

Влияние текстурирования поверхности пластин кремния для солнечных фотопреобразователей на их прочностные свойства

© В.В. Шпейзман, В.И. Николаев, А.О. Поздняков, А.В. Бобыль, Р.Б. Тимашов, А.И. Аверкин, С.Е. Никитин, О.И. Коньков, Г.Г. Шелопин, Е.И. Теруков, А.В. Нащекин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: shpeizm.v@mail.ioffe.ru; nkvlad@inbox.ru

Поступило в Редакцию 27 ноября 2019 г.
В окончательной редакции 27 ноября 2019 г.
Принято к публикации 15 января 2020 г.

Важной технологической операцией для повышения эффективности солнечных преобразователей на основе кремния является создание на поверхности кремния текстур с размерами шероховатостей, близкими к длинам волн видимого света. Рассмотрено влияние различных вариантов структурирования поверхности кремниевых пластин на их прочностные свойства. Рассмотрены четыре вида поверхностных текстур кремния: после избирательного травления в щелочном растворе, пирамидально текстурированные поверхности, текстурированные с помощью окисления под тонким слоем V_2O_5 и после высокотемпературного отжига и обработки в HF. Получены электронно-микроскопические изображения всех четырех текстур, и измерена прочность методом „кольцо-в-кольцо“ по-разному текстурированных пластин кремния. Методом конечных элементов рассчитаны зависимости максимальных напряжений и прогиб под малым кольцом от нагрузки. Совпадение последней с экспериментом служило критерием правильности определения прочности пластин. Рассчитаны средние значения и среднеквадратичные отклонения прочности для каждой из четырех групп пластин кремния.

Ключевые слова: кремний для солнечных преобразователей, структура поверхности, расчет напряжений, прочность.

DOI: 10.21883/JTF.2020.07.49452.380-19

Введение

Солнечные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) на основе гетеропереходов монокристаллического и аморфного кремния ($c\text{-Si}-a\text{-Si:H}$) являются одними из самых перспективных с точки зрения соотношения коэффициента полезного действия (КПД) и стоимости. Такие ФЭП носят сокращенное англоязычное наименование НИТ (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer solar cell) [1,2]. Теоретическое значение КПД солнечных ФЭП на основе монокристаллического кремния приближается к 30% [3]. К настоящему времени КПД промышленных НИТ фотопреобразователей достигает 26% [4]. Очевидно, что потолок КПД ФЭП на основе $c\text{-Si}$ практически достигнут, и на первый план выступают такие характеристики, как время безотказной эксплуатации и себестоимость. По прогнозу International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) к 2024 г. деградация мощности для этой разновидности солнечных ФЭП за первый год эксплуатации должна быть не более 2%, гарантийный срок на изделие не менее 10 лет, а общий срок эксплуатации должен быть 30 лет. Вес серебра, используемого для создания системы токоведущих электродов в одной ячейке (156×156 мм), предполагается снизить с 100 мг (2016 г.) до 40 мг (2024 г.) [5]. В связи со сказанным особое внимание исследователями уделяется себестоимости солнечных

ФЭП и причинам, приводящим к их быстрой деградации и разрушению. Существенной конструктивной особенностью кремниевых НИТ фотопреобразователей является использование тонких кремниевых пластин (< 0.2 мм), что ставит на первый план вопросы, связанные с их прочностью [6]. Для уменьшения отражения света и увеличения эффективности ФЭП используются текстурированные слои, расположенные на поверхности кремниевой пластины. Все солнечные ФЭП имеют на фронтальной поверхности слой прозрачного проводящего оксида (ППО), отделенный тонким слоем полимера от герметизирующей пластины. В качестве ППО используются слои оксидов цинка и индия, легированных алюминием или оловом ($ZnO:Al, In_2O_3:Sn$). Слои ППО имеют коэффициент преломления в диапазоне от 2 до 2.2, а коэффициент преломления полимерного слоя равен ~ 1.41 . Если свет, отраженный от поверхности кремния, падает на границу ППО — полимер под углами, близкими или большими угла полного внутреннего отражения, то излучение вновь возвращается в кремниевые активные слои. Для максимального увеличения такого эффекта необходимо увеличивать диффузное отражение излучения от поверхности кремния, что приводит к необходимости создания на поверхности кремния текстур с размерами шероховатостей, близкими к длинам волн видимого света. Элементами текстур могут быть выпуклые и

