

Трибоэлектрическая генерация при трении высоколегированных алмазных зондов о поверхность p -Si

© П.А. Алексеев, Д.Д. Сахно, М.С. Дунаевский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: прохер@gmail.com

Поступила в Редакцию 27 октября 2023 г.

В окончательной редакции 20 ноября 2023 г.

Принята к публикации 22 ноября 2023 г.

Исследовалась генерация трибоэлектрического тока при трении алмазных зондов сканирующего зондового микроскопа о поверхность p -Si-подложек со слоем естественного оксида. Выбор зондов с различным типом легирования, а также подложек с различной ориентацией поверхности позволил установить определяющее влияние разности работ выхода зонда и поверхности на направление и силу трибоэлектрического тока. Генерация трибоэлектрического тока происходит за счет туннелирования неравновесных носителей заряда, возникающих вследствие разрушения химических связей при трении. В условиях освещения наблюдалось увеличение трибоэлектрического тока, а также возникновение фототока за счет разделения носителей заряда в области пространственного заряда.

Ключевые слова: трибоэлектричество, трибоэлектрическая генерация, кремний, легированный алмаз, туннелирование, фототок.

DOI: 10.61011/FTP.2023.09.56986.5701

1. Введение

Создание миниатюрных устройств для преобразования механической энергии окружающей среды в электричество является актуальной задачей. Одним из подходов является использование трибоэлектрического эффекта, заключающегося в переносе заряда при фрикционном контакте разных материалов. Активное исследование трибоэлектрической генерации при трении диэлектрических материалов позволило увеличить плотность мощности подобных генераторов до 500 Вт/м^2 и достигнуть эффективности преобразования механической энергии в 50% [1]. При трении диэлектрических материалов в цепи генерируются токи смещения и подобные генераторы выдают высокие напряжения и сравнительно низкие переменные токи $\sim 0.1 \text{ А/м}^2$ [2]. Для увеличения выходного тока недавно стал развиваться подход использования полупроводниковых материалов в трибоэлектрических генераторах [3]. При трении проводящего электрода о поверхность высоколегированного Si достигнуты плотности токов 10^5 А/м^2 [4]. При этом данные генераторы выдают ток с постоянным направлением. Механизм возникновения трибоэлектрического тока при трении о полупроводник является дискуссионным [3]. Для возникновения тока необходимо наличие электрического поля в области фрикционного контакта. Такое поле может быть обусловлено разностью работ выхода, флексоэлектрическим эффектом [5], возникновением и разрушением электрических диполей [6] в области границы. Трение материалов является неадиабатическим процессом и в области контакта происходит генерация электронно-дырочных пар за счет разрыва химических связей [7]. Важно отметить, что полярность

трибоэлектрического тока при трении одинаковых пар материалов в разных работах может быть различной. При трении Au-электрода о p -Si может быть как положительной [8], так и отрицательной [9] ток. Точные причины данного различия не установлены и требуется дополнительное исследование.

Для исследования трибоэлектрической генерации в полупроводниках одним из основных инструментов является сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) [3]. Действительно, СЗМ позволяет контролировать величину силы давления на поверхность, площадь контакта и скорость движения зонда при трении. Использование зондов с различным проводящим покрытием позволяет изменять разность работ выхода. Кроме того, с помощью СЗМ можно исследовать топографические и электрические свойства поверхности до и после трения. С другой стороны, существует ряд недостатков СЗМ для исследования трибоэлектрической генерации. Большинство современных атомно-силовых микроскопов использует оптическую систему для детектирования положения зонда, приводящую к засветке поверхности лазерным излучением [10]. Такая засветка при условии энергии кванта оптического излучения, большей, чем ширина запрещенной зоны полупроводника ($h\omega > E_g$), будет приводить к дополнительным эффектам — фотопотенциалу и фотопроводимости. К сожалению, в некоторых работах влияние данных эффектов игнорируется [11].

