

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-2-185-190>
УДК 538.9:546.28:544.478

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОГО ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ НА УДАЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ И ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРЕМНИЕВОГО ПОРОШКА

А. М. Серікбеков^{1,2}, А. С. Серікканов³, Г. К. Мусабек², Д. И. Бакранова^{4*}

¹ ТОО «Физико-технический институт», Лаборатория фотоэлектрических явлений и приборов,
Алматы, Казахстан

² КазНУ, Физико-технический факультет, Алматы, Казахстан

³ Национальная академия наук Республики Казахстан при Президенте Республики Казахстан,
Алматы, Казахстан

⁴ SDU University, Школа информационных технологий и прикладной математики,
Каскелен, Казахстан

* E-mail для контактов: dinabakranova@gmail.com

В данном исследовании изучается влияние влажного химического травления на очистку и фотокаталитические свойства порошка кремния металлургического качества. Порошок Si подвергался двухстадийному высокоэнергетическому шаровому измельчению с последующим травлением в смеси кислот HF:HCl:HNO₃. Морфология и состав образцов анализировались методами TEM и EDS. Показано, что размеры частиц после обработки составляют менее 200 нм, при этом наблюдается кристаллическая структура с межплоскостным расстоянием ~0,20 нм, соответствующим плоскости Si (220). EDS-анализ подтвердил эффективное удаление металлических примесей (K, Ca, Ni) и углерода, при этом зафиксировано увеличение содержания кислорода (~8 ат.%) и азота (~12,2 ат.%) вследствие особенностей химической обработки.

Фотокаталитическая активность очищенного (Si_p) и неочищенного (Si_s) кремния оценивалась по разложению метиленового синего (10 мг/л) под УФ-излучением. Установлено, что Si_p демонстрирует значительно более высокую эффективность: через 120 мин облучения отношение C_t/C₀ снижается до ~0,18, тогда как для Si_s остается на уровне ~0,9. Интенсивность пика поглощения при 664 нм уменьшается более чем в четыре раза для Si_p, что свидетельствует об эффективной деградации красителя.

Кинетический анализ показал, что процесс подчиняется модели псевдопервого порядка, при этом очищенные образцы характеризуются более высокой константой скорости. Улучшение фотокаталитических свойств связано с удалением примесей, снижением рекомбинации носителей заряда и увеличением числа активных центров. Полученные результаты демонстрируют, что влажное химическое травление является эффективным методом повышения функциональных характеристик металлургического кремния для экологических приложений.

Ключевые слова: Металлургический кремний; Кислотное травление; Фотокатализ; Разложение метиленового синего; Удаление примесей; Наночастицы кремния; УФ-облучение; Влажная химическая обработка

ВВЕДЕНИЕ

Растущий спрос на экологически устойчивые технологии активизировал исследования полупроводниковых фотокатализаторов для очистки воды и разложения загрязняющих веществ. Среди различных материалов кремний (Si) привлекает все большее внимание благодаря своей распространенности, нетоксичности и хорошо изученным электронным свойствам. Однако кремний металлургического качества содержит значительное количество примесей, которые негативно влияют на его фотокаталитическую эффективность, создавая центры рекомбинации и снижая эффективность носителей заряда.

Недавние исследования показали, что уменьшение размера частиц до наноразмера значительно повышает фотокаталитическую активность за счет увеличения площади поверхности и улучшения поглощения

света [1, 2]. В частности, наноструктурированный кремний демонстрирует улучшенное взаимодействие с органическими загрязнителями и улучшенное образование активных форм кислорода под воздействием УФ или видимого света [2-4].

Одним из наиболее эффективных подходов к улучшению свойств кремния является влажное химическое травление, которое позволяет избирательно удалять примеси и модифицировать поверхность [5-7]. Смеси кислот на основе фтористоводородной кислоты (HF), азотной кислоты (HNO₃) и соляной кислоты (HCl) широко используются для очистки кремния и текстурирования поверхности. Такое травление не только удаляет металлические загрязнения, но и создаёт пористые или наноструктурированные поверхности, которые значительно повышают фотокаталитическую активность.