вогнутые конусы, пирамиды, фасетки, столбики. Рассеивающие свойства таких текстур должны максимально приближаться к ламбертовской отражающей поверхности. Такая поверхность имеет одинаковую яркость по всем направлениям, и отражает свет, интенсивность которого изменяется по закону косинуса $I = I_0 \cos \theta$, где I_0 — интенсивность излучения в направлении нормали к поверхности, θ — угол между направлением на наблюдателя и нормалью к поверхности. Примерами может служить белая бумага или молочное стекло [7]. Наиболее распространенными способами текстурирования поверхности кремния являются анизотропное жидкостное травление, плазменное травление и фотолитография [8,9]. В промышленных кремниевых НПТ фотопреобразователях наибольшее применение получили пирамидальные текстуры, получаемые методом щелочного анизотропного травления. Несмотря на доступность и несомненное технологическое изящество, пирамидальное текстурирование имеет и недостатки. Идеальное диффузное рассеяние нереализуемо в пирамидальных структурах даже на одной длине волны, не говоря о широком диапазоне длин волн. Кроме того, при механических нагрузках пирамидальная геометрия текстуры приводит к концентрации напряжений вблизи оснований и вершин пирамид [10,11]. Возникающие напряжения ведут к растрескиванию и разрушению текстурированных кремниевых пластин с толщинами < 0.2 mm, что является одной из основных причин отказов кремниевых НПТ фотопреобразователей. В связи со сказанным, необходим поиск новых способов текстурирования, что должно привести к улучшению прочностных и эксплуатационных характеристик кремниевых ФЭП. Одним из альтернативных способов текстурирования поверхности кремния является неоднородное окисление, когда в качестве иницирующих центров окисления используются дефекты кремния с последующим растворением областей оксида кремния в плавиковой кислоте [12,13]. В настоящей работе исследованы прочностные свойства тонких кремниевых пластин с четырьмя разновидностями текстур, полученных с помощью различных технологий.

1. Подготовка образцов и их электронно-микроскопическое исследование

Для приготовления образцов для прочностных измерений использовались пластины монокристаллического кремния, полученного кристаллизацией из расплава по методу Чохральского (CZ-кремний), допированного фосфором фирмы LONGI. Кремний был выращен в направлении (100). Удельное сопротивление кремния составляло $\sim 1.5 \Omega \cdot \text{cm}$, концентрация кислорода $\sim 8 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, концентрация углерода $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, плотность дислокаций $\sim 500 \text{ cm}^{-2}$. На заводе монокристаллы были нарезаны на пластины толщиной 0.14–0.19

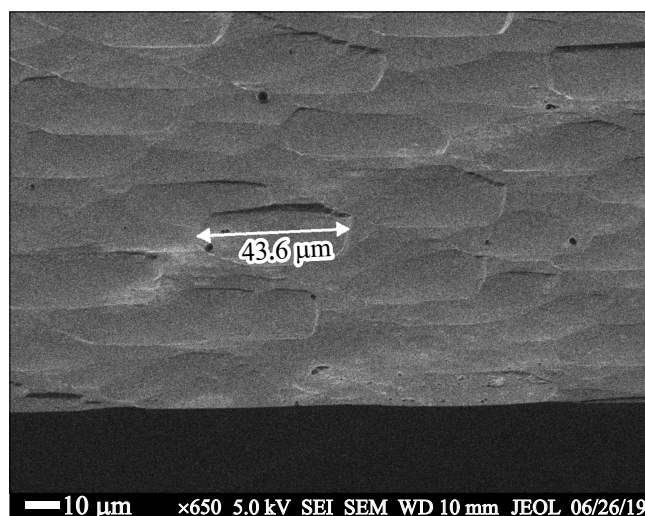


Рис. 1. СЭМ изображение поверхности кремниевой пластины после удаления нарушенного слоя.

и размером 156×156 mm. Для всех пластин нами проводилась процедура удаления нарушенного слоя (SDE, Saw damage etching). Процедуру удаления нарушенного слоя проводили в растворе щелочи KOH с концентрацией 15% при температуре 80°C в течение 4 min, при этом глубина травления пластин составила $7.2 \mu\text{m}$ с каждой стороны. До и после удаления нарушенного слоя выполняли процедуру очистки в аммиачно-перекисном растворе. После SDE с двух сторон поверхности кремниевых пластин появлялась макроскопическая текстура с геометрией, близкой к искаженным прямоугольникам. Изображение поверхности кремниевой пластины после SDE, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM 7001F (Jeol, Япония), показано на рис. 1. Появление такой макроскопической текстуры на поверхности монокристаллического кремния связано с анизотропным характером щелочного травления и подробно описано в литературных источниках [14]. Для последующих прочностных испытаний пластины после SDE нарезали на квадраты размером 30×30 mm. Для этого использовалась установка лазерной резки кремниевых пластин. При прочностных испытаниях эти образцы были обозначены как тип I.