Другой сложностью является подбор зонда с проводящим покрытием. Известны следующие коммерчески доступные проводящие зонды: (i) с проводящим покрытием (Au, PtIr, Al, W_2C , TiN), (ii) цельнометаллические (Pt) и (iii) износостойкие с цельной алмазной иглой или поликристаллическим алмазным покрытием. При трении

Значения трибоэлектрического тока и поверхностного потенциала для различных пар полупроводниковых материалов

	КДБ001 (100) WF= 4.85 ± 0.1 эВ I , пА		КДБ005 (111) WF= 4.65 ± 0.1 эВ I , пА		КДБ12 (100) WF= 4.65 ± 0.1 эВ I , пА		КДБ001 (100) SP, мВ	КДБ005 (111) SP, мВ
	темно	светло	темно	светло	темно	светло	темно	темно
DCP11, <i>n</i> -тип, WF= 4.68 ± 0.1 эВ	12 ± 6	-200 ± 100	-20 ± 30	1000 ± 700	0 ± 3	-1000 ± 500	50 ± 100	300 ± 100
DEP30, <i>p</i> -тип, WF= 4.78 ± 0.1 эВ	4000 ± 3000	7000 ± 4000	0 ± 10	0 ± 100	0 ± 3	-50 ± 30	-50 ± 100	200 ± 100

проводящие покрытия изнашиваются, а цельнометаллическая Pt игла при сильных нажимах деформируется, изменяя площадь контакта. Поэтому использование высоколегированного алмаза является оптимальным вариантом. Важно отметить, что существуют коммерчески доступные зонды с цельной алмазной иглой, легированной бором (*p*-тип, зонды DEP30, NT-MDT), а также с поликристаллическим покрытием, легированным азотом (*n*-тип, зонды DCP11, NT-MDT). Несмотря на то что алмаз является широкозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны 5.5 эВ, высокий уровень легирования создает проводящую зону и при контакте таких зондов с металлической поверхностью, вольт-амперные характеристики имеют линейный вид [12,13]. Однако отличие работ выхода (WF) данных зондов составляет ~ 100 мэВ [14]. Таким образом, использование данных зондов позволяет проводить исследование влияния разности работ выхода на величину и полярность трибоэлектрического тока. Кроме того, известно, что подложки *p*-Si, в зависимости от ориентации поверхности ((100) или (111)), также имеют различные значения работы выхода [15] и генерируют импульсы тока противоположной полярности при контакте с проводящим зондом [16].

Целью данной работы является: (i) исследование величины и полярности трибоэлектрического тока в зависимости от разности работ выхода при трении зондов с высоколегированным алмазным покрытием о подложки *p*-Si с различной ориентацией поверхности, (ii) установление механизма трибоэлектрической генерации и выявление влияния оптического возбуждения на генерируемый ток.

2. Образцы и методы

В работе исследовались кремниевые подложки КДБ001 с поверхностью (100), КДБ005 с поверхностью (111), КДБ12 с поверхностью (100). Подложки были легированы бором и уровни легирования соответственно составляли $1 \cdot 10^{20}$, $5 \cdot 10^{19}$, $1 \cdot 10^{16}$ см⁻³ (см. таблицу). Подложки имели слой естественного оксида толщиной ~ 1 нм с шероховатостью поверхности RMS (root mean square) 0.2 нм.

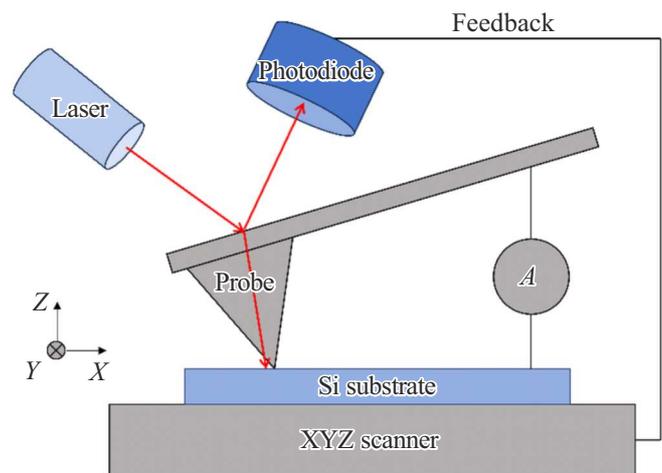


Рис. 1. Схема эксперимента по измерению трибоэлектрического тока.

