

Применение тонких слоев MoO_x для пассивации наноструктурированной поверхности кремния

© А.А. Максимова^{1,2}, А.В. Уваров¹, Е.А. Вячеславова¹, А.И. Баранов¹, О.П. Михайлов^{1,3},
В.А. Поздеев^{1,2}, Э.Я. Ярчук², А.С. Гудовских^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова
Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина),
197022 Санкт-Петербург, Росси

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: maksimova_alina@spbau.ru

Поступила в Редакцию 5 мая 2026 г.

В окончательной редакции 13 июня 2026 г.

Принята к публикации 25 июня 2026 г.

Исследована возможность использования тонких слоев MoO_x для пассивации и формирования селективного дырочного контакта на наноструктурированной поверхности черного кремния (black silicon, *b*-Si). Нановолокна *b*-Si высотой ~ 0.7 мкм и диаметром 0.1–0.2 мкм получены методом плазмохимического травления. Слои MoO_x осаждены вакуумным термическим испарением и, согласно растровой электронной микроскопии, формируют дендритные структуры на всей поверхности нановолокон. С помощью измерения кинетики спада фотолюминесценции показано, что пассивирующий слой MoO_x увеличивает время жизни неосновных носителей заряда с 9 до 59 нс, что свидетельствует об успешной пассивации поверхности. Изготовлен лабораторный солнечный элемент $\text{Ag}/\text{ITO}/\text{MoO}_x/\text{b-Si}/\text{Ag}$ с эффективностью преобразования 4.25 %. Результаты подтверждают перспективность MoO_x для создания солнечных элементов на основе черного кремния.

Ключевые слова: черный кремний, оксид молибдена, селективные контакты, время жизни носителей заряда, солнечные элементы.

DOI: 10.61011/FTP.2026.07.63945.9760

Сегодня наиболее перспективными технологиями с точки зрения эффективности остаются кремниевые солнечные элементы на основе гетеропереходов (HIT), где тонкие слои аморфного кремния (*a*-Si) пассивируют поверхность кристаллической подложки. Однако их эффективность приближается к теоретическому пределу, а сам аморфный кремний имеет недостатки, такие как паразитное поглощение в УФ-части спектра и ограниченная термостабильность. Это стимулирует активный поиск новых материалов и архитектур.

Одним из главных направлений стало создание наноструктурированной поверхности черного кремния (*b*-Si), что позволяет кардинально снизить отражение света в широком спектральном и угловом диапазоне. Такая поверхность потенциально позволяет отказаться от стандартных антиотражающих покрытий и повысить среднесуточную выработку энергии, особенно для стационарных панелей. Однако основная сложность заключается в нанесении качественных пассивирующих слоев на такую сложную трехмерную поверхность. Традиционный аморфный кремний часто наносится неоднородно, что приводит к возникновению дефектов и увеличению рекомбинационных потерь.

В данной работе предлагается использовать тонкий слой оксида молибдена (MoO_x) для пассивации нано-

структурированной поверхности кремния. Этот материал потенциально способен обеспечить эффективную полевую пассивацию за счет своей зонной структуры, минимизировать паразитное поглощение и выступать в роли селективного контакта для дырок [1]. Осаждение слоев MoO_x проводилось методом вакуумного термического испарения, который ранее успешно применялся для изготовления оптоэлектронных приборов на основе MoO_3/Si -гетеропереходов [2]. В данной работе выполнено исследование свойств этого слоя на развитой поверхности — его морфологии и пассивирующей способности.

Образцы черного кремния были изготовлены с использованием пластин *n*-типа (100) *c*-Si толщиной 180 мкм и концентрацией электронов $2\text{--}3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Формирование черного кремния проводилось методом сухого плазмохимического травления с индуктивно связанной плазмой (ICP, RIE), с использованием газовой смеси SF_6 и O_2 с потоками 21 и 28 $\text{см}^3/\text{мин}$ соответственно. Давление в камере составляло 5 мТорр, ВЧ мощность — 700 Вт.