Для создания пирамидально текстурированной поверхности после SDE проводили обработку кремниевых пластин в растворе гидроксида калия KOH 2% при температуре 80°C в течение 8 min. Текстурирование проводили с использованием коммерческой добавки, которая содержит несколько поверхностно-активных веществ, основным компонентом которых является изопропанол. Взаимодействие кремния и текстурирующего раствора гидроксида калия описывается химической реакцией с образованием силиката калия и водорода:



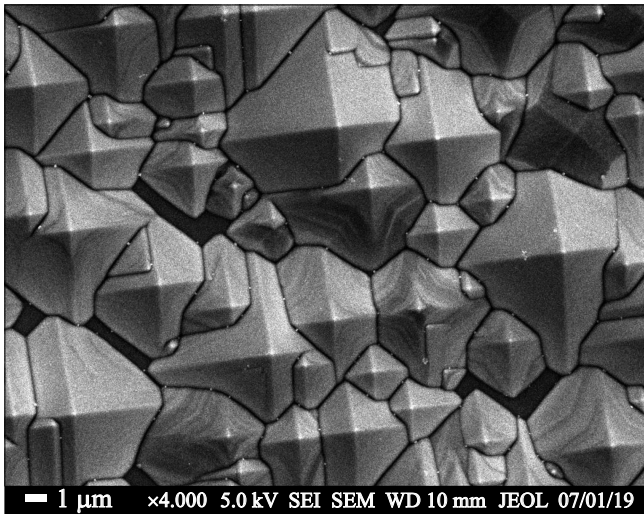
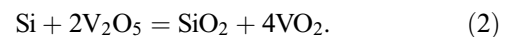


Рис. 2. СЭМ изображение пирамидальной текстуры на поверхности кремния.

Текстурированная поверхность представляет собой множество хаотично расположенных пирамид с шириной основания пирамид от 1 до $6 \mu\text{m}$, боковые грани пирамид параллельны кристаллографическим плоскостям (111). Формирование такого микрорельефа объясняется сильной зависимостью скорости травления кристалла от ориентации кристаллографических плоскостей. Самая низкая скорость травления наблюдается на плоскости (111), так как плотность упаковки атомов здесь самая высокая. В результате наиболее эффективно пирамиды формируются на монокристаллических подложках кремния с ориентацией (100), которые и используются в промышленном производстве солнечных ФЭП [15]. При использовании такой технологии текстура образуется с двух сторон кремниевой пластины и представляет собой сочетание макроскопической текстуры с характерным размером $30\text{--}45 \mu\text{m}$, на которой находится пирамидальная текстура с размером $1\text{--}6 \mu\text{m}$. Такие пирамидально-текстурированные кремниевые пластины используются в промышленном производстве солнечных ИТ фотопреобразователях. Электронно-микроскопическое изображение пирамидальной текстуры на поверхности кремния показано на рис. 2. На изображении СЭМ четко выделяются границы между соседними пирамидами. Природа такого контраста может быть обусловлена как каналированием электронов пучка, например, по дефектным областям, сформировавшимся в результате травления подложки, так и за счет „топологического контраста“, формирующегося в результате разницы числа вышедших вторичных электронов [16]. Проведенные исследования при различных ускоряющих напряжениях (от 5 до 30kV) показали, что с ростом напряжения уровень контраста заметно снижается, при этом изображение поперечного скола структуры не выявило сколь-нибудь заметного нарушения качества кристалла под границами между

пирамидами. Таким образом, формирование контраста в пирамидальных текстурах связано с топологией, т.е. с уменьшением числа электронов, выходящих из самой границы, по сравнению с вторичными электронами, выходящими с граней пирамид. Для последующих прочностных испытаний пирамидально текстурированные пластины также нарезали на квадраты размером $30 \times 30 \text{mm}$. При прочностных испытаниях эти образцы были обозначены как тип II.

Третьей разновидностью образцов (тип III) были монокристаллические кремниевые пластины фирмы LONGI (после SDE), текстурированные с помощью окисления под тонким слоем V_2O_5 . Технология получения таких текстур и их спектры отражения описаны в работах [12,13]. В этих работах исследован процесс текстурирования поверхности монокристаллического кремния, окисленного под слоем V_2O_5 , основанный на существовании в объеме кремния микроскопических преципитатов аморфного субоксида кремния $\alpha\text{-SiO}_x$ [17], диффузии атомарного кислорода из V_2O_5 через слой SiO_2 к кремнию и последующего растворения областей оксида кремния и V_2O_5 в плавиковой кислоте. Функцию инициирующих центров окисления могут выполнять места выхода дислокаций или преципитаты SiO_x ($x \leq 2$). В современных CZ-Si-монокристаллах концентрация дислокаций на поверхности не превышает 10^2cm^{-2} , чего недостаточно для создания сплошных текстур с размерами $400\text{--}800 \text{nm}$. Концентрация преципитатов кислорода, возникающих при росте монокристаллов CZ-кремния, находится в диапазоне $10^{11}\text{--}10^{13} \text{cm}^{-3}$ [17], достаточном для создания текстур субмикронных размеров. Для изготовления таких образцов пластины SDE-кремния лазером нарезались на квадраты $30 \times 30 \text{mm}$. На одну из поверхностей кремния с удаленным SDE осаждался слой металлического ванадия толщиной $70\text{--}80 \text{nm}$, который окислялся до V_2O_5 при температуре 450°C в течение 1 h. Далее производился отжиг полученной структуры при температуре 630°C (1 h) в кислороде или на воздухе. При этой температуре начинается взаимодействие V_2O_5 и кремния, приводящее к окислению кремния и восстановлению металла в V_2O_5 . Восстановление оксида до металла необязательно, достаточно чтобы металл изменил свое валентное состояние от Me^{+n} до $\text{Me}^{+(n-1)}$. В частности, реакция восстановления V^{+5} до V^{+4} выглядит следующим образом:



