

УДК 621.385.833

DOI 10.22213/2410-9304-2018-2-48-55

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИВОДОВ СБЛИЖЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТИ

П. В. Гуляев, кандидат технических наук, Институт механики УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия

Ю. К. Шелковников, доктор технических наук, Институт механики УдмФИЦ УрО РАН,
Ижевск, Россия

А. И. Кириллов, Институт механики УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия

К. С. Ермолин, Институт механики УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия

В статье рассмотрены особенности использования шаговых пьезоэлектрических приводов в условиях интенсификации процессов сближения образца и зондирующего острия сканирующего туннельного микроскопа при контроле поверхности образца. Показано, что попеременное включение и выключение привода сближения и цепи обратной связи в туннельном микроскопе позволяет использовать относительно высокие скорости шагового пьезоэлектрического привода, сохранить зондирующее острие измерительной иглы в процессе сближения и увеличить коэффициент использования цепи обратной связи. Кроме того, установлено, что выключение привода позволяет снизить уровень помех при работе обратной связи. Описана конструкция механической муфты с держателем образца, обеспечивающая сопряжение подвижной части привода с держателем и разрыв механической связи после завершения сближения с целью устранения влияния тепловых дрейфов. Описан основной алгоритм управления приводом сближения, состоящий из повторяющихся процедур: формирование управляющих импульсов для шагового пьезоэлектрического привода; включение цепи обратной связи и проверка наличия туннельного тока. Представлены особенности алгоритма управления приводом сближения в завершающей стадии, позволяющего разомкнуть механическую связь подвижной части привода с держателем образца и удерживать сканер в середине динамического диапазона.

Ключевые слова: сканирующий туннельный микроскоп, шаговый пьезоэлектрический привод, зондирующее острие, цифровая обратная связь, прецизионные перемещения.

Введение

В процессе использования сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) для контроля качества поверхности образцов, используемых в микро- или нанотехнологиях, одной из важнейших задач является сохранение формы зондирующего острия (ЗО) измерительной иглы [1–5]. Во-первых, это обусловлено тем, что поле зрения СТМ ограничено и требуется выполнение многочисленных операций подвода-отвода при смещении поля зрения микроскопа [6–9]. Во-вторых, форма ЗО в случае повреждения может значительно влиять на результат отображения дефектов [10, 11], а также на общий уровень шумов в измерительном тракте СТМ. Сохранение формы острия на протяжении всего процесса контроля поверхности образца является одним из условий получения однозначно интерпретируемых результатов. Другим условием является снижение виброакустических помех, передаваемых на ЗО через механические конст-

рукции и привод сближения. Одним из путей устранения этого влияния является применение приводов в совокупности с устройством разрыва механической связи привод-образец после сближения образца и ЗО. В качестве приводов сближения широко применяются шаговые пьезоэлектрические приводы, поскольку они позволяют обеспечить необходимую точность перемещений (~20 нм и выше) [12]. Однако параметры траектории шагового перемещения (скорость, форма) данного типа приводов не способствуют сохранности ЗО, поэтому применяются специальные алгоритмы сближения. Основой таких алгоритмов является разделение процесса подвода на чередующиеся этапы работы привода сближения с втянутым сканером и покоя привода с вытягиванием сканера по направлению к образцу под управлением цепи обратной связи (ЦОС) [13]. Процесс вытягивания сканера может сопровождаться дополнительными процедурами контроля и установ-

ления рабочей точки [14]. В частности, можно учитывать форму траектории перемещения образца конкретного привода. Например, для шагового высокоточного инерционного пьезоэлектрического привода (ИПП) [15, 16] характерно наличие неконтролируемых смещений – значительных по величине и продолжительности прямого или обратного хода (рис. 1), что отодвигает наступление этапа включения обратной связи на 10–100 мс. В каждом конкретном случае в зависимости от конструкции СТМ и

нагрузки на привод [17–21] это время может изменяться. При включении ЦОС во время обратного хода привода сближения образец и зондирующее острие некоторое время будут перемещаться в одном направлении, что дополнительно обезопасит ЗО от повреждения. Применение подобных алгоритмов обосновано на этапе грубого подвода, когда скорость сближения является наиболее высокой, а ЦОС находится на краю рабочего диапазона в насыщенном состоянии.

