

Емкостная методика сканирующей силовой микроскопии в исследовании распределения легирующей примеси в кремнии.

Быков В. А., Лосев В.В., Саунин С.А.

Государственный научно-исследовательский институт физических проблем
им. Ф.В. Лукина, Корпорация МДТ, 103460 Москва-Зеленоград, Гос.НИИФП
тел.(095) 535-03-05, Факс (095) 535-64-10, e-mail:spm@ntmdt.zgrad.ru,
<http://www.ntmdt.ru>

В настоящее время уровень развития технологий, что в первую очередь относится к микроэлектронике, достиг субмикронного уровня, что требует применения новых методов локальной диагностики метрических параметров и физических свойств поверхности и подповерхностных слоев пластин и изделий с нанометровой точностью [1]. Для решения этих задач в последние годы все более широкое применение находят сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ). С помощью этих приборов имеется возможность осторожно “ощупывать” поверхность тел твердотельными зондами, регистрируя различные силовые поля, геометрический рельеф, тепловые поля, микротвердость, силы электростатической и электродинамической природы, оптические характеристики поверхности и ряд других [1,2,3].

Зонды для регистрации силовых рельефов и топографии – кантилевер представляет собой тонкие балки, на свободном конце которых имеется острая игла. Наибольшее распространение в настоящее время получили кремниевые кантилеверы, которые производятся из монокристаллических пластин методами групповых обработок, принятыми в микроэлектронике, что обеспечивает высокую воспроизводимость их геометрических характеристик вместе с относительной дешевизной. Длина кремниевых балок l обычно лежит в диапазоне 80 - 400 мкм, толщина $h \sim 1 - 2$ мкм, высота игл 3 - 10 мкм, а радиус кривизны менее 20 нм. Кантилеверы производства НТ-МДТ имеют конические иглы длиной 7 - 8 мкм, угол сходимости конуса 22° , радиус кривизны менее 10 нм, силовые константы 30 ± 6 Н/м и 3 ± 1 Н/м. Первая резонансная частота кантилеверов $f_R \sim \frac{l}{h^2}$ и для промышленных кантилеверов лежит в диапазоне от 20 кГц до 1 МГц. Добротность кантилеверов в вакууме достигает $2 \times 10^4 - 3 \times 10^4$, а на воздухе 200 - 300.

Для исследования полупроводников и полупроводниковых приборов в особенности интересна возможность исследования распределения неоднородностей распределения легирующих примесей наряду с топографическими измерениями геометрического рельефа. Реализация этой возможна в так называемых емкостных модах, которые могут быть реализованы как в контактной моде сканирования [4], так и бесконтактной моде при регистрации электрически индуцированного возбуждения колебания кантилевера под действием силы, пропорциональной первой производной емкости системы кантилевер - образец по расстоянию между ними. В данной статье мы рассматриваем бесконтактную емкостную моду работы СЗМ.

Как хорошо известно, энергия конденсатора емкостью C , к которому приложено напряжение U равна: $E = \frac{C \cdot U^2}{2}$. При этом сила, с которой будет

притягиваться к поверхности будет равна: $F = -\frac{\partial E}{\partial Z} = -\frac{1}{2} \cdot U^2 \cdot \frac{\partial C}{\partial Z}$. Эта сила и регистрируется в бесконтактной моде. В случае, если напряжение между образцом и кантилевером равно $U = U_0 + U_1 \times \sin(\omega t)$, сила будет равна:

$$F = -\left[\frac{1}{2} \times \left(U_0^2 + \frac{1}{2} \times U_1^2 \right) + U_0 \times U_1 \times \sin(\omega t) - \frac{1}{4} \times U_1^2 \times \cos(2\omega t) \right] \times \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (1).$$

Очевидно, что колебания кантилевера под действием этой возбуждающей силы будут максимальны, если частота возбуждающего сигнала ω будет равна либо резонансной частоте кантилевера, либо половине резонансной частоты. В случае, если частота изменения электрического поля равна резонансной частоте кантилевера возбуждающая сила, а следовательно и амплитуда колебания кантилевера, будет пропорциональна произведению:

$$A_{\omega_{U_1}=2\pi f} \sim U_0 \times U_1 \cdot \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (2).$$

Если $\omega_U = \frac{1}{2} \cdot \omega_R = \frac{1}{2} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_R)$, то максимальная амплитуда колебания кантилевера будет проявляться на второй гармонике относительно возбуждающего электрического сигнала и будет пропорциональна

$$A_{2\omega_U} \sim \frac{U_1^2}{4} \cdot \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (3).$$

Схема измерения приводится на рис.1.

