

STANDORT LOCATION  
Albert-Einstein-Str. 9  
07745 Jena - Germany

---

POSTANSCHRIFT POSTAL ADDRESS  
PF 100 239  
07702 Jena - Germany

---

TELEFON PHONE  
0049 3641 206-00

---

TELEFAX FAX  
0049 3641 206-399

---

E-MAIL E-MAIL  
institut@leibniz-ipht.de

---

WEB WEB  
www.leibniz-ipht.de

## Review of the foreign scientific advisor

Dr. rer. nat. Vladimir Sivakov

for the PhD Thesis:

*Optical and structural properties of microstructured silicon obtained by metal-assisted chemical etching*

submitted by:

**Mrs. Yermuhamed, Dana**

in the specialty 6D071000 - Material science and technology of new materials

ANSPRECHPARTNER CONTACT

UNSER ZEICHEN OUR REFERENCE

IHR ZEICHEN YOUR REFERENCE

DATUM DATE

Dr. Vladimir Sivakov  
+49(0)3641 206-440  
[vladimir.sivakov@leibniz-ipht.de](mailto:vladimir.sivakov@leibniz-ipht.de)

Jena, 14<sup>th</sup> February 2020

The proposed Ph.D. Dissertation of Mrs. Yermuhamed is yield an in-depth fundamental understanding of light-driven hydrogen generation mechanism using functionalized nanostructured silicon surface as highly promising surface for the solar-to-hydrogen conversation. The dissertation has a strong focus to the implementation of proposed system to the cost effective water purification or water desalination processes which today is one of the most important tasks for the human community of planet Earth, given the consumption of natural sources (oil, gas) for water treatment and desalination processes. On the other hand, if we look at the widespread use of "green" energy technologies based on wind, water or solar energy, human energy consumption can be more or less completely covered by "green" energy. However, a global problem, which is also pointed out by many international organizations, is access to drinking water. This is not only a Third World or developing country problem, but also a critical point for Western countries. In the context of highly developed and highly localized agriculture (e.g. in Germany, the agricultural sector is mainly localized in northern Germany), which results in groundwater pollution mainly from pesticides or other organic pollutants. From this perspective, the water purification or desalination by using green technologies and smart nanomaterials is a crucial challenge for the modern human society processes that is to time one of the most important challenge for the human community of the planet Earth. Photocatalytic water splitting or solar-to-hydrogen conversions one of the pillars of modern nanotechnology. For this technology to succeed, the development of materials capable for light-driven water splitting with high efficiencies and high long-term stability is necessary. Fostering any new advancement in this area, aimed not only at elevations of the process efficiencies, but also at the developments of environmentally-friendly technological routes, requires high interdisciplinary synergism and activities across the borders of physics, chemistry and material sciences. In this context, silicon (Si) is an ideal candidate as it is the second most abundant element in the Earth's crust. Silicon-based approaches are certainly favored because of non-toxicity at a high level of materials control and understanding, together with a huge industrial infrastructure to account for low production/processing costs and high production yields.

Mrs. Yermuhamed dissertation is dedicated to investigation of structural and physicochemical properties of nano/microstructured silicon for applications in hydrogen energy. The influence of morphology and optical properties of silicon microstructures obtained by metal-assisted wet-chemical etching on the efficiency of hydrogen generation is considered in work.

As a practical application, it has been shown that investigating structures can be successfully used for the efficient generation of hydrogen both due to chemical reaction of structure's surface oxidation and due to photocatalytic reactions on oxidizing surface.

Ms. Yermuhamed was performed experimental research work on the preparation and detailed study of silicon micro- and nanostructures morphology and optical properties.