Затем поверхность очищали по методу Ширази, а естественный оксид удаляли травлением в HF непосредственно перед осаждением пассивирующих слоев. Слои собственного и легированного *a*-Si:H осаждались на тыльную поверхность кремния методом плазмохимиче-

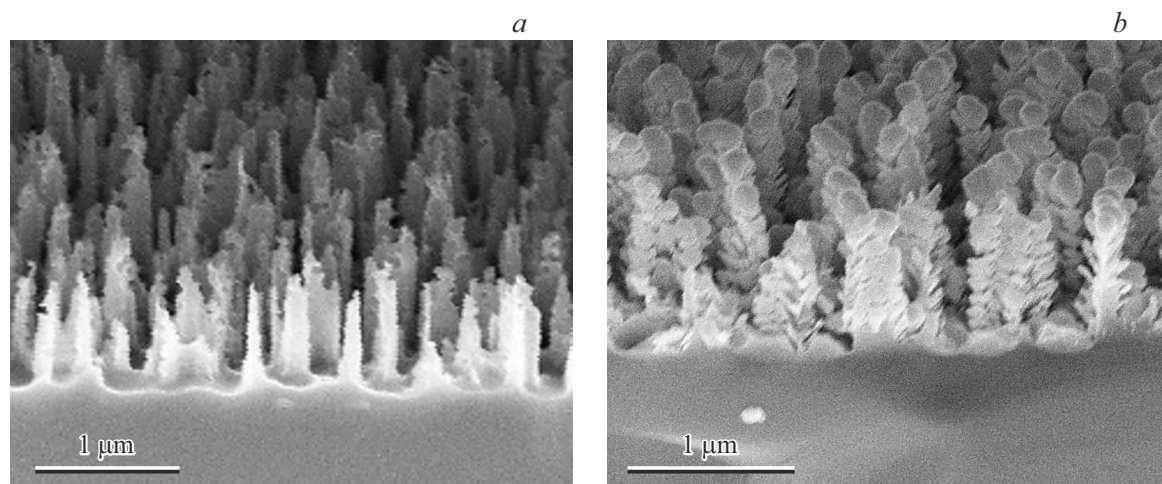


Рис. 1. Изображение растровой электронной микроскопии черного кремния: *a* — исходная структура; *b* — структура после осаждения MoO_x .

ского осаждения в установке Oxford Plasmalab 100. Осаждение проводилось при ВЧ-мощности 5 Вт, давлении 350 мТорр и температуре 250 °С. Слой i - a -Si:H толщиной 5 нм был осажден на тыльную сторону подложек Si, после чего осаждался слой n - a -Si:H толщиной 10 нм с использованием газовой смеси SiH_4 , H_2 и фосфина (PH_3) [3].

Сначала 170 нм в пересчете на планар оксида молибдена термически испарялось в вакуумной установке Voc Edwards Auto 500 на верхнюю поверхность черного кремния. В процессе термического осаждения MoO_x часть атомов кислорода реагирует с остаточной атмосферой камеры, поэтому материал не является строго стехиометрическим. Толщина слоев была оценена с помощью лазерного эллипсометра Horiba PZ2000 с He–Ne-источником (632.8 нм).

Морфология поверхности черного кремния изучалась с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) на установке Zeiss Supra 25. РЭМ-изображение исходного образца показало (рис. 1, *a*), что высота волокон черного кремния составляет ~ 0.7 мкм с диаметром 0.1–0.2 мкм. Осаждение слоев MoO_x происходит по всей поверхности нановолокон, включая боковые стенки (рис. 1, *b*), однако геометрия нановолокон после осаждения изменяется — оксид молибдена осаждается в виде ветвистых структур, что обусловлено несколькими факторами. Во-первых, как показано в работе [4], неровная поверхность волокон способствует направленному росту иерархических структур по партвердофазному механизму. Во-вторых, анизотропия кристаллической решетки MoO_3 (орторомбическая структура с сильной связью внутри слоев и слабыми ван-дер-ваальсовыми взаимодействиями между слоями) предопределяет преимущественный рост вдоль кристаллографического направления (001). В-третьих, низкая температура подложки при термическом испарении (отсутствие дополнительного

нагрева) может усиливать ветвление, так как, согласно данным по восстановлению оксида молибдена, степень дендритного роста увеличивается с понижением температуры [5].