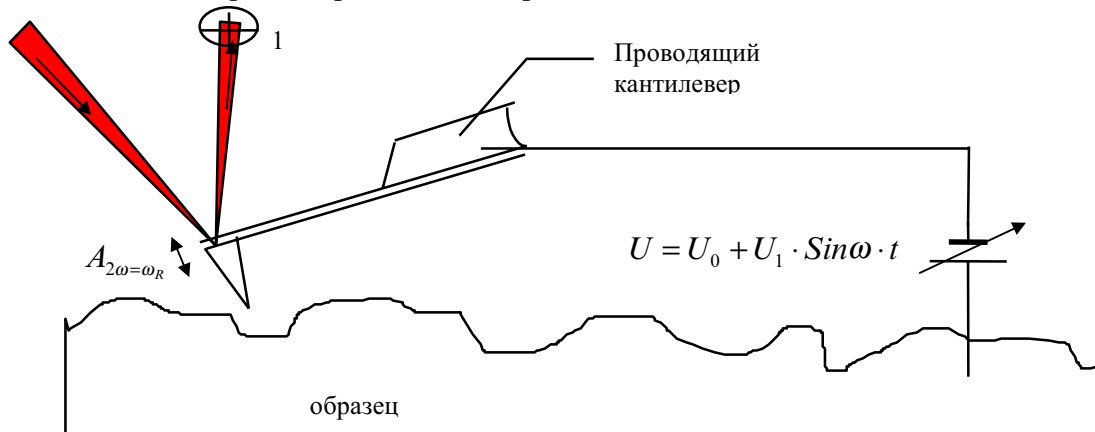


Рис.1. Схема измерения в бесконтактной емкостной моде. Амплитуда колебания кантилевера A регистрируется оптико-позиционной системой, в которой с помощью четырех секционного фотодиода (1) регистрируется интенсивность отраженного луча полупроводникового лазера, сфокусированного на отражающую поверхность кантилевера. Колебания кантилевера инициируются осцилляциями электрического поля в зазоре кантилевер - образец.

Максимальная чувствительность измерений достигается в т.н. двухпроходной резонансной моде, в которой в процессе сканирования первоначально измеряется рельеф очередной строки, а при повторном сканировании строки в бесконтактной моде измеряется амплитуда колебания кантилевера инициированная электродинамической силой (3).

Интерес представляет из себя измерение поверхностной емкости. Общая емкость системы кантилевер - образец складывается из двух емкостей, включенных последовательно - емкости зазора, зависящей от расстояния кантилевер - образец C_Z и поверхностной емкости $C_{X,Y}$, определяемой для полупроводников дебаевской

длиной экранирования и зависящей от уровня легирования. При этом в приближении плоского конденсатора ($C_Z \sim Z^{-1}$) амплитуда резонансных колебаний кантилевера, инициированная переменным электрическим полем с частотой равной половине резонансной, будет пропорциональна:

$$A_{\omega_R}(X, Y) \sim \frac{U_1^2}{4} \times \frac{\partial C}{\partial Z}(X, Y) \approx \frac{U_1^2(\omega = \frac{\omega_R}{2})}{4} \times \frac{C_{X,Y}^2}{Z \cdot C_Z \cdot \left(1 + \frac{C_{X,Y}}{C_Z}\right)^2} \quad (4)$$

и полученное в процессе сканирования изображение будет определяться распределением поверхностной емкости в случае, если

$$Z = \text{const} \text{ и } C_Z = \text{const} \quad (5).$$

Выполнение этих условий возможно, если регистрация амплитуды колебания (4) происходит в двухпроходной методике. При этом каждая строка сканируется дважды: во время первого прохода строки измеряется рельеф, а при повторном сканировании строки регистрируется амплитуда резонансных колебаний кантилевера (4). При этом второй проход осуществляется уже по известному рельефу в бесконтактном режиме, когда игла кантилевера проходит на заданном расстоянии от поверхности. Синхронно со сканированием цифро-аналоговым преобразователем осуществляется управление перемещением сканера по нормали к поверхности с использованием данных из памяти компьютера.