В ряде исследований сообщалось, что травление с использованием HF играет решающую роль в удалении оксидных слоев и обеспечении активации поверхности, в то время как HNO_3 действует как окислитель, способствуя контролируемому растворению кремния [7]. Добавление HCl улучшает удаление металлических примесей за счет реакций комплексообразования. Такие синергетические эффекты делают системы травления смешанными кислотами особенно эффективными для очистки металлургического кремния [8].

Несмотря на эти достижения, сохраняется необходимость в систематическом исследовании взаимосвязи между условиями травления, удалением примесей, размером частиц и фотокалитической эффективностью, особенно для недорогого металлургического кремния [9–10].

В данной работе мы объединяем высокоэнергетическое шаровое измельчение с влажным химическим травлением для получения очищенных частиц кремния с улучшенными фотокалитическими свойствами [11–12]. Эффективность обработанных образцов оценивалась путем разложения метиленового синего под воздействием УФ-излучения, что позволило получить представление о роли очистки поверхности и наноструктурирования в фотокалитических процессах [3,6,13].

В данном исследовании представлен комбинированный подход, сочетающий механическое уменьшение размера частиц и оптимизированное кислотное травление, предлагающий экономически эффективный способ преобразования низкосортного металлургического кремния в эффективный фотокалитизатор.

Методика

Порошок металлургического кремния Si был размолот в две стадии, с помощью планетарно-шаровой мельницы PULVERISETTE 7, производство FRITSCH, Германия. Время измельчения составляло 1 час, диаметр шаров – 3 мм, 600 об/мин. Повторное измельчение проводилось в планетарно шаровой мельнице, при этом время измельчения составляло 1 час, диаметр шаров 0,3 мм, скорость – 800 об/мин.

Для травления примесей помещали порошок Si в раствор кислот $\text{HF}:\text{HCl}:\text{HNO}_3$ в соотношении 0,5М:5М:5М. При температуре раствора 60 °С время травления составляло 2 ч [14]. Далее происходила двухэтапная селекция частиц с помощью центрифугирования при 3000 об/мин и 4000 об/мин, по 15 мин. на каждом этапе. Сушка происходила в сушильном шкафу, в течение 12 ч.

В качестве загрязнителя был выбран метиленовый синий (МС). Был взят исходный раствор МС объемом с концентрацией 10 мг/л, с последующим раздельным добавлением двух типов фотокалитизатора: частицы очищенного Si_p и не очищенного Si_s металлургического кремния, массой по 20 мг.

Перед световым облучением растворы перемешивались в темноте в течение 30 мин для установления адсорбционно-десорбционного равновесия между частицами катализатора и молекулами МС.

В качестве источника ультрафиолетового излучения использовали ртутную лампу OSRAM ULTRA-VITALUX мощностью 1.1 W/m^2 для диапазона UV-B, 7.3 W/m^2 для диапазона UV-A и 29.7 W/m^2 для U-Vis [15]. Согласно техническим характеристикам лампы OSRAM ULTRA-VITALUX, использовался источник УФ-излучения мощностью 300 Вт. Расстояние до образцов поддерживалось постоянным (30 см) во всех экспериментах.

Проведение реакции и анализ.

Реакторы с растворами размещали под УФ-лампой на расстоянии 30 см. Расстояние до источника и интенсивность потока поддерживали постоянными на протяжении всей серии экспериментов. Через определенные промежутки времени из реакторов отбирали пробы объемом 1 мл. Твердые частицы катализатора отделяли от раствора центрифугированием. Концентрацию оставшегося в растворе МС определяли методом спектрофотометрии по изменению интенсивности пропускания. Спектры пропускания и поглощения связаны между собой уравнением:

$$A = -\log_{10}\left(\frac{T}{100}\right)$$

где A – поглощение;

T – коэффициент пропускания раствора.

