

15. He S.J., Song B., Li D., Zhu C.F., Qi W.P., Wen Y.Q., et al. A graphene nanoprobe for rapid, sensitive, and multicolor fluorescent DNA analysis // *Adv Funct Mater.* 2010. 20(3). P. 453–9.
16. Wang Y., Li Z.H., Hu D.H., Lin C.T., Li J.H., Lin Y.H. Aptamer/graphene oxide nanocomplex for in situ molecular probing in living cells // *J Am Chem Soc.* 2010. 132(27). P. 9274–6.
17. Sun X.M., Liu Z., Welsher K., Robinson J.T., Goodwin A., Zaric S., et al. Nano-graphene oxide for cellular imaging and drug delivery // *Nano Res.* 2008. 1(3). P. 203–12.
18. Yang X.Y., Zhang X.Y., Liu Z.F., Ma Y.F., Huang Y., Chen Y. Highefficiency loading and controlled release of doxorubicin hydrochloride on graphene oxide // *J Phys Chem C.* 2008. 112(45). P. 17554–8.
19. Stankovich S., Dikin D.A., Dommett G.H.B, Kohlhaas K.M., Zimney E.J., Stach E.A., et al. Graphene-based composite materials // *Nature.* 2006. 442(7100). P. 282–6.
20. Mukhopadhyay P., Gupta R.K. Trends and frontiers in graphene-based polymer nanocomposites // *Plast Eng.* 2011. 67(1). P. 32–42.
21. Gutiérrez-González C.F., Suarez M., Pozhidaev S., Rivera S., Peretyagin P., Solís W., Díaz L.A., Fernandez A., Torrecillas R. Effect of TiC addition on the mechanical behaviour of Al₂O₃–SiC whiskers composites obtained by SPS // *Journal of the European Ceramic Society*, 36, Issue 8, 2149 - 2152, 2016.
22. A. Fernández, P. Peretyagin, W. Solís, R. Torrecillas, A. Borrell Functionalization of carbon nanofibres obtained by floating catalyst method // *Journal of Nanomaterials*, 2015, 146, 2015.
23. Díaz, LA, Solís, W, Peretyagin, P, Fernández, A, Morales, M, Pecharromán, C; Moya, JS; Torrecillas, R Spark Plasma Sintered Si₃N₄/TiN Nanocomposites Obtained by a Colloidal Processing // *Route, Journal of Nanomaterials*, 2016.
24. Fernandez-Garcia, E; Gutierrez-Gonzalez, CF; Peretyagin, P; Solis, W; Lopez-Esteban, S; Torrecillas, R; Fernandez, A Effect of yttria–titanium shell–core structured powder on strength and ageing of zirconia/titanium composites // *Materials Science and Engineering: A*, 646, 96-100, 2015.
25. Novikov, SV; Peretyagin, P Yu; Dolzhikova, E Yu; Torrecillas, R Formation of Structure in Hard-Alloy Coatings from Powders Under Passage of a Powerful Pulse of Electric Current Metal // *Science and Heat Treatment.* 57. 9-10. 596-602. 2016.

Экспериментальное исследование плотности потока пучков быстрых нейтральных частиц методом пьезокварцевых резонаторов

Ю. П. Маишев, С. Л. Шевчук, В.П. Кудря
ФГБУН Физико-технологический институт Российской академии наук,
117218, Москва, Нахимовский проспект 36/1, e-mail:slshev@mail.ru

Разработана экспериментальная система измерения пространственного распределения плотности пучка быстрых нейтральных частиц (БНЧ), основанная на использовании метода пьезокварцевых датчиков. Получены кривые распределения плотности потока частиц пучка посредством программной обработки экспериментальных данных.

Experimental research of the fast atom beam density distribution by means of piezoelectric sensors method. Yu. P. Maishev, S. L. Shevchuk, V.P. Kudrya. Experimental system of the fast atom beam (FAB) density distribution measurement is developed. The system is based on the method of piezoelectric sensors. The FAB density distribution curves are obtained by means of Fourier spectrum consideration and software processing.