Энергия Гиббса (ΔG) этой реакции при $630\text{--}650^\circ\text{C}$ отрицательна ($\Delta G \sim -680 \text{kJ}$), следовательно, эта реакция осуществима. Для непрерывного протекания реакции (2) необходимо поддерживать состав пленки V_2O_5 постоянным. В работе [18] исследован процесс окисления ванадия в атмосфере кислорода при температуре 600°C и показано, что при этой температуре величина коэффициента диффузии кислорода в V_2O_5 равна $\sim 3 \cdot 10^{-11} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, что на несколько порядков больше, чем коэффициент диффузии кислорода через

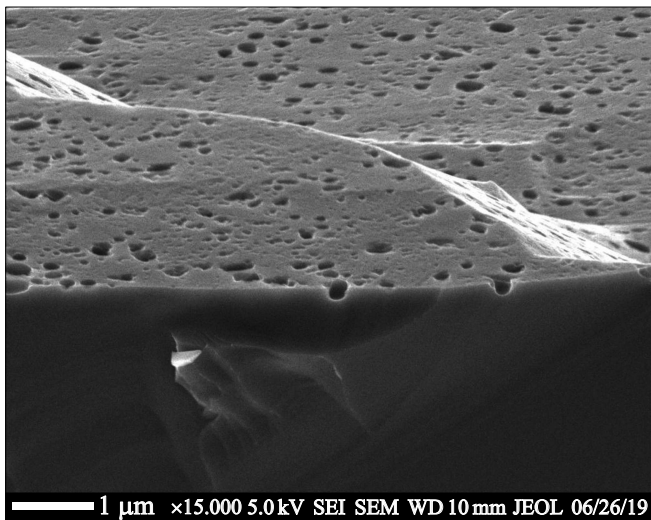


Рис. 3. СЭМ изображение поверхности кремниевой пластины после удаления нарушенного слоя, окисления под слоем V_2O_5 и обработки в плавиковой кислоте.

пленку оксида кремния. Поэтому расход кислорода из пленки V_2O_5 на окисление кремния восполняется за счет поступления кислорода из газовой фазы. Поскольку V_2O_5 участвует в реакции (2), но не расходуется, можно сделать вывод, что пленка V_2O_5 является хемостимулятором окисления кремния и выполняет функцию донора атомарного кислорода. Из-за низких значений коэффициента диффузии кислорода в SiO_2 при достижении критической толщины слоя SiO_2 скорость окисления кремния становится пренебрежимо малой, и рост слоя SiO_2 прекращается [13]. После растворения SiO_2 и V_2O_5 в плавиковой кислоте на поверхности кремния образуется слой, состоящий из микроскопической текстуры, образовавшейся в результате SDE ($30\text{--}45\ \mu\text{m}$), на поверхности которой находятся многочисленные вогнутые сфероиды с размерами от 100 до 400 нм (рис. 3). Вогнутые сфероиды разделены между собой относительно гладкими областями размерами 300–800 нм. Отчетливо видно, что поверхность кремния состоит из двух текстур. На поверхности обратной стороны пластины кремния находится макроскопическая текстура, образовавшаяся в результате удаления SDE. Вид такой поверхности аналогичен приведенному на рис. 1.

Для изучения влияния высокотемпературных отжигов и обработки в HF на прочностные свойства кремния была приготовлена четвертая группа образцов (тип IV). Для этого пластины SDE-кремния нарезались на квадраты $30 \times 30\ \text{mm}$ и подвергались двухступенчатому отжигу на воздухе — 450°C (1 h) + 630°C (1 h). Далее пластины обрабатывались в 40% HF для удаления поверхностного оксида кремния. Пластины имели двухстороннюю текстуру, аналогичную показанной на рис. 1. Всего для прочностных испытаний было подготовлено 66 образцов.

2. Измерение прочностных характеристик

Общепринятым методом определения прочности тонких пластин является измерение характеристик сопротивления изгибу, одноосному, когда образцами служат полоски, или двухосному для круглых или прямоугольных пластин. Края пластин или полосок даже после специальной обработки инициируют разрушение, поскольку всегда содержат дефекты, которые являются более высокими концентраторами напряжений по сравнению с дефектами на плоской поверхности пластины. Поэтому при трех- или четырехточечном изгибе полосок измеряются характеристики края, при этом не удастся достичь высоких значений прочности, которые получаются при осесимметричном изгибе круглых пластин с вынесенными за границы опоры краями, которые нагружены значительно слабее, чем центральные области пластины. Разрушение в этом случае определяется состоянием поверхности материала пластины. Последний метод иначе называют „кольцо-в-кольцо“ (ring-on-ring test), поскольку опора и нагружающий пуансон имеют контакт с образцом по окружности. Сказанное выше делает этот метод наиболее достоверным способом определения истинной прочности тонких пластин. В последнее время его часто используют для измерения прочности кремниевых пластин различного размера [19–25]. Однако при определении напряжений в случае осесимметричного изгиба для тонких пластин возникают трудности при анализе напряженного состояния и расчете величины прочности.

