

бездислокационные, но и предварительно пластически деформированные НК $p\text{-Si}$ $\langle 111 \rangle$ при 300 К не обнаруживают макроскопической пластической деформации. Более того, эти НК при 300 К в условиях наличия слабого постоянного и малой амплитуды импульсного электрического тока не склонны к проявлению макроскопической пластической деформации. Однако при более высоких температурах в НК кремния обнаруживается макроскопическая пластическая деформация даже в отсутствие электрического тока.

МИКРОПЛАСТИЧНОСТЬ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ, СТИМУЛИРОВАННАЯ ИМПУЛЬСАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Дрожжин А.И., Ермаков А.П., Яценко С.Н.

*Воронежский государственный технический университет
394026 Воронеж, Московский просп., 14,
E-mail : nis@ns1.vstu.ac.ru*

АННОТАЦИЯ. Микропластичность в исходно бездислокационных нитевидных кристаллах кремния $\langle 111 \rangle$ зарождается и эволюционирует только в поверхностных слоях. Обнаружено семь уровней с существенно различными закономерностями зарождения и эволюции процесса.

В качестве образцов использовались нитевидные кристаллы (НК) $p\text{-Si}$, имеющие ориентацию оси роста $\langle 111 \rangle$, диаметр 30-100 мкм, рабочую длину 5-10 мм. НК имели форму шести- и двенадцатигранных призм. Боковая поверхность шестигранных НК была образована семейством плоскостей $\{112\}$ либо $\{110\}$, а двенадцатигранных - смешанным семейством плоскостей $\{112\}$ и $\{110\}$.

Деформировали НК растяжением, сжатием или изгибом в условиях равномерно распределенной вдоль его рабочей

длины нагрузки в матрицах при воздействии прямоугольных импульсов электрического тока.

Исследования структуры исходных и деформированных НК осуществляли методом селективного и послойного химического травления, металлографии, рентгенографии, внутреннего трения. Фигуры травления исходных и деформированных образцов представляли в виде фоторазверток боковой и торцевой поверхностей НК путем сканирования их с помощью оптического микроскопа. В экспериментах использовали травители на основе хромовой кислоты ($\text{HCrO}_4 + 40\% \text{HF}$ в пропорциях 2:1, 1:1, 2:3). В работе с НК p-Si наиболее полезным оказался свежеприготовленный травитель с соотношением компонентов 1:1. Время травления - 15 - 90 с.

НК характеризуются большой удельной поверхностью. Механизмы роста НК из газовой фазы позволяют получать ее высокое совершенство на атомном уровне. Однако влияние физического и кристаллографического факторов заметно снижает ее совершенство. В зависимости от направления оси роста и огранки на поверхности НК кремния появляются микро- и макроступени роста. Они являются наиболее распространенными коллективными дефектами свободной поверхности НК. Играя роль концентраторов напряжений, они заметно снижают прочность и другие механические свойства. Кроме ступеней роста на поверхности НК кремния обнаруживаются и другие дефекты, также существенно ухудшающие механические свойства. Как правило, это одиночные дефекты или небольшие их скопления, хаотически распределенные на поверхности. Одни из них открыты для непосредственного наблюдения, например, ярко выраженные одиночные или групповые нарушения поперечного сечения НК. Другие скрыты для наблюдения в исходном состоянии. Они проявляются только после травления, например, в виде хаотически распределенных по поверхности НК ямок травления. Это связано с более быстрым, на 1-2 порядка, раствориванием локальной дефектной области, чем остального материала НК.

Легирующая примесь способствует образованию НК р- или п-типа проводимости. С составом и количеством легирующей примеси тесно связаны картины распределения примеси в объеме НК. Примесная область и основной материал НК являются монокристаллом, и в нем нет несовершенств типа дислокаций несоответствия и дефектов упаковки. Примесные области однозначно связаны со ступенями роста на боковых гранях. Они берут свое начало от входящих углов, т.е. во впадинах ступеней роста на боковых гранях НК кремния. В пределах разрешения использованных методов исследования в большинстве исходных НК кремния $\langle 111 \rangle$ не обнаруживаются ростовых дислокаций.

На боковой поверхности деформированных на стадии микропластичности НК кремния $\langle 111 \rangle$ кроме хаотически распределенных ямок травления наблюдаются упорядоченные, строго ориентированные к оси роста ряды (линии) остродонных ямок травления. Направление рядов ямок травления хорошо совпадает с кристаллографически определенными следами пресечения граней свободной поверхности НК и плоскостей систем скольжения $\{111\} \langle 110 \rangle$. Методами рентгенографии и внутреннего трения в таких образцах обнаруживаются признаки пластичности. Эти и ряд других экспериментальных фактов позволяют отождествить упорядоченно выстроенные в определенных кристаллографических направлениях остродонные ямки травления на поверхности НК с дислокационными, а их совокупность считать очагом зарождения сдвиговой деформации.

По характеру распределения ямок травления на стадии микропластичности условно выделено семь уровней ее зарождения и эволюции. Основные закономерности, установленные по ямкам травления боковой поверхности и поперечных сколов, следующие.

На самой ранней стадии деформации (на первом уровне микропластичности) на боковой поверхности НК обнаруживаются только одиночные ряды (линии) ямок травления (рис.1а), распределенные крайне неравномерно (хаотично) по длине и периметру. Число таких рядов мало. Длина ряда - около десятка микрометров (менее ширины грани), и число



Рис. 1.