Использование пьезокварцевых резонаторов для измерения скорости удаления/нанесения вещества (а также связанных с ней величин) основано на зависимости резонансной частоты пьезокварцевого кристалла от величины присоединенной массы на его

поверхности. Первая попытка теоретического объяснения такой зависимости в связи с методом подстройки резонансной частоты кварцевых резонаторов путем осаждения на их поверхности металлических контактных площадок была предпринята в работе [1]. Хотя предложенный в указанной статье подход не является корректным, он, тем не менее, получил широкое распространение в силу своей простоты и наглядности. Если преобразовать полученную в [1] формулу, связывающую изменение резонансной частоты Δf с изменением присоединенной массы Δm (массы осаждаемой на поверхность кристалла пленки или массы распыляемого с поверхности материала), то получим:

$$\Delta f = k \Delta m, \quad k = \frac{2f_0^2}{S_q \sqrt{\varepsilon \rho_q}} = \frac{f_0^2}{N \rho_q S_q} \quad (1)$$

где k - чувствительность пьезоэлектрического элемента (Гц/кг); f_0 - его резонансная частота (Гц); S_q - площадь поверхности резонатора (m^2); ε - модуль упругости материала резонатора для колебаний соответствующего типа (Па); ρ_q - плотность материала резонатора (kg/m^3); N - частотная константа. В частности, для АТ-среза кварца $N = 1670$ Гц·м.

Эксперименты проводились на вакуумной технологической установке "Каштан [2]. В качестве рабочего газа использовался кислород. На рис. 1 представлена схема измерительного блока, включающего в себя кварцевый измеритель толщины (КИТ). При воздействии пучка частиц на установленные внутри помещенного в пучок зонда кварцевые датчики (рис. 2) изменяется масса электродного покрытия датчиков и, как следствие, изменяется частота собственных внутренних колебаний кварцевой пластины, что и является мерой толщины. В качестве датчиков использовались резонаторы АТ-среза частотой 5000.0 кГц с диаметром электродного покрытия Ag 5 мм. Изменение частоты кварцевых датчиков измерялось при помощи контроллера Inficon IQM-233 [2] (рис. 3).

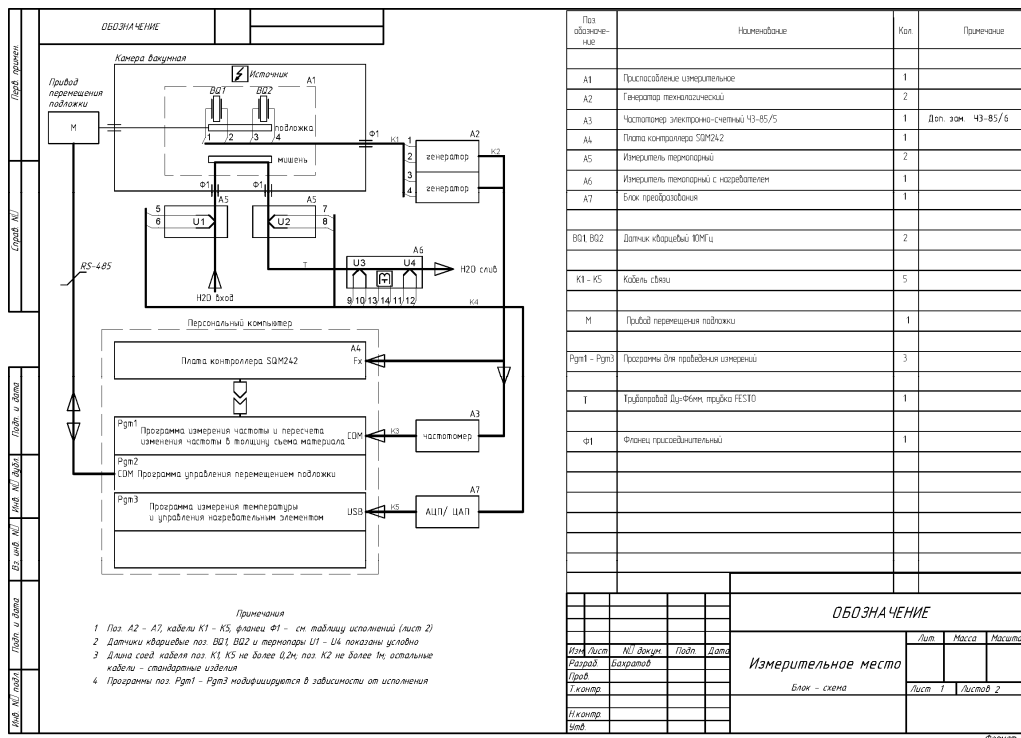


Рис. 1. Схема измерительного блока, содержащего кварцевый измеритель толщины.