В [19] подробно рассмотрены различные методы расчета напряжений при изгибе тонких пластин: аналитические [26], численные [20–25] и экспериментальные [25,27,28]. Было показано, что формулами линейной теории упругости [26] можно пользоваться только в области крайне малых значений действующей силы и прогиба. Для определения реальной прочности кремниевых пластин они непригодны. Экспериментальные методы определения напряжений или формы изогнутой пластины, например рентгеновский [27,28] или оптический [25], достаточно сложны, требуют корректировки при изменении размера пластины и опорного или нагружающего колец и специальных устройств, обеспечивающих доступ световых или рентгеновских лучей в области пластины с наибольшими напряжениями. Расчетные методы, в частности конечно-элементное (finite element method (FEM) [29]) моделирование системы, позволяют по величине нагружающей силы рассчитать напряжения, прогиб и прочность пластины, однако расчеты должны быть проверены экспериментально. В [19] расчет напряжений сравнивался с рентгеновскими измерениями и показал хорошую сходимость результатов. В настоящей работе предложен более простой метод оценки правильности модели, положенной в основу расчета напряжений и прочности. Поскольку модель позволяет получить не только зависимость напряжений в заданной точке пластины от приложенной силы, но и зависимость прогиба

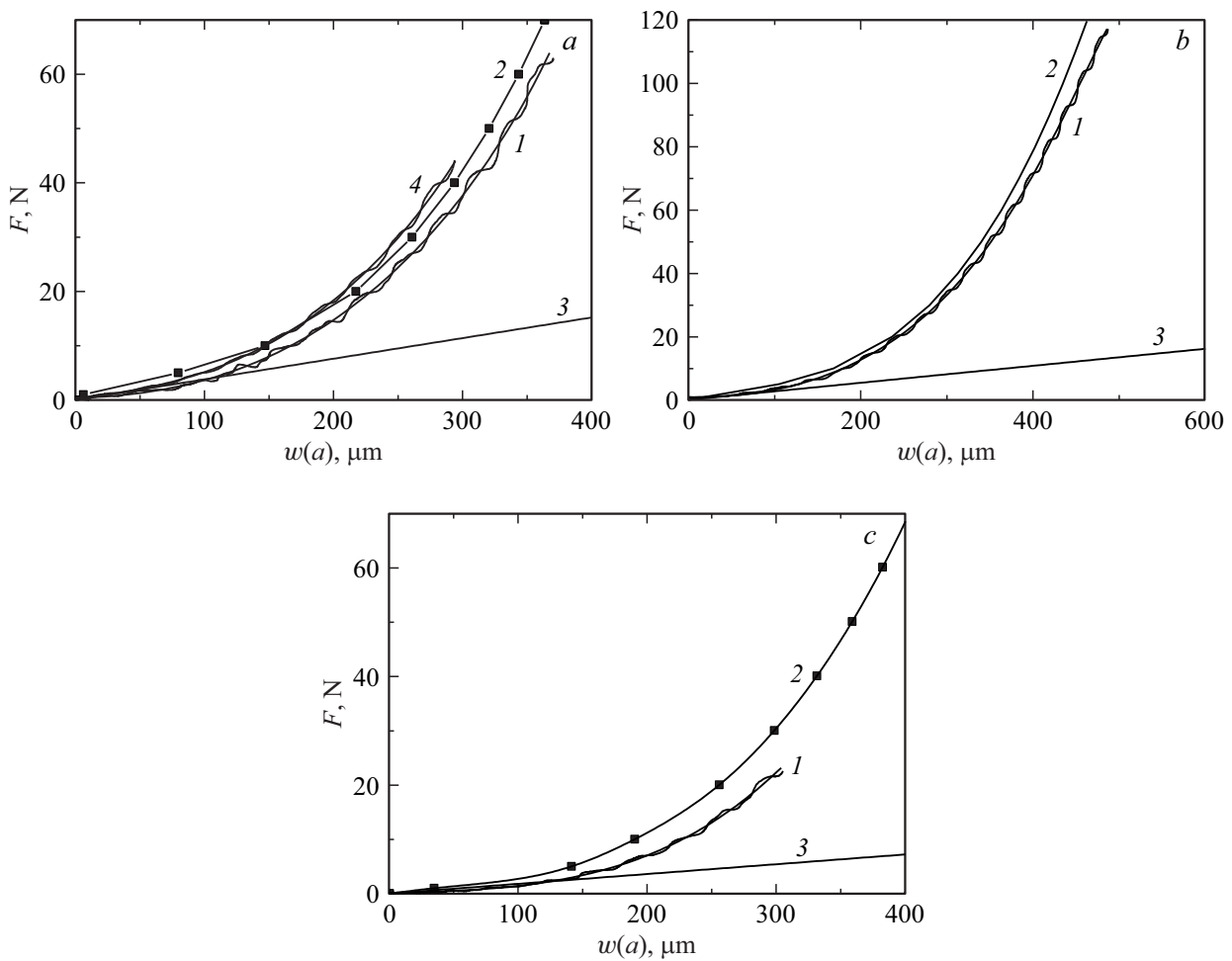


Рис. 4. Зависимость силы от прогиба под нагружающим кольцом для пластин толщиной 0.19 (a), 0.17 (b), 0.15 (c) mm. 1, 4 — экспериментальные и усредненные кривые, 2 — расчет по FEM, 3 — расчет по формулам [26]. Типы структур: I (b), II (c), III (a, кривые 4), IV (a, кривые 1).