Концентрацию получившихся растворов можно оценить с помощью уравнения:

$$C_t = \frac{C_o A_t}{A_o}$$

где C_o – начальная концентрация метиленового синего;

C_t – концентрация в момент времени t ;

A_o – начальное значение поглощения;

A_t – значение поглощения в момент времени t .

Результаты и обсуждение

Изучение снимков ТЭМ (рисунок 1) показывает, что селекция методом центрифугирования прошла успешно, и размеры частиц металлургического Si не превышают 200 нм. Сферическая форма частиц, а также их размер располагают к высокой фотокалитической активности образцов [3]. Дополнительно на снимке видны полосы решетки с межплоскостным расстоянием приблизительно 0,20 нм (рисунок 1а), что подтверждает наличие четко выраженной кристаллической структуры и соответствует кристаллографическому направлению Si (220) [16].

Оценка содержания различных примесей в образцах металлургического Si производилась с помощью EDS-анализа (рисунок 2). Как видно из результатов, в пробах металлургического Si (Караганда) присутству-

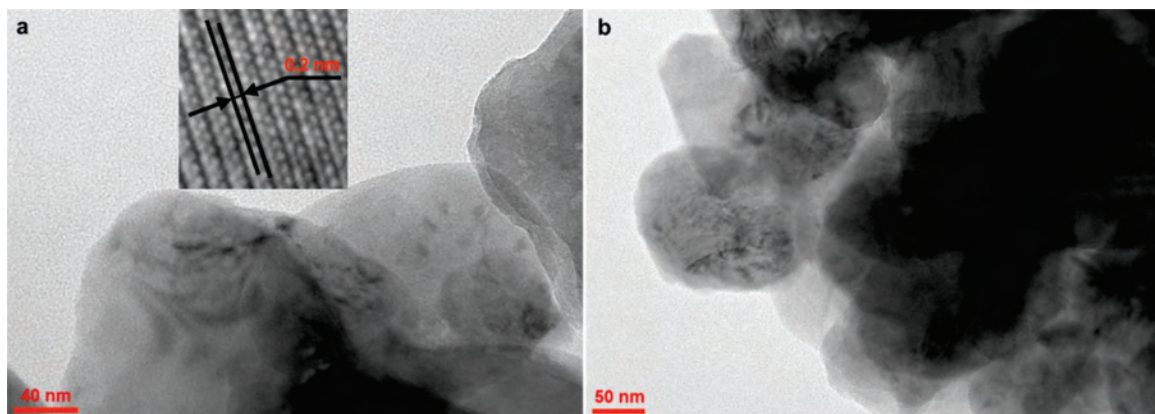


Рисунок 1. Снимки ТЭМ металлургического Si при пространственных разрешениях, а: 40 нм; б: 50 нм.

ют незначительные количества примесей металлов (K, Ca, Ni) и углерода (C). После влажно-химического травления, видно, что очистка поверхности частиц от всех примесей прошла успешно, и все металлические примеси, а также частицы C были удалены. Для каждого образца EDS-анализ проводился не менее чем в трех различных областях поверхности, а представленные значения являются усредненными результатами измерений. Типичный предел обнаружения метода EDS для большинства элементов составляет около 0.1–1 ат.%. Присутствие кислорода (O) и увеличение его значений до 8 % по атомной доле, следует объяснить наличием естественного оксидного слоя на поверхности частиц металлургического Si. Увеличение значения содержания азота (N) до 12,2 % по атомной доле, объясняется использованием азотной кислоты HNO_3 в смеси кислот при влажно-химическом травлении металлургического Si.