Mrs. Yermuhamed passed two times a scientific internship in the period from August to October, 2017 and March to April 2019, under my leadership at Leibniz Institute of Photonic Technology, Jena, Germany. During the scientific internship, Mrs. Yermuhamed performed experimental work on the topic of the thesis. In this case, she had a good opportunity to learn new aspects of material characterization methods using research and technology infrastructure at Leibniz IPHT in Jena, Germany. Her latest scientific progress was obtained under close daily supervision and controlling in my department at Leibniz Institute of Photonic Technology. The main focus of her studies was related to the formation, evaluation of morphological and physicochemical properties of nanostructured silicon surfaces and their photocatalytic activities studies by gas chromatography. Mrs. Yermuhamed investigated optical properties (surface reflectance) of nanostructured layers using UV-vis spectroscopy. The morphology of nanostructured layers was studied using scanning electron microscopy using facilities at Leibniz IPHT, but also at Ernst Abbe University of Applied Sciences in Jena/Germany. As a result of applicant: investigations, conditions optimization of silicon micro- and nanostructures formation were determined, and structural and optical properties of obtained experimental samples were studied. It was also experimentally shown that during silicon microstructures growing on highly doped n-type substrate surface, additional layer of porous silicon is formed between silicon microstructures array and silicon substrate, which leads to 2 time increase in the generated hydrogen when they interact with water compared to low-doped samples of n-type conductivity. Large yield of hydrogen occurs presumably due to the cleavage of passivating Si-H bonds on the microstructures surface, which was also shown by scanning electron microscopy and IR spectroscopy investigations. The investigation of near-threshold X-ray absorption spectra showed the presence of uniform silicon suboxide (SiO<sub>x</sub>) film with thickness of more than 10 nm on the upper layer of silicon microstructures surface and in the lower part of structures, which indicates that hydrogen is generated on the surface of n+ type silicon microstructures due to the oxidation reaction surface to silicon dioxide, and due to the photocatalytic decomposition of water molecules on the silicon suboxides surface. It is worth noting that results obtained by Mrs. Yermuhamed contribute to better understanding of hydrogen generation processes physics and chemistry with using semiconductor micro- and nanostructures, and are also very important from an applied point of view for creating hydrogen energy applications. Each week, Dana actively participated my group weekly lab meetings and she attended all scientific presentations that were given within research center. She presented her Ph.D. topic and scientific progress in form of scientific presentation (30 min) at my department meeting. For the time being in my laboratory, Dana developed very good relations with all members of my international research group. She was always very kind, friendly, and sincere. She comes from a very different field of research, for that reason many experimental aspects were absolutely new, useful, and I believe on long-term, they would have very beneficial aspects on her studies.

The results achieved in frame of proposed dissertation were published in 13 works, including 2 scientific papers in international peer-reviewed journals like Scientific Reports, Materials Research Express and Brief Communications on Physics, and also presented at international scientific conferences.

As a scientific co-advisor of Mrs. Dana Yermuhamed, considering the above, I consider that in terms of the results obtained in the thesis, the personal qualities of the applicant, the dissertation by Mrs. Yermuhamed "*Optical and structural properties of microstructured silicon obtained by metal-assisted chemical etching*"

meets the qualification requirements of an international standard for a Ph.D. and I strongly encourage the presentation to the Academic Dissertation Council of your University and Mrs. Yermuhamed deserves awarding of the Ph.D. degree in the specialty 6D071000-“Materials science and technology of new materials”.

Please do not hesitate to contact me, if you have further questions or inquiries.

Sincerely yours

A foreign scientific advisor

Dr. rer. nat. Vladimir Sivakov

  
Leibniz Institute  
of Photonic Technology  
Albert-Einstein-Str. 9 · D-07745 Jena  
POB 100239 · D-07702 Jena  
Germany

Head of *Semiconductor Nanostructures* Group at

Leibniz Institute of Photonic Technology

CTCT Conference President

Baltic Sea Network „*NanoPhoto*“ Coordinator

Member of National Research Council Section “Life Sciences” of Republic of Kazakhstan

Member of National Research Council Section of Lithuanian Republic

## ОТЗЫВ

зарубежного научного  
консультанта доктора  
естественных наук Владимира  
Сивакова на диссертационную  
работу на тему «Оптические и  
структурные свойства  
микроструктурированного  
кремния, полученного металл-  
стимулированным химическим  
травлением», представленную  
г-жой Ермухамед Даной по  
специальности 6D071000 -  
Материаловедение и  
технология новых материалов

Адрес  
ул. Альберта-Эйнштейна, 9  
07745 Йена, Германия  
Почтовый адрес  
PF 100 239  
07702 Йена, Германия  
Телефон  
0049 3641 206-00  
Факс  
0049 3641 206-399  
E-mail  
institut@leibniz-ipht.de  
Вэб  
www.leibniz-ipht.de

Контакты	Наша ссылка	Ваша ссылка	Дата
Доктор В. Сиваков +49(0)3641 206-440 <a href="mailto:vladimir.sivakov@leibniz-ipht.de">vladimir.sivakov@leibniz-ipht.de</a>			г.Йена, 14 февраля 2020 года

