ионном травлении поверхности происходит конусообразование и в некоторых случаях при скользящих углах падения образование ручьевого строения [1]. Для более детального понимания этих изменений необходимо изучение влияния различных условий облучения на модификацию микрорельефа. Ранее эти особенности в основном изучались электронной микроскопией [2] либо оже-электронной спектроскопией, рентгеновской электронной спектроскопией и вторично-электронной спектроскопией [3]. Но все они неадекватно отражают трехмерную топографию поверхности. С появлением сканирующего туннельного микроскопа и атомно-силового микроскопа (AFM) стало возможно получать трехмерный образ поверхности, который может быть использован для количественной характеристики изменений поверхностной морфологии при ионной бомбардировке. Измерения AFM позволяют получить высокое латеральное и высотное разрешение, делая его идеальным инструментом исследования достаточно гладких полупроводниковых поверхностей. Однако в подобных исследованиях [4–6] зачастую авторы ограничиваются лишь измерением среднеквадратичной высоты шероховатости, что не несет информации о структуре поверхности. Целью данной работы является выявление статистических параметров микрорельефа полупроводниковых структур, полученных при ионном облучении, которые адекватно описывают поверхностную топографию. Применение статистического подхода к исследованию таких структур позволит в дальнейшем моделировать как поверхности, возникающие в процессе ионной бомбардировки, так и физико-химические процессы, сопровождающие ионное облучение.

Методика эксперимента

В данной работе исследовались образцы арсенида галлия, легированного дельта-слоями индия, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии (образец 1), и образцы арсенида галлия, легированного дельта-слоями германия, выращенные путем магнетронного распыления (образцы 2–4). Отметим, что поверхности образцов 2–4 менее гладкие, чем поверхность образца 1, по-видимому, вследствие недостатков, присущих методу магнетронного распыления. Их среднеквадратичные высоты равны соответственно 7.6–18 и 1.4 nm. Образцы подвергались облучению ионами цезия Cs⁺ с энергией $E_p = 3 \text{ keV}$ и углом падения к поверхностной нормали 40° с целью изучения развития топографии поверхности в зависимости от дозы ионного облучения. Распределение высот поверхностного микрорельефа измерялось атомно-силовым микроскопом Autoprobe-CP с иглой, имеющей радиус закругления около 10 nm. Из полученной карты распределения высот вычислялись статистические характеристики микрорельефа. AFM-карты поверхностей имели разрешение 512 × 512 пиксел. С изменением длины сканирования (базовой длины измерения L) автоматически измерялся шаг дискретизации. Для сравнительного анализа производились измерения участков поверхностей размером 5 × 5 μm и шагом дискретизации 10 nm.

Результаты и обсуждение

Обычно в подобных измерениях считается, что статистические параметры поверхности несут только качественную или относительную информацию, все они зависят от масштаба измерений, т. е. от разрешения инструмента и базовой длины измерения [7]. Необходимо также принимать во внимание наличие приборных эффектов AFM-измерений. Параметры AFM-карт поверхностей до и после ионного облучения представлены на рис. 1. По