Возможны два варианта реализации двухпроходной методики различающиеся способом измерения рельефа. В первом варианте сканирование во время первого прохода строки осуществляется в контактном режиме, а во втором в полуконтактном или “теппинг” моде. Второй режим предпочтительнее, так как подходящим выбором амплитуды резонансных колебаний кантилевера и условий сканирования удастся более точно и с искажениями обусловленными только конечностью радиуса кривизны зонда добиться выполнения условий (5), хотя для поверхностей с грубым рельефом при $Z = \text{const}$ (Z расстояние от кончика иглы до поверхности по вертикали, измеренное в процессе первого прохода строки) C_Z не будет постоянным. Тем не менее ошибка при контактном сканировании может быть существенно больше, так как неточность выполнения условий (5) увеличивается из за капиллярного эффекта и деформации рельефа под давлением в системе игла - поверхность.

В теппинг моде также возможны искажения рельефа, обусловленные контактными взаимодействиями игла - поверхность. Степень искажения обуславливается характеристиками кантилевера (радиус кривизны зонда, жесткость) и выбором условий сканирования (скорость сканирования, сила возбуждения осцилляций, оцениваемая по амплитуде свободных колебаний кантилевера, и степени уменьшения амплитуды осцилляций кантилевера, обусловленной контактными взаимодействиями игла - подложка).

Для экспериментальной проверки возможности определения неоднородности распределения концентрации примесей в полупроводниках методами бесконтактной силовой микроскопии на приборах базирующихся на электронике и программном обеспечении компании “НТ-МДТ”, были разработаны и изготовлены специальные тестовые образцы с разными уровнями легирования.

Образцы представляли собой монокристаллические кремниевые пластины КЭФ-4.5 легированные бором посредством термодиффузии до концентрации 10^{19} . Окна легирования представляли собой линии шириной 0.66 ± 0.03 мкм с шагом 3.4

мкм. После легирования защитная маска удалялась с целью максимальной планеризации пластины.

На рис. 2 приведены топография поверхности этих образцов и поверхностное распределение амплитуды колебания кантилевера инициированное напряжением. Резонансная частота кантилевера составляла 158,4кГц, а частота электрического сигнала соответственно 79, 2 кГц.