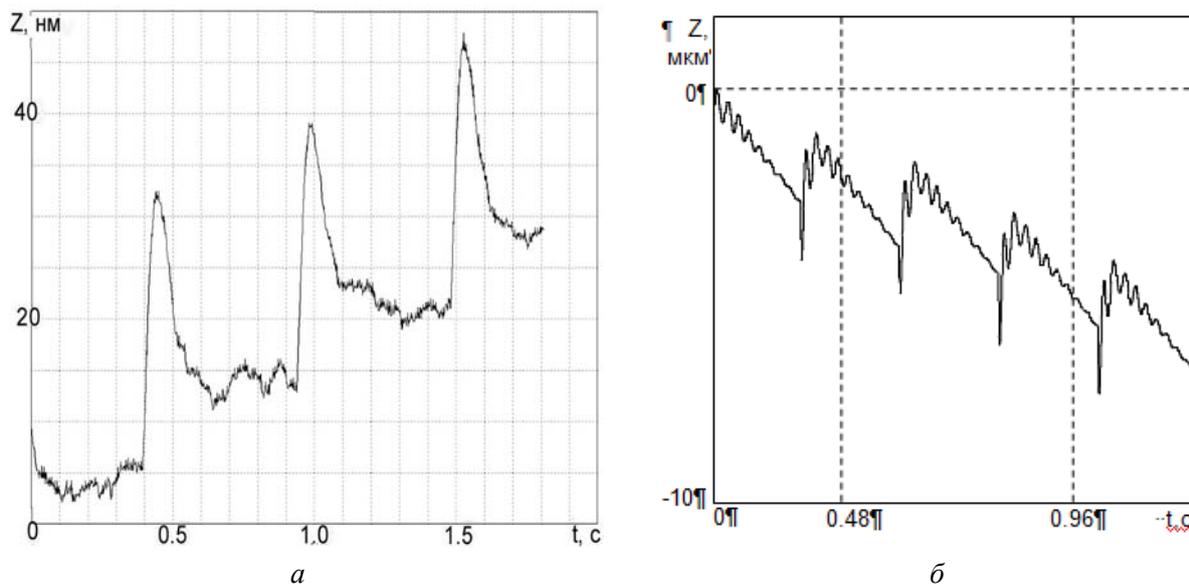


Рис. 1. Траектория переходных процессов перемещения шагового инерционного привода: а – обратный ход; б – прямой ход

На этапе точного подвода процедура сближения ЗО и исследуемой поверхности заключается в формировании серии микроперемещений при одновременном контроле величины выдвигания сканера или выходного сигнала интегрирующего звена (усилителя Z сканера) системы регулирования, которые должны быть в середине динамического диапазона. При использовании в системе сближения распространенных линейных пьезоэлектрических инерционных приводов [22–26] на пьезоэлемент подается управляющий несимметричный пилообразный сигнал, амплитуда которого ограничивается в момент достижения выходным сигналом интегрирующего звена середины своего диапазона. Если выходной сигнал интегратора не достиг необходимого уровня, то амплитуда устанавливается на максимально допустимом уровне.

В противном случае амплитуда напряжения ограничивается величиной, которая была на обкладках пьезоэлемента в момент достижения интегратором середины своего динамического диапазона (с учетом величины обратного или прямого хода). После перемещения выполняется измерение выходного сигнала интегратора, если он вышел из рабочего диапазона, то процедура сближения продолжается. При формировании среза управляющего сигнала в линейных инерционных приводах возможны неконтролируемые перемещения как в обратном [27–28], так и в прямом направлении (рис. 2). Последние представляют наибольшую опасность для сохранности ЗО, поэтому шаг привода, как правило, устанавливают на минимально возможном уровне, ограничивая при этом по величине неконтролируемые смещения.

