

Обратимая электрохимическая модификация поверхности полупроводников зондом атомно-силового микроскопа

© А.С. Кожухов^{1,2}, Д.В. Щеглов¹, А.В. Латышев¹

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова
Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

E-mail: antonkozuhkov@yandex.ru

(Получена 27 октября 2015 г. Принята к печати 26 сентября 2016 г.)

Предложена и обоснована методика обратимого изменения свойств поверхности зондом атомно-силового микроскопа, когда при локальном изменении поверхностного потенциала образца под зондом атомно-силового микроскопа не происходит заметных механических или топографических изменений. На основе предложенной методики установлена возможность контролируемого относительного изменения омического сопротивления канала в мосте Холла в пределах 20–25%.

DOI: 10.21883/FTR.2017.04.44333.8089

1. Введение

Модификация поверхности посредством зонда атомно-силового микроскопа (АСМ) является удобным методом формирования структур нанометрового масштаба на поверхности полупроводников [1,2]. В отличие от электронной литографии [3] АСМ литография, обладая сравнимым разрешением (до 10 нм) [4–6], оказывает значительно меньшее воздействие на электронные свойства приповерхностной области [7]. Существенным недостатком и электронно-литографических, и зондовых методов модификации поверхности является необратимость процесса, когда степень воздействия на поверхность или характерный размер уже сформированных нанообъектов не могут быть изменены или скорректированы в дальнейшем.

На основе анализа развития и применения спектроскопических методик АСМ [8–12] в работе предлагается изучение воздействия зонда АСМ на электронные свойства поверхности, что позволило бы обосновать возможность обратимой электрохимической модификации поверхности.

2. Кельвиновская сканирующая зондовая микроскопия

Регистрация изменения электронных свойств поверхности [13–16] осуществляется двухпроходной методикой АСМ, называемой кельвиновской сканирующей зондовой микроскопией (КСЗМ) [17]. В первом проходе регистрируется рельеф поверхности полуконтактным методом АСМ. Во втором проходе зонд АСМ вертикально смещается на некоторое задаваемое расстояние 1–1000 нм от уже полученного рельефа, при этом на зонд подается напряжение с постоянной U_0 и переменной $U_1 \sin(\omega t)$ составляющими. При представлении си-

стемы зонд-поверхность как плоский конденсатор энергии такой системы равна $E = \frac{CU^2}{2}$, где C — емкость системы. При этом сила, с которой зонд взаимодействует с поверхностью, равна $F = -\frac{\partial E}{\partial Z} = -\frac{1}{2} U^2 \frac{\partial C}{\partial Z}$ [18]. Таким образом, после интегрирования и выделения гармоник сила, действующая между зондом и поверхностью на частоте возбуждающего, равна

$$F_z(\omega) = [(U_0 - \varphi(x, y))U_1 \sin(\omega t)] \cdot \frac{\partial C}{\partial Z}. \quad (1)$$

Регистрация силы на первой гармонике возбуждающего сигнала дает возможность получить карту распределения контактной разности потенциалов (КРП) $\psi_s(x, y)$. Для этого в процессе сканирования необходимо изменением постоянного напряжения U_0 поддерживать равной нулю силу, действующую на кантилевер, расклевываемый переменным электрическим полем на частоте своего механического резонанса. В соответствии с (1) $F_z(\omega) \equiv 0$, если $U_0 = \varphi(x, y)$ при любых значениях возбуждающего потенциала U_1 и любых значениях производной емкости. При работе в КСЗМ частота переменного электрического поля выбирается равной резонансной частоте кантилевера [19,20].

3. Эксперимент

Для изучения возможности изменения поверхностного потенциала зондом АСМ была выбрана поверхность гетероструктуры AlGaAs/GaAs. Глубина залегания двумерного электронного газа в данной гетероструктуре составляла 15 нм.