Исследования трибоэлектрической генерации выполнялись методом проводящей атомно-силовой микроскопии на СЗМ NTEGRA AURA (NT-MDT, Россия). В качестве зондов использовались зонды DEP30 (NT-MDT, Россия), легированные бором, и DCP11 (NT-MDT, Россия), легированные азотом. Жесткость кантилеверов DEP30 составляла 20 Н/м, а жесткость кантилеверов DCP11 — 10 Н/м. Регистрация трибоэлектрического тока выполнялась встроенным амперметром с чувствительностью 3 пА. Важно отметить, что, как правило, сканирование в контактном режиме реализуется в режиме постоянной силы. В каждой точке поверхности обратная связь подает управляющие сигналы на Z-сканер (двигающийся вверх-вниз) для сохранения изгиба балки (кантилевера), а значит, и силы нажатия на поверхность на постоянном уровне (рис. 1). Величина изгиба балки контролируется с помощью оптической системы лазер-фотодиод. Данная конфигурация приводит к частичной засветке поверхности образца лазером с длиной волны 650 нм. Используемый в работе СЗМ позволяет отключать лазер и обратную связь и создавать контакт между зондом и поверхностью путем изменения положения Z-сканера. Поскольку плоскость поверхности образца может быть не параллельна плоскости сканирования XY,

сила воздействия на поверхность будет меняться в соответствии с углом наклона поверхности. В работе данный угол ($< 2^\circ$) минимизировался путем изменения наклона образца. Кроме того, трибоэлектрические токи возникали только при сильных нажимах зонда на поверхность ($\Delta z > 500$ нм относительно начального касания точки поверхности), поэтому влиянием наклона плоскости образца можно пренебречь. Регистрация трибоэлектрического тока производилась при сканировании области 1×1 мкм² со скоростью 1 строчка в секунду с разрешением 128×128 точек.

Величина электрического поля в области контакта зонд-подложка зависит от разности работ выхода зонда и подложки (поверхностного потенциала). Измерение поверхностного потенциала (SP) выполнялось методом Кельвин-зонд микроскопии с применением ИК-лазера с длиной волны 1300 нм. Важно отметить, что при трении работа выхода поверхности может отличаться от измеренной методом Кельвин-зонд микроскопии вследствие присутствия пленки водного адсорбата на поверхности, флексоэлектрического эффекта, а также флуктуаций локальной работы выхода. Исследование влияния освещения на трибоэлектрический ток выполнялось с помощью включения или отключения встроенного лазера (рис. 1).

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2, *a* представлена топография поверхности образца КДБ001, полученная в полуконтактном режиме зондом DEP30. Направлению медленного сканирования соответствует горизонтальная ось на скане. После получения изображения топографии поверхности была получена карта трибоэлектрического тока (рис. 2, *b*). Сканирование начальной области протяженностью 200 нм (темная вертикальная полоса) выполнялось без создания механического контакта. Затем зонд приводился в контакт с поверхностью с силой нажатия 10 мкН и в цепи происходила генерация трибоэлектрического тока. Характерный профиль трибоэлектрического тока, полученный вдоль пунктирной линии на рис. 2, *b*, представлен на рис. 2, *c*. Сила тока для данной пары зонд-подложка в условиях темноты составляет 4 ± 3 нА. Положительное значение тока соответствует движению электронов из зонда в подложку. Генерация тока происходила только в процессе трения зонда о поверхность. При остановке зонда (в условиях темноты) ток не протекал. Важно отметить, что трибоэлектрический ток возникал только при сильном нажиме на поверхность (с силой $F > 1$ мкН), и после получения карты трибоэлектрического тока в области сканирования наблюдалась впадина. При меньших силах, по-видимому, не происходило разрыва химических связей на поверхности и выделения энергии, достаточной для образования носителей заряда, переносящих ток. Если глубина впадины превышала толщину поверхностного естественного оксида, то трибоэлектрический ток исчезал.

