

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Нгуен Ван Лыонга «Лазерное нано/микроструктурирование и сверхлегирование примесями серы поверхности кремния», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.5 – «Оптика»

Кремний является основным элементом, на базе которого построена подавляющая масса устройств микро- и оптоэлектроники. Наряду с множеством достоинств, которые выдвинули его в первый ряд основных материалов в этих областях, он имеет ряд недостатков – например, таких как слабое длинноволновое электромагнитное поглощение, практически исключающее его широкое применение в ИК-фотонике с использованием всей наработанной CMOS-технологии кремниевой нано-, микро- и оптоэлектроники. Вместе с тем, легирование кремния донорными или акцепторными примесями позволяет создать в его запрещенной зоне глубокие примесные электронные состояния, допускающие межзонные переходы «примесная зона-зона проводимости» или «валентная зона-примесная зона». Это позволит использовать его для решения актуальных задач разработки приборов ночного видения и ИК-визуализации.

Диссертационная работа Нгуен Ван Лыонга посвящена формированию микро- и наноструктурных поверхностных слоев кремния, сверхлегированных атомами и комплексами серы (содержание – до нескольких атомных процентов) в среде жидкого сероуглерода при воздействии ИК-лазерного излучения нано-, пико- и фемтосекундной длительности с варьируемой плотностью энергии и экспозицией, которые в рамках работы получены **впервые** в мире. С помощью передовых аналитических методов рентгеновской микроспектроскопии, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, электронной микродифракции детально исследованы нано- и микро топографии лазерно-

структурированного поверхностного слоя и его кристаллическое состояние по глубине и структуре, содержание, распределение и химическое состояние легирующей донорной примеси серы в поверхностном слое. С использованием широкополосной ИК-спектроскопии установлены эффекты пленения света структурой рельефа и межзонного ИК-поглощения «зона донорных состояний серы–зона проводимости» легирующих атомов серы или их комплексов, обеспечивающие высокую поглощательную способность данных микро- и наноструктурных, сверхлегированных поверхностных слоев кремния. Полученные результаты являются принципиально **новыми** для данной области, весьма актуальной для современной оптоэлектроники.

Диссертационная работа состоит из **введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы.**

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели и решаемые задачи, представлены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту, обоснована их достоверность, а также приведены сведения о апробации работы, личном вкладе автора и структуре диссертации.

В первой главе (обзоре литературы) достаточно подробно (проанализировано 129 публикаций) описаны два общепринятых подхода для придания кремнию высокого ИК-поглощения: лазерное текстурирование/сверхлегирование и ионная имплантация донорными примесями халькогенидов поверхностного слоя кремния, далее обсуждаются достоинства и недостатки этих подходов.

Во второй главе даются схемы экспериментальных установок, их комплектация и принцип работы, описаны методики проведения экспериментов, указано использовавшееся в экспериментах оборудование и материалы.

В третьей главе описано формирование наноструктурных и сверхлегированных слоев на поверхности кремния при ее облучении в среде

жидкого сероуглерода множественными лазерными импульсами фемто- и пикосекундной длительности с варьируемой экспозицией, имеющих вид массивов одномерных субволновых периодических решеток рельефа. Наноструктурные слои имеют аморфные, сверхлегированные (содержание легирующей примеси серы – до нескольких атомных процентов) штрихи на кристаллическом основании, для которых установлено распределение элементов примеси по сечению и химическим состояниям. Обнаружено низкое широкополосное пропускание в ближнем/среднем ИК-диапазоне благодаря протеканию электронных переходов из донорных состояний серы в зону проводимости.

В четвертой главе охарактеризован процесс формирования микроструктурных слоев на поверхности кремния при ее облучении в среде жидкого сероуглерода множественными лазерными импульсами наносекундной длительности с варьируемой плотностью энергии и экспозицией в виде массивов микрократеров рельефа с минимальным поверхностным слоем аморфной фазы. Отмечается низкое пропускание сверхлегированной микроструктуры поверхности в широком спектральном диапазоне 1-25 мкм, связанное с пленением света и его поглощением атомами и кластерными комплексами донорной примеси.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты, полученные в диссертационной работе.

По диссертационной работе можно высказать следующие замечания:

1. В спектрах комбинационного рассеяния образцов, полученных в результате облучения кремния в сероуглероде, наблюдается уменьшение величины стокова сдвига. Автор однозначно связывает данный факт с возникновением растягивающих напряжений в верхнем слое возникшей структуры. Однако, к уменьшению частоты стокова сдвига могут приводить также (1) возникновение наночастиц и конфайнмент фононов в них, (2) нагрев образца в условиях ухудшившейся теплопроводности. Оба эти эффекта часто встречаются в наноструктурированных средах. Между тем, эти возможности не обсуждаются в тексте.

2. Возникновение периодической структуры с периодом порядка 100 нм при облучении кремния в сероуглероде недостаточно подробно обсуждается в тексте работы. Хотя в целом данный эффект объясняется изменением волнового числа поверхностных плазмонов, следовало бы обсудить изменение условий их возбуждения и дать численную оценку указанной величине.