Для проведения экспериментов в атмосферных и вакуумных условиях использовался атомно-силовой микроскоп Ntegra Aura (NT MDT) с вертикальным разрешением до 0.5 Å, который для улучшения разрешения

и воспроизводимости эксперимента помещался в изолированную от электромагнитных помех, заземленную виброшумозащитную ячейку. Все эксперименты проводились при идентичных значениях влажности и освещенности. Изменение поверхностного потенциала осуществлялось подачей напряжения на зонд микроскопа последовательно в каждой заданной точке поверхности таким образом, чтобы эти точки образовывали прямые, пересекающиеся канал в мосте Холла. Значение поданного на зонд потенциала варьировалось от -50 до 50 В. При приложении на зонд отрицательного потенциала во избежание окисления образец помещался в камеру, в которой с помощью турбомолекулярного насоса создавался вакуум 10^{-2} Торр.

Время, в течение которого зонд действовал на поверхность, соответствовало 2 с в каждой точке. После каждого воздействия на поверхность изменение поверхностного потенциала детектировалось с помощью метода КСЗМ. Приложение на зонд положительного потенциала не требовало вакуумных условий. При приложении напряжений, больших 35 В, происходило разрушение зонда. После того как поверхностный потенциал участка был изменен, измерялось сопротивление образца с помощью четырехзондового метода, и регистрировалась вольт-амперная характеристика канала моста Холла.

4. Результаты

Для определения возможности изменения потенциала поверхности в положительную сторону относительно начального значения на зонд прикладывался положительный относительно поверхности образца потенциал 25 В. На рис. 1, *a* представлено 6×6 мкм КСЗМ-изображение поверхности модифицируемого образца, в области приложения напряжения изменение поверхностного потенциала составило величину $+70$ мВ относительно среднего значения поверхностного потенциала участка. При этом изменений топографии участка поверхности, на котором осуществлялось изменение поверхностного потенциала, зафиксировано не было.

Чтобы определить возможности изменения потенциала поверхности в отрицательную сторону относительно начального значения, на зонд в вакуумных условиях прикладывался отрицательный относительно поверхности образца потенциал 25 В. На рис. 1, *b* представлено 6×6 мкм КСЗМ-изображение после изменения потенциала поверхности в вакуумных условиях. Изменение поверхностного потенциала производилось посредством вышеописанного метода. После этого поверхность сканировалась в режиме КСЗМ. В области приложения напряжения изменение потенциала составило величину -60 мВ относительно среднего значения поверхностного потенциала участка. При этом изменений топографии участка поверхности, на котором осуществлялось изменение поверхностного потенциала, также зафиксировано не было.

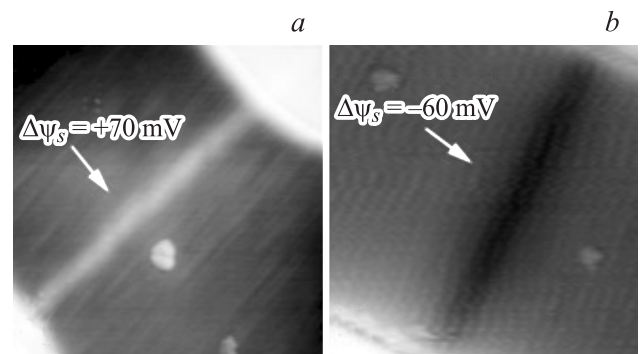


Рис. 1. *a* — 6×6 мкм КСЗМ-изображение поверхности гетероструктуры AlGaAs/GaAs после положительного изменения поверхностного потенциала; *b* — 6×6 мкм КСЗМ-изображение поверхности гетероструктуры AlGaAs/GaAs после отрицательного изменения поверхностного потенциала.

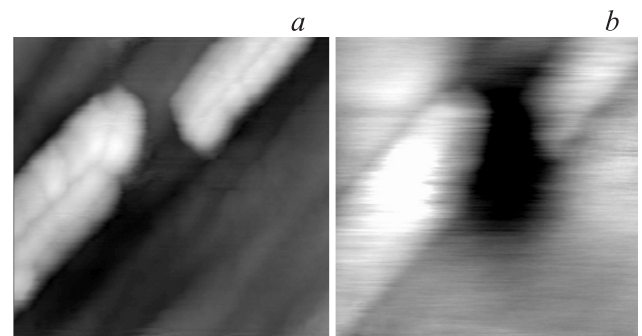


Рис. 2. *a* — 1×1 мкм КСЗМ-изображение топографии поверхности гетероструктуры AlGaAs/GaAs; *b* — 1×1 мкм КСЗМ-изображение поверхности гетероструктуры AlGaAs/GaAs.