от силы, то по экспериментальной проверке одной из этих зависимостей можно судить о правильности самой модели и вытекающих из нее следствий. Как показали ранее сделанные расчеты и эксперименты [27,28], максимальные радиальные напряжения в пластине, значением которых в момент разрушения является ее прочность, находятся под нагружающим кольцом. Прогиб пластины в этом месте равен перемещению подвижного штока испытательной машины, поэтому если экспериментальная и расчетная зависимости нагрузка–перемещение близки, то можно доверять и рассчитанным по той же модели напряжениям.

Эксперимент проводился следующим образом. Пластинки помещались на подставку в виде кольца диаметром 18 mm и нагружались со скоростью 0.2 mm/min. Оконечная часть штока испытательной машины также представляла кольцо диаметром 6 mm, соосное с первым кольцом и образцом. В ходе эксперимента фиксировалась сила F как функция перемещения штока испытательной машины $\Delta l = w(a)$, где $w(a)$ — прогиб пластины под нагружающим кольцом радиуса a . Поскольку

основе расчета лежала осесимметричная задача теории упругости, то квадратная пластина моделировалась равновеликим кругом, а модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν , которые в плоскости (100) зависят от направления, вычислялись как средние интегральные значения [27,28]. Расчеты по FEM проводились в пакете Comsol Multiphysics.

На рис. 4 приведены примеры расчетных и экспериментальных кривых нагрузка–перемещение для пластин с толщиной h , равной 0.17 (образцы типа I), 0.15 (типа II) и 0.19 mm (типа III и IV). Для всех пластин с разной толщиной и структурой поверхности видно, что расчеты по FEM показывают результаты, близкие к эксперименту, а формулами теории упругости для тонкой пластины, нагруженной по способу кольцо-в-кольцо [26], можно пользоваться только при очень малых прогибах и нагрузках. Полученные результаты могут служить основанием для распространения этой модели на определение зависимости максимальных напряжений в пластине от приложенной силы для использованных в работе пластин и условий их нагружения. На рис. 5

Прочность кремниевых пластин с различным типом структуры поверхности

Тип структуры	После SDE	Пирамидальная текстура	Окисление под слоем V ₂ O ₅	Отжиг+травление в HF
σ , МПа	874 ± 278	318 ± 24	432 ± 118	557 ± 146

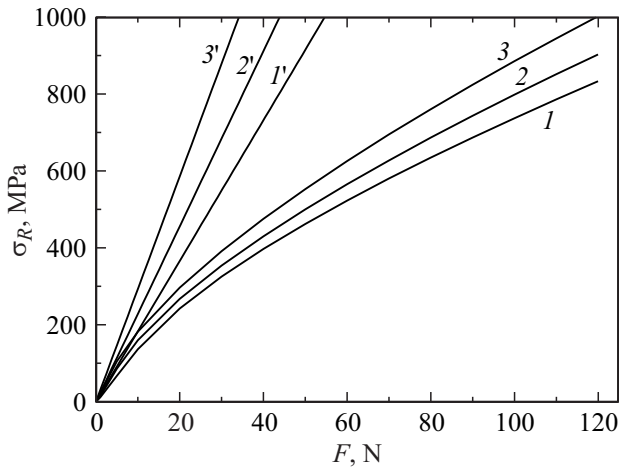


Рис. 5. Зависимость максимальных радиальных напряжений от приложенной силы при нагружении кольцо-в-кольцо, рассчитанных по FEM (1–3) и формулам [26] (1’–3’) теории упругости для пластин кремния разной толщины: 0.19 (1), 0.17 (2) и 0.15 (3) mm.

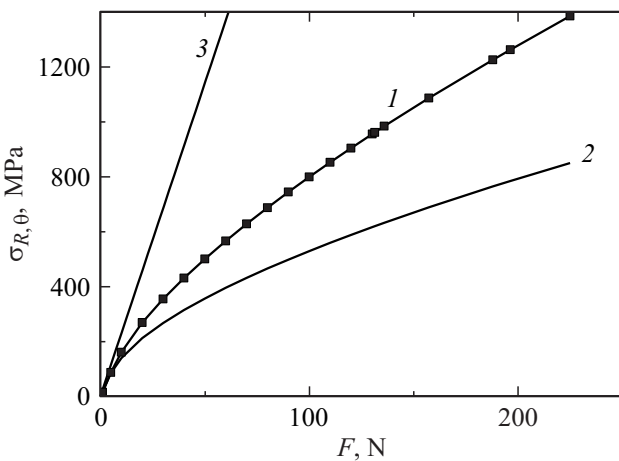


Рис. 6. Зависимость радиальных (1) σ_R и тангенциальных (2) σ_θ напряжений под нагружающим кольцом, рассчитанным по FEM, от силы для пластин кремния толщиной 0.17 mm (тип I); 3 — σ_R и равные им σ_θ при расчете по формулам теории упругости [26]. Точки на кривой 1 — аппроксимация расчетной кривой полиномом 3-го порядка.