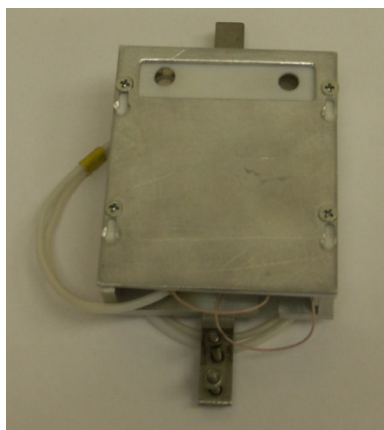


Рис. 2. Фотография зонда со встроенными кварцевыми датчиками.

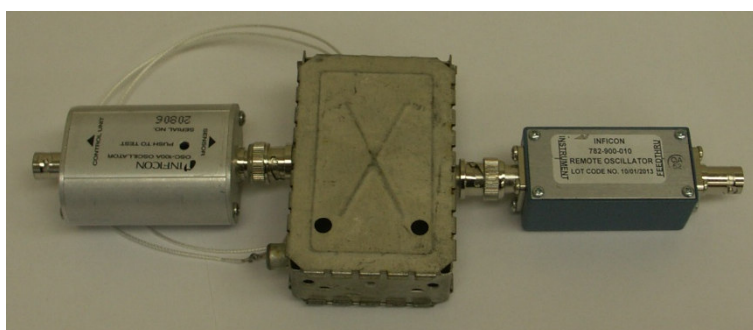


Рис. 3. Фотография блока контролеров Inficon IQM-233 с модулем согласования.

Установка состоит из вакуумного откачного агрегата, рабочей вакуумной технологической камеры, стоек электропитания и управления и источника с ленточным пучком БНЧ «Нейтрал-Л» (рис. 4).

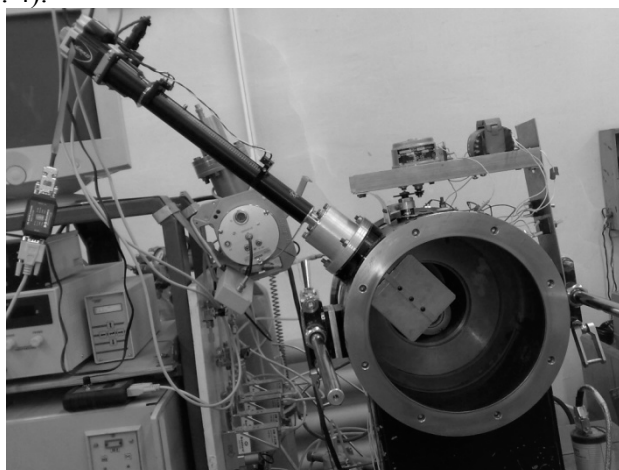


Рис. 4. Вакуумная камера технологической установки, оснащенной источником быстрых нейтральных частиц «Нейтрал-Л» и подложкодержателем, соверщающим возвратно-поступательное движение в направлении перпендикулярном направлению пучка.

Откачной агрегат обеспечивает безмасляную откачку рабочей камеры турбомолекулярным насосом с эффективной быстротой откачки 720 л/с в диапазоне давлений ($2 \cdot 10^{-2}$ - $1.3 \cdot 10^{-4}$) Па.

В технологическую камеру установки встроена система возвратно-поступательного перемещения подложкодержателя (рис. 5), выполненная на основе модифицированного высоковакуумного ввода типа ZBLM-275-8 SMMCS-MS и обеспечивающая линейное

перемещение подложкодержателя на 200 мм. Такой ввод применен на установке с целью повышения равномерности обработки подложек за счет возвратно-поступательного перемещения подложкодержателя, на котором располагается пьезокварцевый датчик.

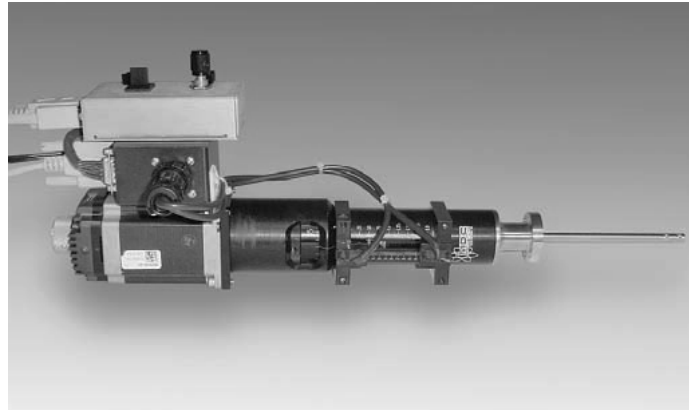


Рис. 5. Вакуумный ввод, обеспечивающий линейное возвратно-поступательное перемещение подложкодержателя на 200 мм перпендикулярно оси пучка.

