

УДК 54.063

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АТОМНОГО СИЛОВОГО МИКРОСКОПА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ *p-n*-ПЕРЕХОДОВ

Н.Г. ЦИРКУНОВА¹, Я.А. СОЛОВЬЕВ², В.Е. БОРИСЕНКО¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки 6, 220013, Минск, Беларусь

²УП "Завод Транзистор", НПО "Интеграл"
Корженевского 16, 220108, Минск, Беларусь

Поступила в редакцию 30 декабря 2009

Показана возможность использования различных методик атомно-силовой микроскопии для исследования *p-n*-переходов. Показано влияние амплитуды колебания зонда на разрешение метода фазового контраста при получении изображения, а также влияние обработки на структуру и свойства поверхности *p-n*-переходов.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, *p-n*-переход, параметры поверхности.

Введение

Для обнаружения и исследования *p-n*-переходов обычно используют оптический контроль поверхности образца, предварительно подвергнутой анодному окислению, химическому или фотохимическому травлению, декорированию металлами [1, 2]. Все эти подходы предполагают изменение поверхностных оптических свойств исходного образца и являются разрушающими. Кроме того, каждый из них требует дополнительных временных затрат на проведение необходимой подготовки образца, а также специального оборудования и химических реагентов.

С развитием атомной силовой микроскопии появилась возможность обнаружения и исследования *p-n*-переходов при помощи зондовых методов. Преимущество использования атомного силового микроскопа (АСМ) для исследования различного рода структур определяется тем, что вертикальный предел измерений составляет 0,1 нм. Кроме того, использование различных методик позволяет в одном цикле проводить исследование ряда физических свойств поверхности наряду с ее рельефом. Наиболее распространенными для исследования *p-n*-переходов являются электро-силовая микроскопия и сканирующая емкостная микроскопия [3, 4]. Однако эти методы требуют специальной комплектации сканирующего зондового микроскопа, а так же зондов, не имеющих в массовом производстве. Зонды для них изготавливают в единичных экземплярах, что влияет на воспроизводимость получаемых результатов. Существует еще один метод, основанный на измерении потенциала поверхности и позволяющий определять границы *p-n*-переходов — метод зонда Кельвина [5]. В нем используют стандартные промышленные зонды. Однако метод зонда Кельвина имеет меньшее разрешение по сравнению с вышеуказанными, поскольку отношение паразитной емкости конуса зонда и плоской части консоли к полезной емкости острия зонда-образца значительно большее для стандартных зондов.

Наиболее распространенными АСМ методиками исследования являются: полуконтактная [6] и фазового контраста [7]. Они дополняют друг друга, так как полуконтактная методика направлена на регистрацию изменения рельефа поверхности, а методика фазового контраста — на фиксацию областей с различными поверхностными свойствами. Фазовый контраст опреде-

ляется сдвигом фаз между опорным и измеренным сигналами. Происхождение этого сдвига принято приписывать изменению поверхностной активности образца, т.е. дефектов или присутствию нескольких материалов с различными поверхностными свойствами.

В данной работе наряду с методом зонда Кельвина для изучения образцов с различной концентрацией легирующей примеси предложено использовать совместно полуконтактную методику и методику фазового контраста с целью установления возможностей атомной силовой микроскопии при исследовании *p-n*-переходов. Наличие различных по своим свойствам легирующих примесей вблизи *p-n*-перехода должно вносить изменения в состояние поверхности, на которую этот *p-n*-переход выходит.

Методика эксперимента

Формирование *p-n*-переходов проводили ионной имплантацией бора в монокристаллический кремний КЭФ 0,5 (111). Поверхность кремния была предварительно покрыта маскирующим окислом толщиной 0,12 мкм, в котором фотолитографией вскрыты окна до кремния, представляющие набор полос шириной 2 мкм с периодом расположения 7 мкм. Энергия ионов составляла 60 кэВ. Изменяя дозу легирующей примеси, были получены *p-n*-переходы с различными параметрами (табл. 1). Далее образцы отжигали при температуре 1150°C в среде азота в течение 30 мин. После отжига вспомогательный окисел удаляли травлением. Данная методика позволяет формировать *p-n*-переходы с гладкой поверхностью для методов растровой электронной микроскопии. В результате были получены пять структур с различными поверхностными концентрациями областей *p*-типа. Концентрация примеси в исходной подложке составляла 1×10^{16} ат/см³.

