

## Локальная трибоэлектризация поверхности *n*-GaAs с помощью зонда атомно-силового микроскопа

© П.Н. Брунков<sup>¶</sup>, В.В. Гончаров, М.Э. Рудинский, А.А. Гуткин, Н.Ю. Гордеев, В.М. Лантратов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, Р.В. Соколов, С.Г. Конников

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 24 января 2013 г. Принята к печати 29 января 2013 г.)

С помощью метода сканирующей кельвин-зондовой микроскопии показано, что при взаимодействии зонда атомно-силового микроскопа с поверхностью *n*-GaAs наблюдается эффект трибоэлектризации. Знак изменения потенциала указывает на то, что поверхность образца после трибоэлектризации становится заряженной более отрицательно. Обнаруженные закономерности этого эффекта качественно могут быть объяснены термически активированной генерацией точечных дефектов в приповерхностных слоях образца, деформированных из-за взаимодействия с зондом.

Трибоэлектрический эффект, т.е. изменение электрического потенциала поверхности твердого тела при трении его о поверхность другого твердого тела, известен давно, хотя природа его во многих случаях не совсем ясна (см., например, обзор [1]). Относительно недавно было показано, что применение сканирующего атомно-силового микроскопа (АСМ) является мощным средством для создания и исследования трибоэлектрических явлений в нанометровом диапазоне [2–9]. С помощью метода электростатической силовой микроскопии (ЭСМ) было впервые установлено, что статический контакт зонда с металлическим покрытием с поверхностью диэлектрика без приложения напряжения смещения приводит к формированию на этой поверхности локализованного заряда [2]. Недавние трибологические исследования при непрерывном сканировании различных поверхностей твердых тел при малых нагрузках на зонд атомно-силового микроскопа показали, что перед появлением изменений топографии поверхности, связанных с механическим разрушением, наблюдается локальная модификация потенциала поверхности в области сканирования, измеряемая с помощью метода сканирующей кельвин-зондовой микроскопии (СКЗМ) [3–6]. В настоящее время наблюдаемое явление локальной трибоэлектризации не имеет однозначного физического объяснения. С одной стороны, оно может быть связано с изменением заряда на поверхности, вызванным контактной разностью потенциалов, возникающей из-за разности работ выхода материалов зонда и поверхности [5,6]. С другой стороны, изменение величины поверхностного потенциала может быть обусловлено локальной модификацией работы выхода исследуемой поверхности, которая чувствительна как к структурной перестройке атомов в приповерхностных слоях, так и к появлению новых электронных поверхностных состояний [3,4,8,9].

В настоящей работе сообщается об изменении потенциала поверхности *n*-GaAs под влиянием контакта с движущимся по поверхности зондом АСМ. Образцы для исследования представляли собой эпитаксиальные