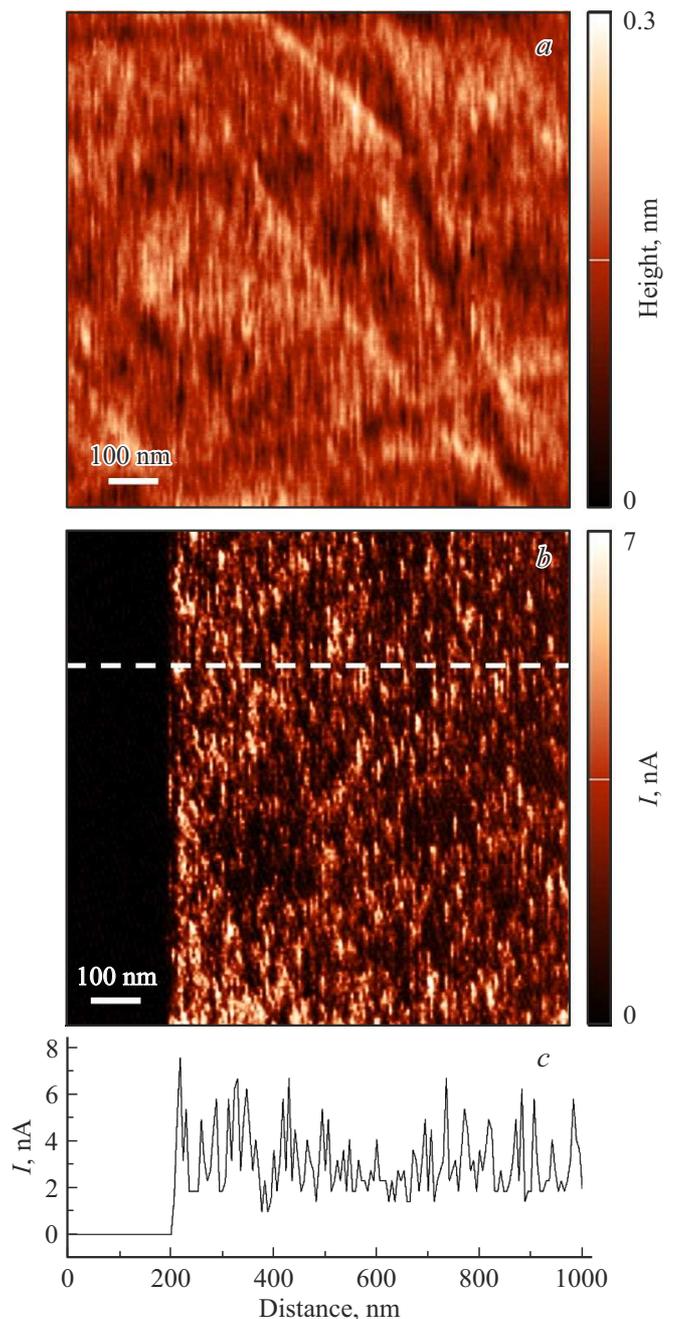


Рис. 2. Исследование подложки КДБ001 зондом DEP30 (*p*-тип): *a* — топография поверхности; *b* — карта трибоэлектрического тока. Контакт между зондом и поверхностью был создан при достижении горизонтальной координаты 200 нм; *c* — профиль трибоэлектрического тока, полученный вдоль пунктирной линии на рис. *b*. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

Таким образом, трибоэлектрическая генерация возникла только при частичном разрушении поверхностного оксида. Детальное исследование механической деградации поверхности при трибоэлектрической генерации выходит за рамки данной работы и для удобства сравне-

ния величин трибоэлектрического тока сила нажима на поверхность выдерживалась на уровне 10 мкН.

В таблице представлены значения трибоэлектрического тока для исследуемых зондов и подложек в условиях темноты и лазерной засветки.

Из таблицы следует, что величина трибоэлектрического тока в зависимости от зонда и подложки может меняться на несколько порядков. Более того, полярность тока может меняться при включении лазерной засветки. Интересно отметить, что для ряда пар зонд-подложка полярность тока может быть переменной в одинаковых условиях (КДБ005). В условиях темноты для низколегированной подложки КДБ12 трибоэлектрический ток не регистрировался. Учитывая чувствительность используемого амперметра, полученные значения согласуются с данными, представленными в работах для кремния с таким же уровнем и типом легирования [11].

