

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

Бутова Олега Владиславовича

на диссертацию Колымагина Данилы Анатольевича «Оптические и морфологические свойства микроструктур, полученных методом DLW-STED-фотолитографии», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика

Актуальность темы диссертации связана с развитием методов аддитивных технологий для создания элементов современной фотоники. Проведенные в диссертационной работе исследования были осуществлены с помощью метода двухфотонной фотополимеризации, совмещённой с методикой гашения возбуждения вынужденным излучением (DLW-STED-фотолитографии). Данный метод обладает большим потенциалом для получения фотонных 3D-структур интегрированных в фотонные интегральные схемы (ФИС), а также схем, комбинированных с оптоволокном. Субмикронное разрешение DLW-STED-фотолитографии также позволяет получать плазмонные устройства, как благодаря методам металлизации (например, использованный в диссертационных исследованиях для создания плазмонных антенн метод взрывной металлизации (lift-off)), так и с помощью специальных светочувствительных композиций. Результаты исследований новых светочувствительных композиций при взаимодействии с ними сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения позволяют расширить знания о протекающих во время создания 3D-структур физико-химических процессах.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 135 страниц текста, в том числе 53 рисунка и 1 таблица и 73 наименования в списке литературы.

Во **введении** сформулирована цель диссертационной работы и обоснована ее актуальность, проанализирована научная новизна исследования, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, сформулированы защищаемые положения, обоснована достоверность результатов.

В **первой главе** представлен анализ современного состояния исследований, посвященных методу DLW-фотолитографии и DLW-STED-фотолитографии.

Представлены основные понятия, приведены базовые объяснения эффекта улучшения пространственного разрешения литографии при создании структур с помощью использования дополнительного лазерного излучения, выявлены преимущества и физические ограничения метода DLW-STED-фотолитографии.

Во **второй главе** рассмотрена модель взаимодействия фемтосекундного лазерного излучения и светочувствительной композиции и изложены методики исследования. Отдельная часть главы посвящена устройству оригинальной установки для DLW-STED-фотолитографии. Приведены результаты оптических и морфологических исследований микроструктур, полученных из фоточувствительной композиции на основе кумаринового красителя (DETC) методами DLW-STED-фотолитографии.

Третья глава посвящена исследованию DLW-STED-фотолитографии с новыми светочувствительными композициями, включающими в свой состав кумариновые, имидазолсодержащие, (мет)акрилатсодержащие красители, а также органическую соль серебра. Для гибридной металл-органической фотокомпозиции приведены результаты исследования DLW-STED-фотолитографии и продемонстрировано влияние фотовосстановленных серебряных наночастиц на полученный материал. Получены полимерные линейные элементы с латеральным размером 45 нм для новых (мет)акрилатсодержащих.

В **Четвертой главе** изложены результаты морфологических и оптических исследований 3D-структур, полученных с помощью метода DLW-STED-фотолитографии. Изучены плазмонные свойства золотых V-образных наноплазмонных антенн в среднем ИК-диапазоне. Представлен способ создания микролинз и продемонстрированы их оптические и морфологические свойства. В качестве прикладного применения данных линз, было создано оригинальное устройство для оптоволокна с целью увеличения эффективности ввода излучения. Получены «фотонные межсоединения» для фотонных интегральных схем с пропусканием света фотонного волновода лучше 5 дБ на длине волны 1550 нм.

В **заключении** приводятся основные выводы, отражающие результаты проведённых исследований.

В качестве **наиболее важных результатов, полученных в диссертации**, можно отметить следующие:

1. Создана уникальная установка для проведения DLW-STED-фотолитографии, которая позволяет получать субмикронное разрешение литографии и является аддитивным инструментом создания как полимерных, так и металлоорганических (включающих в свой состав полимер, краситель и серебряные наночастицы) 3D-структур.
2. Показана возможность создания с помощью DLW-STED-фотолитографии фотонных элементов, таких как: массив V-образных плазмонных наноантенн, обладающих свойством линейного дихроизма; устройств на основе микролинз с радиусом кривизны 60 мкм для ввода излучения в оптоволокно; «фотонные межсоединения» (Photonic Wire Bond-PWB), с потерями на пропускание света менее 5 дБ на длине волны 1550 нм.