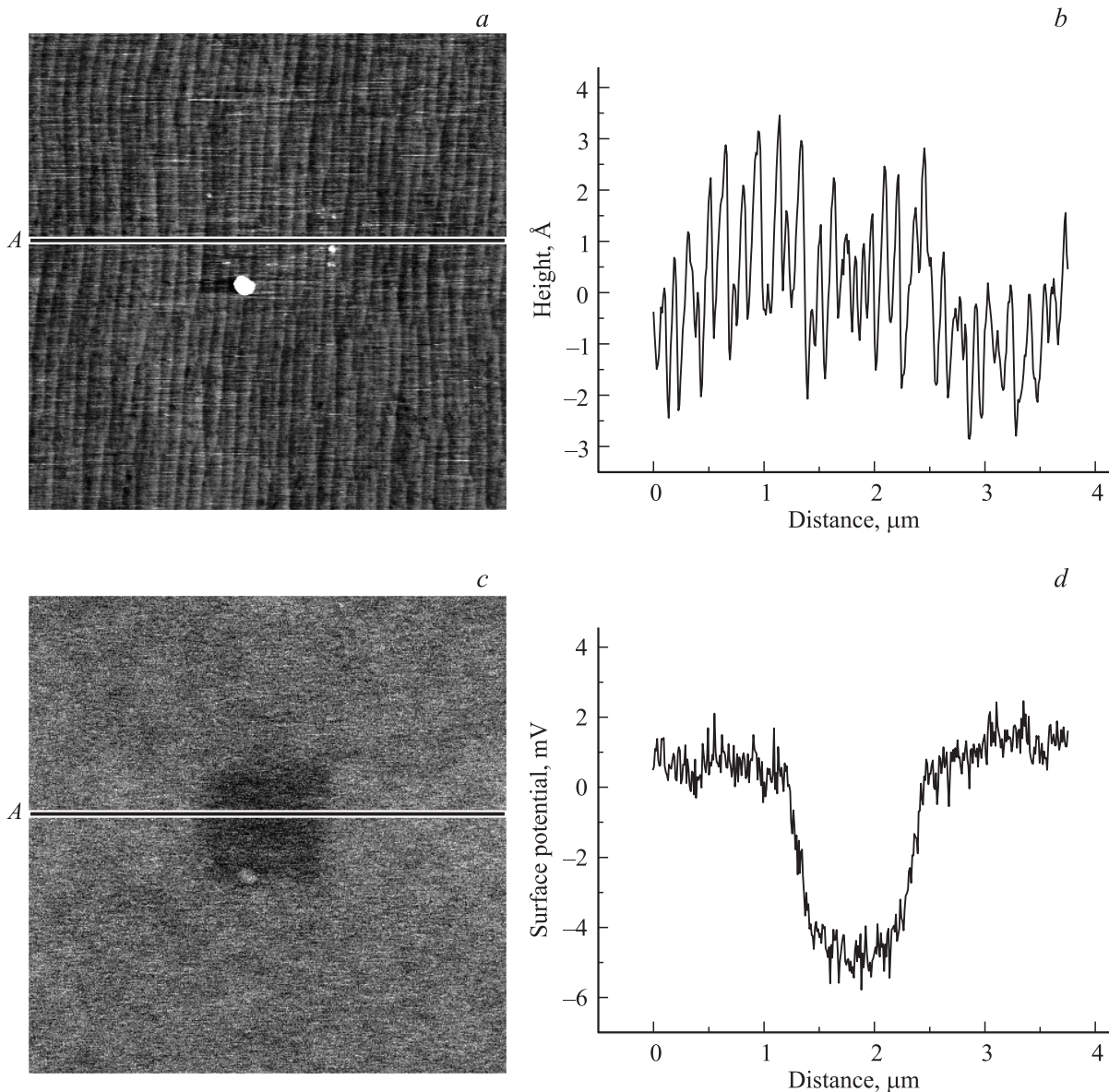
пленки *n*-GaAs толщиной  $\sim 0.5$  мкм, с концентрацией электронов  $N_d = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , выращенные методом металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ) на подложке *n*-GaAs. Поверхность образца представляла собой плоскость (001) и была атомарно-гладкой.

Для проведения трибоэлектризации поверхности образца, а также для топографических измерений и измерения распределения потенциала поверхности использовался зонд MESP7, покрытый слоем Co/Cr, с радиусом закругления конца 25 нм [10]. Жесткость кантилевера зонда была на уровне 3 Н/м [10].

Для реализации трибоэлектрического эффекта использовалась как полуконтактная, так и контактная моды сканирования поверхности. Трибоэлектризация и измерения параметров поверхности образца проводились на воздухе при комнатной температуре и влажности  $< 20\%$ . В процессе трибоэлектризации поверхности эпитаксиальной пленки *n*-GaAs зонд и образец были заземлены. Для измерений распределения потенциала использовался двухпроходный метод сканирующей кельвин-зондовой микроскопии (СКЗМ) [11,12].

На рисунке, *a–d* представлены топография и распределение потенциала поверхности *n*-GaAs, полученные после однократного сканирования участка с размерами  $1 \times 1$  мкм зондом, прижатым к поверхности с силой  $\sim 100$  нН. На поверхности эпитаксиального слоя *n*-GaAs видна сетка атомных ступеней, свидетельствующая о высоком кристаллическом совершенстве исследуемых структур (рисунок, *a, b*). Как видно из рисунка, *c, d*, однократное сканирование центральной области образца площадью  $1 \times 1$  мкм привело к падению потенциала поверхности в этой области на величину  $\sim 6$  мВ. Знак изменения потенциала указывает на то, что поверхность образца после трибоэлектризации становится заряженной более отрицательно. Величина уменьшения поверхностного потенциала, полученная при трибоэлектризации различных образцов в тех же условиях, лежала в диапазоне 3–8 мВ. Экспериментально было установлено, что трибоэлектризация поверхности *n*-GaAs в контактной моде АСМ наблюдалась при скорости

<sup>¶</sup> E-mail: brunkov@mail.ioffe.ru



Распределение рельефа и электростатического потенциала по поверхности образца  $n$ -GaAs после трибоэлектризации центрального участка поверхности площадью  $1 \times 1$  мкм. Площадь сканирования  $4 \times 4$  мкм. *a* — топографическое АСМ-изображение образца, *b* — профиль топографического АСМ-изображения образца вдоль линии *A*, *c* — СКЗМ-изображение распределения потенциала, *d* — профиль потенциала вдоль линии *A*.