Получением линий электрической модификации при различных потенциалах было показано, что зависимость изменения поверхностного потенциала $\Delta\psi_s$ от поданного на зонд напряжения является линейной.

Для определения влияния изменения поверхностного потенциала на проводимость моста Холла была предложена следующая последовательность экспериментальных действий. На первом этапе методом локального анодного окисления [21] канал моста Холла сужался от 5 мкм до 200 нм (рис. 2, *a*). В результате сужения общее сопротивление канала увеличивалось в 2 раза (от 90 до 180 кОм). На втором этапе посредством описанного выше метода в области между линиями окисления (рис. 2, *b*) осуществлялось отрицательное изменение поверхностного потенциала. В результате такого изменения поверхностного потенциала общее сопротивление канала моста Холла уменьшалось на 20% от 180 до 140 кОм.

Изменение проводимости канала объясняется изменением концентрации двумерного электронного газа [22] в области между линиями окисления в силу того, что при приложении внешнего отрицательного электрического поля происходит изменение зонной диаграммы,

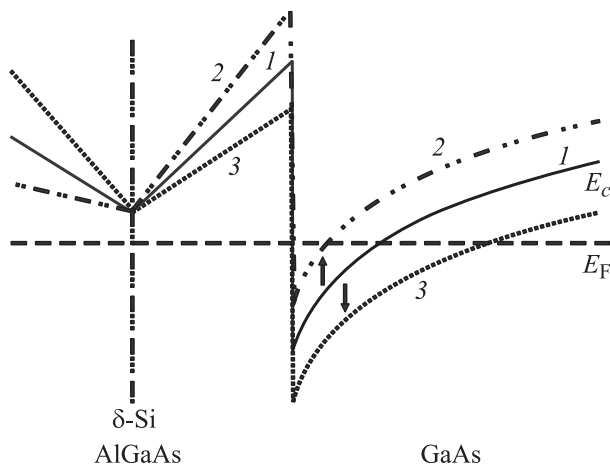


Рис. 3. Зонная диаграмма гетероструктуры AlGaAs/GaAs: 1 — начальная, 2 — после отрицательного изменения поверхностного потенциала, 3 — после положительного изменения поверхностного потенциала.

как показано на рис. 3. Поверхностная концентрация электронов составляет 10^{17} м^{-2} [23], тогда из формулы для поверхностной проводимости $\sigma_{sur} = \mu e n_{sur}$, где μ — подвижность электронов, e — заряд электрона. Можно оценить поверхностную концентрацию n_{sur} после изменения поверхностного потенциала: $1.3 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$.

5. Заключение

На основе анализа физических аспектов взаимодействия зонда атомно-силового микроскопа и поверхности в условиях приложения взаимной разности потенциалов предложена и обоснована методика электрической обратимой модификации поверхности зондом атомно-силового микроскопа, когда при локальном зондовом изменении поверхностного потенциала не происходит заметных механических или топографических изменений. Установлена возможность контролируемого относительного изменения сопротивления канала в мосте Холла в пределах 20–25% при изменении поверхностного потенциала области канала зондом АСМ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00143).

Список литературы

- [1] D.V. Sheglov, A.V. Latyshev, A.L. Aseev, AIP proceedings, Scanning Tunneling Microscopy/Spectroscopy and Related Techniques: 12th Intern. Conf., CP696 (2003).
- [2] В.А. Ткаченко, З.Д. Квон, Д.В. Щеглов, А.В. Латышев, А.И. Торопов, О.А. Ткаченко, Д.Г. Бакшеев, А.П. Асеев. Письма ЖЭТФ. **93**, 168 (2004).
- [3] W. Chen, H.J. Ahmed. Vac. Sci. Technol. B, **11**, 2519 (1999).
- [4] V.L. Mironov, O.L. Ermolaeva, S.A. Gusev, A.Yu. Klimov, V.V. Rogov, B.A. Gribkov, A.A. Fraerman, O.G. Udalov. Phys. Rev. B: Condens. Matter and Mater. Phys., **81**, 094436 (2010).