Сформулированные в диссертационной работе научные положения и выводы основаны на результатах экспериментальных исследований и обоснованных моделей. Результаты получены с использованием современных экспериментальных методик, и обработаны в соответствии с общепринятыми методами обработки данных. Данные экспериментов согласуются с описанными в диссертации моделями, результаты докладывались на международных и российских конференциях. По результатам, представленным в диссертации автором опубликовано 12 статей в рецензируемых журналах, включая журналы первого квартиля.

Научная значимость работы не вызывает сомнения. Детально исследована морфология полимеризованных областей, получаемых в процессе двухфотонной фотополимеризации, в том числе и для фоточувствительных композиций, для которых работает эффект тушения реакции полимеризации за счет эффекта вынужденного излучения. Продемонстрировано создание целого ряда фотонных структур. Результаты работы могут найти широкое практическое применение при создании планарных и волоконно-планарных фотонных структур, широко используемых в телекоммуникации, сенсорике, в схемах оптической обработки информации.

Работа не лишена недостатков, а именно:

1. В первой главе подробно рассматриваются DWL и STED-фотолитография как методы, однако не дается обзор по фотонным структурам, создаваемым с помощью литографии, что могло бы дать представление о современном состоянии дел в

данной области, а также продемонстрировать актуальность и значимость полученных, в диссертационной работе соискателя, результатов.

2. Во второй главе отмечено, что создана уникальная научная установка, разрешение которой превосходит лучшие мировые аналоги. Дается подробное описание схемы. Однако, в тексте не отмечены те моменты, которые принципиально отличают схему литографа в лучшую сторону от аналогов. Какие параметры лучше? Известно из литературы, в т.ч. приводимой автором, что основные достигнутые параметры, например, разрешение в 100 нм, были достигнуты и ранее. Это в тексте не выделено.
3. Текст диссертационной работы содержит большое количество сокращений. Несмотря на встречающуюся в тексте их расшифровку удобнее было бы создать раздел со списком сокращений, как рекомендует ГОСТ.
4. В главе 2 упоминается высокая степень синхронизации работы подвижек Standa и пьезоэлементов (глава 2)? При этом разрешение позиционирования первых составляет 2,5 микрона на шаг при возможности дробления шага до величины 1/8. Но упоминается 1/256 шага, при этом, очевидно, это не значит, что возможно получить точность позиционирования на уровне 10 нм (стр.52). Остается открытым вопрос, как при совместном использовании подвижек достигалась высокая точность позиционирования и стабильность скорости их перемещения при совместной работе? Упоминается оптический датчик обратной связи. Был ли он задействован при отработке алгоритма движения подвижки или его функция ограничивалась лишь измерением фактического положения подвижки?
5. В тексте встречаются неточности, вводящие в заблуждения. Например, на страницах 6 и 21 упоминается, что в одной из работ была достигнута точность 2,4 нм, составляющая 1/23 от длины волны видимого возбуждающего излучения, что в принципе некорректно. Разрешение 2,4 нм, упоминаемые в приведенной работе действительно были получены, но это, по меньшей мере, 1/200 от длины волны, что на два порядка превосходит дифракционный предел. И в этом случае требуются дополнительные разъяснения.

Отмеченные недостатки носят, скорее, рекомендательный характер и не снижают общее положительное впечатление о работе. Диссертационная работа Колымагина Даниила Анатольевича выполнена на высоком научном уровне и содержит ряд новых результатов, интересных для широкого круга исследователей, работающих

в области фотоники. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

На основании текста диссертации можно сделать вывод, что по значимости и актуальности полученных результатов работа Колымагина Даниила Анатольевича «Оптические и морфологические свойства микроструктур, полученных методом DLW-STED-фотолитографии» соответствует требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. Автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 «Оптика».

Официальный оппонент,
зам. директора по научной работе
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
доктор физ.-мат. наук



Бутов Олег Владиславович

29 ноября 2021 г.