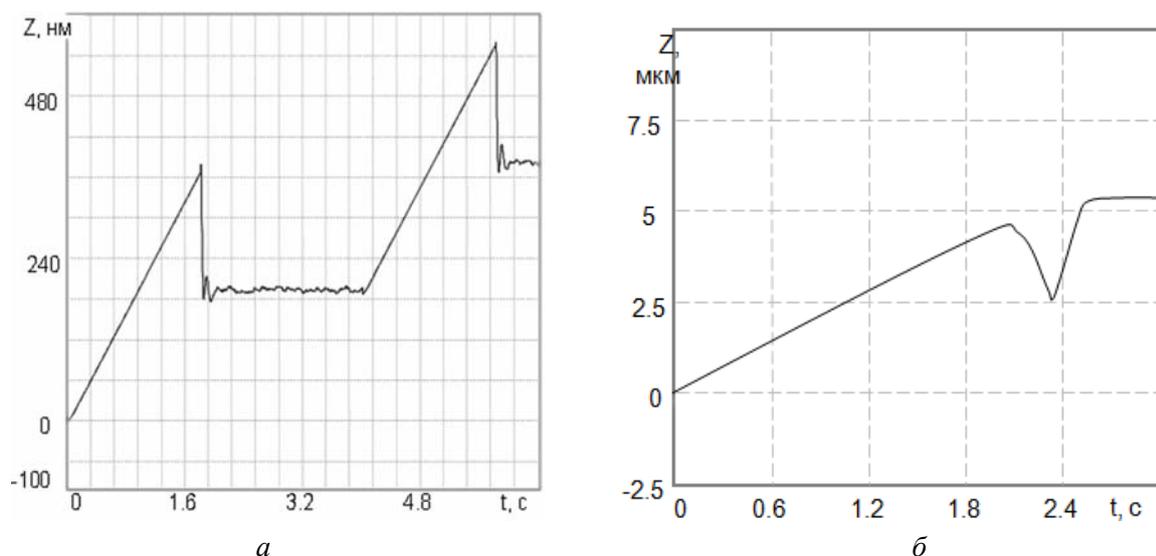


Рис. 2. Траектория переходных процессов перемещения линейного инерционного привода:
 а – обратный ход; б – прямой ход

В настоящей работе предлагается помимо этого при втягивании сканера оставлять резерв перемещения на величину минимального шага привода. Цепь регулирования туннельного промежутка в этом случае не будет находиться в насыщении, что увеличит ее быстродействие. Также следует отметить, что повышение коэффициента использования цепи регулирования туннельного промежутка в процессе сближения положительно влияет на сохранность ЗО. Это обусловлено тем, что неконтролируемые перемещения в приводах отличаются небольшой скоростью протекания, позволяющей цепи регулирования эффективно компенсировать эти перемещения.

Особенности использования шаговых пьезоприводов

Рассмотрим работу алгоритма сближения, учитывающего форму траектории шагового привода на примере СТМ, представленного на рис. 3. Механический блок микроскопа состоит из привода сближения 1, платформы сканера 2, установленной на стойках 3 и перемещаемой с помощью винтов 4. На платформе 2 закреплен трубчатый пьезосканер 5 с зондирующим острием 6. Привод сближения через шток 7 перемеща-

ет размещенный на держателе 9 образец 8. Держатель 9 и цапговые пружины 10 образуют элемент трения, удерживающий вертикальное положение держателя 9 при разьединении со штоком 7 привода.

Временные диаграммы процесса сближения иглы и образца представлены на рис. 4. В момент времени t_0 ЦОС выключается (изменяется ее полярность), и это приводит к тому, что сканер максимально вытянутый по направлению к образцу, переключается в противоположное состояние – сжатие. Степень сжатия устанавливается на уровне 80–90 % от максимума. На привод подается серия ($t_0 - t_1$) управляющих сигналов такой амплитуды и длительности, что суммарное перемещение при этом не превышает половины диапазона перемещений сканера вдоль оси Z .

После задержки времени $t_1 - t_2$ начинается обратный ход привода, включается ЦОС, и под ее управлением сканер начинает выдвигаться по направлению к образцу ($t_2 - t_3$). Если происходит захват сигнала туннельного тока, то процесс сближения завершается. В противном случае ЦОС выключается и сканер отходит от образца. Этот процесс происходит в интервал времени $t_3 - t_4$.

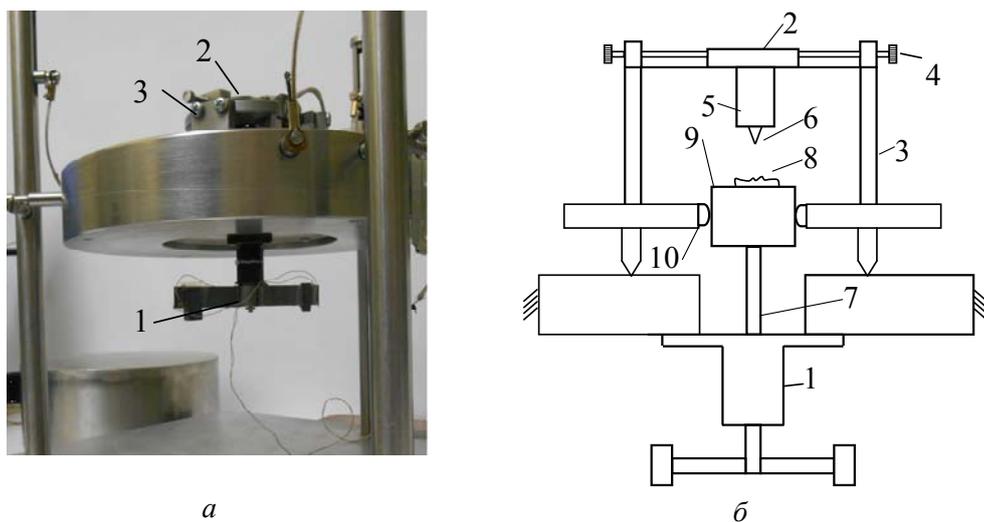


Рис. 3. Внешний вид (а) и устройство механической части СТМ с шаговым приводом (б)