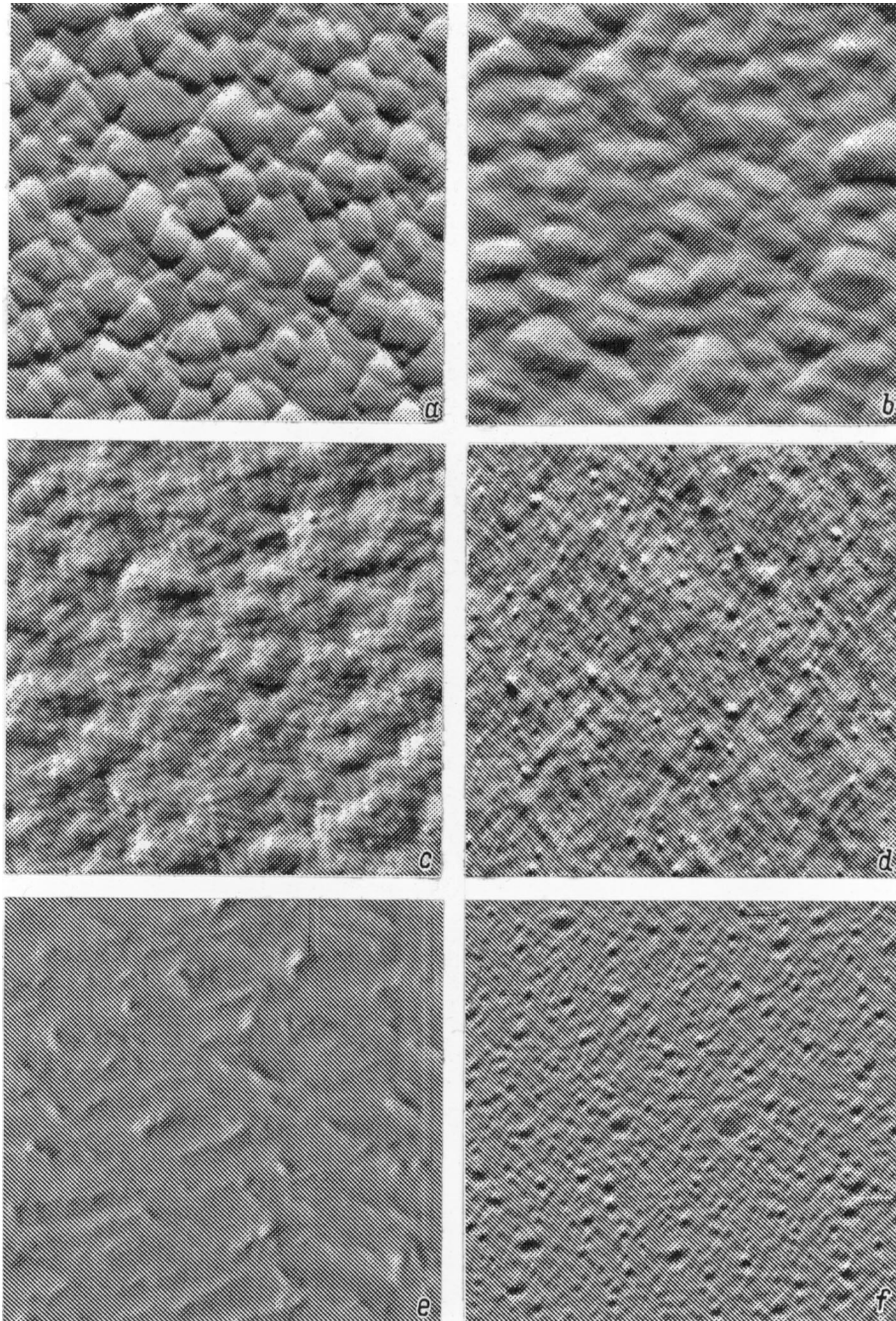


Рис. 1. AFM-карты поверхностей образцов 2 и 1 для различных доз ионного излучения: *a-d* — образец 2, *e-f* — образец 1; *a, e* — начальная поверхность; доза, cm^{-2} : *b* — $3.3 \cdot 10^{17}$, *c* — $6.6 \cdot 10^{17}$, *d* — $2.7 \cdot 10^{18}$, *f* — $4.6 \cdot 10^{17}$.

ним вычислялись высотные характеристики поверхности, плотность распределения вероятностей высот $P(h)$ и среднеквадратичная высота σ

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2}, \quad (1)$$

где h_i — высота в точке, \bar{h} — средняя высота по поверхности, N — число точек.

Обнаружено, что на рассматриваемом поверхностном масштабе все поверхности имеют близкий к гауссовому тип функций плотности распределения вероятностей высот, которые в свою очередь могут быть аппроксимированы ортогональным набором функций Эрмита [8]. На рис. 2 представлены плотности распределения вероятностей высот, приближенные полиномами Эрмита, для поверхностей, модифицированных различными ионными дозами. Зависимость среднеквадратичной высоты от дозы показана на рис. 3 и носит экспоненциальный характер.