Данные об изменении частоты кварцевых резонаторов, скорости их перемещения и толщины удаленного слоя электродного покрытия, поступающие от контроллера, обрабатывались в программном модуле и визуализировались на экране монитора (рис. 6).

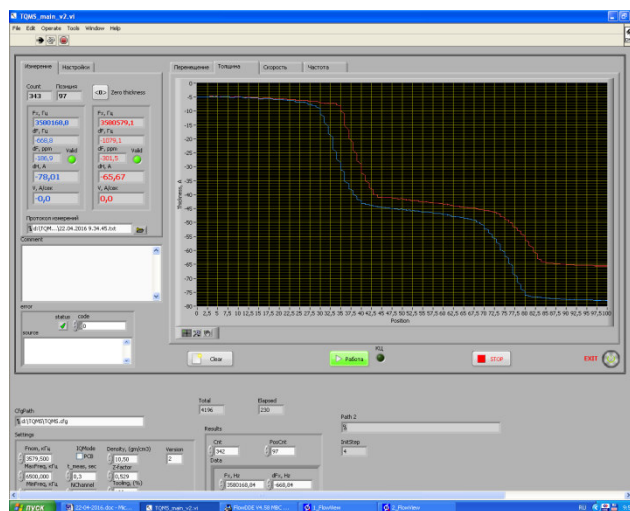


Рис. 6. Изображение на экране монитора зависимости изменения толщины удаленного слоя двухканальной системы контроля на основе кварцевых резонаторов (1-ый канал – синий, 2-ой канал – красный). Параметры пучка: напряжение на разряде $U_p = 1.4$ кВ, ток разряда $I_p = 0.01$ А, поток газа 5 см³/мин, линейная скорость перемещения образца $v = 1$ мм/с.

Кварцевый измеритель толщины позволяет контролировать процесс травления материала пучком БНЧ с разрешением по толщине 1 \AA , по скорости изменения толщины - не менее $0.2 \text{ \AA}/\text{сек}$. Держатель с системой кварцевых датчиков перемещается перпендикулярно пучку БНЧ посредством устройства ввода возвратно-поступательного перемещения, выполненного на основе модифицированного высоковакуумного ввода типа ZBLM-275-8 SMMCS-MS. Информация об изменении частоты резонаторов и, соответственно, толщине удаленного слоя Ag резонатора регистрируется и далее обрабатывается программой, разработанной на основе изложенного ранее алгоритма обработки.

В качестве примера обработки результатов измерений рассмотрим данные, полученные во время прямого хода кварцевого датчика. На рис. 7 показан Фурье-спектр экспериментальных данных. Видно, что основной вклад в сигнал дают 10-12 первых гармоник,

тогда как амплитуды остальных гармоник пренебрежительно малы (заметим, что приблизительно такой же спектр был получен для набора экспериментальных данных, зарегистрированных при обратном ходе датчика). Таким образом, для воспроизведения только характерного поведения зависимости Δh от x достаточно ограничиться первыми 12-ю гармониками.

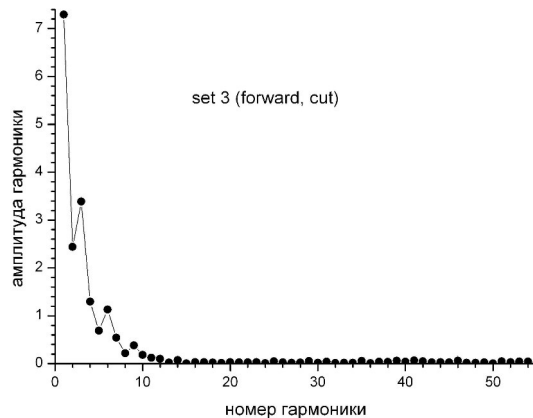


Рис. 7. Фурье-спектр экспериментальных данных.

На рис. 8 толстой линией показана зависимость производной $-dh/dx$, пропорциональной локальному значению потока БНЧ. Тонкая линия получена при дискретном дифференцировании исходных (несглаженных) данных. Видно, что максимумы потока от щелей источника пучков БНЧ хорошо идентифицируемы. Расстояние между положением максимумов соответствует конструктивному расстоянию между щелями. Исходные же данные совершенно непригодны для восстановления распределения плотности потока от поперечной координаты.