Для объяснения полученных экспериментальных данных рассмотрим энергетические диаграммы зондов и исследуемых полупроводников. Как уже указывалось выше, трибоэлектрический ток может быть обусловлен разностью работ выхода зонда и поверхности подложки. Значения работ выхода зондов DCP11 и DEP30 представлены в статье [14], в которой работы выхода зондов определялись путем сравнения с работой выхода высоко-ориентированного пиролиитического графита (ВОПГ). Однако использовалось некорректное значение работы выхода ВОПГ 4.6 ± 0.1 эВ. Корректное значение составляет 4.48 эВ [17]. Таким образом, работа выхода зонда DEP30 должна составлять 4.78 ± 0.1 эВ, а зонда DCP11 — 4.68 ± 0.1 эВ. Разница в 0.1 эВ согласуется с данными поверхностного потенциала, представленными в таблице. Для p -Si (100) работа выхода составляет 4.85 ± 0.1 эВ, а для p -Si (111) — 4.6 ± 0.1 эВ [15]. Данное различие также согласуется с измерениями поверхностного потенциала, представленными в таблице. Важно отметить, что электронное сродство для кремния составляет 4.05 эВ, что приводит к приповерхностному изгибу зон, поскольку положение уровня Ферми в объеме не совпадает с уровнем Ферми на поверхности (работой выхода), закрепленным на поверхностных состояниях. Кроме того, высокий уровень легирования в объеме Si приводит к смещению уровня Ферми на 60 мэВ ниже дна зоны проводимости в КДБ001 и 40 мэВ в КДБ005. С учетом уровня легирования и положения уровня Ферми на поверхности ширина приповерхностной области пространственного заряда (ОПЗ) для КДБ005 составляет 4 нм, а для КДБ 001 — 1.5 нм.

На рис. 3, *a* и *b* представлены зонные диаграммы в области поверхностного оксида для КДБ001 и КДБ005 соответственно. Положения уровней Ферми и носители заряда изображены черным цветом для условий темноты и красным — при лазерной засветке. Также на рисунке показаны работы выхода зондов DEP30 и DCP11. Рисунок приведен для случая, когда между зондом и поверхностью не возникло электрического контакта и уровни Ферми не выровнялись. Важно отметить, что