- [5] D.V. Sheglov, A.V. Prozorov, D.A. Nasimov, A.V. Latyshev, A.L. Aseev. Phys. Low-Dim. Struct., **5/6**, 239 (2002).
- [6] М.С. Дунаевский, J.J. Grob, А.Г. Забродский, R. Laiho, А.Н. Титков. ФТП, **38** (11), 1294 (2004).
- [7] V.T. Renard O.A. Tkachenko, V.A. Tkachenko, T. Ota, N. Kumada, J.C. Portal, Y. Hirayama. Phys. Rev. Lett., **100**, 186801 (2008).
- [8] U. Zaghoul, G. Papaioannou, B. Bhushan, F. Coccetti, P. Pons, R. Plana. Microelectron. Reliability, **51**, 1810 (2011).
- [9] T.R. Volk, L.V. Simagina, R.V. Gainutdinov, A.L. Tolstikhina, L.I. Ivleva. J. Appl. Phys., **108**, 042010 (2010).
- [10] A.V. Ankudinov, V.P. Evtikhiev, K.S. Ladutenko, M.G. Rastegaeva, A.N. Titkov, R. Laiho. J. Appl. Phys., **101**, 024504 (2007).
- [11] W. Melitz, J. Shen, A.C. Kummel, S. Lee. Surf. Sci. Reports, **66**, 1 (2011).
- [12] К.С. Ладутенко, А.В. Анкудинов, В.П. Евтихийев. Письма ЖТФ, **36** (5), 71 (2010).
- [13] А.В. Анкудинов, В.П. Евтихийев, К.С. Ладутенко, А.Н. Титков, R. Laiho. ФТП, **40**, 1009 (2006).
- [14] N.A. Torkhov, V.G. Bozhkov, I.V. Ivonin, V.A. Novikov. J. Surf. Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, **3**, 888 (2009).
- [15] L.C. Teague, O.D. Jurchescu, C.A. Richter, S. Subramanian, J.E. Anthony, T.N. Jackson, D.J. Gundlach, J.G. Kushmerick. Appl. Phys. Lett., **96**, 203305 (2010).
- [16] H. Ueyama, M. Ohta, Y. Sugawara, S. Morita. Jpn. J. Appl. Phys., **34**, L1086 (1995).
- [17] M. Nonnenmacher, M.P. O'Boyle, H.K. Wickramasinghe. Appl. Phys. Lett., **58**, 2921 (1991).
- [18] J. Lee, J. Kong, H. Kim, S.-O. Kang, K. Lee. Appl. Phys. Lett., **99**, 243301 (2011).
- [19] B. Moores, F. Hane, L. Eng, Z. Leonenko. Ultramicroscopy, **110**, 708 (2010).
- [20] K.L. Sorokina, A.L. Tolstikhina. Crystallogr. Reports, **49**, 476 (2004).
- [21] Д.В. Щеглов, Е.Е. Родякина, А.В. Латышев, А.Л. Асеев. Микросистемная техн., **9**, 8 (2004).
- [22] J.P. Ibbetson, P.T. Fini, K.D. Ness, S.P. Denbaars, J.S. Speck, U.K. Mishra. Appl. Phys. Lett., **77**, 250 (2000).
- [23] Д.А. Козлов, З.Д. Квон, А.К. Калагин, А. И. Торопов. ФТП, **41** (2), 186 (2007).

Редактор Г.А. Оганесян

Reversible electrochemical modification of semiconductor surface by atomic force microscopy probe

A.S. Kozhukhov^{1,2}, D.V. Sheglov¹, A.V. Latyshev¹

¹ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630090 Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State University, 630090 Novosibirsk, Russia

Abstract The technique of reversible surface modification probe of an atomic force microscope (AFM) is proposed. Local change of the surface potential of the sample under the AFM probe is carried out with no significant mechanical or topographic changes. Using proposed method allows to control relative change of the ohmic resistance of the channel in the Hall bridge of 20–25%.