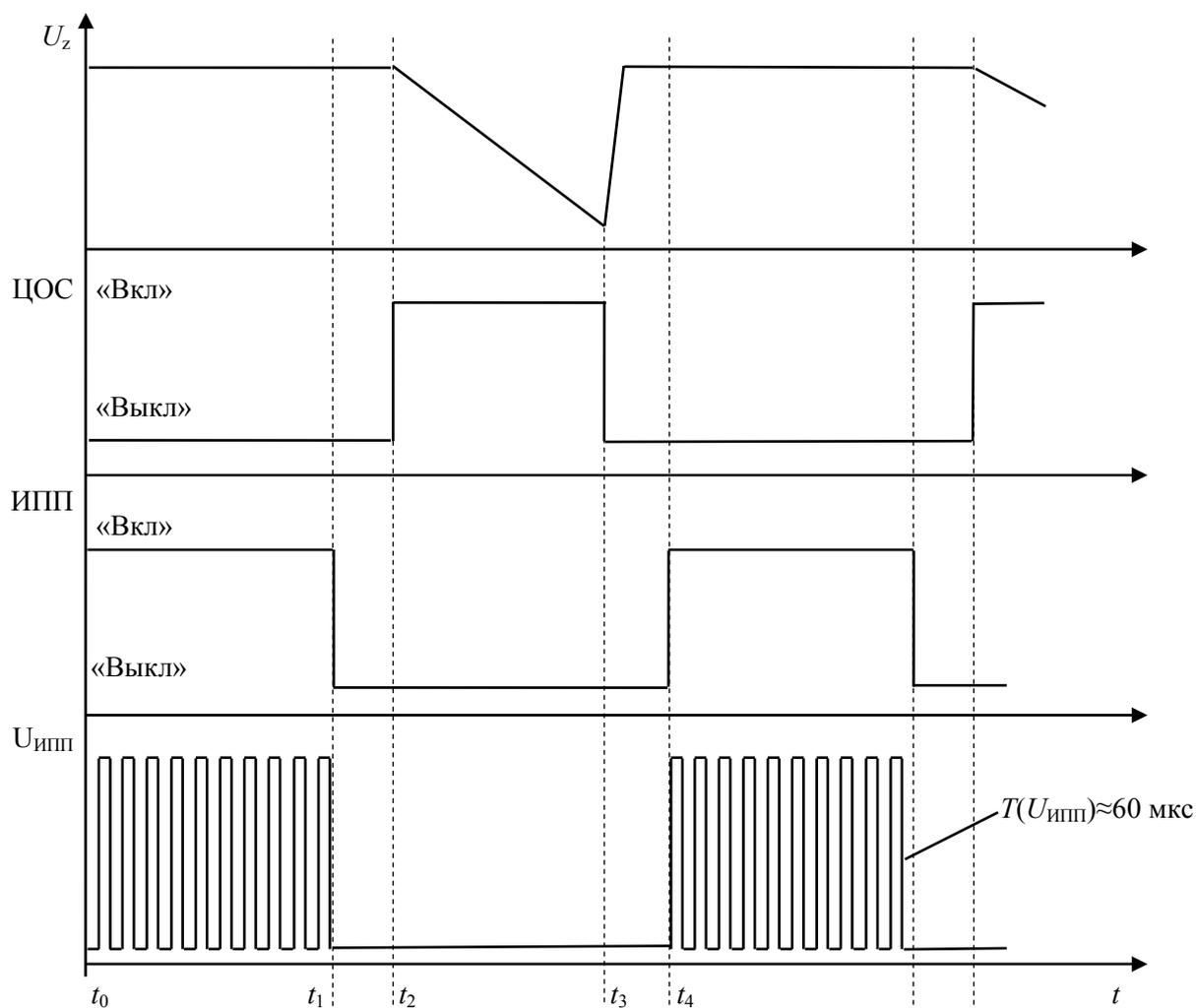


Рис. 4. Временные диаграммы процесса сближения иглы и образца

При использовании цифровой обратной связи существует возможность снизить продолжительность интервала $t_3 - t_4$ за счет принудительного установления на выходе цифрового ПИД регулятора крайнего значе-

ния. Далее с момента времени t_4 подается очередная серия управляющих сигналов на ИПП. Реальное соотношение диапазонов времени $(t_0 - t_1)/(t_1 - t_4)$ составляет $1/10 \dots 1/5$, что не приводит к существенно-

му увеличению длительности процесса сближения.