показаны зависимости максимальных напряжений от действующей силы для пластин разной толщины. Там же приведены прямые, рассчитанные по формулам [26], которые дают сильно завышенные результаты даже при малых значениях нагрузки. При необходимости, используя формулу для расчета напряжений, легко подобрать

аппроксимирующую функцию $\sigma_R(F)$. Так, на рис. 5 точки на кривой 1 принадлежат полиному 3-го порядка $y = 28.41 + 11.41 \cdot x - 0.46 \cdot x^2 + 9.88 \cdot x^3$.

За прочность пластины, как отмечалось выше, принимались максимальные радиальные напряжения σ_R в момент ее разрушения. Следует заметить, что в плоском напряженном состоянии, каким является использованный способ испытаний, помимо радиальных напряжений, есть меньшие по величине тангенциальные напряжения σ_θ (рис. 6). Роль этих напряжений в разрушении, как и критерии разрушения при различных напряженных состояниях, не исследована и требует специального изучения.

В таблице приведены средние значения прочности и среднеквадратичные отклонения для 4-х типов пластин кремния, отличающихся структурой поверхностного слоя. Наименьшую прочность показали пластины с пирамидальной текстурой поверхности. Этого следовало ожидать, поскольку, как отмечалось во введении, вершины пирамид обладают высоким коэффициентом концентрации напряжений. Интересно, что для этих пластин наблюдается очень малый разброс данных (малая величина среднеквадратичного отклонения), что нетипично для хрупкого разрушения. Это может быть связано с хорошей воспроизводимостью формы пирамид и соответственно малым различием коэффициентов концентрации напряжений в разных пластинах.

Пластины типа III и IV обладают более высокой прочностью, чем пластины с пирамидальной текстурой, причем прочность пластин типа IV, в обработке которых участвует травление в HF, выше, чем типа III. Из литературных данных известно, что специальные режимы травления (химической полировки) кремния в растворах, содержащих HF, могут значительно повысить его прочность [27,28]. Высокая прочность образцов после SDE, возможно, связана со слабо выраженной микроструктурой, а макроструктура с плавными изменениями рельефа поверхности позволяет реализовать высокую прочность.

Заключение

Исследование показало, что все испытанные образцы кремния обладают прочностью, значительно более высокой, чем после обычной механической резки или полировки (более 300 МПа). При этом из трех типов образцов с различными способами текстурирования наименьшую среднюю прочность показали образцы с пирамидальным текстурированием, на 35% большую имели образцы, текстурированные с помощью окисления под тонким

слоем V_2O_5 , и на 55% большую пластины, подвергнутые двухступенчатому отжигу на воздухе при 450 и +630°C и обработке в 40% HF. Однако все они уступают в прочности исходным образцам после SDE. Высокая прочность последних показывает, что резервы повышения прочности текстурированных пластин кремния для фотопреобразователей еще не исчерпаны. Перспективной в этом отношении, с нашей точки зрения, являются такие типы финишной обработки, в которых участвует химическая полировка в растворах, содержащих HF. Известно, что используя особые режимы такой полировки можно получить тонкие пластины кремния с прочностью, существенно превышающую достигнутую в настоящей работе [27,28].

Следует также отметить, что при оценке времени безотказной эксплуатации ФЭП, одной только величины средней прочности, полученной при испытании пластин способом кольцо-в-кольцо, может оказаться недостаточно и понадобится учитывать характеристики распределения прочности и кинетические эффекты в разрушении. В этом случае можно будет рассчитать вероятность разрушения за данное время в реальных условиях и, поскольку пластин в ФЭП много, то можно будет оценить вероятное число пластин, которые могут разрушиться за определенное время эксплуатации.