Такая морфология увеличивает эффективную площадь поверхности и дополнительно снижает отражение за счет „запутывания“ света в ветвистой структуре. Однако увеличенная площадь поверхности также может привести к возрастанию концентрации оборванных связей на границе раздела, что потенциально ухудшает пассивацию.

Тем не менее время жизни неосновных носителей заряда (ННЗ), исследованное путем измерения времени спада сигнала фотолуминесценции, показывает, что положительный эффект от полевой пассивации поверхностных состояний со стороны MoO_x преобладает над негативным влиянием морфологии. На рис. 2, *a* и *b* показаны схематические изображения структур до и после осаждения MoO_x , а на рис. 2, *c* и *d* показано распределение эффективного времени жизни ННЗ по поверхности образца, измеренное сразу после осаждения пассивирующих слоев.

Согласно картам распределения времени жизни ННЗ, при пассивации оксидом молибдена максимальное время жизни возрастает с 9 до 59 мкс. Достигнутое значение времени жизни является достаточным для изготовления лабораторных образцов солнечных элементов с ожидаемой эффективностью на уровне нескольких процентов.

Для создания солнечного элемента площадью 1 см² серебро (Ag) термически испарялось на тыльную сторону для формирования омического контакта. Далее, на лицевую поверхность наносился прозрачный проводящий электрод на основе оксида индия–олова (ITO) методом магнетронного распыления толщиной 100 нм. Мишень представляла собой диск 3'' из спеченного оксида состава 90 % In_2O_3 и 10 % SnO_2 толщиной 5 мм,