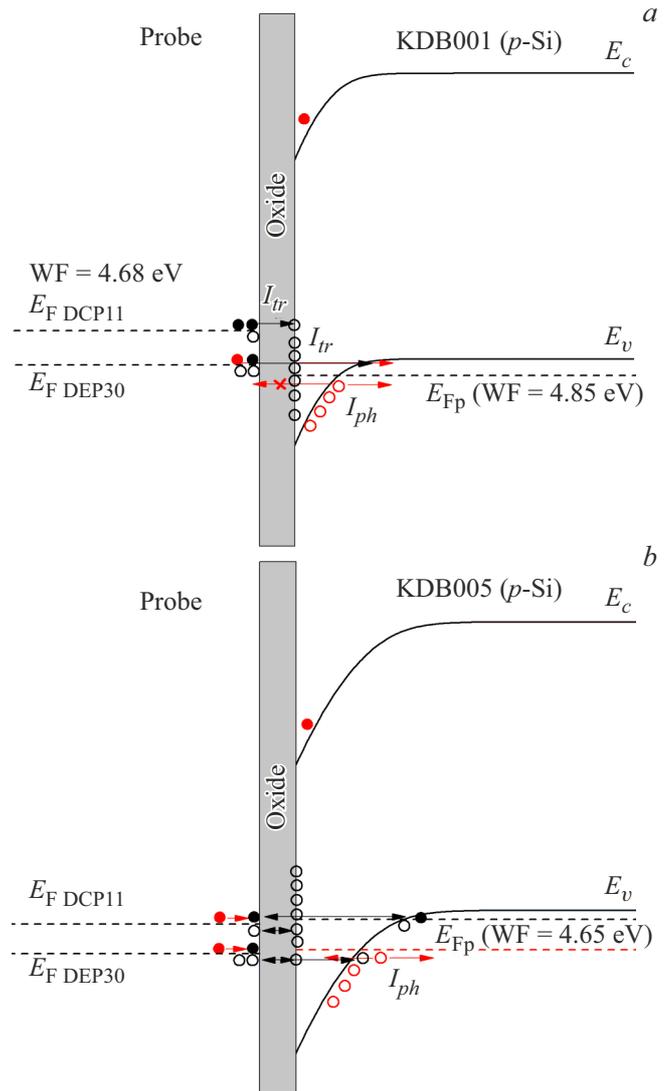


Рис. 3. Зонные диаграммы в области поверхностного оксида для КДБ001 (*a*) и КДБ005 (*b*). Черные круги — распределение носителей в темноте, красные круги — распределение носителей при освещении. Заполненные круги — электроны, незаполненные круги — дырки. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

бор и азот в алмазе являются достаточно глубокими примесями 0.3 и 1.7 эВ [18] соответственно, и поэтому положением валентной зоны и зоны проводимости алмаза при комнатной температуре можно пренебречь. Однако важно учитывать, что высокое легирование создает примесную зону конечной ширины в запрещенной зоне.

Рассмотрим случай трения зонда DCP11 о подложку КДБ001 (рис. 3, *a*). При трении в области контакта вследствие разрыва химических связей или нагрева кристаллической решетки выделяется энергия, которая может приводить к формированию электронно-дырочных пар. Кроме того, легированный зонд также имеет высокую концентрацию носителей заряда. Относительное

положение уровней Ферми зонда и подложки делает возможным прямое туннелирование электронов из зонда только на поверхностные состояния на границе кремний/поверхностный оксид. Обмен зарядами данных состояний с объемом кремния затруднен, поскольку прямое туннелирование не может происходить в запрещенную зону. Однако если мы рассмотрим случай для зонда DEP30, у которого уровень Ферми ниже на ~ 100 мэВ, то становится возможным туннелирование в валентную зону, и поэтому величина трибоэлектрического тока вырастает на 3 порядка (см. таблицу). Полярность регистрируемого тока также соответствует туннелированию электронов из зонда в кремний.

В условиях освещения происходит увеличение концентрации неравновесных носителей заряда, сужение приповерхностной ОПЗ и смещение вниз квазиуровня Ферми для дырок. Однако стоит учитывать, что вклад лазерной засветки будет тем меньше, чем выше уровень легирования кремния, поскольку интенсивность лазерного излучения, достигающего до подложки, невысока и соответствует $\sim 10^4$ Вт/м² [19]. Таким образом, для пары КДБ001/DCP11 при освещении помимо сохранения туннелирования электронов из зонда на поверхностные состояния (I_{tr}) будет возникать фототок (I_{ph}) при разделении электронно-дырочных пар в приповерхностной ОПЗ. При этом дырки будут двигаться в полупроводник, что соответствует отрицательному току. Важно отметить, что прямое туннелирование дырок в зонд также невозможно, ввиду узости примесной зоны в алмазе. Доминирование фототока над трибоэлектрическим приводит к тому, что суммарный ток имеет отрицательное направление. Для случая КДБ001/DEP30 возможность прямого туннелирования как электронов из зонда в валентную зону, так и дырок в зонд приводит к дополнительному увеличению регистрируемого тока по сравнению с условиями темноты.

Для подложки КДБ005 наблюдается отличающаяся картина, обусловленная близостью уровней Ферми зондов и подложки. Кроме того, более широкая ОПЗ значительно уменьшает туннельные токи. В условиях темноты регистрируемый ток имеет относительно низкие значения для обоих зондов и имеет переменное направление в разных точках скана, что объясняется локальными флуктуациями относительных положений уровней Ферми. Для зонда DEP30 ток ниже, поскольку разница с уровнем Ферми в подложке более существенная 130 ± 200 мэВ, по сравнению с 30 ± 200 мэВ для зонда DCP11. В условиях освещения квазиуровень Ферми для дырок сдвигается вниз, что увеличивает вероятность туннелирования электронов из зонда DCP11 в подложку. Данная конфигурация аналогична конфигурации для пары КДБ001/DEP30 (рис. 3, а), поэтому ток имеет положительное направление. Для пары КДБ005/DEP30 в условиях освещения уровни Ферми практически совпадают, что приводит к генерации тока с переменной полярностью, но увеличенной амплитудой по сравнению с темнотой за счет неравновесных носителей заряда

и сужения ОПЗ. В рассмотренных выше случаях не обсуждалось поведение неравновесных электронов в зоне проводимости кремния. Приповерхностный изгиб зон и удаленность от уровня Ферми, по сравнению с дырками, приводят к низким электронным токам в зоне проводимости Si, которыми можно пренебречь.