сканирования зонда АСМ  $< 4$  мкм/с. При более высоких скоростях сканирования эффект трибоэлектризации поверхности  $n$ -GaAs не наблюдался. Для предотвращения модификации поверхностного потенциала в процессе контрольных измерений именно при таких скоростях и проводились измерения методом СКЗМ.

Подобные изменения потенциала наблюдались также после трибоэлектризации при медленном сканировании образца в полуконтактном режиме АСМ.

Для исследования стабильности изменения потенциала поверхности  $n$ -GaAs был проведен отжиг образца в реакторе установки МОГФЭ при температуре  $700^\circ\text{C}$  в потоке высокочистого водорода в течение 10 мин.

Отжиг проводился при небольшом парциальном давлении арсина для предотвращения коррозии поверхности. Установлено, что изменение потенциала на модифицированной поверхности после отжига сохранялось, хотя и уменьшалось по абсолютной величине. Это свидетельствует о том, что основная часть изменения потенциала поверхности связана не с формированием окисла при взаимодействии зонда с поверхностью, а с образованием термически стабильных дефектов.

Как показано в ряде работ по симуляции на атомном уровне движения зонда АСМ по поверхности кристалла [13–15], этот процесс сопровождается возникновением в приповерхностных слоях твердого тела дефектов,

обусловленных перемещением в эти слои атомов зонда и образованием собственных межузельных атомов или других более сложных дефектов. Эти дефекты создают дополнительные электронные состояния, которые можно рассматривать как поверхностные состояния. Если эти состояния расположены ниже исходного положения поверхностного уровня Ферми в *n*-GaAs, на них локализируются электроны, что и приводит к появлению дополнительного отрицательного заряда на поверхности и уменьшению ее потенциала (увеличению поверхностного потенциального барьера для электронов в объеме кристалла).

Решая уравнение Пуассона для обедненного слоя, существующего на поверхности *n*-GaAs, в приближении полного истощения, можно связать величину этого изменения потенциала  $\Delta U_S$  с величиной плотности дополнительного избыточного заряда  $\Delta Q_S$ . В образцах *n*-GaAs исходное падение потенциала на приповерхностном обедненном слое  $U_S$  обычно составляет 0.6–0.9 В [16,17], т.е. намного больше, чем  $\Delta U_S$ . Тогда, полагая, что распределение мелких доноров по глубине образца в пределах ширины приповерхностного обедненного слоя однородно, получим

$$\Delta Q_S = \frac{\Delta U_S \sqrt{\varepsilon q N_d}}{\sqrt{8\pi U_S}},$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость GaAs,  $q$  — заряд электрона.

Подставляя в это выражение средние величины  $\Delta U_S \approx 5.5$  мВ и  $U_S \approx 0.75$  В, получим  $\Delta Q_S \approx 8 \cdot 10^9 q \text{ см}^{-2}$ , т.е. плотность избыточного заряда соответствует плотности вновь созданных заполненных состояний  $8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ . Для того чтобы оценить полную плотность отрицательно заряженных состояний, созданных в процессе трибоэлектризации, необходимо учесть, что наблюдаемое понижение поверхностного потенциала означает увеличение на  $q\Delta U_S$  энергетического расстояния между дном зоны проводимости и уровнем Ферми на поверхности и соответственно опустошение части исходно существовавших поверхностных состояний. Это уменьшение поверхностного отрицательного заряда должно быть скомпенсировано зарядом на состояниях, вновь созданных ниже нового уровня Ферми. Согласно данным [18], исходная плотность поверхностных состояний вблизи уровня Ферми на границе воздух–поверхность (001) для арсенида галлия, полученного молекулярно-пучковой эпитаксией, составляет  $2.4 \cdot 10^{11} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ . В этом случае для приведенных средних значений полная плотность заряженных отрицательно состояний, введенных в приповерхностный слой в процессе трибоэлектризации, составляет  $\sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$ .