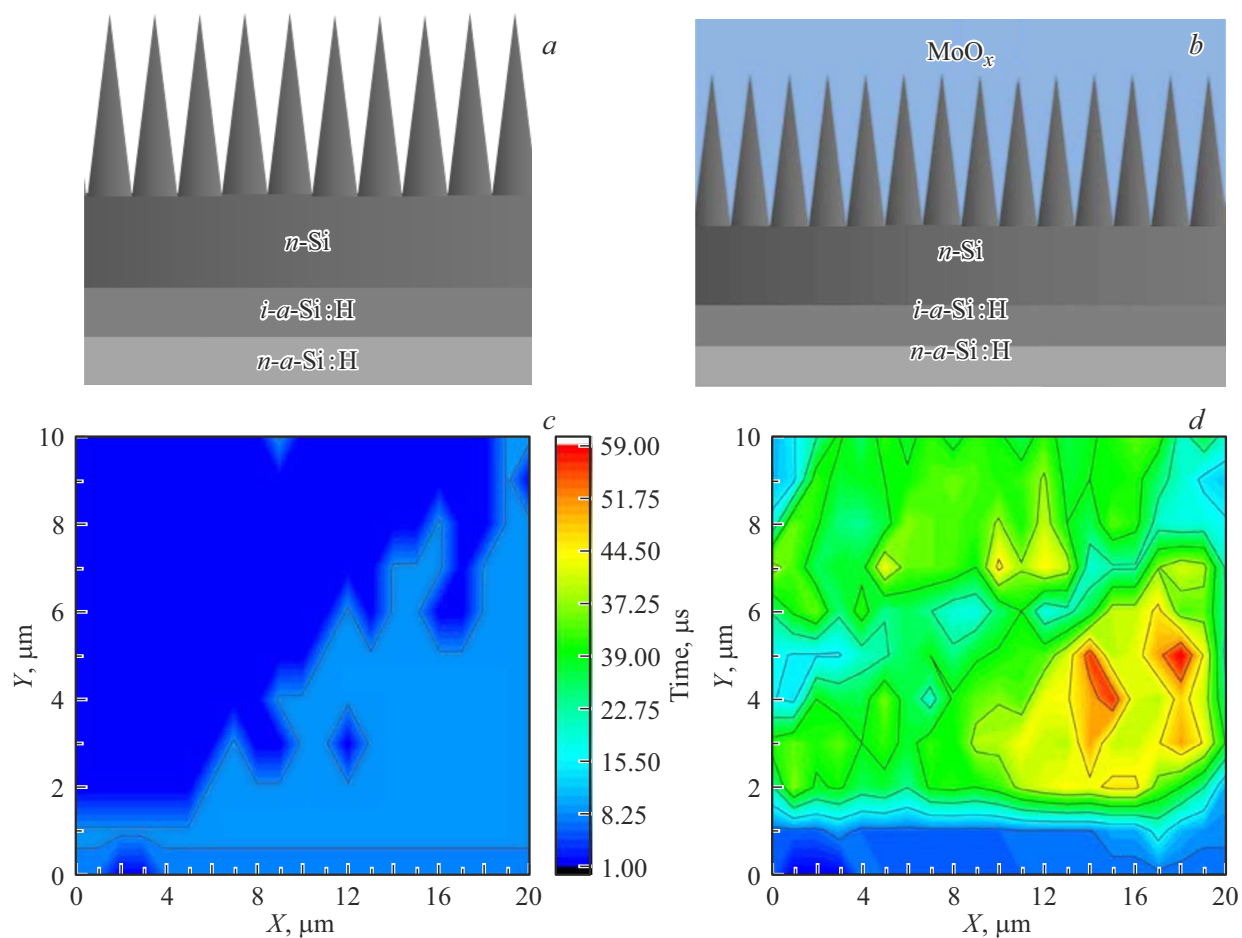


Рис. 2. *a* — схематическое изображение исходной структуры; *b* — схематическое изображение структуры с MoO_x ; *c* — карта распределения времени жизни исходной структуры; *d* — карта распределения времени жизни структуры с MoO_x .

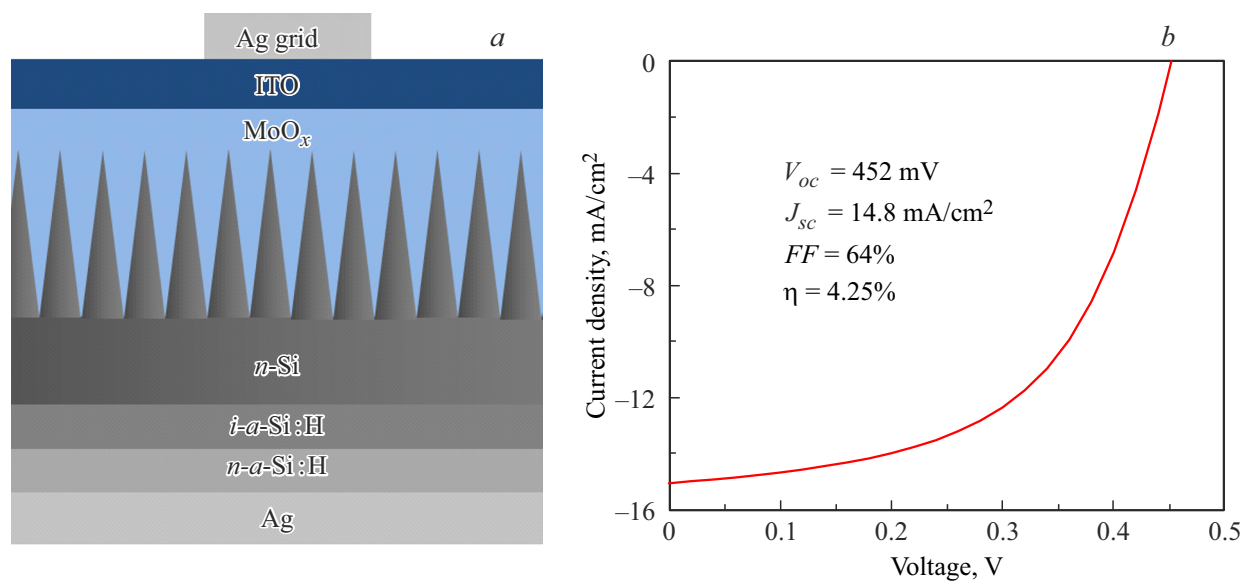


Рис. 3. *a* — схематическое изображение СЭ; *b* — ВАХ СЭ при освещении AM1.5G.