3. Ряд экспериментальных данных недостаточно обсужден в тексте работы. Так, нижняя панель рис. 2.8, содержащая, как следует из подписи, данные, необходимые для определения порога абляции, никак не прокомментирована в тексте; хотя представленные на ней результаты не представляются интуитивно понятными и требуют объяснений.

4. Не обсуждаются причины различия содержания чистой серы и окисленных сульфитов/сульфатов в наноструктурированном кремнии при облучении импульсами пико- и фемтосекундной длительности.

Отмеченные недостатки, однако, носят частный характер и не снижают общей положительной оценки диссертации. Научные положения, выдвинутые на защиту, **обоснованы** результатами целого ряда исследований независимыми методами с помощью сертифицированного лазерного и аналитического оборудования, в том числе сами основные результаты представляются **достоверными**. Указанные результаты представлены и опубликованы в материалах нескольких международных конференций, а также в четырех научных статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа «Лазерное нано/микроструктурирование и сверхлегирование примесями серы поверхности кремния» полностью **удовлетворяет всем требованиям** «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор – Нгуен Ван Лыонг – несомненно заслуживает присуждения ему искомой ученой степени

кандидата физики-математических наук по специальности 01.04.05 –
оптика.

Официальный оппонент:

Профессор физического факультета Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
доктор физико-математических наук



Головань Леонид Анатольевич

«20» ноября 2018 г.

Почтовый адрес: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2

Телефон: +7(495) 939-46-57

Email: golovan@physics.msu.ru

Подпись профессора физического факультета МГУ, доктора физико-
математических наук Голованя Леонида Анатольевича удостоверяю

Декан физического факультета
МГУ имени М.В.Ломоносова
профессор



Н.Н. Сысоев

Список основных публикаций Л.А. Голованя по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Заботнов С.В., Кашаев Ф.В., Шулейко Д.В., Гонгальский М.Б., Головань Л.А., Кашкаров П.К., Логинова Д.А., Агрба П.Д., Сергеева Е.А., Кириллин М.Ю. Кремниевые наночастицы как контрастирующие агенты в методах оптической биомедицинской диагностики// Квантовая электроника. - 2017. - Т. 47., № 7. - С. 638 - 646.
2. Головань Л.А., Соколов А.А., Тимошенко В.Ю., Семенов А.В., Пастушенко А., Ничипорук Т., Лысенко В. Рост времени жизни фотона и увеличение эффективности процессов комбинационного рассеяния света и генерации второй гармоники в пористом карбиде кремния // Письма в "Журнал экспериментальной и теоретической физики".— 2015.— Т 101, № 12.—С. 891-896
3. Efimova A., Eliseev A., Georgobiani V., Kholodov M., Kolchin A., Presnov D., Tkachenko N., Zobotnov S., Golovan L., Kashkarov P. Enhanced photon lifetime in silicon nanowire arrays and increased efficiency of optical processes in them // Optical and Quantum Electronics. - 2016. - V. 48. - P. 232-240.
4. Zobotnov S. V., Kholodov M. M., Georgobiani V. A., Presnov D. E., Golovan L. A., Kashkarov P. K. Photon lifetime correlated increase of Raman scattering and third-harmonic generation in silicon nanowire arrays // Laser Physics Letters. - 2016. - V. 13, - P. 035902-1-035902-5
5. Kashaev F. V., Kaminskaya T. P., Zobotnov S. V., Golovan L. A. Structural properties of silicon nanoparticles obtained via femtosecond laser ablation in gases at different pressures // Optical and Quantum Electronics. - 2016. - V. 48, - № 7, - P. 348-1-348-10.
6. Миргородский И.В., Головань Л.А., Тимошенко В.Ю., Семенов А.В., Пузилов В.М. Люминесцентные свойства тонких нанокристаллических пленок карбида кремния, изготовленных

- прямым ионным осаждением // *Физика и техника полупроводников.* – 2014.– Т. 48, № 6.– С. 731-735.
7. Гук И.В., Шандыбина Г.Д., Яковлев Е.Б., Головань Л.А. Вклад поляритонного механизма микроструктурирования поверхности кремния пикосекундными лазерными импульсами // *Оптический журнал.*–2014.–Т. 81, № 5.– С. 62-67
 8. Golovan L.A., Timoshenko V.Yu. Nonlinear-optical properties of porous silicon nanostructures // *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics.* - 2013. - V. 8. - № 3. - P. 223-239.
 9. Guk I., Shandybina G., Yakovlev E., Golovan L. Picosecond laser structuring of monocrystalline silicon surface // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.* - 2013. - V. 9065. - P. 90650R-1-90650R-7.
 10. Буньков К. В., Головань Л. А., Гончар К. А., Тимошенко В. Ю., Кашкаров П. К. Зависимость эффективности комбинационного рассеяния света в ансамблях кремниевых нанонитей от длины волны возбуждения // *Физика и техника полупроводников.* - 2013. - Т. 47. - № 3. - С. 329-333.