После захвата туннельного тока начинается вторая часть процесса сближения, цель которой разомкнуть механическую связь привод-образец в муфте (рис. 5) и удержать сканер в середине динамического диапазона.

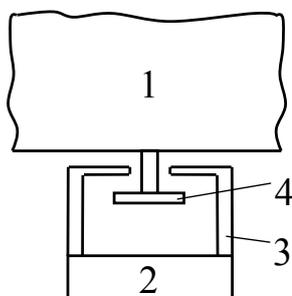


Рис. 5. Устройство муфты: 1 – держатель образца; 2 – шток привода; 3 – толкатель; 4 – зацеп

Для этого привод сближения серией мелких перемещений выводит сканер в подготовительное для размыкания положение. Данное положение зависит от обратного хода образца при размыкании муфты и опре-

деляется экспериментальным путем. Безопасность ЗО при этом обеспечивается цепью отрицательной обратной связи (ООС), находящейся в рабочем диапазоне.

Далее на привод подаются сигналы управления, перемещающие шток привода в обратном направлении на расстояние ~ 1 мм, что обеспечивает размыкание механической связи привод-образец.

Анализ результатов

Типовой график изменения напряжения на усилителе Z сканера при сближении представлен на рис. 6. До точки a происходит подвод в соответствии с диаграммами, представленными на рис. 4.

В точке a регистрируется сигнал туннельного тока, и через небольшой промежуток времени происходит вывод сканера в подготовительное для размыкания положение (точка b). От точки b до точки v происходит медленное расцепление, которое заканчивается быстрым размыканием механической связи привод-образец.

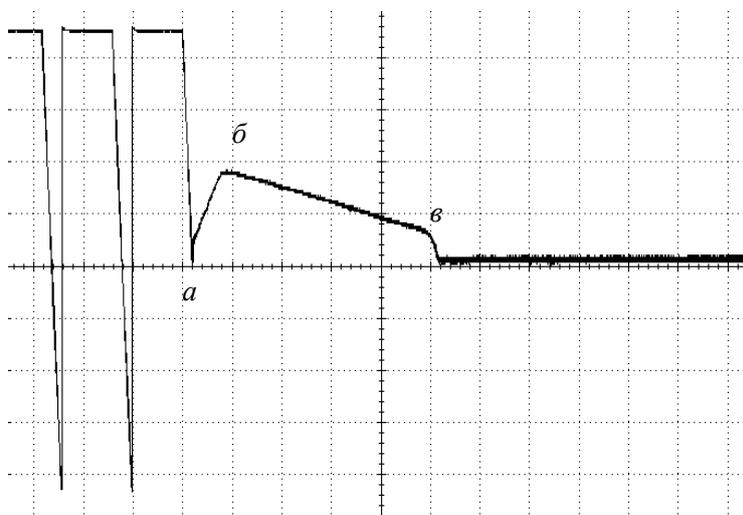


Рис. 6. Выходной сигнал усилителя Z сканера при модернизированном подводе (масштаб оси Y 20 В/дел, оси X 2 с/дел)

По сравнению с известными методами подвода (рис. 7) новый алгоритм позволяет осуществлять большую часть процесса сближения под контролем цепи ООС на безопасном для ЗО расстоянии от поверхности образца.

Результаты и выводы

Таким образом, для обеспечения сохранности зондирующего острья и исключения

механической связи образца с источниками тепловых и виброакустических помех рекомендуется к применению конструкция пьезоэлектрического привода, включающая:

- расположение держателя образца в элементе сухого трения;
- специализированную муфту для обеспечения размыкания механической связи

между образцом и приводом на время проведения измерений.

Для управления приводом следует использовать процесс сближения, характеризующийся учетом:

– траектории шаговых перемещений привода;

– особенностями работы размыкающей муфты.

Применение представленных решений позволило снизить вероятность повреждения ЗО при сближении с образцом, устранить влияние тепловых дрейфов, виброакустических помех, увеличить коэффициент использования цепи ООС.

