

ОТЗЫВ официального оппонента
о диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук Скрябина Николая Николаевича
на тему: «Элементы линейно-оптических квантовых вычислений на
основе интегрально-оптических чипов»
по специальности 1.3.19. Лазерная физика

Диссертация Николая Николаевича Скрябина «Элементы линейно-оптических квантовых вычислений на основе интегрально-оптических чипов» посвящена чрезвычайно **актуальной** теме современной фотоники – технологии изготовления элементов для фотонных квантовых компьютеров. Актуальность построения квантовых компьютеров, наверное, ни у кого не вызывает сомнения, и именно фотонное направление их развития - одно из самых перспективных с точки зрения относительно несложной технологии изготовления ключевых компонентов. Именно интегрально-оптические чипы являются одним ключевыми элементами такого компьютера, поскольку позволяют сохранять квантовую когерентность при комнатной температуре. Технология изготовления чипов на основе силикатных стекол с помощью прямой лазерной записи, чему посвящена диссертация Н.Н. Скрябина, отличается относительной простотой и гибкостью, поэтому все соответствующие лаборатории мира используют ее для прототипирования схем квантовых компьютеров.

Положения, выносимые на защиту, исчерпывающим образом обоснованы масштабными экспериментальными и теоретическими исследованиями оптических чипов, изготовленных самим же диссертантом. **Научные выводы и рекомендации**, сформулированные в диссертации, также полностью обоснованы и напрямую следуют из результатов, которые были получены с использованием надежных методик. **Достоверность и новизна** результатов не вызывает сомнений и подтверждается публикациями в высокорейтинговых рецензируемых научных журналах, а также докладами на тематических конференциях.

В то же время, есть ряд непринципиальных замечаний по тексту в параграфах диссертации:

1.2.4. На Рис.1.3. отражение в светоделителе происходит при пересечении светом поверхности пластинки из нее во внешнюю среду, то есть при переходе из среды с большим показателем преломления в среду с меньшим показателем и утверждается, что фаза поля меняется на π . Это не верно. Она меняется на π при обратном переходе (из воздуха в пластинку).

1.4. Правильно описаны основные три архитектуры волноводов, создаваемых сфокусированным пучком фемтосекундного лазера. Однако некорректно сказано со ссылкой на работу 2000-го года, что в кристалле кварца был записан волновод «по аналогии со стеклами», хотя авторы в той ранней работе так и полагали. Однако позже было установлено, что в кристалле кварца происходит аморфизация кристаллической решётки с уменьшением плотности в области воздействия лазерного пучка, поэтому волновод в той работе был образован из-за стресса, наведенному рядом с областью воздействия.

К приведенной классификации следует добавить новый подкласс волноводов с депрессированной оболочкой, образованной не множеством треков, а одним треком, но имеющим форму спирали с шагом порядка длины волны:

[1] A. G. Okhrimchuk, V. V. Likhov, S. A. Vasiliev, and A. D. Pryamikov, “Helical Bragg Gratings: Experimental Verification of Light Orbital Angular Momentum Conversion,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 8, pp. 2481–2488, Apr. 2022, doi: 10.1109/JLT.2021.3137055.

[2] А. Г. Охримчук и А. Д. Прямиков, “Способ формирования трубчатого канального волновода и установка для его осуществления,” Патент РФ №2711001, 2019.

1.4.1. Классификация режимов лазерной записи в кварцевом стекле представлена в несколько устаревших воззрениях. Правильно отмечено, что для записи гладких треков с изотропным изменением показателя требуются небольшие энергии лазерного импульса (немного превышающие энергию на пороге модификации материал), и длительность импульса, ограниченная

величиной примерно 200 фс. Конечно, этот режим больше всего и интересовал диссертанта для записи волноводов. Но отмечу, что в общем случае для его реализации недостаточно только многофотонного поглощения, как утверждает диссертант. Это может иметь место лишь при длительности импульса короче 100 фс, а поглощение электронной плазмой при последующей лавинной ионизации всегда имеет заметную долю в энерговкладе в материал при реально используемых длительностях и энергии лазерного импульса.

[3] B. Rethfeld, “Free-electron generation in laser-irradiated dielectrics,” *Phys Rev B Condens Matter Mater Phys*, vol. 73, no. 3, 2006, doi: 10.1103/PhysRevB.73.035101.

Далее в диссертации неправильно указано, что при повышении энергии импульса за режимом 1 следует режим 2, соответствующий образованию нанорешёток. Так считалось на ранних стадиях исследований лазерной записи в кварцевом стекле. Согласно последним за 10 лет результатам экспериментальных и теоретических исследований образованию нанорешёток предшествует образование нанопор, а для образования нанорешоток ключевым фактором является не энергия (но при превышении энергии, необходимой для образования нанополости), а достаточное количество импульсов, воздействующих на одну и ту же микро-область стекла. То есть нанорешотки образуются в результате эволюции ансамбля нанопор.

[4] F. Zimmermann, A. Plech, S. Richter, A. Tünnermann, and S. Nolte, “The onset of ultrashort pulse-induced nanogratings,” *Laser Photon Rev*, vol. 10, no. 2, pp. 327–334, Mar. 2016, doi: 10.1002/lpor.201500272.

[5] A. Rudenko, H. Ma, V. P. Veiko, J. P. Colombier, and T. E. Itina, “On the role of nanopore formation and evolution in multi-pulse laser nanostructuring of glasses,” *Appl Phys A Mater Sci Process*, vol. 124, no. 1, Jan. 2018, doi: 10.1007/s00339-017-1492-2.

[6] A. Rudenko, J.-P. Colombier, and T. E. Itina, “From random inhomogeneities to periodic nanostructures induced in bulk silica by ultrashort laser,” *Phys Rev B*, vol. 93, no. 7, p. 075427, 2016, doi: 10.1103/PhysRevB.93.075427.