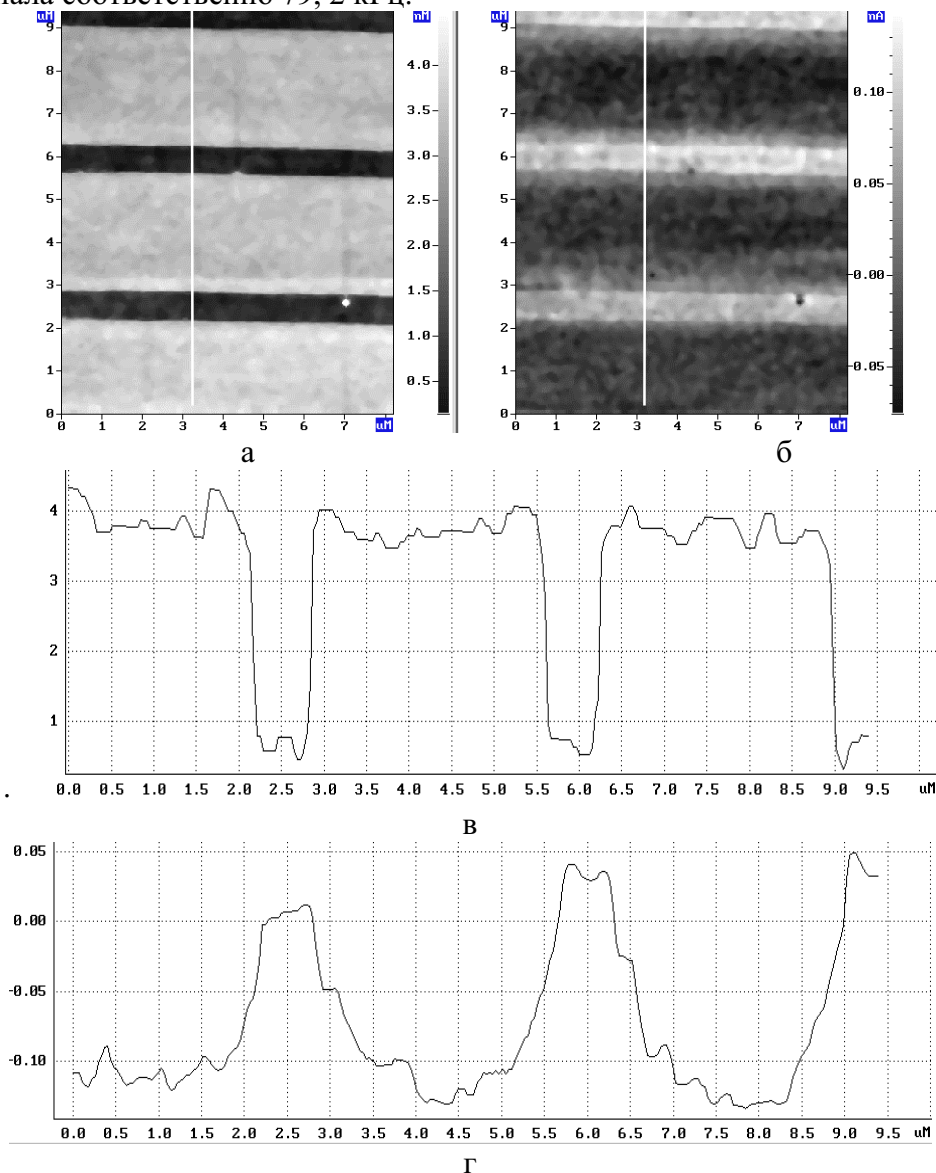


Рис.2. Топография поверхности тестовых образцов легированного кремния (а) и измеренное двухпроходной методикой изменение амплитуды резонансных колебаний зонда ($f=158,4\text{кГц}$), инициированное переменным электрическим полем с частотой равной половине резонансной ($f_0=79,2\text{кГц}$) (б). (в) и (г) профили сечений по выделенным линиям (СЗМ “СОЛВЕР-Р7-SPMLS”, НТ-МДТ)

В эксперименте использовался сканирующий зондовый микроскоп компании «НТ-МДТ» (г. Зеленоград) SOLVER P7-SPMLS, специально предназначенный для контроля качества полупроводниковых пластин диаметром до 300 мм. Для емкостной методики измерений использовались проводящие кантилеверы с треугольной балкой. Для обеспечения проводимости кантилеверы покрывались проводящим слоем W_2C .

