

06

К вопросу о точности количественных измерений локального поверхностного потенциала

© К.С. Ладутенко, А.В. Анкудинов, В.П. Евтихийев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: fisik2000@mail.ru

Поступило в Редакцию 19 октября 2009 г.

Представлены результаты исследования области основного падения потенциала в резком GaAs $p^+ - n^+$ -переходе методами обычной и градиентной сканирующей Кельвин-зонд-микроскопии. Показаны преимущества градиентного метода при проведении количественных измерений. Предложен алгоритм программной реализации градиентного метода измерений на серийно выпускаемых атомно-силовых микроскопах. Обнаружен вклад слоя адсорбированной воды в ширину области основного падения измеряемого потенциала.

Для прямых исследований локальных распределений электростатического потенциала на поверхности образца широкое применение получил стандартный метод сканирующей Кельвин-зонд-микроскопии (СКЗМ) [1], характеризующийся высоким пространственным разрешением (вплоть до атомарного [2]). Однако для выполнения количественно точных измерений с предельным разрешением необходимо подавить паразитный емкостной вклад, связанный с конкретной конструкцией и формой зонда [3,4]. Для этого требуется минимизировать расстояние до поверхности, что, как правило, приводит к разрушению либо зонда, либо поверхности исследуемого образца.

Известное решение проблемы заключается в применении режима градиентной СКЗМ (ГСКЗМ) [5]. Обычно для таких измерений нужна существенная модернизация серийно выпускаемой установки с использованием дополнительного синхронного усилителя [5,6] и низкочастотного генератора [7].

В нашей работе для измерений профилей падения напряжения в резком $p^+ - n^+$ -переходе в режиме ГСКЗМ был использован новый подход, реализованный исключительно программными средствами.

Физические принципы, лежащие в основе ГСКЗМ, подробно описаны в работе [6]. Мы опирались на следующий факт: при приложении смещения V_{dc} между зондом и образцом происходит изменение фазы резонансных механических колебаний зонда $\Delta\phi$ (чувствительной к производной z -компоненты силы электростатического взаимодействия) на величину

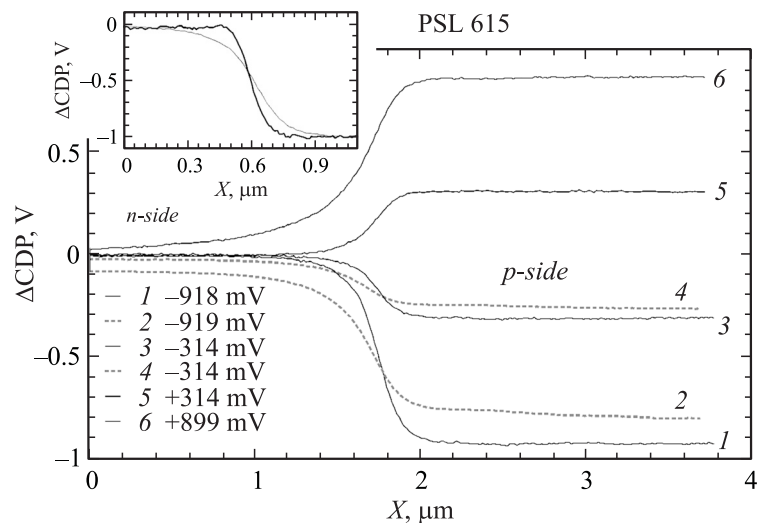
$$\Delta\phi(V_{dc}) = \frac{1}{2} \frac{Q}{k} (V_0 - V_{dc})^2 \frac{\partial^2 C}{\partial z^2},$$

где Q — добротность колебаний зонда, k — жесткость зонда, V_0 — контактная разность потенциалов (КРП) между зондом и образцом, C — емкость между зондом и образцом, z — направление колебаний зонда, перпендикулярное к плоскости образца. Другими словами, зависимость фазы от приложенного смещения имеет форму параболы, чья вершина соответствует равенству приложенного V_{dc} и КРП между зондом и образцом.

Экспериментальное измерение сигнала поверхностного потенциала в каждой точке было организовано по следующему алгоритму: вначале происходит измерение топографии в полуконтактном режиме, затем расстояние между средним положением зонда и поверхностью образца фиксируется, а амплитуда колебаний зонда уменьшается в несколько раз (микроскоп переводится в бесконтактный режим). Далее выставляется зазор между средним положением зонда и образцом („лифт“), измеряется зависимость фазы колебаний зонда от приложенного напряжения, и полученная зависимость аппроксимируется параболой по методу наименьших квадратов. Величина напряжения, соответствующая вершине параболы, и является измеренным сигналом поверхностного потенциала. Предполагая, что работа выхода зонда не меняется во время измерений, можно получить распределение потенциала по поверхности образца.