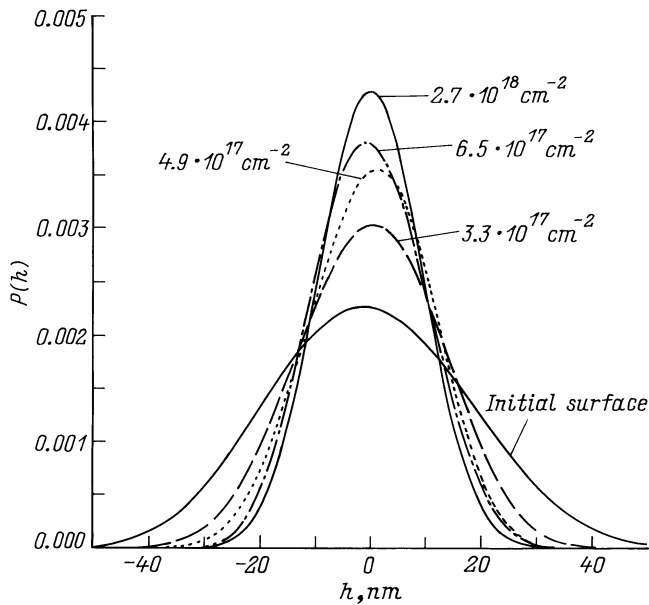


Рис. 2. Плотности распределения вероятностей высот $P(h)$ поверхностей, модифицированных различными дозами ионного облучения (образец 2).

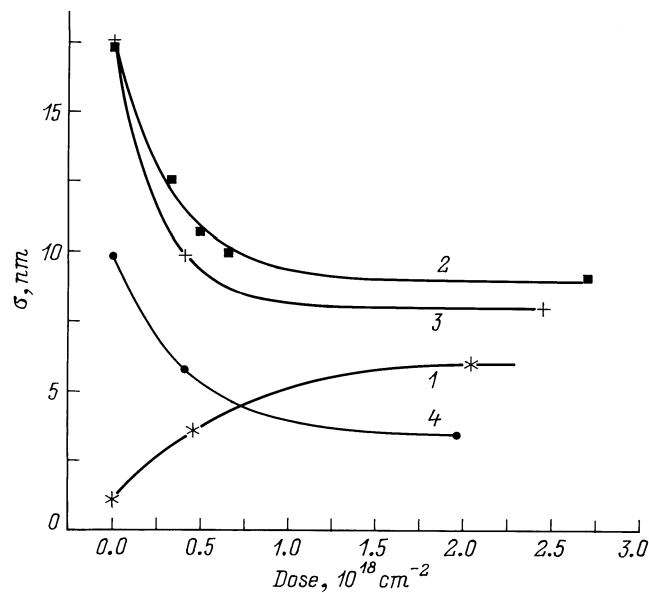


Рис. 3. Зависимость среднеквадратичной высоты от дозы ионного облучения для различных образцов (номера кривых соответствуют номерам образцов).

Подобный эффект (экспоненциальная зависимость среднеквадратичной высоты σ от дозы ионного облучения) наблюдался при облучении InP ионами Ag^+ при малых энергиях [6], но для поверхности InP авторы наблюдали лишь экспоненциальный рост σ , тогда как в данном случае наблюдаются как экспоненциальный рост, так и экспоненциальное убывание σ в процессе ионной модификации. Таким образом, можно предположить, что на образцы, выращенные методом магнетронного распы-

ления, изначально имеющие более высокие значения дисперсии высот, ионное травление оказывает полирующее воздействие, а шероховатость образца, полученного молекулярно-пучковой эпитаксией, наоборот, ухудшается.

Наряду с высотными характеристиками вычислялись латеральные параметры поверхностной шероховатости, несущие информацию о структуре поверхности, квазидвумерные корреляционные и структурные функции поверхности

$$\text{Cor}(\tau) = \langle h(x)h(x+\tau) \rangle_{\tau}, \quad (2)$$

$$\text{Ctr}^2(\tau) = \langle (h(x+\tau) - h(x))^2 \rangle_{\tau}. \quad (3)$$

Здесь $\langle \rangle$ — статистическое усреднение по длине. Квазидвумерные — это значит, что при вычислении этих функций усреднение производилось по каждой строке измерений, а затем все усреднялось. Автором работы [7] показано, что значения двумерных и квазидвумерных латеральных функций поверхности почти эквивалентны, а время вычислений, необходимое для них, различается очень сильно. Следует отметить, что значения корреляционной функции зависят от длины измерения и шага дискретизации. Достоверными можно считать измерения на длине, превышающей корреляционную длину, определенную как пересечение корреляционной функции с нулем, более чем в 10 раз [8]. Этот факт иллюстрирует рис. 4, на котором приведены примеры корреляционных функций образца 1, измеренные для различных шагов дискретизации и соответственно разных базовых длин L .