1.4.2. В обзоре записи интегрально-оптических элементов следовало бы указать тип архитектуры волноводов, использованных в оптических чипах для квантовых вычислений, поскольку изготовление таких чипов — это одна из основных задач диссертации.

2.1. Некорректная фраза: «... выравнивание углов образца». Очевидно, имеется в виду выравнивание ориентации образца.

Мощность обратного отражения очевидно не «наблюдалась», а детектировалась на фотодетекторе ФД2.

Описанная схема позиционирования перетяжки лазерного пучка на поверхности образца работоспособна лишь, если расстояние от фокусирующей линзы АЛ до фотодиода ФД2 z (не указано в диссертации) бесконечно много больше, чем фокусное расстояние линзы f . Если это не выполнено, то максимум сигнала с фотодиода соответствует положению перетяжки над поверхностью образца на высоте $h = f^2/(2z)$, а не на поверхности. Например, даже при $z = 1$ м получим, что $h=10$ мкм, что составляет заметную величину по сравнению с предполагаемой глубиной залегания волновода в подложке.

2.2. Не указано, чем обусловлен выбор кварцевого стекла для лазерной записи оптических чипов. Например, почему не использовалось распространенное в оптической промышленности стекло К8 (BK7 по западной классификации)?

2.3. Почему расчет модового состава сделан только для квадратных волноводов?

2.4.2. Непонятно утверждение:

«...несмотря на то, что числовая апертура линзы АЛ2 превышает апертуру волновода, изображение подвергается низкочастотной фильтрации из-за ограниченной входной апертуры системы визуализации.» Ведь апертура системы визуализации – это и есть апертура линзы АЛ2. Могу предположить, что проблемы с визуализацией связаны с использованием асферической линзы, а не сферической. Асферическая линза вносит aberrации для внеосевых пучков, и поэтому не годится для построения изображений.

2.6. Было бы информативней представить электронную схему самодельного устройства регистрации одновременного прихода двух фотонов, чем его фотографию.

3.1. Чем обусловлена регистрация одиночных (не парных) фотонов при использовании параметрического преобразования второго типа в кристалле в каждом канале – сигнальном и холостом? Например, куда исчезает холостой фотон при генерации сигнального, если он требуется при втором типе синхронизма?

3.2.1. Справедливо сказано, что режим записи волноводов следует подбирать исходя из фактически имеющихся аппаратных средств в лаборатории. Однако диссертант не привел результатов исследований, почему он остановился на конкретно выбранном режиме.

При записи трека в режиме типа 2 имеет значение направление поляризации записывающего пучка. Оно не указано.

3.2.4. Фотографии волноводной структуры и выгравированных управляющих электродов в чипе плохого качества, не позволяющего рассмотреть некоторые детали.

4.1. Почему был использован фемтосекундный лазер для накачки квантовой точки, если его спектр слишком широк? Не лучше бы было использовать полупроводниковый импульсный лазер, и при этом не потребовалось бы фильтровать спектр?

Нет пояснения, почему в каждый канал отклонялось по 4 фотона, а не по одному.

4.2.3. Обнаружена зависимость пропускания волновода от глубины записи, но при этом не указано, применялась ли коррекция сферической aberrации. Наилучший волновод был получен для глубины, на которой сферическая aberrация должна быть значительной. В связи с этим остаётся невыясненной причина столь большой оптимальной глубины. Не связано ли это с увеличением размеров перетяжки, как результат проявления сферической aberrации?

4.2.4. На мой взгляд неудачно применен термин «параллельная запись». Это было бы уместно, если бы запись была проведена одновременно двумя и более пучками.

4.3.2. Видимо неправильно указана ссылка на Рис.4.10.

4.3.2. Почему была применена столь небольшая глубина записи (15 мкм)? В предыдущих параграфах была найдена оптимальная глубина, и она значительно больше.

4.3.3. Не понятно из текста, что означает время жизни одиночных фотонов 150 пс?

5.1. Некорректно указана ссылка на работу [170]. В ней астигматичная фокусировка применена для улучшения аспектного отношения в сечении трека записи (приближения его к единице). Тогда как диссертант применил этот метод для увеличения размера перетяжки вдоль записи, что служило для улучшения гладкости трека (При этом совершенно справедливо указана ссылка [119].)

Целесообразно было бы указать ссылку на работу, в которой впервые было проведено сравнение гладкости треков, записанных обычной сигарообразной перетяжкой и линзообразной перетяжкой с увеличенным размером вдоль трека [A. G. Okhrimchuk, V. K. Mezentsev, H. Schmitz, M. Dubov, and I. Bennion, "Cascaded nonlinear absorption of femtosecond laser pulses in dielectrics," *Laser Phys*, vol. 19, no. 7, pp. 1415–1422(2009)].

5.2. Не указано в какой из волноводов заводился пучок при исследовании коэффициентов деления. Не ясно, зависят ли коэффициенты деления от того, в какое плечо заводится пучок.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.19. Лазерная физика (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование

оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Скрябин Николай Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:

Кандидат физ-мат. наук,
Ведущий научный сотрудник,
Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»
Охримчук Андрей Гордеевич

11/05/2026

Контактные данные:

тел.: +7(916) 989-47-95, e-mail: okhrim@fo.gpi.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.04.21 – Лазерная физика

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38,
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова.
Тел.: +7 (499) 503-87-34, e-mail: office@gpi.ru

Подпись сотрудника ИОФ РАН
в.н.с. А.Г. Охримчука удостоверяя
И.о. ученого секретаря ИОФ РАН
д.ф.-м.н. Глушков В.В.

05.2026