Благодарности

Электронно-микроскопические исследования выполнены с использованием оборудования федерального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“, поддержанного Минобрнауки России.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Taguchi M., Yano A., Tohoda S., Matsuyama K., Nakamura Y., Nishiwaki T., Fujita K., Maruyama E. // IEEE J. Photovoltaics. 2014. N 4. P. 96–99.
- [2] Kegel J., Angermann H., Stürzebecher U., Conrad E., Mews M., Korte L., Stegemann B. // Appl. Surf. Sci. 2014. Vol. 301. P. 56–62.
- [3] Kasap S., Capper P. (Eds.) Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials, Springer International Publishing AG. 2017.
- [4] Green A., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E.D., Levi D.H., Hohl-Ebinger J., Ho-Baillie A.W.Y. // Prog. Photovolt. Res. Appl. 2017. Vol. 25. P. 668–676.
- [5] ITRPV. Eighth. Edition, September 2017. http://www.semi.org/sites/semi.org/files/docs/ITRPV_2014_Roadmap_Revision1_140324.pdf
- [6] Köntges M., Kurtz S., Jahn U., Berger K.A., Kato K., Liu H., Friesen T., Van Iseghem M. // Rev. Failures Photovolt. Modul. Report IEA-PVPS T13–01:2014.
- [7] Forbes L. // Sol. Energy. 2012. Vol. 86. P. 319–325.
- [8] Edwards M., Bowden S., Das U., Burrows M. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2008. Vol. 92. P. 1373–1377.
- [9] Moreno M., Murias D., Martinez J., Reyes-Betanzo C., Torres A., Ambrosio R., Rosales P., Roca i Cabarrocas P., Escobar M. // Solar Energy. 2014. Vol. 101. P. 182–191.
- [10] Buchler A., Beinert A., Kluska S., Hauelsen V., Romer P., Heinz F.D., Glatthaar M., Schubert M. // Energy Proced. 2017. Vol. 124. P. 18–23.
- [11] Rion J., Leterrier Y., Menson J.-A.E., Blairon J.-M. // Composites: Part A. 2009. Vol. 40. P. 1167–1173.
- [12] Пат. РФ. № 2600076. Способ получения светопоглощающей кремниевой структуры. С.Е. Никитин, Е.Е. Терукова, А.В. Нащекин, А.В. Бобыль. 20.10.2016.
- [13] Никитин С.Е., Терукова Е.Е., Нащекин А.В., Бобыль А.В., Трапезникова И.Н., Вербицкий В.Н. // ФТП. 2017. Т. 51. Вып. 1. С. 105.
- [14] Joachim Fruhauf. Shape and Functional Elements of the Bulk Silicon Microtechnique. A Manual of Wet-Etched Silicon Structures. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005. Printed in Germany. 229 p. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fb138230.pdf>
- [15] Angermann H., Laades A., Stürzebecher U., Conrad E., Klimm C., Schulze T.F., Jacob K., Lawrenz A., Korte L. // Solid State Phenomena. 2012. Vol. 187. N 349. P. 52.
- [16] Практическая растровая электронная микроскопия / Под ред. Дж. Голдстейна, Х. Яковича. М.: Мир, 1978. 656 с.
- [17] Borghesi A., Pivac B., Sassella A., Stella A. // J. Appl. Phys. 1995. Vol. 77. P. 4169.
- [18] Wilson J.R., Levis M.E. // Nature. 1965. Vol. 206. P. 1350–1351.
- [19] Шпейзман В.В., Николаев В.И., Поздняков А.О., Бобыль А.В., Тимашов Р.Б., Аверкин А.И. // ЖТФ. 2020. Т. 90. Вып. 1. С. 79.
- [20] Gouttebroze S., Lange H.I., Ma X., Glockner R., Emamifard B., Syvertsen M., Vardavoulias M., Ulyashin A. // Phys. Status Solidi. A. 2013. Vol. 210. N 4. P. 777–784. DOI: 10.1002/pssa.201300003
- [21] Gabor A.M., Janoch R., Anselmo A., Lincoln J.L., Seigneur H., Honeker Ch. // IEEE J. Photovolt. 2016. Vol. 6. N 1. P. 3575.
- [22] Rozgonyi G., Youssef K., Kulshreshtha P., Shi M., Good E. // Solid State Phenomena. 2011. Vol. 178–179. P. 79. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.178-179.79
- [23] Coletti G., van der Borg N., De Iulius S., Tool C.J., Geerligs L.J. rx06032. 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 4–8 September 2006, Dresden, Germany.
- [24] Rupnowski P., Sopori B. // Int. J. Fracture. 2009. Vol. 155. P. 67–74.
- [25] Popovich V.A., Geerstma W., Janssen M., Bennett I.J., Richardson I.M. EPD Congress. 2015. / Ed. J. Yurko, A. Allanore, L. Bartlett, J. Lee, L. Zhang, G. Tranell, Y. Meteleva-Fischer, S. Ikhmayies, A.S. Budiman, P. Tripathy, G. Fredrickson. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society). 2015. P. 242.
- [26] Витман Ф.Ф., Уфлянд Я.С., Иоффе Б.С. // Прикладная механика. 1970. Vol. 6. N 5. P. 122.
- [27] Степанов В.А., Песчанская Н.Н., Шпейзман В.В. // Прочность и релаксационные явления в твердых телах. Л.: Наука, 1984. 245 с.
- [28] Жога Л.В., Степанов В.А., Шпейзман В.В. // ФТТ. 1977. Т. 19. Вып. 8. С. 1521.
- [29] Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. М.: Изд-во Мир, 1984. 428 с. [Gallagher R. Finite element analysis: Fundamentals. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1975. 416 p.]