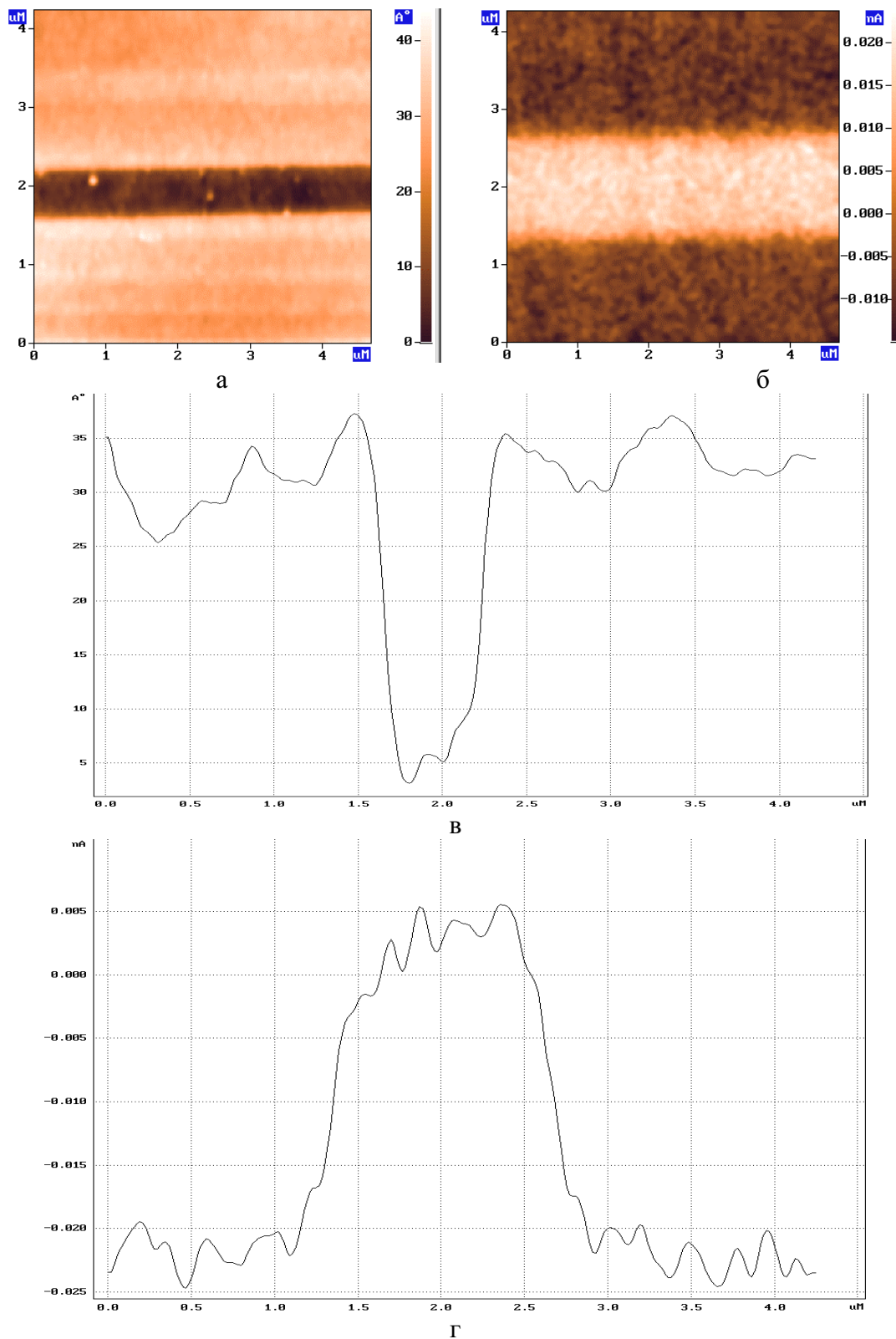


Рис.3. Топография поверхности тестовых образцов легированного кремния (а) и измеренное двухпроходной методикой изменение амплитудно-фазового контраста $A \times \sin(\varphi + \varphi_0)$ резонансных колебаний зонда ($f=471,5\text{кГц}$), инициированное переменным электрическим полем с частотой равной половине резонансной ($f_U=235,75\text{кГц}$) (б). (в) и (г) профили сечений по выделенным линиям (СЗМ “СОЛВЕР-Р7-SPMLS”, НТ-МДТ)

В соответствии с ожиданием, топографический профиль маски (рис. 2 (в)) оказывается более “узким”, чем профиль распределения неоднородности

электродинамических сил (рис.2 (г)). Участки образца с разными уровнями легирования имеют различные значения емкости $C_{x,y}$. В соответствии с (4), это приводит к неоднородности силового взаимодействия на данных участках. Как видно из сравнения профилей (рис. 2 (в) и (г)), топографические изменения коррелируют с изменением профиля электродинамических сил, что не позволяет однозначно соотносить эти изменения с изменением $C_{x,y}$. Возможно, что корреляция тонких изменений на профилях просто связана с несоблюдением приближения плоского конденсатора и с изменениями в процессе сканирования неинформативной для нас величины C_z , что также ведет к появлению контраста (4).

Наряду с регистрацией изменения амплитуды колебания кантилевера, на приборах серии СОЛВЕР и СМЕНА возможна регистрация изменения фазы колебания кантилевера и амплитудно-фазовых изменений, что позволяет более прецизионно регистрировать приповерхностные силовые поля. Используя емкостную методику ССМ, можно регистрировать распределение легирующей электроактивной примеси, от которой напрямую зависит глубина обедненного слоя, а следовательно и глубина залегания р-п. перехода. Данная методика позволяет контролировать уровень легирования в пределах $10^{15} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ с максимальным разрешением в плоскости образца до 10 нм.