Фотокаталитические характеристики образцов, оценивали по разложению MC с концентрацией 10 мг/л при облучении ультрафиолетовым светом при

комнатной температуре. Результаты, представленные на рисунке 3а, основаны на изменениях интенсивности пика поглощения MC при 664 nm после облучения и свидетельствуют об эффективном разложении красителя. Спектр поглощения образца очищенного металлургического кремния (Si_p) после 120 мин воздействия УФ-излучения снижается более чем в четыре раза по сравнению с исходным раствором (см. рис. 3а). Обратной выглядит ситуация для неочищенных частиц металлургического кремния (Si_s), значение поглощения при 664 nm снизилось всего до 1,7. Это может свидетельствовать о том, что примеси на поверхности частиц Si_s поглощают падающие фотоны без генерации носителей заряда [17], вследствие чего не образуются активные радикалы ($\bullet\text{OH}$, $\text{O}_2^{\bullet-}$) [3, 18].

На рисунке 3б показаны кривые отношения концентраций MC с течением времени при облучении UV-лампой и солнечным симулятором соответственно. В присутствии Si_s с примесями фотодеградация протекает наиболее медленно. В течение всего времени эксперимента снижение концентрации красителя

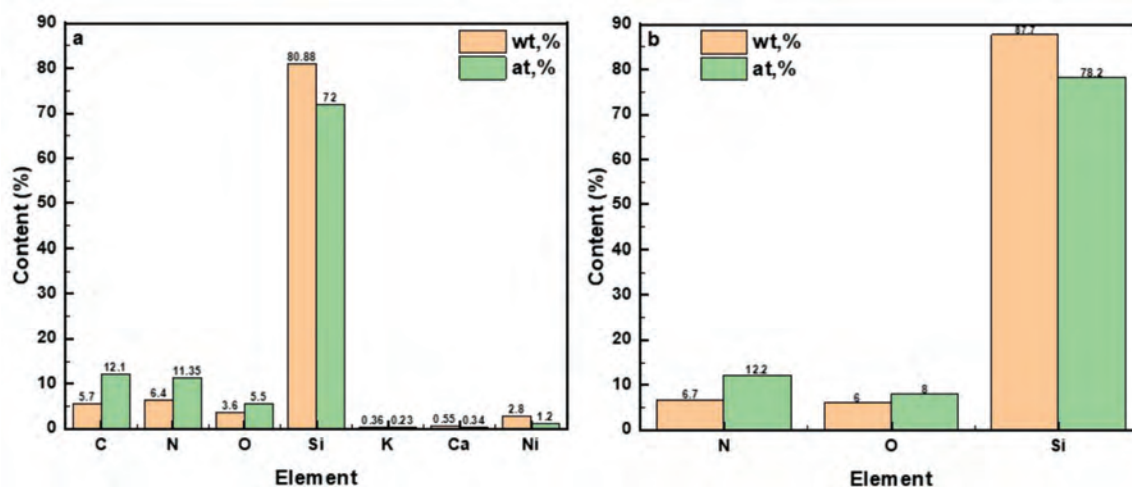


Рисунок 2. Результаты EDS-анализа металлургического кремния: (а) образец Si_s до кислотного травления; (б) образец Si_p после травления в растворе $\text{HF}:\text{HCl}:\text{HNO}_3$.