Таблица 1. Параметры *p-n*-переходов

Параметр	Образец №				
	1	2	3	4	5
Доза имплантации ионов бора, мкКл/см ²	1	5	30	150	600
Концентрация легирующей примеси у поверхности, ат/см ³	1×10^{17}	$5,5 \times 10^{17}$	$3,35 \times 10^{18}$	$1,68 \times 10^{19}$	$6,72 \times 10^{19}$
Глубина залегания <i>p-n</i> -перехода, мкм	0,88	1,14	1,37	1,54	1,68

Образцы со сформированными *p-n*-переходами исследовали с помощью сканирующей зондовой лаборатории NTEGRA Prima. Использовали зонды серии NSG01 с платиновым покрытием и без него. Первоначально образцы исследовались по двухпроходной методике зонда Кельвина, а затем с использованием двух методик: полуконтактной и фазового контраста. Использование методики фазового контраста, предположительно, должно было выявить области с различным типом примеси. При исследовании в режиме фазового контраста изменяли амплитуду колебаний зонда от 70 нм до 130 нм с целью получения зависимости разрешения используемого метода от амплитуды. Далее образцы обрабатывали в плавиковой кислоте с целью снятия естественного окисла, после чего исследование при помощи фазового контраста и полуконтактной методик проводили повторно.

Результаты и их обсуждение

Исследования структур с *p-n*-переходом при помощи двухпроходной методики зонда Кельвина показали, что разрешение данного метода позволяет определять границы перехода при минимальной концентрации легирующей примеси $5,5 \times 10^{17}$ ат/см³ — рис. 1. Однако наличие шумовой составляющей, которая при малых концентрациях легирующей примеси соизмерима с перепадом огибающей профиля, позволяющим различать области *p-n* перехода, значительно усложняет интерпретацию результата с использованием данной методики.

Исследование образцов с помощью полуконтактной методики показало, что, не смотря на то, что исходная поверхность была гладкой (14 класс поверхности) и легирование проводили через пленку окисла, после снятия последнего поверхность структуры с *p-n*-переходом приобрела достаточно четкий рельеф, хорошо различимый атомным силовым микроскопом. Причем ее геометрия (табл. 2) зависит от параметров *p-n*-перехода (рис. 2). Чем больше доза легирова-

ния, тем ярче выражен рельеф p - n -перехода. Так как вносимая примесь создает напряженности в исходной кристаллической решетке кремния, то это приводит к увеличению объема легированной области.