Адрес: 125009 Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7,
ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
e-mail: obutov@mail.ru,
тел.: (495) 629-33-20

**Список основных публикаций оппонента доктора физико-математических наук
О.В. Бутова по теме защищаемой диссертации за последние 5 лет:**

1. Smirnov A. M., Bazakutsa A. P., Chamorovskiy Y. K., Nechepurenko I. A., Dorofeenko A. V., **Butov O. V.** “Thermal switching of lasing regimes in heavily doped Er³⁺ fiber lasers”//ACS Photonics. – 2018. – Т. 5. – №. 12. – С. 5038-5046.
2. Tomyshev K. A., Tazhetdinova D. K., Manuilovich E. S., **Butov O. V.** “High-resolution fiber optic surface plasmon resonance sensor for biomedical applications” // Journal of Applied Physics. – 2018. – Т. 124. – № 11. – С. 113106
3. Tomyshev K. A., Tazhetdinova D. K., Manuilovich E. S., **Butov O. V.** “Ultrastable Combined Planar-Fiber Plasmon Sensor” // physica status solidi (a). – 2019. – Т. 216. – № 3. – С. 1800541
4. **Butov O. V.** “Bragg gratings inscription in weakly-doped fibers” //Results in Physics. – 2019. – Т. 15. – С. 102542.
5. **Butov O. V.**, Bazakutsa A. P., Chamorovskiy Y. K., Fedorov A. N., Shevtsov I. A. “All-fiber highly sensitive Bragg grating bend sensor” //Sensors. – 2019. – Т. 19. – №. 19. – С. 4228.
6. Manuylovich E., Tomyshev K., **Butov O. V.** “Method for Determining the Plasmon Resonance Wavelength in Fiber Sensors Based on Tilted Fiber Bragg Gratings” // Sensors. – 2019. – Т. 19. – № 19. – С. 4245
7. Laktaev I. D., Przhiialkovskii D. V., Ustimchik V. E., **Butov O. V.** “Thermal aging of Bragg gratings inscribed in pristine Ge-and N-doped fibers” //Applied optics. – 2019. – Т. 58. – №. 34. – С. 9326-9330.
8. Рыбалтовский А. А., Васильев С. А., **Бутов О. В.**, Егорова О. Н., Журавлев С. Г., Семенов С. Л., Галаган Б. И., Сверчков С. Е., Денкер Б. И. “Фоточувствительность эрбиевых композитных фосфоросиликатных световодов к лазерному излучению с длиной волны 193 нм” //Квантовая электроника. – 2019. – Т. 49. – №. 12. – С. 1132-1136.
9. A. A. Rybaltovsky, D. S. Lipatov, A. S. Lobanov, A. N. Abramov, A. A. Umnikov, A. P. Bazakutsa, K. K. Bobkov, **O. V. Butov**, and A. N. Gur’yanov, “Photosensitive highly Er/Yb co-doped phosphosilicate optical fibers for continuous-wave single-frequency fiber laser applications,” //JOSA B. – 2020. – Т. 37. – №. 10. – С. 3077-3083.

10. A. P. Bazakutsa, A. A. Rybaltovsky, A. A. Umnikov, and **O. V. Butov**, "Photobleaching of UV-induced defects in Er/Al-doped glasses for fiber lasers" //Opt. Mater. Express. – 2020. – T. 10. – №. 10. – C.2669-2678.
11. I.D. Laktaev, B.M. Saidzhonov, R.B. Vasiliev, A.M. Smirnov, **O.V. Butov** "Second harmonic generation in colloidal CdSe/CdS nanoplatelets" //Results in Physics – 2020. – T. 19. – C. 103503
12. Popov S. M., **Butov O. V.**, Bazakutsa A. P., Vyatkin M. Y., Chamorovskii Y. K., Fotiadi A. A. "Random lasing in a short Er-doped artificial Rayleigh fiber" //Results in Physics. – 2020. – T. 16. – C. 102868.
13. Laktaev I. D., Przhialkovskii D. V., Saidzhonov B. M., Vasiliev R. B., Smirnov A. M., **Butov O. V.** "Two-photon exciton absorption in CdSe/CdS nanoplatelets colloidal solution" //Semiconductors. – 2020. – T. 54. – №. 14. – C. 1900-1903.
14. A.M.Smirnov and **O.V.Butov**, "Pump and thermal impact on heavily erbium-doped fiber laser generation" //Optics Letters, – 2021. – T.46. – № 1. – C. 86-89.
15. Igor A. Nechepurenko, Alexander V. Dorofeenko, and **Oleg V. Butov** "Optimal defect position in a DFB fiber laser" //Optics Express, – 2021. – T.29. – № 9. – C. 13657-13668/