Рассматриваемая диссертация г-жи Ермухамед вносит вклад в глубокое фундаментальное понимание механизма генерации водорода при освещении, с использованием функционализированной поверхности наноструктурированного кремния в качестве весьма перспективной поверхности для преобразования солнечной энергии в водородную. Диссертация посвящена внедрению предлагаемой системы в экономически эффективные процессы очистки или опреснения воды, которые сегодня являются одной из важнейших задач человеческого сообщества планеты Земля, с учетом потребления природных источников (нефть, газ) для процессов обработки воды и опреснения. С другой стороны, если мы посмотрим на широкое использование технологий «зеленой» энергетики на основе ветровой, водной или солнечной энергии, потребление энергии человеком может быть более или менее полностью покрыто «зеленой» энергетикой. Однако глобальной проблемой, на которую указывают многие международные организации, является доступ к питьевой воде. Это не только проблема третьего мира или развивающихся стран, но считается проблематичным и для западных стран. Условия высокоразвитого и высоко локализованного сельского хозяйства (например, в Германии сельскохозяйственный сектор в основном локализован на севере Германии) приводят к загрязнению подземных вод, главным образом, пестицидами или другими органическими загрязнителями. С этой точки зрения, очистка или опреснение воды с использованием экологически чистых технологий и умных наноматериалов является важнейшей задачей человеческого сообщества планеты Земля. Фотокаталитическое разложение воды или

преобразование солнечной энергии в водородную являются одной из основ современной нанотехнологии. Для успешного развития этой технологии необходима разработка материалов с высокой эффективностью и высокой долговременной стабильностью, способствующих легкому разложению воды. Стимулирование прогресса в этой области, направлено не только на повышение эффективности процесса, но и на разработку экологически безопасных технологических направлений, требующих высокого междисциплинарного синергизма и деятельности через границы физики, химии и материаловедения. В связи с этим кремний (Si) считается идеальным кандидатом, поскольку он является вторым наиболее распространенным элементом в земной коре. Технологические подходы, основанные на использовании кремния, безусловно, являются более предпочтительными благодаря его нетоксичности при высоком уровне контроля и понимания материала, а также огромного потенциала создания промышленной инфраструктуры для получения материала, обеспечивающей низкие затраты на производство/обработку и большое количество выхода продукции. Диссертация г-жи Ермухамед посвящена исследованию структурных и физико-химических свойств нано/микроструктурированного кремния для применения в водородной энергетике. В работе рассмотрено влияние морфологии и оптических свойств кремниевых микроструктур, полученных методом метал-стимулированного мокрого химического травления на эффективность генерации водорода.

В качестве практического применения было показано, что исследуемые структуры могут быть успешно использованы для эффективной генерации водорода как благодаря химической реакции окисления поверхности структуры, так и благодаря фотокаталитическим реакциям на окисляющей поверхности.

Г-жа Ермухамед провела экспериментальные исследовательские работы по получению и детальному изучению морфологии и оптических свойств микро- и наноструктур кремния.

В период с августа по октябрь 2017 года и с марта по апрель 2019 года г-жа Ермухамед дважды проходила научную стажировку под моим руководством в Лейбницком институте фотонных технологий, Йена, Германия. Во время научной стажировки г-жа Ермухамед провела экспериментальную работу по теме диссертации. У нее была хорошая возможность изучить новые аспекты методов определения характеристик материалов с использованием исследовательской и технологической инфраструктуры Лейбницкого института фотонных технологий в Йене, Германия. Ее последние научные результаты были получены под пристальным ежедневным наблюдением и контролем в моем отделении в Лейбницком институте фотонных технологий. Основное направление ее исследований было связано с формированием, оценкой морфологических и физико-химических свойств поверхностей наноструктурированного кремния и изучением их фотоаталитической активности методом газовой хроматографии. Г-жа Ермухамед исследовала оптические свойства (отражение поверхности) наноструктурированных слоев с помощью УФ-видимой спектроскопии. Морфология наноструктурированных слоев была изучена с помощью сканирующей электронной микроскопии с использованием оборудования в Лейбницком институте фотонных технологий, а также в Университете прикладных наук им. Эрнста Аббе в Йене/Германия. В результате исследовательских работ соискателя были определены оптимальные условия формирования микро- и наноструктур кремния и исследованы структурные и оптические свойства полученных экспериментальных образцов. Также было экспериментально показано, что во время роста кремниевых микроструктур на поверхности подложки n-типа с высокой степенью легирования между массивом кремниевых микроструктур и кремниевой подложкой образуется дополнительный слой пористого кремния, который в 2 раза увеличивает генерируемый водород при взаимодействии с водой по