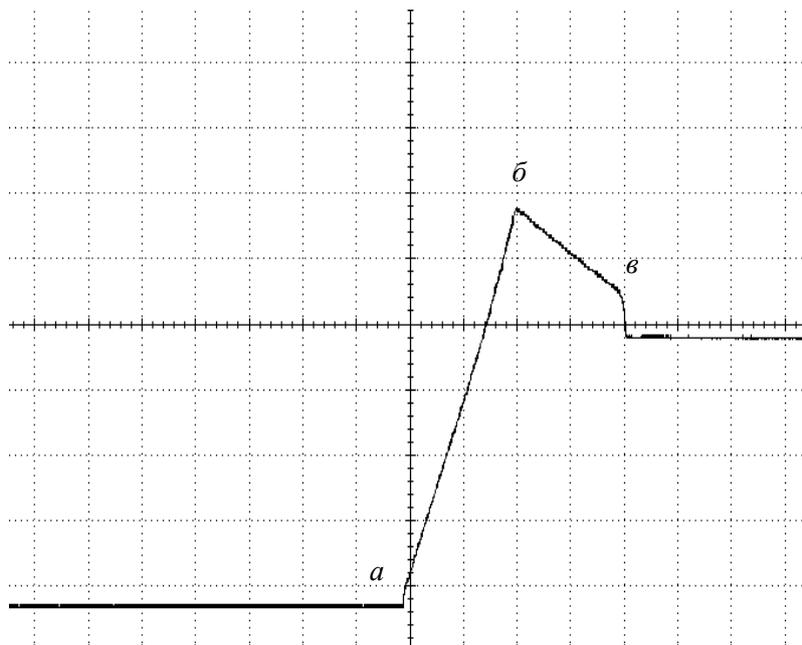


Рис. 7. Выходной сигнал усилителя Z сканера при классическом подводе (масштаб оси Y 20 В/дел, оси X 2 с/дел)

Библиографические ссылки

1. Tersoff J. and Hamann D. R. Theory and application for scanning tunneling microscope // Phys. Rev. Lett. Vol. 50, pp. 1998-2001 (1983).

2. Tersoff J. and Hamann D. R. Theory of the scanning tunneling microscope // Phys. Rev. B, vol. 31 (2), 805-813 (1985).

3. Pong W.-T., Durkan C. A review and outlook for an anomaly of scanning tunnelling microscopy (STM): superlattices on graphite, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 38, pp. R329-R355, 2005.

4. Simons J. G. Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes separated by a thin insulating film // J. Appl. Phys., 34, 1793 (1963).

5. Simons J. G. Electric tunnel effect between dissimilar electrodes separated by a thin insulating film // J. Appl. Phys., 34, 2581 (1963).

6. Неволин В. К. Зондовые нанотехнологии в электронике. М. : Техносфера, 2005. 152 с.

7. Миронов В. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М. : Техносфера, 2004. 143 с.

8. Рыков С. А. Сканирующая зондовая микроскопия полупроводниковых материалов. СПб. : Наука, 2001. 53 с.

9. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. 2-е изд., испр. и доп. М. : Наука-Физматлит, 2007. 416 с.

10. Сканирующая туннельная микроскопия фуллеренов на поверхности металлов и полупроводников / Р. З. Бахтизин, Т. Хашицуме, Ш.-Д. Вонг, Т. Сакурай // УФН. 1997. Т. 167. № 3. С. 289–307.

11. Бенда А. Ф., Поташиников П. Ф. Материалы нанотехнологий в полиграфии. Ч. 4. Сканирующая зондовая микроскопия и другие методы нанодиагностики запечатываемых материалов : учеб. пособие. М. : МГУП имени Ивана Федорова, 2014. 136 с.

12. Трояновский А. М., Roditchev D. Компактный 3D-нанопозиционер сканирующего туннельного микроскопа, работающий при температурах 4.2–300 К // ПТЭ. 2012. № 6. С. 110–116.

13. Mininni; Paul I, Osborne; Jason R., Young; James M., Meyer; Charles R. Method and

apparatus for rapid automatic engagement of a probe // US Pat 7665349 February 23, 2010.

14. Пат. 2497134 Российская Федерация, МПК G01Q10/00. Способ подвода зонда к образцу для сканирующего зондового микроскопа / Маловичко И. М. ; заявл. 05.12.2011.

15. Гуляев П. В. Низковольтный инерционный пьезоэлектрический привод вращательно-поступательного типа // Электротехника. 2014. № 7. С. 12–16.

16. Высокоточный инерционный пьезоэлектрический привод вращательно-поступательного типа / П. В. Гуляев, Ю. К. Шелковников, А. В. Тюриков, Н. И. Осипов // Электротехника. 2010. № 10. С. 8–11.

17. Формирование наноперемещений пьезоэлектрическим осциллятором и кинематической парой вращения / А. М. Липанов, П. В. Гуляев, Е. Ю. Шелковников и др. // Письма в Журнал технической физики. 2011. Т. 37. № 15. С. 55–61.

