

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»

Исследования, связанные с «инженерией» новых материалов на базе высокоразвитой кремниевой электроники, основанные на использовании методов контролируемого допирования и структурирования таких материалов, представляются чрезвычайно важными для развития различных областей плазмоники, фотоники, оптоэлектроники. Одной из нерешённых задач в этой области является придание различным материалам высокого коэффициента поглощения или высокой поглощательной способности от ближнего до дальнего ИК спектральных диапазонов. Известны подходы решения этой задачи, основанные на создании микроструктурных светоулавливающих покрытий, хорошо зарекомендовавшие для применений в объемных фотоэлементах, но обладающие рядом трудностей при их использовании, например, для тонкопленочных солнечных элементов. Таким образом, задача формирования наноструктурных и сверхлегированных светоулавливающих кремниевых покрытий ещё не решена в полной мере и требует исследования альтернативных возможностей.

Диссертационная работа Нгуен Ван Лыонга посвящена формированию высокопоглощающих в ИК-диапазоне тонких слоев на поверхности кремния, микро/наноструктурированных и сверхлегированных донорной примесью серы в среде жидкого сероуглерода лазерными импульсами с варьируемой

длительностью, экспозицией и поверхностной плотностью энергии. С использованием сканирующей электронной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния, просвечивающей электронной микроскопии и электронной дифракции изучены топография и кристаллическая структура полученных микро/наноструктурированных и сверхлегированных слоев. При помощи энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии в этих слоях определены общее содержание примесей, их распределение по глубине, а также их химические состояния. Широкополосная – оптическая спектроскопия демонстрирует высокую поглощательную способность легированных поверхностных слоев в ИК диапазоне. Поэтому, в контексте актуальных поисков решения задачи формирования наноструктурных и сверхлегированных светоулавливающих кремниевых покрытий положительные результаты диссертационной работы Нгуен Ван Лыонга имеют очевидную **новизну**.

Диссертационная работа изложена на 126 страницах, содержит введение, четыре главы и заключение. Список литературы включает 135 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и решаемые задачи, представлена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, кратко изложены основные результаты, выносимые на защиту. Также приведены сведения апробации работы и личном вкладе автора.

Первая глава является обзором литературы. В ней представлены два основных подхода для придания кремнию высокого ИК-поглощения: (1) лазерное текстурирование и сверхлегирование, (2) ионная имплантация донорными примесями халькогенидов в поверхностном слое кремния. Показаны достоинства и недостатки этих подходов.

В второй главе приведены схемы экспериментальных установок и их описание, показаны методики проведения экспериментов и измерений, указано использовавшееся в экспериментах оборудование и материалы, а также приведены основные программы для обработки экспериментальных данных.

В третьей главе описано формирование наноструктурных и сверхлегированных слоев в виде одномерных субволновых периодических решеток рельефа на поверхности кремния, при ее облучении в среде жидкого сероуглерода множественными лазерными импульсами фемто- и пикосекундной длительности с варьируемой экспозицией. Рельеф с кристаллическим основанием и аморфными, сверхлегированными штрихами содержит атомы и комплексы серы в количестве до нескольких атомных процентов. С помощью метода энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии показывает распределение примеси элементов в сечении наноструктур кремния, также при использовании рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии определены химические состояния основных примесей (C, S). Показано, что наноструктурированные образцы кремния демонстрируют низкое широкополосное пропускание в ближнем-среднем ИК-диапазоне, в том числе – ввиду ИК-переходов «зона донорных состояний-зона проводимости» для донорных состояний атомов и комплексов серы.

В четвертой главе описано формирование микроструктурных слоев в виде массивов микрократеров рельефа с минимальным поверхностным слоем аморфной фазы на поверхности кремния при ее облучении в среде жидкого сероуглерода множественными лазерными импульсами наносекундной длительности с варьируемой плотностью энергии и экспозицией. Благодаря пленению света в микроструктуре поверхности и поглощению донорной примеси серы в ее сверхлегированном слое, отмечается низкое пропускание в широком спектральном диапазоне 1-25 мкм.