Новый программный алгоритм был реализован на атомно-силовых микроскопах (АСМ) „Солвер Про“ и „Интегра Аура“ фирмы NT-MDT [8] в управляющей программе Nova, позволяющей пользователю создавать особые режимы работы микроскопа при помощи скриптов, написанных на языке программирования Visual Basic.

Измерения проводились на поверхности скола резкого $p^+ - n^+$ -перехода, выращенного методом МOCVD при температуре 600°C (время роста p -слоя менее 30 min). Величина легирования в $n(\text{Sn})$ - и $p(\text{Zn})$ -части — $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Для того чтобы исключить влияние неизвестной,



Профили падения потенциала, полученные при комнатных условиях в режиме ГСКЗМ (сплошные линии) и СКЗМ (пунктирные). Смещение подавалось на p -сторону при заземленной n -подложке. 1–4 — обратное, 5, 6 — прямое смещение. Значения „лифта“ штатного режима СКЗМ и ГСКЗМ совпадали. На вставке показаны профили потенциала, измеренные в режиме ГСКЗМ в условиях низкого вакуума (жирная линия) и в комнатных условиях.

в общем случае, работы выхода зонда, мы использовали следующую процедуру: из профиля потенциала, измеренного поперек p – n -перехода при приложенном смещении, вычитался профиль потенциала, измеренный в том же месте на заземленном с обеих сторон образце. Использовались кремниевые зонды NSG11 без покрытия. Параметры режима ГСКЗМ были выбраны в следующих диапазонах: амплитуда механических колебаний от 20 до 60 nm, „лифт“ от 20 до 90 nm, амплитуда приложенного напряжения от 0.5 до 2 V. Характерное для этих параметров изменение фазы составляло около 20° .

Рассмотрим сначала случай обратного смещения p – n -перехода. Соответствующие профили потенциалов, измеренные в режимах СКЗМ и ГСКЗМ, представлены на рисунке, кривые 1–4. Сравнение показывает:

Падение потенциала на p – n -переходе, измеренное в режиме ГСКЗМ, равно приложенному обратному смещению с точностью до уровня шумов. СКЗМ дает значение $\sim 80\%$ от приложенного смещения.

Ширина области основного падения потенциала, измеренная между уровнями 10 и 90% от общего перепада, составляет ~ 400 nm для ГСКЗМ и более 600 nm для СКЗМ.

Профили, измеренные СКЗМ, не имеют установившегося значения вблизи области основного падения потенциала („не выходят на полку“), в частности, в области заземленного n -слоя наблюдается существенный потенциал.

Различие между результатами, полученными в режиме ГСКЗМ и СКЗМ, связано с тем, что производная z -компоненты силы электростатического взаимодействия спадает с ростом расстояния до образца быстрее, чем сама z -компонента.

Существенный паразитный вклад в СКЗМ сигнал вносят конус зонда и балка кантилевера АСМ, сглаживающие резкие перепады потенциала, а величина полезного вклада от кончика зонда сильно зависит от расстояния между зондом и поверхностью образца. Более того, измерения показывают, что величина паразитного вклада зависит от взаимного расположения зонда и образца: если кантилевер параллелен линии p - n -перехода на поверхности скола, то систематические ошибки в измерениях потенциалов на n - и p -сторонах примерно равны, в остальных случаях симметрия нарушается.

В режиме ГСКЗМ результаты измерений не зависели от геометрии эксперимента, так как в этом режиме эффективно используется только самый кончик зонда. Тем не менее, область основного падения потенциала занимает 400 nm (см. рисунок, кривые 1, 3), не увеличивается с ростом обратного смещения и оказывается значительно шире расчетной области пространственного заряда (ОПЗ). Для идеального резкого перехода $p = n = 4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ размер ОПЗ не превышает 15 nm, а уширение p - n -перехода в наших образцах за счет диффузии цинка должно составлять менее 100 nm [9]. Различие между экспериментом и оценкой может быть объяснено несовпадением хода потенциала на поверхности с ходом потенциала в объеме образца, вызванным, как мы предположили, влиянием адсорбированной пленки воды.

Для изучения влияния воды на форму профиля потенциала на поверхности мы провели эксперимент в условиях низкого вакуума (5 Pa). Оказалось, что измеренная между уровнями 10 и 90% ширина области основного падения потенциала сужается до 170 nm в режиме ГСКЗМ (см. вставку к рисунку) и слабо меняется в режиме СКЗМ. Способность

разрешать особенности потенциала малого пространственного масштаба на качественном уровне возрастает в вакуумных условиях для обоих методов (например [2,10]), но в нашем эксперименте даже предельно малые значения „лифта“ не обеспечивали количественных измерений в режиме СКЗМ.