18. Гуляев П. В. Особенности применения схем замещения при проектировании инерционных пьезоэлектрических приводов // Электротехника. 2011. № 10. С. 8–13.

19. Гуляев П. В., Шелковников Е. Ю., Тюриков А. В. Влияние нагрузки на переходные процессы в инерционных пьезоэлектрических приводах вращательно-поступательного типа // Ползуновский вестник. 2013. № 2. С. 102–105.

20. Гуляев П. В., Шелковников Ю. К., Тюриков А. В. Дополнительные элементы управления инерционными пьезоэлектрическими приводами наноперемещений // Ползуновский вестник. 2014. № 2. С. 223–226.

21. Автоматизация процесса сближения зондирующей иглы и образца в электрохимическом туннельном микроскопе / П. В. Гуляев, Н. И. Осипов, М. Р. Гафаров и др. // Ползуновский вестник. 2011. № 3-1. С. 200–203.

22. А. С. 1616490 СССР, МПК H02 N 2/00 H01 L 41/09. Пьезоэлектрическое устройство инерционного перемещения объекта / А. О. Голубок и др.

23. А. С. 1537088 СССР, МПК H 01 L 41/08 H 02 N 11/00. Устройство для микроперемещений объекта / Д. Г. Волгунов, А. А. Гудков, В. Л. Миронов.

24. А. С. 1520609 СССР, МПК H 01 J37/285. Туннельный микроскоп / С. М. Войтенко, А. О. Голубок и др.

25. А. С. 1797149 СССР, МПК H 01 J37/285. Сканирующий туннельный микроскоп / В. С. Эдельман и др.

26. Сканирующий туннельный микроскоп с большим полем зрения, совместимый с растро-

вым электронным микроскопом / А. П. Володин, Г. А. Степанян, М. С. Хайкин, В. С. Эдельман // ПТЭ. 1989. № 5. С. 185–187.

27. Svensson K., Althoff F., Olin H. A compact inertial slider STM // Meas. Sci. Technol. 1997. Vol. 8. P. 1360–1362.

28. Pohl D. W. Sawtooth Nanometer Slider: A versatile low voltage piezoelectric translation device // Surf.Sci. 1987. Vol. 181. P. 174–175.

References

1. Tersoff J. and Hamann D. R. Theory and application for scanning tunneling microscope. Phys. Rev. Lett. Vol. 50, pp. 1998-2001 (1983).

2. Tersoff J. and Hamann D. R. Theory of the scanning tunneling microscope. Phys. Rev. B, vol. 31 (2), 805-813 (1985).

3. Pong W.-T., Durkan C. A review and outlook for an anomaly of scanning tunnelling microscopy (STM): superlattices on graphite, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 38, pp. R329-R355, 2005.

4. Simons J. G. Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes separated by a thin insulating film. J. Appl. Phys., 34, 1793 (1963).

5. Simons J. G. Electric tunnel effect between dissimilar electrodes separated by a thin insulating film. J. Appl. Phys., 34, 2581 (1963).

6. Nevolin V. K. (2005). *Zondovye nanotekhnologii v elektronike* [Probe nanotechnology in electronics]. Moscow: Tekhnosfera, 152 p. (in Russ.).

7. Mironov V. (2004). *Osnovy skaniruyushchei zondovoi mikroskopii* [Basics of scanning probe microscopy]. Moscow: Tekhnosfera, 143 p. (in Russ.).

8. Rykov S. A. (2001). *Skaniruyushchaya zondovaya mikroskopiya poluprovodnikovykh materialov* [Scanning probe microscopy of semiconductor materials]. St. Petersburg: Nauka, 53 p. (in Russ.).

9. Gusev A. I. (2007). *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies]. Moscow: Nauka-Fizmatlit, 416 p. (in Russ.).

10. Bakhtizin R. Z., Khashitsume T., Vong Sh.-D., Sakurai T. (1997). *UFN* [Physics-USpekhi], vol. 167, no. 3, pp. 289-307 (in Russ.).

11. Benda A. F., Potashnikov P. F. (2014). *Materialy nanotekhnologii v poligrafii* [Materials of nanotechnology in printing]. Moscow: MGUP imeni Ivana Fedorova, 136 p. (in Russ.).

12. Troyanovskii A. M., Roditchev D. (2012). *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Devices and experimental equipment], no. 6, pp. 110-116 (in Russ.).

13. Mininni; Paul I, Osborne; Jason R., Young; James M., Meyer; Charles R. Method and apparatus for rapid automatic engagement of a probe. US Pat 7665349 February 23, 2010.