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

Работа Нгуен Ван Лыонга ясно изложена и легко читается.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

- 1) В обзоре литературы следовало сделать ссылки на работы по инженерии плазмонных материалов, обладающих малыми потерями, основанные на контроле числа носителей с помощью легирования полупроводников. Это чрезвычайно важное направление плазмоники, к которому полученные в настоящей диссертационной работе результаты имеют важное и непосредственное отношение.
- 2) В диссертационной работе отсутствуют обсуждения причин полученной топологии микроструктур, созданных методом лазерного структурирования поверхности кремния в среде жидкого углерода (Глава 3.1), а именно: (i) физические причины ориентации структур вдоль поляризации использованного лазерного излучения, (ii) физические механизмы, ответственные за образованный пространственный период расположения этих структур (см. например рисунки 3.1-3.3), (iii) причины пространственных деформаций этих структур и наличие локальных неоднородностей.
- 3) В тексте диссертации содержатся опечатки. Например: (i) для отделения целого значения числа часто используется знак «точка», а не знак «запятая», как это требует ГОСТ; (ii) рисунок 3.1 (как и рисунок 3.2) разделён без необходимости на две части и приведён на двух страницах.

Отмеченные недостатки не являются принципиальными и не снижают общей положительной оценки диссертации.

Научные положения, выдвинутые на защиту, представляются достаточно **обоснованными**. Основные результаты проведенных исследований, полученные

Список основных публикаций П.Н. Мелентьева по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Балыкин В. И., Мелентьев П. Н. Оптика и спектроскопия единичной плазмонной наноструктуры // УФН. - 2018. - Т. 188. - № 2. - С. 143–168.
2. Melentiev P. N., Kuzin A. A., Balykin V. I., Ignatov A. I., Merzlikin A. M. Dielectric-loaded plasmonic waveguide in the visible spectral range // Laser Physics Letters. - 2017. - V. 14. - № 12. - P. 126201.
3. Melentiev P. N., Afanasiev A. E., Balykin V. I. Single plasmonic split hole resonator nanostructure as an efficient nanoscale light source // Quantum Electronics. - 2017. - V. 47. - № 9. - P. 818.
4. Melentiev P. N., Kalmykov A., Gritchenko A., Afanasiev A., Balykin V., Baburin A. S., Ryzhova E., Filippov I., Rodionov I. A., Nechepurenko I. A., Dorofeenko A. V., Ryzhikov I., Vinogradov A. P., Zyablovsky A. A., Andrianov E. S., Lisyansky A. A., Plasmonic nanolaser for intracavity spectroscopy and sensorics // Applied Physics Letters. - 2017. - V. 111. - № 21. - P. 213104.
5. Мелентьев П. Н., Кузин А. А., Балыкин В. И. Исследование распространения и фокусировки поверхностных плазмонных волн с помощью рассеяния на наноструктурах // Квантовая электроника. - 2017. - Т. 47. - № 3. - С. 266–271.
6. Melentiev P. N., Kuzin A. A., Gritchenko A. S., Kalmykov A. S., Balykin V. I. Femtosecond plasmon interferometer // Optics Communications. - 2017. - V. 382. - P. 509-513.
7. Мелентьев П. Н., Кузин А. А., Афанасьев А. Е., Балыкин В. И. Генерация излучения третьей гармоники в коротковолновом УФ спектральном диапазоне единичной плазмонной наноструктурой // Квантовая электроника. - 2016. - Т. 46. - № 5. - С. 414–418.
8. Melentiev P. N., Afanasiev A. E., Kuzin A. A., Zablotskiy A. V., Balykin V. I. Giant enhancement of two photon induced luminescence in metal nanostructure // Optics Express. - 2015. - V. 23. - № 9. - P. 11444-11452.

9. Мелентьев П. Н., Афанасьев А. Е., Балыкин В. И. Гигантская оптическая нелинейность плазмонных наноструктур // Квантовая электроника. - 2014. - Т. 44. - № 6. - С. 547–551.
10. Melentiev P. N., Afanasiev A. E., Tausenev A. V., Konyaschenko A. V., Klimov V. V. Nanoscale and femtosecond optical autocorrelator based on a single plasmonic nanostructure // Laser Physics Letters. - 2014. - V. 11. - № 10. - P. 105301.
11. Константинова Т. В., Мелентьев П. Н., Афанасьев А. Е., Кузин А. А., Стариков П. А., Батурин А. С., Таусенев А. В., Конященко А. В., Балыкин В. И. Нанолокализованный источник фемтосекундного излучения // Квантовая электроника. - 2013. - Т. 43. - № 4. - С. 379–387.