В то же время оказалось, что в режиме ГСКЗМ измеряемая ширина области основного падения потенциала от „лифта“ практически не зависела (при амплитуде механических колебаний 20 nm и изменении „лифта“ от 20 до 90 nm ширина увеличивалась не более чем на 25 nm). Отклик ГСКЗМ на идеально резкую особенность в потенциале должен существенно зависеть от „лифта“ [4]. В нашем случае этого не наблюдается, а значит, измеряемый профиль практически совпадает с реальным ходом потенциала на поверхности. Существенное сужение области основного падения потенциала, наблюдаемое в режиме ГСКЗМ, можно объяснить следующим образом: реальная разрешающая способность ГСКЗМ меньше ширины области основного падения потенциала (170 nm) на поверхности, а в комнатных условиях пленка адсорбированной воды уширяет эту область до 400 nm. В вакууме происходит частичное испарение пленки воды, и ее влияние уменьшается. Отсутствие значимого изменения профиля падения потенциала, измеренного сразу после напуска атмосферы, подтверждает наше предположение. Следует добавить, что для восстановления точного хода потенциала в объеме образца необходимо учитывать искажения потенциала, вносимые не только слоем адсорбированной воды, но и областью обеднения вблизи поверхности полупроводника. Например, ранее было замечено, что при освещении скола диодной структуры межзонным светом происходит сужение области основного падения потенциала [11].

Рассмотрим результаты, полученные при прямом смещении образца. Профиль, измеренный в режиме ГСКЗМ при небольшом прямом смещении (+0.314 V), практически повторяет профиль при таком же обратном смещении (с учетом знака), так как в обоих случаях ток крайне мал. При увеличении прямого смещения профиль уширяется, и становится хорошо заметно расхождение между приложенным и измеренным потенциалом в p -части (несколько десятков mV при полном смещении +0.9 V). Это расхождение вызвано уменьшением величины приповерхностного изгиба зон вследствие зарядки поверхности электронами, инжектированными сквозь p - n -переход. Инжекция

дырок в n -слое приводит к аналогичному расхождению: в области заземленного n -слоя наблюдается положительный потенциал (см. кривую b на рисунке). Более детально этот вопрос был рассмотрен ранее [12].

На примере исследований p – n -перехода в режиме ГСКЗМ показана возможность точных количественных измерений в приборных структурах. Использование режима ГСКЗМ позволяет значительно улучшить пространственное разрешение (до 170 nm) и точно измерять величину потенциала в заданной области образца.

Обнаружено, что ширина области основного падения потенциала на поверхности p – n -перехода больше расчетной ширины в объеме образца. Такое расхождение обусловлено тем, что слой адсорбированной воды сглаживает скачки потенциала на поверхности p – n -перехода.

В работе предложен простой способ реализации режима градиентной сканирующей Кельвин-зонд-микроскопии, не требующий дополнительного оборудования. Он опробирован на серийно выпускаемых микроскопах „Солвер Про“ и „Интегра Аура“ фирмы NT-MDT [8]. Дополнительным преимуществом нашего способа является однопроходность — в каждой точке последовательно происходит измерение топографии и потенциала (это позволяет производить измерения даже в случае существенного дрейфа образца).

Авторы выражают благодарность В.М. Лантратову за предоставленные образцы, М.С. Дунаевскому и А.Н. Титкову за обсуждение получаемых результатов и критическое прочтение манускрипта.

Работа частично поддержана Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе „УМНИК“ (гос. контракт № 7047р/9640), а также программой президиума РАН „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“.

Список литературы

- [1] *Nonnenmacher M., O'Boyle M.P., Wickramasinghe H.K.* // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58 (25). P. 2921.
- [2] *Bocquet F., Nony L., Loppacher Ch., Glatzel Th.* // Phys. Rev. B. 2008. V. 78 (3). P. 035 410.
- [3] *Robin F., Jacobs H., Homan O. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76 (20). P. 2907.

- [4] *Colchero J., Gil A., Bare A.M.* // Phys. Rev. B. 2001. V. 64 (24). P. 245 403.
- [5] *Kitamura Sh., Iwatsuki M.* // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72 (24). P. 3154.
- [6] *Girad P., Ramonda M., Saluel D.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 2002. V. 20 (4). P. 1348.
- [7] *Zerweck U., Loppacher Ch., Otto T. et al.* // Phys. Rev. B. 2005. V. 71 (12). P. 125 424.
- [8] <http://www.ntmtd.com>. Сайт компании НТ-МДТ, производящей АСМ приборы.
- [9] *Chase M.P., Deal M.D., Plummer J.D.* // J. Appl. Phys. 1997. V. 81 (4). P. 1670.
- [10] *Дунаевский М.С., Тутков А.Н., Ларкин С.Ю.* и др. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 20. С. 80.
- [11] *Анкудинов А.В., Тутков А.Н., Ладутенко К.С.* и др. // XI Международный симпозиум „Нанопизика и наноэлектроника“. Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2007. С. 452.
- [12] *Ладутенко К.С., Анкудинов А.В., Евтихийев В.П.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 12. С. 74.