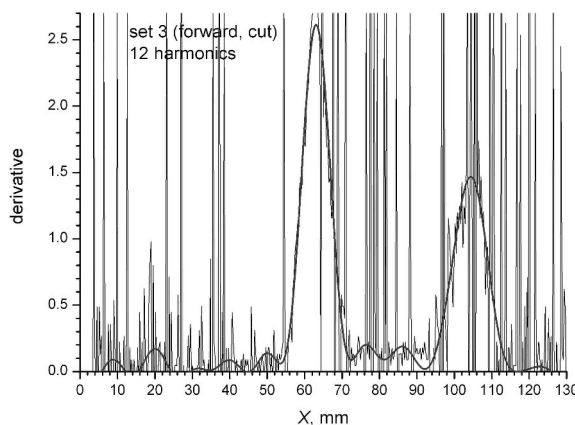


Рис. 8. Распределение плотности потока БНЧ вдоль поперечной координаты (толстая линия).

Видно, что предложенный метод позволяет получить пространственное распределение плотности потока пучка БНЧ. При этом ближайшей задачей является улучшение метода сглаживания экспериментальных данных. Создана экспериментальная система измерения пространственного распределения плотности потока пучков БНЧ, основанная на пьезокварцевом датчике. Программно реализован алгоритм обработки экспериментальных данных, основанный на фильтрации Фурье-спектра. Путем дифференцирования

отфильтрованных данных получены реалистические распределения плотности потока по координате перемещения датчика.

Литература

1. Spears R.A. "Gold film electrodes for high frequency quartz plates". Journal of the British Institution of Radio Engineers, 1946, Vol. 6, No. 2, pp. 50-59.
2. "Operation Manual. IQM-233 Thin Film Deposition Controller". Inficon, 2013.
3. Майшев Ю.П., Шевчук С.Л. "Установка для обработки материалов пучком быстрых нейтральных частиц". Труды ФТИАН, 2017, т. 26 (в печати).

Влияние легирования углеродного покрытия-ориентанта кремнием, молибденом и вольфрамом на антифрикционные свойства полиальфаолефинового масла ПАО-4

*Е.А. Митрофанов, С.Б. Симакин, *А.Н.Большаков, *И.А.Буяновский,
**В.Н.Матвеевко, **В.А. Левченко
Москва, ОАО «НИИВТ им. С.А. Векшинского»
*Москва, ИМАШ РАН, Малый Харитоньевский, 4
**Москва, Химфак МГУ имени Ломоносова
E-mail:vladalev@yahoo.com*

Экспериментально установлена возможность значительного повышения смазочной способности неактивного полиальфаолефинового масла ПАО-4 при нанесении на рабочие поверхности деталей узлов трения покрытий монокристаллическим углеродом. Показана также возможность управлять антифрикционными свойствами исследуемого масла путём легирования монокристаллического покрытия-ориентанта такими элементами, как вольфрам, молибден и кремний, а также введения в масло ПАО-4 поверхностно-активной и химически активной присадок.

Influence of alloying of a carbon coating-orientation silicon, molybdenum and tungsten on antifriction properties of the polyalphaolefin PAO-4 oil. E.A. Mitrofanov, S.B. Simakin, A. N. Bolshakov, I. A. Buyanovskii, V. N. Matveenko, V. A. Levchenko. The possibility of the substantial increase of lubricant ability of inactive polyalphaolefin PAO-4 oil was established experimentally when plotting on working surfaces of details of frictional units by monocrystalline carbon coatings. An opportunity to control antifriction properties of the researched oil is shown by alloying of a monocrystalline coating orientation with tungsten, molybdenum and silicon and by introductions of surface-active and chemically active additives to PAO-4 oil.

Современные смазочные масла для обеспечения снижения энергетических потерь при эксплуатации узлов трения тяжелонагруженных объектов новой техники включают значительное число присадок, содержащих соединения серы, фосфора, хлора и т.д., которые дороги и во многих случаях неблагоприятно воздействуют на экологию. Борьба с этим явлением ведётся, главным образом, путём сокращения содержания в этих маслах химически активных присадок, включающих подобные вещества, или замена их на компоненты, представляющие меньшую опасность для экологии. Этот путь достаточно корректен, но не всегда эффективен. Авторы предлагают альтернативный путь обеспечения требуемого уровня антифрикционных свойств масел – нанести на рабочие поверхности контактирующих деталей узлов трения разработанные ранее углеродные покрытия-ориентанты, обеспечивающие требуемые смазочные свойства. Это позволит отказаться от дорогих и не всегда экологически