Применим фрактальный подход к описанию исследуемых поверхностей. Из-за физических ограничений

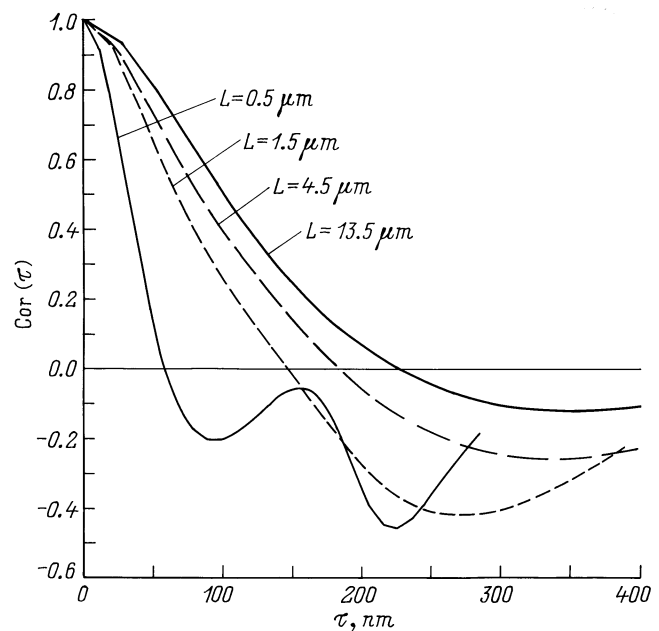


Рис. 4. Корреляционные функции образца 1 (начальная поверхность), измеренные при различных базовых длинах L .

поверхность может показывать фрактальное поведение лишь на ограниченных масштабах длин. Известно, что для самоаффинных поверхностей, т.е. поверхностей, инвариантных относительно масштабного преобразования в латеральном направлении, справедливо следующее соотношение:

$$\text{Str}(\tau) \cong |\tau|^H, \quad (4)$$

где H — самоаффинная экспонента, или параметр Херста.

Кроме того, существует понятие фрактальной размерности поверхности $D = 3 - H$ и для физических поверхностей D лежит в диапазоне $2 \leq d \leq 3$. Параметр D отражает меру шероховатости поверхности [7]. Структурная функция фрактальной поверхности, построенная в двойных логарифмических координатах, должна быть линейна, и ее наклон пропорционален фрактальной размерности поверхности. Структурные функции образца 1, измеренные для разных областей сканирования, показаны на рис. 5. Кривые совпадают друг с другом на пересекающемся участке $\tau = 1-100$ nm, их наклон не зависит от масштаба измерений и, значит, они количественно характеризуют состояние поверхности. Было исследовано изменение фрактальной размерности во время ионного травления. Для образца 1 параметр D увеличивается от 2.088 до 2.215; точность полученных значений $\delta = \pm 0.007$. Аналогичное поведение показывают все исследуемые поверхности. На рим. 6 приве-