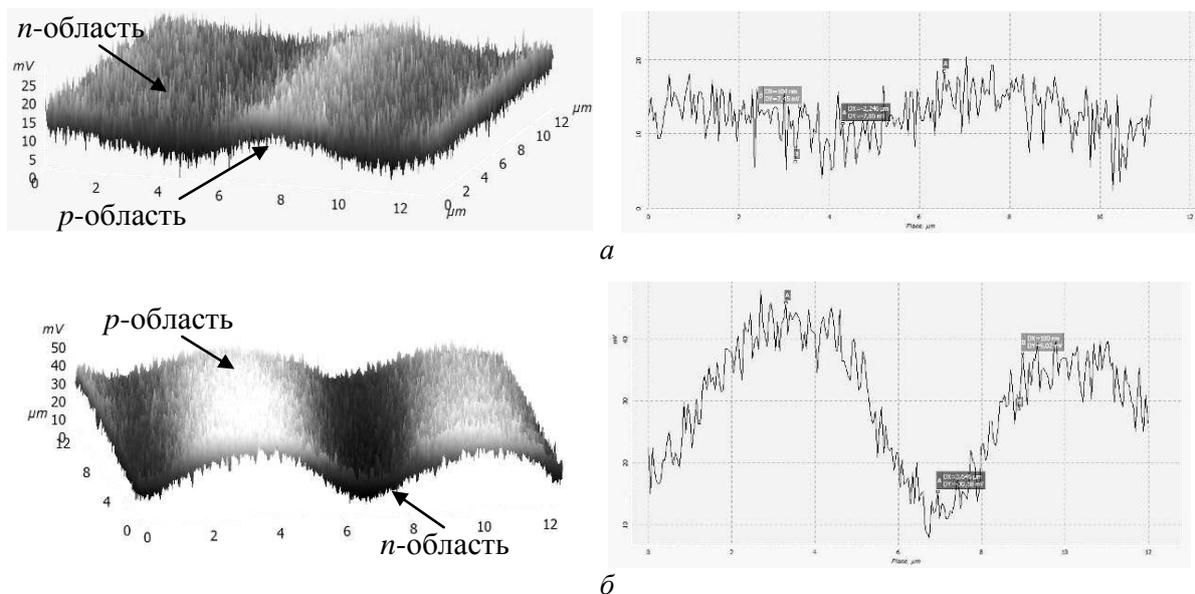


Рис. 1. 3D изображение поверхностного потенциала (слева) и соответствующий профиль (справа): *a* — образец № 2 — перепад огибающей профиля составляет примерно 7 мВ, шумовая составляющая порядка 7 мВ; *б* — образец №5 — перепад огибающей профиля составляет примерно 30 мВ, шумовая составляющая порядка 9 мВ

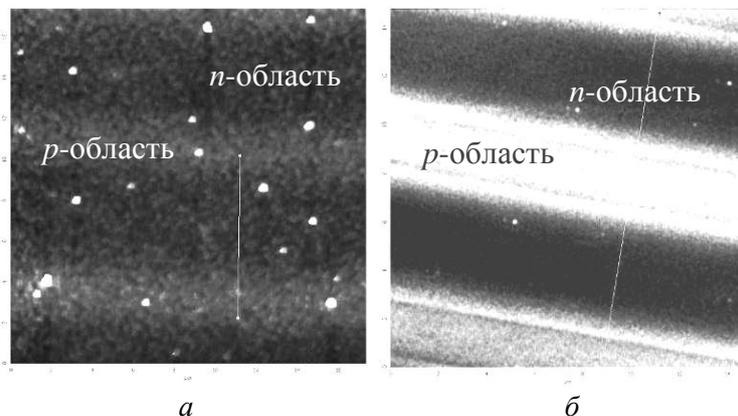


Рис. 2. Топография p - n -переходов, полученных с помощью полуконтактной методики для образцов: *a* — №1; *б* — № 3

Стоит также отметить, что на вершинах полученных структур, начиная с третьего образца, четко просматриваются линейные плато шириной порядка 2 мкм. Это происходит из-за ограничения увеличения объема под окислом, т.е. когда у структуры нет возможности расти вверх, она начинает расти в стороны.

Таблица 2. Геометрические параметры полученных структур p - n -переходов

№ образца	1	2	3	4	5
Период структуры, мкм	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8
Ширина линии на $\frac{1}{2}$ высоты, мкм	2,2	3,0	3,8	4,7	5,3
Высота структуры, нм	0,9	1,5	2,2	4,0	5,0
Ширина плато, мкм	—	—	1,9	2,2	2,4
Ширина бокового перехода, мкм	—	—	0,95	1,25	1,45

С помощью методики фазового контраста также можно определять расположение *p-n*-переходов. Начиная с третьего образца, четко отслеживаются плато шириной 2 мкм и боковые переходы области, согласующиеся с изображением, полученным при помощи полуконтактной методики. Однако стоит отметить, что чувствительность данного метода ограничена. Так, согласно методике фазового контраста, мы можем определить существование *p-n*-перехода лишь при концентрации легирующей примеси большей 1×10^{18} ат/см³, в то время как полуконтактная методика позволяет, по крайней мере, визуализировать отклонения в рельефе структуры поверхности, тем самым определяя *p-n*-переход уже при концентрации примеси 1×10^{17} ат/см⁻³.