преобразование солнечной энергии в водородную являются одной из основ современной нанотехнологии. Для успешного развития этой технологии необходима разработка материалов с высокой эффективностью и высокой долговременной стабильностью, способствующих легкому разложению воды. Стимулирование прогресса в этой области, направлено не только на повышение эффективности процесса, но и на разработку экологически безопасных технологических направлений, требующих высокого междисциплинарного синергизма и деятельности через границы физики, химии и материаловедения. В связи с этим кремний (Si) считается идеальным кандидатом, поскольку он является вторым наиболее распространенным элементом в земной коре. Технологические подходы, основанные на использовании кремния, безусловно, являются более предпочтительными благодаря его нетоксичности при высоком уровне контроля и понимания материала, а также огромного потенциала создания промышленной инфраструктуры для получения материала, обеспечивающей низкие затраты на производство/обработку и большое количество выхода продукции.

Диссертация г-жи Ермухамед посвящена исследованию структурных и физико-химических свойств нано/микроструктурированного кремния для применения в водородной энергетике. В работе рассмотрено влияние морфологии и оптических свойств кремниевых микроструктур, полученных методом метал-стимулированного мокрого химического травления на эффективность генерации водорода.

В качестве практического применения было показано, что исследуемые структуры могут быть успешно использованы для эффективной генерации водорода как благодаря химической реакции окисления поверхности структуры, так и благодаря фотокаталитическим реакциям на окисляющей поверхности.

Г-жа Ермухамед провела экспериментальные исследовательские работы по получению и детальному изучению морфологии и оптических свойств микро- и наноструктур кремния.

В период с августа по октябрь 2017 года и с марта по апрель 2019 года г-жа Ермухамед дважды проходила научную стажировку под моим руководством в Лейбницком институте фотонных технологий, Йена, Германия. Во время научной стажировки г-жа Ермухамед провела экспериментальную работу по теме диссертации. У нее была хорошая возможность изучить новые аспекты методов определения характеристик материалов с использованием исследовательской и технологической инфраструктуры Лейбницкого института фотонных технологий в Йене, Германия. Ее последние научные результаты были получены под пристальным ежедневным наблюдением и контролем в моем отделении в Лейбницком институте фотонных технологий. Основное направление ее исследований было связано с формированием, оценкой морфологических и физико-химических свойств поверхностей наноструктурированного кремния и изучением их фотоаталитической активности методом газовой хроматографии. Г-жа Ермухамед исследовала оптические свойства (отражение поверхности) наноструктурированных слоев с помощью УФ-видимой спектроскопии. Морфология наноструктурированных слоев была изучена с помощью сканирующей электронной микроскопии с использованием оборудования в Лейбницком институте фотонных технологий, а также в Университете прикладных наук им. Эрнста Аббе в Йене/Германия. В результате исследовательских работ соискателя были определены оптимальные условия формирования микро- и наноструктур кремния и исследованы структурные и оптические свойства полученных экспериментальных образцов. Также было экспериментально показано, что во время роста кремниевых микроструктур на поверхности подложки n-типа с высокой степенью легирования между массивом кремниевых микроструктур и кремниевой подложкой образуется дополнительный слой пористого кремния, который в 2 раза увеличивает генерируемый водород при взаимодействии с водой по

сравнению с образцами с низким легированием проводимости n-типа. Большой выход водорода происходит, по-видимому, из-за разрыва пассивирующих Si-H-связей на поверхности микроструктур, который был показан с помощью сканирующей электронной микроскопии и ИК-спектроскопии. Исследования околопороговых спектров поглощения рентгеновского излучения показало наличие однородной пленки субоксида кремния ( $\text{SiO}_x$ ) толщиной более 10 нм на верхнем слое поверхности микроструктур кремния и в нижней части структур, что указывает на то, что водород генерируется на поверхности кремниевых микроструктур n<sup>+</sup>-типа вследствие реакции окисления до диоксида кремния и фотокаталитического разложения молекул воды на поверхности субоксидов кремния. Стоит отметить, что результаты, полученные г-жой Ермухамед, способствуют лучшему пониманию физики и химии процессов генерации водорода с использованием полупроводниковых микро- и наноструктур, а также очень важны с прикладной точки зрения для создания приложений водородной энергетики. Каждую неделю Дана принимала активное участие в еженедельных семинарах лаборатории и посещала все научные презентации, представленные в исследовательском центре. Она представила свою тему PhD диссертации и научные результаты в форме научной презентации (30 минут) на заседании нашего отдела в институте.