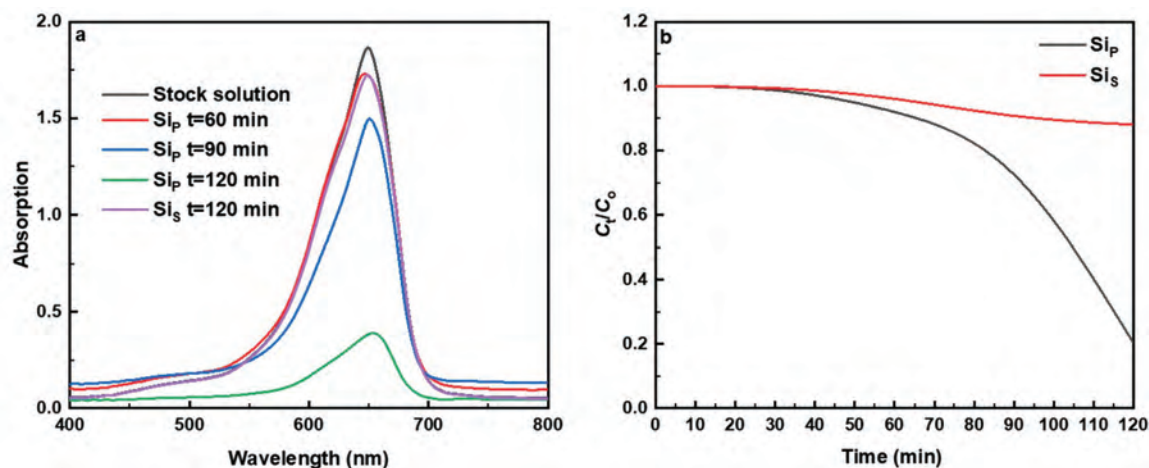


Рисунок 3. Фотокаталитические свойства образцов Si_s и Si_p под УФ-облучением: (а) спектры поглощения метиленового синего; (б) изменение относительной концентрации C_t/C_0 во времени.

происходит постепенно, и к 120 мин значение C_t/C_0 остается очень высоким (0,9). Это указывает на ограниченную фотокаталитическую Si_s активность в условиях УФ-светового облучения. Растворы с Si_p, в свою очередь, наоборот показывают высокую скорость деградации (0,18) МС по нескольким причинам: более эффективное образование носителей заряда; меньшее количество центров рекомбинации; большее количество активных радикалов, образующихся на поверхности частиц Si_p [3, 17, 18].

Для дальнейшей оценки фотокаталитической эффективности кинетика разложения метиленового синего была проанализирована с использованием модели псевдопервого порядка:

$$\ln(C_0/C_t) = kt$$

где C_0 и C_t – начальная и зависящая от времени концентрации метиленового синего соответственно, а k – кажущаяся константа скорости реакции.

Линейная зависимость между $\ln(C_0/C_t)$ и временем подтверждает, что процесс разложения подчиняется кинетике псевдопервого порядка.

Улучшенные характеристики Si_p согласуются с предыдущими сообщениями о подавлении рекомбинации, вызванной примесями. Более высокая константа скорости, наблюдаемая для Si_p, дополнительно подтверждает его превосходную фотокаталитическую эффективность по сравнению с необработанным кремнием. Согласно модели псевдопервого порядка, рассчитанные константы скорости составили приблизительно 0.0011 мин⁻¹ для образца Si_s и 0.0134 мин⁻¹ для образца Si_p и представлены в таблице ниже.

Таблица. Численные значения констант скорости фотодегградации для образцов Si_s и Si_p

Образец	k (мин ⁻¹)
Si _s	0.0011
Si _p	0.0134

Таким образом, после влажного химического травления константа скорости фотодегградации увеличилась более, чем в 12 раз, что подтверждает существенное улучшение фотокаталитической активности очищенного металлургического кремния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследовано влияние влажного химического травления на структурные и фотокаталитические свойства металлургического кремния. Комбинация двухстадийного шарового измельчения и обработки в растворе HF:HCl₃ позволила получить частицы размером менее 200 нм и эффективно удалить металлические примеси, что подтверждено результатами TEM и EDS анализа.

EDS-анализ показал существенное снижение содержания примесных элементов (K, Ca и Ni) после травления, что свидетельствует об успешной очистке поверхности кремния. Уменьшение размеров частиц и очистка поверхности способствовали увеличению площади контакта с загрязняющими веществами и улучшению функциональных свойств материала.

Фотокаталитические испытания с использованием метиленового синего показали значительно более высокую эффективность протравленного образца Si_p по сравнению с необработанным Si_s. После 120 мин УФ-облучения отношение C_t/C_0 для Si_p снизилось до ~0,18, тогда как для Si_s сохранялось на уровне ~0,9. Кинетический анализ подтвердил более высокую константу скорости фотодегградации для очищенного кремния.