При использовании методики фазового контраста имеют значение амплитуда колебания зонда и наличие на нем проводящего покрытия. Так более четкое изображение дает зонд без проводящего покрытия и с большей амплитудой колебания балки (рис. 3). Это может объясняться тем, что увеличение амплитуды уменьшает шумовую составляющую измерений, а отсутствие проводящего покрытия не позволяет стекать статическому заряду, находящемуся на поверхности, и тем самым повышает значение контрастности формируемого изображения.

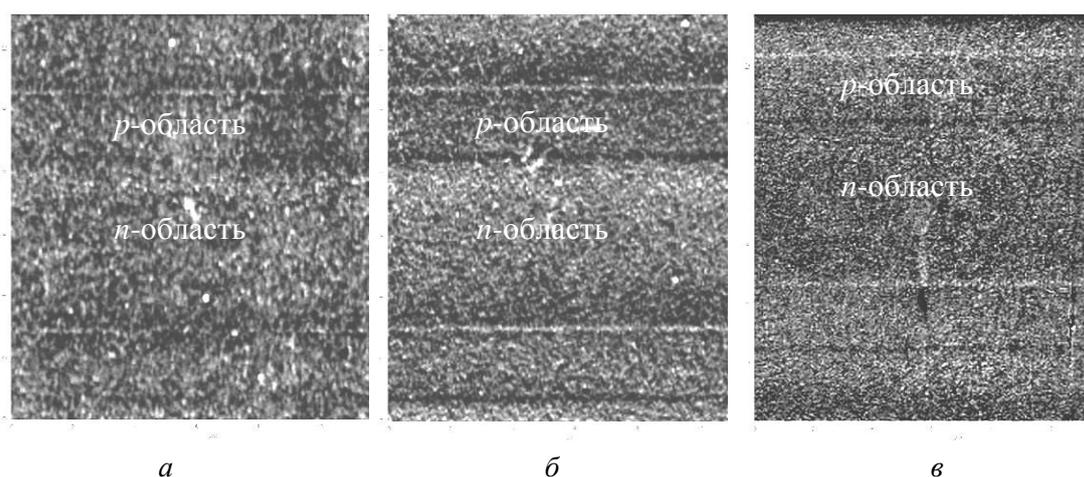
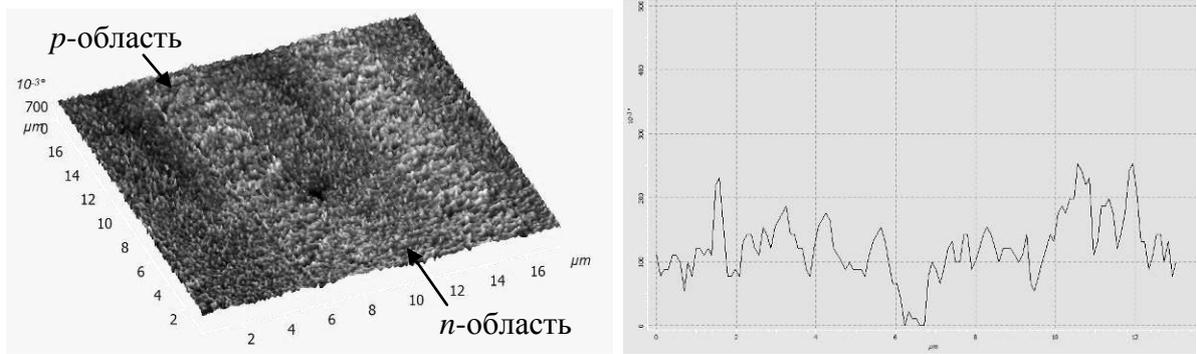


Рис. 3. Изображение поверхности образца №3, полученное с помощью методики фазового контраста при амплитуде колебания зонда: *a* — 70 нм (без покрытия); *б* — 130 нм (без покрытия); *в* — 130 нм (зонд с Pt покрытием порядка 30 нм).