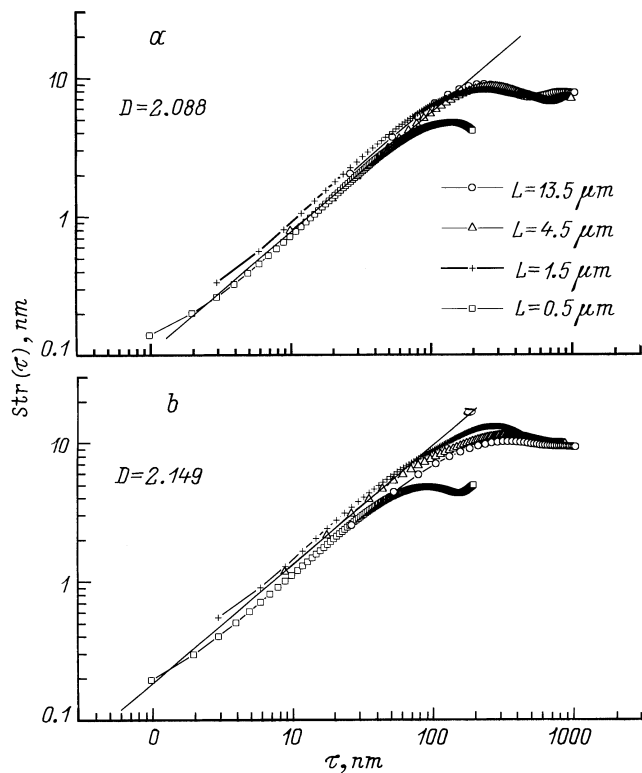


Рис. 5. Структурные функции образца 1, измеренные при различных базовых длинах L для поверхностей до (а) и после (б) ионного травления.

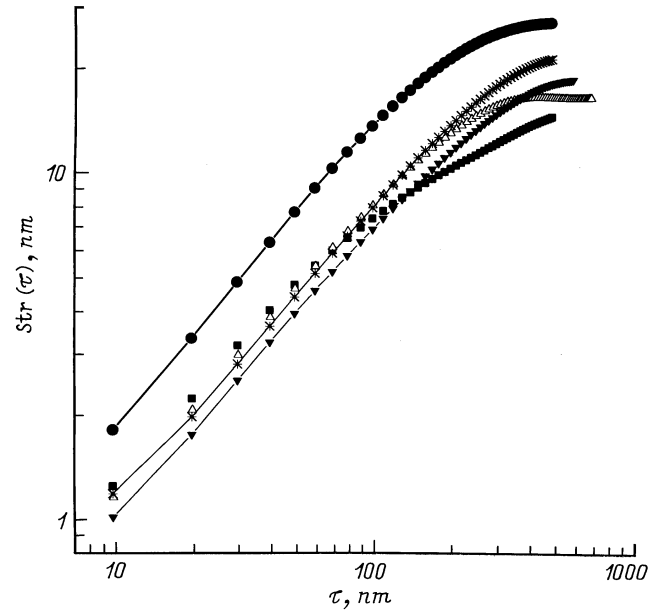


Рис. 6. Структурные функции образца 2, измеренные для различных доз ионного облучения: ● — начальная поверхность ($D = 2.100$), * — $3.27 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ ($D = 2.130$), ▼ — $4.91 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ ($D = 2.153$), △ — $6.55 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ ($D = 2.163$), ■ — $2.70 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ ($D = 2.222$).

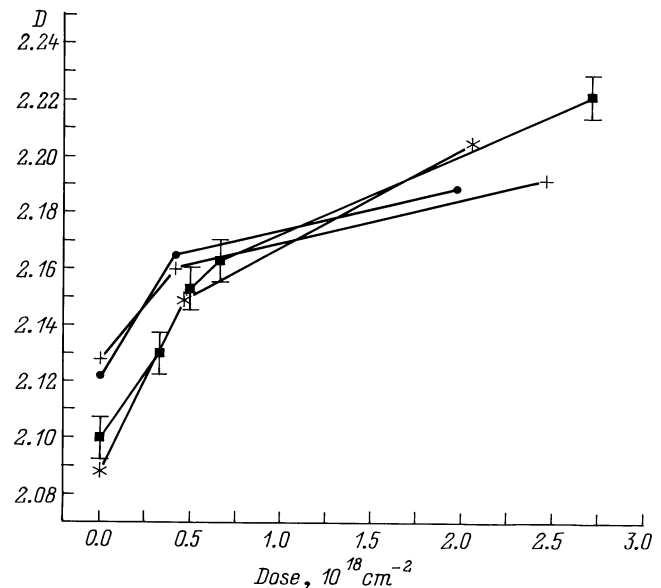


Рис. 7. Зависимость параметра D -фрактальной размерности от дозы ионного облучения: * — образец 1, ■ — образец 2, + — образец 3, ● — образец 4.