Повышение фотокаталитической активности связано со снижением числа центров рекомбинации носителей заряда, улучшением поглощения излучения и увеличением количества активных поверхностных центров. Полученные результаты демонстрируют, что влажное химическое травление является эффективным и технологически простым способом повышения

фотокаталитических характеристик металлургического кремния и расширяет возможности его применения для очистки водной среды от органических загрязнителей.

Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23486943 «Создание фотокаталитических систем на основе металлургического кремния для очистки водной среды от органических загрязнителей»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Liu, X.; Radfar, B.; Chen, K.; Setälä, O. E.; Pasanen, T. P.; Yli-Koski, M.; Savin, H.; Vähänissi, V. Perspectives on Black Silicon in Semiconductor Manufacturing: Experimental Comparison of Plasma Etching, MACE, and Fs-Laser Etching. *IEEE Trans. Semicond. Manuf.* **2022**, *35*, 504–510. <https://doi.org/10.1109/TSM.2022.3190630>
- Zhang X. *Electrochemistry of Silicon and Its Oxide*; Kluwer Academic Publishing, 2004
- Serikkanov, A. S., Bakranov, N. B., Idrissova, T. K., Bakranova, D. I., & Boukhvalov, D. W. (2025). Silicon Photocatalytic Water-Treatment: Synthesis, Modifications, and Machine Learning Insights. *Nanomaterials*, *15*(19), 1514. <https://doi.org/10.3390/nano15191514>
- Li, X.; Bohn, P. W. Metal-assisted Chemical Etching in HF/H₂O₂ Produces Porous Silicon. *Appl. Phys. Lett.* **2000**, *77*, 2572–2574. <https://doi.org/10.1063/1.1319191>
- Srivastava, R. P.; Khang, D.-Y. Structuring of Si into Multiple Scales by Metal-Assisted Chemical Etching. *Adv. Mater.* **2021**, *33*, 2005932 <https://doi.org/10.1002/adma.202005932>
- W. Peng, S.M. Rupich, N. Shafiq, Y.N. Gartstein, A.V. Malko, Y.J. Chabal Silicon surface modification and characterization for emergent photovoltaic applications based on energy transfer Chem. Rev., *115* (23) (2015), pp. 12764–12796, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00085>
- Yunfei He and Wenhui Ma and Aimin Xing and M. Hu and Shicheng Liu and Xi Jie Yang and Jiawang Li and Shuzhong Du and Wanli Zhou. A review of the process on the purification of metallurgical grade silicon by solvent refining, *Materials Science in Semiconductor Processing*, **2022**, *141*, 106438 <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.106438>
- Peng KQ, Xu Y, Wu Y, Yan YJ, Lee ST, Zhu J. Aligned single-crystalline Si nanowire arrays for photovoltaic applications. *Small*. 2005;1:1062. <https://doi.org/10.1002/smll.200500137>.
- Chartier C, Bastide S, Levy-Clement C. Metal-assisted chemical etching of silicon in HF-H₂O₂. *Electrochim Acta*. 2008;53:5509–5516. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.03.009>.
- S. Li, H.M. Ayedh, M. Yli-Koski, V. Vähänissi, H. Savin, J. Oksanen Chemical excitation of silicon photoconductors by metal-assisted chemical etching *J. Phys. Chem. C*, **127** (8) (2023), pp. 4072–4078, <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c08627>
- Alhmoud, H.; Brodoceanu, D.; Elnathan, R.; Kraus, T.; Voelcker, N. H. A MACEing Silicon: Towards Single-step Etching of Defined Porous Nanostructures for Biomedicine. *Prog. Mater. Sci.* **2021**, *116*, 100636 <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100636>
- Han H.; Huang Z.; Lee W. Metal-Assisted Chemical Etching of Silicon and Nanotechnology Applications. *Nano Today* **2014**, *9*, 271–304. <https://doi.org/10.1016/J.NANOTOD.2014.04.013>.
- Yang, X.; Liu, Y.; Wu, L.; Liao, Z.; Zhang, B.; Tembo, T.; Wang, Y.; Hu, Y. Metal Ions' Dynamic Effect on Metal-Assisted Catalyzed Etching of Silicon in Acid Solution. *Coatings* **2024**, *14*, 1405. <https://doi.org/10.3390/coatings14111405>
- Zong, L., Zhu, B., Lu, Z., Tan, Y., Jin, Y., Liu, N., Hu Y., Gu Sh. & Cui, Y. (2015). Nanopurification of silicon from 84% to 99.999% purity with a simple and scalable process. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *112*(44), 13473–13477. <https://doi.org/10.1073/pnas.1513012112>
- Stefan, M. (2016). More than just light. Solutions in ultraviolet light. In *100 Years of Innovation Osram* (p. 24). Munich, Germany: OSRAM GmbH.
- Kessler, E. G., Szabo, C. I., Cline, J. P., Henins, A., Hudson, L. T., Mendenhall, M. H., & Vaudin, M. D. (2017). The lattice spacing variability of intrinsic float-zone silicon. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, *122*, 1. <https://doi.org/10.6028/jres.122.024>
- Wang, X., Wang, T., Ren, Q., Xu, J., & Cui, Y. (2023). Construction of localized state levels and near-infrared light absorption of silicon: B/P doping and first-principles calculations. *Micro and Nanostructures*, *184*, 207695. <https://doi.org/10.1016/j.micrna.2023.207695>
- Das, K. C., Das, B., & Dhar, S. S. (2020). Effective catalytic degradation of organic dyes by nickel supported on hydroxyapatite-encapsulated cobalt ferrite (Ni/HAP/CoFe₂O₄) magnetic novel nanocomposite. *Water, Air, & Soil Pollution*, *231*(2), 43. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-4409-1>