Для подложки КДБ12 уровень Ферми в объеме находится в запрещенной зоне и низкое легирование приводит к значительному уширению ОПЗ, снижению туннельного тока и отсутствию трибоэлектрической генерации. В условиях освещения контакт зонд–подложка работает как солнечный элемент и фототок имеет отрицательное направление.

Анализ результатов эксперимента позволяет сформулировать ряд закономерностей, влияющих на величину трибоэлектрического тока при фрикционном контакте двух высоколегированных полупроводников.

В условиях темноты полярность трибоэлектрического тока определяется разностью работ выхода (положением закрепления уровня Ферми на поверхности). Полярность не определяется полем p – n -перехода, как это было постулировано в модели трибовольтаического эффекта [11].

Трибоэлектрическая генерация происходит в высоколегированных полупроводниках со слоем естественного оксида, что подтверждает механизм трибоэлектрического туннелирования [8]. Поверхностные состояния на границе оксид/полупроводник необходимы в качестве промежуточных состояний, через которые протекает трибоэлектрический ток.

Трибоэлектрическая генерация наблюдалась только для случая возникновения топографических изменений на поверхности. Таким образом, выделение энергии происходит за счет разрушения и образования химических связей на поверхности оксида [4].

В условиях освещения происходит как усиление трибоэлектрического тока за счет усиления туннелирования, так и возникновение фототока за счет разделения неравновесных носителей в приповерхностной ОПЗ. Полярности трибоэлектрического тока и фототока могут быть противоположными и суммарный ток определяется балансом данных токов.

4. Заключение

В работе исследовалась генерация тока при трении высоколегированных алмазных зондов p - и n -типа легирования о поверхность p -Si с разным уровнем легирования и ориентацией поверхности. Работа выхода зонда n -типа была на 100 мэВ меньше работы выхода зонда p -типа легирования. Работа выхода p -Si (100) была на 250 мэВ больше, чем у p -Si (111). Данные различия в работах выхода зондов и подложек Si позволили исследовать влияние разности работ выхода на направление и величину трибоэлектрического тока.

В условиях темноты при трении зонда о поверхность высоколегированного p -Si наблюдалась генерация трибоэлектрического тока. Направление тока определялось разностью работ выхода зонда и поверхности, и ток протекал в направлении материала с меньшей работой выхода. Трибоэлектрическая генерация происходила за счет выделения энергии при разрушении зондом химических связей на поверхности. Выделение энергии приводит к генерации неравновесных носителей заряда, которые туннелируют через поверхностный оксид и приповерхностную ОПЗ в кремнии. Величина трибоэлектрического тока определяется шириной приповерхностной ОПЗ и возможностью прямого туннелирования носителей заряда в валентную зону. Так, например, для пары алмазный зонд n -типа—подложка КДБ001 (100) уровень Ферми зонда попадает в запрещенную зону в Si и величина трибоэлектрического тока составляет 12 ± 6 пА, в то время как для зонда p -типа уровень Ферми попадает в валентную зону и ток вырастает на 3 порядка — до 4 ± 3 нА.

В условиях освещения за счет неравновесных носителей заряда и уменьшения ширины приповерхностной ОПЗ трибоэлектрический ток увеличивается. Однако возникает дополнительный фототок, обусловленный полем приповерхностной ОПЗ, направление которого может не совпадать с направлением трибоэлектрического тока. Суммарный ток при трении в условиях освещения определяется балансом трибоэлектрического и фототоков. Результаты работы позволят увеличить эффективность трибоэлектрических генераторов на основе полупроводниковых материалов, а также гибридных устройств трибоэлектрический генератор-солнечный элемент.