дены структурные функции и фрактальные размерности поверхностей образца 2 для начальной поверхности и для поверхностей, подвергшихся облучению различными ионными дозами. Приведенная же на рис. 7 зависимость фрактальной размерности от дозы позволяет сделать вывод о том, что для всех исследуемых образцов в диапа-

зоне длин 1–100 nm фрактальная размерность увеличивается во время травления, т. е. на этих масштабах длин поверхностная шероховатость арсенида галлия увеличивается при бомбардировке ионами цезия. Это увеличение шероховатости соответствует развитию на поверхности бугорков с характерным диаметром до 100 nm, появление которых хорошо видно на AFM-картах (рис. 1, *d, f*). Измеренные же значения σ характеризуют шероховатость большего масштаба, для образца 1 эта шероховатость увеличивается, а для образцов 2–4 уменьшается, что говорит о наличии некоторого процесса, приводящего к сглаживанию поверхности. Сходное поведение статистических параметров поверхности при ионном облучении, т. е. уменьшение шероховатости на большом масштабе и увеличение на малом, наблюдалось авторами работы [9]. И вынесенный ими в заглавии вопрос: "Ионное травление: шероховатость увеличивается или уменьшается?" свидетельствует о неоднозначности измеряемых интегральных статистических параметров. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что при ионном травлении присутствуют по крайней мере два различных процесса, приводящих к модификации поверхностной шероховатости: 1) ионная полировка поверхности, 2) возникновение случайных поверхностных структур. Таким образом, поведение структурной функции помогает оценить характерные латеральные размеры процессов, сопровождающих ионное травление.

Выводы

В работе исследовалась модификация поверхности арсенида галлия во время облучения тяжелыми ионами цезия Cs^+ путем измерения распределения высот поверхностей образцов атомно-силовым микроскопом с их последующей статистической обработкой. Наблюдалось как увеличение, так и уменьшение интегрального параметра σ -среднеквадратичной высоты. Анализировались латеральные статистические характеристики поверхностей, такие как корреляционная и структурная функции. Обнаружено, что корреляционная длина, определенная как пересечение корреляционной функции с нулем, в интересующем диапазоне длин зависит от базовой длины измерения. Структурная функция, построенная в двойных логарифмических координатах, имеет линейный участок, наклон которого не зависит от условий измерения, а определяется только шероховатостью поверхности на этом участке. Установлено, что в латеральном диапазоне 1–100 nm шероховатость поверхности арсенида галлия увеличивается для всех исследуемых образцов. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что при ионном травлении присутствуют по крайней мере два различных процесса, приводящих к модификации поверхностной шероховатости. Анализ структурной функции позволил оценить характерные латеральные размеры процессов, сопровождающих ионное травление, и определить степень детализации каждого из них при последующем моделировании.

Список литературы

- [1] *Johan B. Mahnerbe*. // *Critical Reviews in Solid State and Material Science*. 1994. Vol. 24 (3). P. 141–146.
- [2] *Ion Bombardment Modification of Surfaces. Fundamentals and Applications* / Ed. O. Auciello, R. Kelly. Elsevier, 1984.
- [3] *Yoshukazu Homma, Hamao Okamoto, Yoshukazu Ishii* // *Jap. J. Appl. Phys.* 1985. Vol. 24 (8). P. 934–939.
- [4] *Demant C.M., Vijaya Sankar K., Mahnerbe J.B.* at al. *Surface and Interface Analysis*. 1996. Vol. 24. P. 497–502.
- [5] *Demant C.M., Vijaya Sankar K., Mahnerbe J.B.* // *Surface and Interface Analysis*. 1996. Vol. 24. P. 503–510.
- [6] *Demant C.M., Vijaya Sankar K., Mahnerbe J.B., Van der Berg N.G.* // *Surface and Interface Analysis*. 1995. Vol. 23. P. 433–439.
- [7] *Almqvist N.* // *Surf. Sci.* 1996. Vol. 355. P. 221–228.
- [8] *Ogilvi J.A., Foster J.R.* // *J. Phys. D.* 1989. Vol. 22. P. 1243–1251.
- [9] *Csahok Z., Farkas Z., Menyharg M.* et al. // *Surf. Sci. Lett.* 1996. Vol. 364. P. 600–604.