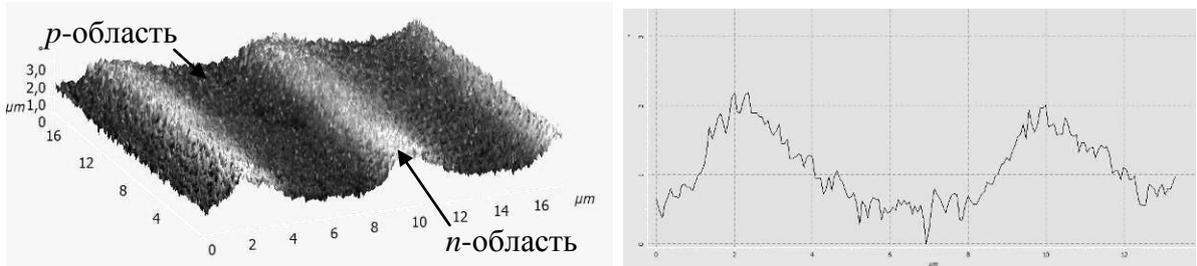
Таблица 3. Значения сдвига фаз при исследовании *p-n*-перехода для различных амплитуд колебаний зонда в процессе сканирования

Амплитуда колебаний	70 нм	90 нм	110 нм	130 нм	130 нм (зонд с покрытием)
Максимальное значение	2,9097°	1,89954°	1,33956°	1,11996°	1,50097°
Среднее значение	1,1326°	0,829119°	0,648353°	0,527257°	0,501638°

После обработки исходных образцов в плавиковой кислоте для снятия естественного окисла и проведения исследований по методике фазового контраста было обнаружено резкое увеличение контрастности изображения — рис. 4. Изменения были обнаружены также и при исследовании в полуконтактном режиме работы — рис. 5. Если высота элементов поверхности до травления и пассивации образца составляла порядка 5,3 нм, то после проведения указанных процессов она уменьшилась до 4,6 нм. Это может быть объяснено тем, что плавиковая кислота является селективным травителем, то есть области с большим количеством дефектов или нарушением структуры травятся быстрее [2]. Таким образом, несмотря на то, что использовалась слабоконцентрированная кислота, при удалении естественного окисла проявились ее селективные свойства. Изменение высоты структур до и после травления составило порядка 0,5 нм, то есть пассивация структуры может увеличить предел разрешения по концентрации легирующей примеси для полуконтактной методики исследования.