изготовленный LTS Chemicals (США). Ранее для данной установки был определен оптимальный режим роста при комнатной температуре. Было показано, что при мощности магнетрона 50 Вт, давлении в камере 0.2 Па и расстоянии от образца до магнетрона 10 см формируется слой ИТО с оптимальными характеристиками [6,7]. На лицевой стороне была сформирована токособирающая сетка из термически испаренного Ag с последующей сушкой при 180 °С в течение 10 мин. Схематический вид структуры солнечного элемента представлен на рис. 3, а).

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) солнечного элемента при освещении AM1.5G (100 мВт·см⁻²) измерялись с использованием имитатора солнечного излучения Abet Technology SunLite и источника-измерителя Keithley 2400 при температуре 25 °С.

Анализ ВАХ (рис. 3, б) позволил определить следующие фотоэлектрические параметры: плотность тока короткого замыкания — 14.8 мА/см², напряжение холостого хода — 452 мВ, фактор заполнения — 64 %, эффективность преобразования — 4.25 %.

Полученное значение эффективности 4.25 % подтверждает перспективность использования оксида молибдена в качестве селективного контакта для дырок в структурах на основе наноструктурированного „черного“ кремния.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-79-10275).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] C. Battaglia, S.M. De Nicolás, S. De Wolf, X. Yin, M. Zheng, Ch. Ballif, A. Javey. *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 113902 (2014).
- [2] C. Zhao, Z. Liang, M. Su, P. Liu, W. Mai, W. Xie. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 25981 (2015).
- [3] A.S. Gudovskikh, A.I. Baranov, A.V. Uvarov, E.A. Vyacheslavova, A.A. Maksimova, A. Salimi, D.A. Kirilenko, O. Aydın, R. Turan, H. Nasser. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **58**, 045101 (2024).
- [4] P. Badica. *Cryst. Growth Des.*, **7**, 794 (2007).
- [5] R. Senthilkumar, G. Anandhababu, T. Mahalingam, G. Ravi. *J. Energy Chem.*, **25**, 798 (2016).
- [6] D.A. Kudriashov, A.A. Maksimova, E.A. Vyacheslavova, A.V. Uvarov, I.A. Morozov, A.I. Baranov, A.O. Monastyrenko, A.S. Gudovskikh. *Semiconductors*, **55**, 475 (2021).
- [7] D. Kudryashov, A. Gudovskikh, A. Baranov, I. Morozov, A. Monastyrenko. *Phys. Status Solidi A*, **217**, 1900534 (2020).

Редактор А.Н. Смирнов

Application of Thin MoO_x Layers for Passivation of Black Silicon Surface

A.A. Maksimova^{1,2}, A.V. Uvarov¹,
E.A. Vyacheslavova¹, A.I. Baranov¹, O.P. Mikhaylov^{1,3},
V.A. Pozdeev^{1,2}, E.Y. Yarchuk², A.S. Gudovskikh^{1,2}

¹ Alferov University,
194021 St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg Electrotechnical University „LETI“,
197022 St. Petersburg, Russia

³ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Thin MoO_x layers were investigated for passivation and selective hole contact formation on black silicon (*b*-Si) surfaces. *b*-Si nanowires (~ 0.7 μm height, 0.1–0.2 μm diameter) were produced by dry etching. Thermally evaporated MoO_x formed branched structures covering the entire nanowire surface. Photoluminescence decay measurements revealed an increase in effective minority carrier lifetime from 9 to 59 μs, demonstrating effective passivation of dangling bonds. A laboratory Ag/ITO/MoO_x/*b*-Si/Ag solar cell achieved a power conversion efficiency of 4.25 %. These results confirm the promise of MoO_x for hybrid black silicon-based solar cells.