Отсутствие изменения поверхностного потенциала в случае быстрого сканирования поверхности образца зондом можно объяснить, если учесть, что процесс приповерхностного дефектообразования является термически активированным и имеет конечную скорость. Взаимодей-

ствие зонда АСМ с поверхностью твердого тела приводит к деформации атомных связей в поверхностных слоях образца. При этом происходит понижение потенциального барьера, препятствующего перемещению атомов, и, следовательно, увеличение скоростей термически активируемых процессов создания различных типов точечных дефектов. Если время, в течение которого при взаимодействии с зондом АСМ определенный участок приповерхностной области образца находится в сильно деформированном состоянии, достаточно велико, то количество вновь образующихся дефектов в ней может заметно возрасти, что и приведет к изменению потенциала поверхности. Если этот промежуток времени мал, что имеет место при быстром сканировании зонда АСМ по поверхности, число вновь возникших дефектов мало и изменение потенциала незаметно.

Таким образом, показано, что при взаимодействии зонда АСМ с поверхностью *n*-GaAs наблюдается эффект трибоэлектризации. Обнаруженные закономерности этого эффекта качественно могут быть объяснены термически активированной генерацией точечных дефектов в приповерхностных слоях образца, деформированных из-за взаимодействия с зондом.

Работа выполнена с использованием оборудования регионального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ при поддержке грантов РФФИ № 10-02-00852-а и 11-02-12215-офи-м.

## Список литературы

- [1] D.J. Lacks, R.M. Sankaran. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44**, 453 001 (2011).
- [2] B.D. Terris, J.E. Stern, D. Rugar, H.J. Mamin. *Phys. Rev. Lett.*, **63**, 2669 (1989).
- [3] D. DeVecchio, B. Bhushan. *Rev. Sci. Instrum.*, **69**, 3618 (1998).
- [4] B. Bhushan, A.V. Goldade. *Wear*, **244**, 104 (2000).
- [5] J.Y. Son, G. Lee. *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 173 105 (2008).
- [6] H. Sun, H. Chu, J. Wang, L. Ding, Y. Li. *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 083 112 (2010).
- [7] J. Krim, D.H. Solina, R. Chiarello. *Phys. Rev. Lett.*, **66**, 181 (1991).
- [8] B. Bhushan, J.N. Israelachvili, U. Landman. *Nature*, **374**, 607 (1994).
- [9] *Handbook of Micro/Nanotribology*, ed. by B. Bhushan (CRC, Boca Raton, Florida, 1995).
- [10] <http://www.bruckerafimprobes.com>
- [11] Y. Martin, D.W. Abraham, H.K. Wickramasinghe. *Appl. Phys. Lett.*, **52**, 1103 (1988).
- [12] M. Nonnenmacher, M.P. O’Boyle, H.K. Wickramasinghe. *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 2921 (1991).
- [13] A.I. Livshits, A.L. Shluger. *Phys. Rev. B*, **56**, 12 482 (1997).
- [14] U. Landman, W.D. Luetke, M.W. Ribarsky. *J. Vacuum Sci. Technol. A*, **7**, 2829 (1989).
- [15] U. Landman, W.D. Luetke, E.M. Ringer. *Wear*, **153**, 3 (1992).
- [16] T.-C. Chang, R. Ludeke, M. Aono, G. Landgren, F. J. Himpsel, D.E. Eastman. *Phys. Rev. B*, **27**, 4770 (1983).

- [17] G.S. Chang, W.C. Hwang, Y.C. Wang, Z.P. Yang, J.S. Hwang. J. Appl. Phys., **86**, 1765 (1999).
- [18] J.S. Hwang, C.C. Chang, M.F. Chen, C.C. Chen, K.I. Lin, F.O. Chang. J. Appl. Phys., **94**, 348 (2003).

*Редактор Л.В. Шаронова*

### **Local triboelectrization of *n*-GaAs surface using the tip of atomic-force microscope**

*P.N. Brunkov, V.V. Goncharov, M.E. Rudinsky,  
A.A. Gutkin, N.Yu. Gordeev, V.M. Lantratov,  
N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, R.V. Sokolov,  
S.G. Konnikov*

loffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** With the help of Kelvin-probe-microscopy it is shown that the interaction of the tip of atomic-force microscope with the surface of *n*-GaAs epitaxial layers results in triboelectrization phenomena. The sign of the potential change indicates that the sample surface after triboelectrification becomes more negative. The observed peculiarities of the phenomena can be explained by thermally activated generation of point defects close to sample surface due to deformation caused by the tip.