В процессе изготовления интегральных микросхем технологией должны обеспечиваться строго фиксированные параметры легированных областей, и необходим точный контроль этих параметров. Так, по технологии изготовления рассмотренного выше образца глубина залегания р-п перехода составляет 1 мкм (рис.4).

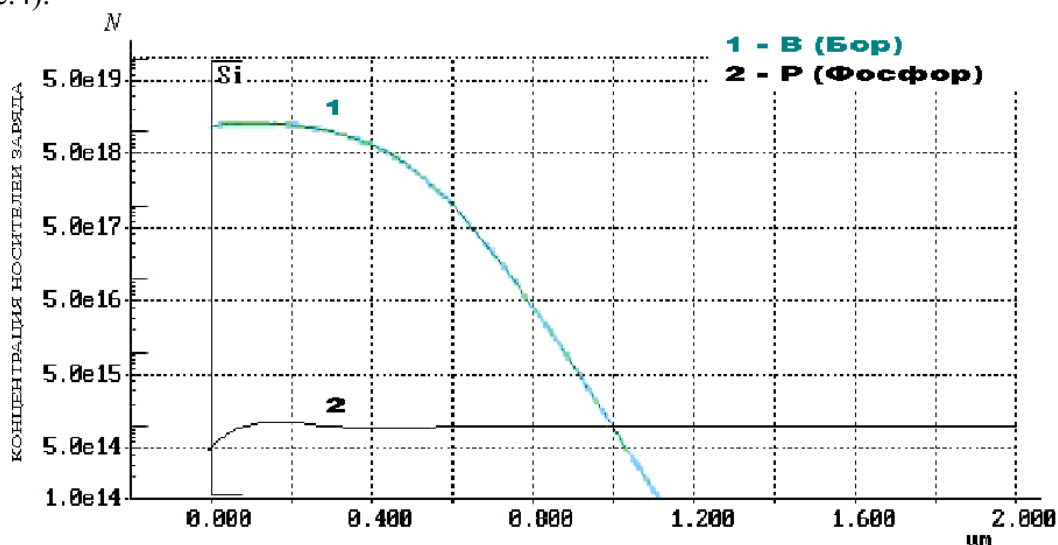


Рис.4. График распределения концентрации носителей заряда в зависимости от глубины проникновения примесных атомов бора в кремний n-типа.

Используя данные сканирования (рис.26, 3), можно видеть, что ширина растекания примеси в кремнии в латеральном направлении составляет 1 - 1,4 мкм (это значение соответствует ширине светлого участка на рисунках). Поэтому, глубина залегания р-п перехода определяется, как половина ширины растекания [5], т.е. 0,7 мкм. В этом случае, даже учитывая, что емкостная методика имеет погрешность 10%, видно, что в процессе внедрения примесных атомов бора в кремний n-типа, технология не была соблюдена полностью.

В отличие от топографического изображения, которое позволяет определять размеры с точностью до геометрических параметров кантилеверов и линейности

сканеров ($\geq 1\%$), как в латеральном, так и в нормальном направлениях к поверхности (рис.2а, 3), погрешность визуализации распределения примеси в интервале от 10^{15} - 10^{20} см⁻³ заметно больше и составляет 10%.

Литература

1. Быков В.А., Лазарев М.И., Саунин С.А.. Сканирующая зондовая микроскопия для науки и промышленности//Электроника: наука, технология, бизнес. 1997. №5. Стр.7-14.
2. Быков В.А., Лазарев М.И., Саунин С.А.. Зондовая микроскопия для биологии и медицины1//Сенсорные системы. 1998. Т.2. №1. Стр. 101-124.
3. Быков В.А., Лосев В.В., Саунин С.А.. Применение атомно-силового микроскопа для исследования поверхностей магнитных материалов/Пруды пятой всероссийской научно-технической конференции "Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники. 1998. Т.1. Стр. 102-104.
4. Henning A.K., Hochwitz T., Slinkman J. et. al.//J. Appl.Phys.1995. V.77. №5. p.1888-1896.
5. Батавин В.В., Концевой Ю.В., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. -М.: Радио и связь., 1985. -264 с.