EFFECT OF WET CHEMICAL ETCHING ON IMPURITY REMOVAL AND PHOTOCATALYTIC PERFORMANCE OF METALLURGICAL SILICON POWDER

A. M. Serikbekov^{1,2}, A. S. Serikkanov³, G. K. Musabek², **D. I. Bakranova^{4*}**

¹ *Physical-Technical Institute, Laboratory of Photoelectric Phenomena and Devices, Almaty, Kazakhstan*

² *KazNU, Faculty of Physics and Technology, Almaty, Kazakhstan*

³ *National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan under the President of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan*

⁴ *SDU University, School of Information Technology and Applied Mathematics, Kaskelen, Kazakhstan*

* E-mail for contacts: dinabakranova@gmail.com

Abstract. This study investigates the effect of wet chemical etching on impurity removal and the photocatalytic properties of metallurgical-grade silicon (Si) powder. The Si powder was subjected to a two-stage high-energy ball milling process followed by acid etching using an HF:HCl:HNO₃ mixture under controlled conditions. The morphology and composition of the samples were analyzed using transmission electron microscopy (TEM) and energy-dispersive spectroscopy (EDS). The results revealed particle sizes below 200 nm and a well-defined crystalline structure with an interplanar spacing of ~0.20 nm, corresponding to the Si (220) plane. EDS analysis confirmed the effective removal of metallic impurities (K, Ca, Ni) and carbon, while an increase in oxygen (~8 at.%) and nitrogen (~12.2 at.%) content was observed due to surface oxidation and chemical treatment.

The photocatalytic activity of etched (Si_p) and untreated (Si_s) silicon powders was evaluated via the degradation of methylene blue (10 mg/L) under UV irradiation. After 120 minutes, the concentration ratio C_t/C₀ decreased to ~0.18 for Si_p, compared to ~0.9 for Si_s. A more than fourfold reduction in the absorption peak at 664 nm was observed for Si_p, indicating enhanced dye degradation.

Kinetic analysis showed that the degradation process follows a pseudo-first-order model, with higher rate constants for the etched samples. The improved performance is attributed to impurity removal, reduced charge carrier recombination, and increased active surface sites. These results demonstrate that wet chemical etching is an effective and scalable approach to enhance the functional properties of metallurgical silicon for environmental photocatalytic applications.