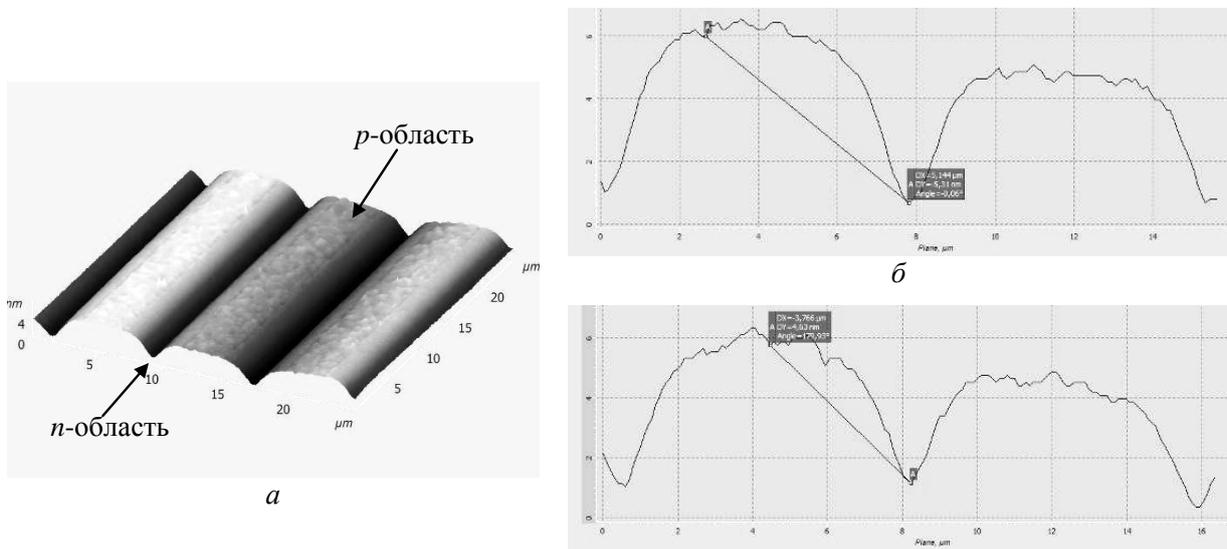


a



б

Рис. 4. Изображение и профиль поверхности образца № 4, полученные с помощью методики фазового контраста: *a* — до; *б* — после травления и пассивации в плавиковой кислоте



a

б

в

Рис. 5. Изображение и профиль поверхности образца №5, полученные с помощью методики фазового контраста: *a* — топография и профили; *б* — до, *в* — после травления и пассивации в плавиковой кислоте

Заключение

Проведенные исследования показали, что использование двухпроходной методики зонда Кельвина для изучения *p-n*-переходов осложняется наличием шумовой составляющей, которая при малых концентрациях легирующей примеси соизмерима с перепадом, характеризующим области с различным типом проводимости структур. Использование полуконтактной методики и методики фазового контраста также возможны для анализа структур с *p-n*-переходом. При этом чувствительность первой из двух последних методик оказалась на порядок выше второй и позволяет выявлять *p-n*-переходы с меньшей концентрацией легирующей примеси.

Методика фазового контраста оказалась менее чувствительной по сравнению с полуконтактной методикой. Однако наличие различных уровней именно в данной методике фазового контраста гарантирует наличие нескольких материалов или областей с различными поверхностными свойствами. Для методики фазового контраста установлено, что увеличение амплитуды колебания зонда приводит к уменьшению среднего отклонения значений фазового контраста, что, в свою очередь, способствует уменьшению шума и помех в изображении.

Сканирование зондом без покрытия дает более контрастное изображение сдвига фаз по сравнению с изображением, полученным при использовании зонда с металлическим покрытием, что может объясняться присутствием емкостной составляющей.

Удаление естественного окисла приводит к резкому увеличению разрешения изображений, полученных при помощи методики фазового контраста, однако данная процедура сопровождается сглаживанием рельефа поверхности, что снижает контрастность полуконтактных методик.

USE OF ATOMIC FORCE MICROSCOPE FOR RESEARCH *p-n*-JUNCTION

N.G. TSIRKUNOVA, J.A. SOLOVIEV, V.E. BORISENKO

Abstract

The possibility to use different methods for identification and analysis of *p-n*-junctions with atomic force microscopy is shown. Vibration amplitude of the probe and surface treatments has been observed to influence the resolution of the phase contrast method.

Литература

1. Луфт Б.Д. Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников. М., 1982.
2. Бургер Р., Донован Р. Основы технологии кремниевых интегральных микросхем: Окисление, Диффузия, эпитаксия. М., 1969.
3. <http://www.ntmdt.ru/spm-principles/view/efm>
4. <http://www.ntmdt.ru/spm-principles/view/scanning-capacitance-microscopy>
5. <http://www.ntmdt.ru/spm-principles/view/kelvin-probe-microscopy>
6. <http://www.ntmdt.ru/spm-principles/view/semicontact-mode>
7. <http://www.ntmdt.ru/spm-principles/view/phase-imaging-mode>