ямок травления в ряду - от единиц до нескольких десятков. Распределены ямки травления в ряду неравномерно, плотность их на единицу длины мала. Как правило, плотность максимальна в очаге и убывает к периферии ряда. Процесс зарождения и эволюции одиночных рядов всегда идет в одну плоскость скольжения. Ряды (линии) ямок травления легко удаляются стравливанием поверхностного слоя на глубину нескольких микрометров. Считая, что каждая ямка травления соответствует выходу дислокации на поверхность НК, была оценена локальная плотность $\rho_{\text{лок}}$ дислокаций, которая оказалась равной $\sim 10^8 - 10^{10} \text{ м}^{-2}$. При этом локальная пластическая деформация $\varepsilon_{\text{пл лок}}$ в очаге сдвига, оцененная по формуле

$$\varepsilon_{\text{пл лок}} = \rho_{\text{лок}} b L,$$

где L - длина пробега дислокаций, b - вектор Бюргерса, дала величину $\sim 0,5 - 1,0\%$. Градиент плотности дислокаций по радиусу НК составляет $10^{15} - 10^{16} \text{ м}^{-3}$. Наряду с такими пластически деформированными микрообъемами, локализованными в поверхностном слое НК, основная часть его не обнаруживает признаков пластической деформации.

При больших степенях деформации в игру вступает второй уровень микропластичности. На этом уровне наблюдается как зарождение "новых" рядов (линий) ямок травления, так и эволюция "старых" (ранее зародившихся). Причем закономерности зарождения новых рядов сохраняются, т.е. остаются такими же, как были описаны на первом уровне. Характер распределения новых рядов ямок травления на поверхности НК свидетельствует о том, что они являются

“свободными” и никак не связаны со старыми. Эволюция в “старых” очагах пластичности сопровождается плавным расширением фронта сдвиговой деформации, направленного вовне. На этом уровне наблюдается рост числа ямок травления в ряду до сотен, длины ряда - в 2-5 раз, линейной плотности дислокаций - на 1-3 порядка (рис.1б). При этом локальная плотность дислокаций и их градиент по радиусу НК достигают максимальных значений и становятся равными $\rho_{\text{лок}} \approx 10^{12} \text{ м}^{-2}$ и $\sim 10^{17} \text{ м}^{-3}$ соответственно.

Третий уровень микропластичности сопровождается зарождением “связанного” нового ряда (одного или нескольких, рис.1в), расположенного параллельно и на некотором расстоянии (5-10 мкм) от старого ряда ямок травления. Как правило, длина и число дислокаций в нем всегда меньше, чем в предыдущем. Параллельные ряды ямок травления свидетельствуют о протекании в НК преимущественно одноплоскостного скольжения.

При реализации других условий (на четвертом уровне микропластичности) зародившийся новый ряд ямок травления ориентируется под углом к старому и, как правило, пересекает его (рис.2а). В результате этого на свободной поверхности НК кремния образуется X-образная фигура ямок травления. Она качественно сходна с фигурой, получаемой после укола микроиндентором в точку, совпадающую с точкой пересечения рядов ямок травления. Подобная картина ямок травления свидетельствует о зарождении в данной локальной зоне НК двухплоскостного скольжения. Хотя в других соседних локальных областях НК может наблюдаться либо зарождение нового очага, либо эволюция (на втором и третьем уровне) старого очага пластичности, т.е. наблюдается только одноплоскостное скольжение.

Пятый уровень микропластичности соответствует зарождению полосы незавершенного сдвига и характеризуется сдвиговой деформацией, которой соответствует на поверхности НК картина из пересекающихся двух параллельных, отстоящих на 5-10 мкм друг от друга рядов ямок травления. Шестой уровень микропластичности начинается с момента появления на поверхности НК картины травления, состоя-



Рис.2

щей из пересекающихся трех и более параллельных, отстоящих на 5-10 мкм друг от друга рядов ямок травления (рис.2б). Для этого уровня, связанного с расширением полосы незавершенного сдвига, характерна практически постоянная поверхностная плотность ямок травления в очаге сдвиговой деформации. За седьмой уровень микропластичности ответственны процессы зарождения очагов сдвиговой деформации между имеющимися старыми рядами на расстоянии 1-2 мкм от них. При этом поверхностная плотность ямок травления возрастает на 1-3 порядка.

Очагами пластической деформации являются наиболее эффективные концентраторы напряжений, среди которых поверхностные дефекты играют наиболее важную роль. В пользу сказанного свидетельствует и тот факт, что поверхностные концентраторы при растяжении работают более эффективно, чем при сжатии. В экспериментах при растяжении и прочих равных условиях число очагов сдвиговой деформации оказалось в 2,5 раза больше, чем при сжатии. Причем при растяжении и сжатии число очагов первого и второго уровня микропластичности оказалось примерно равным. Однако при растяжении оказалось больше, чем при сжатии, число очагов пятого уровня в 3,5 раза, а шестого уровня - в 6 раз. Это дает основание сделать вывод о том, что при растяжении эффективность поверхностных источников дислокаций на 1-3 порядка выше. Однако при наличии явного эффективного концентратора напряжений на свободной поверхности НК кремния $\langle 111 \rangle$ даже в условиях деформации сжатия седьмой уровень микропластичности достигается при меньших внешних напряжениях, чем в условиях деформации растяжения.