Keywords: Metallurgical silicon; Acid etching; Photocatalysis; Methylene blue degradation; Impurity removal; Silicon nanoparticles; UV irradiation; Wet chemical treatment

ЫЛҒАЛДЫ ХИМИЯЛЫҚ ӨНДЕУДІҢ МЕТАЛЛУРГИЯЛЫҚ КРЕМНИЙ ҰНТАҒЫНЫҢ ҚОСПАЛАРЫН ЖОЮҒА ЖӘНЕ ФОТОКАТАЛИТИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІ

Ә. М. Серікбеков^{1,2}, А. С. Серікқанов³, Г. Қ. Мұсабеков², Д. И. Бакранова^{4*}

¹ Физика-техникалық институтының Фотозлектрлік құбылыстар мен құрылғылар зертханасы, Алматы, Қазақстан

² Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ Физика және технология факультеті, Алматы, Қазақстан

³ ҚР Президентінің жанындағы Ұлттық ғылым академиясы, Алматы, Қазақстан

⁴ SDU университеті, Ақпараттық технологиялар және қолданбалы математика мектебі, Қаскелең, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: dinabakranova@gmail.com

Бұл жұмыста металлургиялық сападағы кремний (Si) ұнтағының қоспалардан тазартылуына және фотокаталитикалық қасиеттеріне ылғалды химиялық травлеудің әсері зерттелді. Si ұнтағы екі сатылы жоғары энергиялы шарлы ұнтақтаудан өткізіліп, кейін HF:HCl:HNO₃ қышқылдарының қоспасында өңделді. Үлгілердің морфологиясы мен құрамы трансмиссиялық электрондық микроскопия (TEM) және энергия-дисперсиялық спектроскопия (EDS) әдістерімен зерттелді. Нәтижелер бөлшек өлшемдерінің 200 нм-ден төмен екенін және Si (220) жазықтығына сәйкес келетін ~0,20 нм арақашықтықтағы кристалдық құрылымның қалыптасқанын көрсетті. EDS талдауы металл қоспаларының (K, Ca, Ni) және көміртектің тиімді жойылғанын дәлелдеді, ал оттегі (~8 ат.%) мен азот (~12,2 ат.%) мөлшерінің артуы беттік тотығумен және химиялық өңдеумен түсіндіріледі.

Тазартылған (Si_p) және шикі (Si_s) кремнийдің фотокаталитикалық белсенділігі ультракүлгін сәулелену кезінде метилен көктің (10 мг/л) ыдырауын өлшеу арқылы бағаланды. Si_p айтарлықтай жоғары тиімділік көрсеткені анықталды: 120 минут сәулеленуден кейін C_t/C₀ қатынасы ~0,18 дейін төмендеді, ал Si_s үшін ~0,9 деңгейінде қалды. 664 нм-дегі жұтылу шыңының төрт еседен астам төмендеуі Si_p үшін жоғары деградация тиімділігін көрсетті.

Кинетикалық талдау процестің псевдо-бірінші ретті модельге бағынатынын көрсетті, ал өңделген үлгілер жоғары жылдамдық тұрақтыларымен сипатталды. Жақсарған қасиеттер қоспалардың жойылуымен, заряд тасымалдаушылардың рекомбинациясының төмендеуімен және белсенді орталықтардың артуымен түсіндіріледі. Алынған нәтижелер ылғалды химиялық травлеудің металлургиялық кремнийдің фотокаталитикалық қасиеттерін арттырудың тиімді және масштабталатын әдісі екенін көрсетеді.

Түйін сөздер: Металлургиялық кремний; Қышқылды ою; Фотокатализ; Метилен көгінің ыдырауы; Қоспаны кетіру; Кремний нанобөлшектері; ультракүлгін сәулелену; Ылғалды химиялық өңдеу.