За время пребывания в лаборатории, у Даны сложились очень хорошие отношения со всеми членами моей международной исследовательской группы. Она всегда была очень доброй, дружелюбной и искренней. Ее предыдущая область исследований отличалась от здешней, поэтому многие экспериментальные аспекты были абсолютно новыми, полезными, и я считаю, что они будут полезны ей в дальнейших исследованиях.

Результаты, полученные в рамках рассматриваемой диссертации, были опубликованы в 13 работах, в том числе в 2 научных статьях в международных рецензируемых журналах, таких как «Scientific Reports», «Materials Research Express» и «Краткие сообщения по физике», а также представлены на международных научных конференциях.

Как научный консультант г-жи Даны Ермухамед, учитывая вышеизложенное, я считаю, что с точки зрения результатов, полученных в диссертации и личностных качеств соискателя, диссертация г-жи Ермухамед «Оптические и структурные свойства микроструктурированного кремния, полученного металл-стимулированным химическим травлением» соответствует квалификационным требованиям международного стандарта для PhD доктора, и рекомендую его для представления Ученому Совету вашего университета, и считаю, что г-жа Ермухамед заслуживает присвоения степени PhD по специальности 6D071000- «Материаловедение и технология новых материалов».

Если у Вас возникли какие-либо вопросы или желания поговорить пожалуйста, позвоните мне.

С уважением,  
Зарубежный научный консультант  
Доктор естественных наук Владимир Сиваков

/подпись/

/печать/

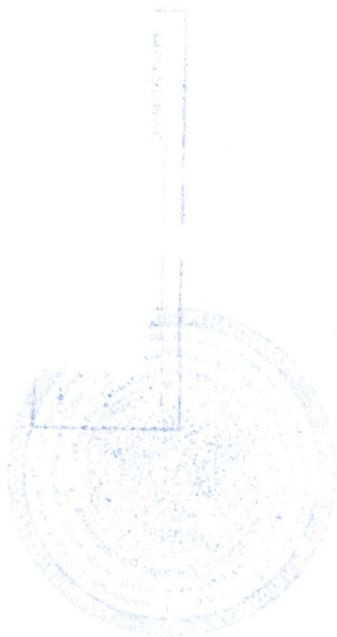
Руководитель группы "Кремниевых наноструктур" в  
Лейбницском институте фотонных технологий  
Президент конференции СТСТ  
Сеть Балтийского моря, координатор «НаноФото»

Член Национального исследовательского совета секции «Науки о жизни» Республики  
Казахстан  
Член секции Национального исследовательского совета Литовской Республики

Профессор доктор Юрген Поп Научный директор (председатель)  
Франк Сондерман Административный директор

НДС НОМЕР DE 151 282 932 НОМЕР НАЛОГА 162 / 141 / 08236 ОКРУЖНОЙ СУД ЙЕНЫ VR 230299  
ИНФОРМАЦИЯ БАНКА Сберкасса Йена-Заале-Хольцланд СФИВТ HELADE F1 JEN МЕЖДУНАРОДНЫЙ НОМЕР  
БАНКОВСКОГО СЧЕТА DE22 8305 3030 0000 0006 98

Членство Лейбница  
Сообщество Лейбница





Я, Уайханова Эльмира Оразгалиевна, ИИН 910924400298, (удостоверение личности № 040688755, выдано МВД РК от 26.09.16 г. действительно до 25.09.2016 г.), настоящим подтверждаю, что данный перевод является точным переводом данного документа и соответствует содержанию оригинала документа.

Подпись *Уайханова Эльмира Оразгалиевна*



«Двадцать третье» сентября две тысячи двадцатого года я, Муталиева Дилжара Рашидовна, нотариус города Алматы, действующая на основании государственной лицензии №0000252, от 03.11.2005 года, выданной Комитетом по организации правовой помощи и оказанию юридических услуг населению Министерства Юстиции Республики Казахстан, свидетельствую подлинность подписи, сделанной переводчиком Уайхановой Эльмиры Оразгалиевной. Личность подписавшей документ установлена, дееспособность и полномочия её проверены. Зарегистрировано в реестре за № *2472*

Взыскана сумма 1473 т/г в т.ч. ГП РК

Нотариус

*Муталиева Дилжара Рашидовна*



Прочитано в присутствии  
Нотариус *Муталиева Дилжара Рашидовна*