14. Malovichko I. M. Patent RU 2497134, 05.12.2011.
15. Gulyaev P. V. (2014). *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], no. 7, pp. 12-16 (in Russ.).
16. Gulyaev P. V., Shelkovnikov Yu. K., Tyurikov A. V., Osipov N. I. (2010). *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], no. 10, pp. 8-11 (in Russ.).
17. Lipanov A. M., Gulyaev P. V., Shelkovnikov E. Yu. (2011). *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki* [Letters to the Journal of Technical Physics], vol. 37, no. 15, pp. 55-61 (in Russ.).
18. Gulyaev P. V. (2011). *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], no. 10, pp. 8-13 (in Russ.).
19. Gulyaev P. V., Shelkovnikov E. Yu., Tyurikov A. V. (2013). *Polzunovskii vestnik* [The Polzunovsky Herald], no. 2, pp. 102-105 (in Russ.).
20. Gulyaev P. V., Shelkovnikov E. Yu., Tyurikov A. V. (2014). *Polzunovskii vestnik* [The Polzunovsky Herald], no. 2, pp. 223-226 (in Russ.).
21. Gulyaev P. V., Osipov N. I., Gafarov M. R. (2011). *Polzunovskii vestnik* [The Polzunovsky Herald], no. 3-1, pp. 200-203 (in Russ.).
22. Golubok A. O. i dr. *P'ezoelektricheskoe ustroistvo inertsiionnogo peremeshcheniya ob"ekta* [Piezoelectric device of inertial displacement of an object]. Author's license no. 1616490 CCCP, МПК H02 N 2/00 H01 L 41/09 (in Russ.).
23. Volgunov D. G., Gudkov A. A., Mironov V. L. *Ustroistvo dlya mikroperemeshchenii ob"ekta* [Device for object micro-displacement]. Author's license no. 1537088 CCCP, МПК H 01 L 41/08 H 02 N 11/00 (in Russ.).
24. Voitenko S. M., Golubok A. O. i dr. *Tunnel'nyi mikroskop* [Tunneling Microscope]. Author's license no. 1520609 CCCP, МПК H 01 J37/285 (in Russ.).
25. Edel'man V. S. i dr. *Skanirovuyushchii tunnel'nyi mikroskop* [Scanning tunneling microscope]. Author's license no. 1797149 CCCP, МПК H 01 J37/285 (in Russ.).
26. Volodin A. P., Stepanyan G. A., Khaikin M. S., Edel'man V. S. (1989). *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Devices and experimental equipment], no. 5, pp. 185-187 (in Russ.).
27. Svensson K., Althoff F., Olin H. A compact inertial slider STM. *Meas. Sci. Technol.* 1997. Vol.8. P. 1360-1362.
28. Pohl D. W. Sawtooth Nanometer Slider: A versatile low voltage piezoelectric translation device. *Surf.Sci.* 1987. Vol. 181. P. 174-175.

Features of the Application of Approach Actuators when Using Tunneling Microscope for Technological Surface Control

P. V. Gulyaev, PhD in Engineering, Senior researcher, Mechanics Institute UdmFRC UB RAS, Izhevsk, Russia
Yu. K. Shelkovnikov, DSc in Engineering, Prof., Mechanics Institute UdmFRC UB RAS, Izhevsk, Russia
A. I. Kirillov, Junior researcher, Institute of Mechanics UdmFRC UB RAS, Izhevsk, Russia
K. S. Ermolin, Junior researcher, Institute of Mechanics UdmFRC UB RAS, Izhevsk, Russia

The paper considers the usage of stepper piezoelectric actuators in the conditions of intensification of tip-sample approach in the scanning tunneling microscope, intended for sample surface control. It is shown that the alternate activation and deactivation of the approach actuator and the tunneling microscope feedback allows: to use the relatively high speeds of the stepper piezoelectric actuator, to keep the probe tip safe during the approach and to increase the utilization factor of the feedback. Furthermore, it was found that switching off the actuator allows to reduce the feedback noise level. The design of a mechanical coupling with a sample holder is described, which allows actuator movable part to contact with the holder and to break the mechanical connection after the approach is completed to eliminate the influence of thermal drifts. The main control algorithm for the approach actuator is described, consisting of repetitive procedures: generation of control pulses for stepper piezoelectric actuator; feedback loop switching on and check of tunneling current presence. Features of the approach control algorithm in the final stage are presented, which allows to break the mechanical connection of actuator movable part and the sample holder and to keep the scanner in the middle of the dynamic range.

Keywords: scanning tunneling microscope, stepper piezoelectric actuators, probe tip, digital feedback, precision movements.

Получено: 18.05.18