Финансирование работы

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 22-22-20084 (<https://rscf.ru/project/22-22-20084/>) совместно с грантом Санкт-Петербургского научного фонда в соответствии с соглашением от 14 апреля 2022 г. № 24/202 2.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] G. Zhu, Y.S. Zhou, P. Bai, X.S. Meng, Q. Jing, J. Chen, Z.L. Wang. *Advanced Mater.*, **26** (23), 3788 (2014).
- [2] Z.L. Wang. *Materials Today*, **20** (2), 74 (2017).
- [3] R. Yang, R. Xu, W. Dou, M. Benner, Q. Zhang, J. Liu. *Nano Energy*, **83**, 105849 (2021).
- [4] S. Lin, R. Shen, T. Yao, Y. Lu, S. Feng, Z. Hao, H. Zheng, Y. Yan, E. Li. *Advanced Sci.*, **6** (24), 1901925 (2019).
- [5] P. Yudin, A. Tagantsev. *Nanotechnology*, **24** (43), 432001 (2013).
- [6] K.M. Abdelaziz, J. Chen, T.J. Hieber, Z.C. Leseman. *J. Electrostatics*, **96**, 10 (2018).
- [7] J.Y. Park, M. Salmeron. *Chem. Rev.*, **114** (1), 677 (2014).
- [8] J. Liu, M. Miao, K. Jiang, F. Khan, A. Goswami, R. McGee, Z. Li, L. Nguyen, Z. Hu, J. Lee, K. Cadien, T. Thundat. *Nano Energy*, **48**, 320 (2018).
- [9] S. Lin, Y. Lu, S. Feng, Z. Hao, Y. Yan. *Advanced Mater.*, **31** (7), 1804398 (2019).
- [10] V.A. Sharov, P.A. Alekseev, B.R. Borodin, M.S. Dunaevskiy, R.R. Reznik, G.E. Cirlin. *ACS Appl. Energy Mater.*, **2** (6), 4395 (2019).
- [11] M. Zheng, S. Lin, L. Xu, L. Zhu, Z.L. Wang. *Advanced Mater.*, **32** (21), 2000928 (2020).
- [12] Y. Tsay, K. Ananthanarayanan, P. Gielisse, S. Mitra. *J. Appl. Phys.*, **43** (9), 3677 (1972).
- [13] P. Alekseev, B. Borodin, M. Dunaevskii, A. Smirnov, V.Y. Davydov, S. Lebedev, A. Lebedev. *Techn. Phys. Lett.*, **44** (5), 381 (2018).
- [14] M. Kratzer, O. Dimitriev, A. Fedoryak, N. Osipyonok, P. Balaz, M. Balaz, M. Tesinsky, C. Teichert. *J. Appl. Phys.*, **125** (18), 185305 (2019).
- [15] G. Shao. *Energy Environ. Mater.*, **4** (3), 273 (2021).
- [16] S. Ferrie, N. Darwish, J.J. Gooding, S. Ciampi. *Nano Energy*, **78**, 105210 (2020).
- [17] W.N. Hansen, G.J. Hansen. *Surf. Sci.*, **481** (1), 172 (2001).
- [18] L. Diederich, O. Küttel, P. Aebi, L. Schlapbach. *Surf. Sci.*, **418** (1), 219 (1998).
- [19] P.A. Alekseev, V.A. Sharov, B.R. Borodin, M.S. Dunaevskiy, R.R. Reznik, G.E. Cirlin. *Micromachines*, **11** (6), 581 (2020).

Редактор Г.А. Оганесян

Triboelectric generation by friction of heavily doped diamond probes on a p -Si surface

P.A. Alekseev, D.D. Sakhno, M.S. Dunaevskiy

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The generation of triboelectric current during friction of diamond probes on the surface of p -Si substrates with a native oxide layer was studied. The choice of probes with different doping, as well as substrates with different surface orientations, made it possible to establish the determining influence of the probe-surface work functions difference on the direction and value of the triboelectric current. The generation of triboelectric current occurs due to the tunneling of nonequilibrium charge carriers resulting from the chemical bonds breaking during friction. Under illumination conditions, an increase in the triboelectric current was observed, as well as the photocurrent appearance due to the charge carriers separation in the space charge region.