

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Вадима Владиславовича Воробьева «Исследование эффективных спин-фотонных интерфейсов на базе центров окраски в алмазе», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

Диссертационная работа В.В.Воробьева посвящена исследованию возможности создания эффективного квантового интерфейса для считывания информации с центров окраски в алмазе. Решалось четыре взаимно связанные задачи:

- подбор наноалмазов, содержащих одиночные NV центры, и отработка технологий их приготовления и исследования;
- исследование взаимодействия NV центров с гиперметаматериалами (ГММ) и статистики излученных фотонов от одиночных NV центров на поверхности ГММ;
- создание установки для вытягивания оптического волокна и отработка соответствующих технологий, а также эффективное сопряжение наноалмазов содержащих единичный NV-центр с вытянутым волокном;
- исследование квантовых свойств излучателей при помощи сверхпроводящих детекторов и улучшение характеристик регистрирующей аппаратуры.

Актуальность работы несомненна в контексте бурного развития науки о квантовой обработке информации (КОИ). Наряду с базовыми научными направлениями, связанными с квантовыми коммуникациями/вычислениями/моделированием, особое значение приобретают квантовые технологии, как важная ветвь, непосредственно ведущая к многообещающим приложениям КОИ. В этой связи экспериментальные квалификационные работы, направленные на достижение конкретных результатов заслуживают отдельного внимания, хотя такие работы в РФ, к большому сожалению, пока чрезвычайно редки.

Данная работа представляет приятное исключение - в ней рассматриваются важные задачи, связанные с технологией изготовления, нанесения и измерения свойств одного из перспективных материалов КОИ - примесных центров в алмазах. Модель примесных центров рассматривается как базовая (наряду со сверхпроводниковыми структурами, нейтральными атомами/ионами в ловушках и линейными фотонными чипами) для построения в ближайшей перспективе среднemasштабных квантовых симуляторов. Кроме того, на основе примесных центров возможно создание одно-, а впоследствии и N-фотонных источников (неклассического) света.

Структурно работа состоит из четырех глав (одна обзорная и три - оригинальные), Введения и Заключения.

В первой главе приведен литературный обзор методов получения однофотонного излучения, его регистрации, а также классификация, способы получения и полезная сводка данных о свойствах центров окраски в алмазах (NV^- , SiV^- , GeV , SnV (TinVacancy)) и методах их исследования.

Вторая глава посвящена исследованию возможности широкополосного усиления излучения NV центра за счет использования гиперболического метаматериала (ГММ). Такие материалы имеют специфический (сильно анизотропный) вид пространственной зависимости показателя преломления, который обусловлен наличием металл-диэлектрической структуры, с характерным размером неоднородности слоев много меньшим, длины волны. Закон дисперсии таких материалов имеет особенности, обуславливающие дополнительные каналы распада в окрестности 600-800 нм, соответствующем спектру флюоресценции NV центров. Основной результат этой главы состоит в обнаружении и количественном измерении эффекта уменьшения времени жизни возбужденного состояния (в 4.5 раза) за счет увеличения спонтанной эмиссии на поверхности ГММ. Конкретно, исследовались ГММ с периодом структуры слоев 10 нм, 20 нм, и 40 нм и поведение NV центров в наноалмазах размером 100 нм и 50 нм, размещенных на поверхности образца. Использовался метод конфокальной микроскопии в конфигурации Объектив - Иммерсионное масло - Наноалмаз - Подложка ГММ в двух конфигурациях образцов: в одной наноалмазы расположены по всему объему полимерного слоя, во второй - наноалмазы расположены на поверхности ГММ тонким слоем. Результаты представлены на рисунке 2.10б. Значительная часть Главы 1 посвящена описанию процедур подготовки образцов и экспериментальной установке.

В третьей главе рассматриваются вопросы, связанные с улучшением характеристик сверхпроводящих детекторов на основе NbN на подложке из кремния с промежуточным слоем SiO_2 , оптимизированных под диапазон длин волн 600-1100 нм, соответствующий области излучения центров окраски в алмазе (NV , SiV , GeV и SnV центры). Эти детекторы имеют зависящую от поляризации квантовую эффективность до 30%, темновые шумы около 0.1 Гц, временной джиттер в районе 60 пс и широкий динамический диапазон порядка 100 МГц. Такие параметры позволяют использовать сверхпроводящие детекторы для исследования статистических свойств света при сравнительно больших интенсивностях. В этой главе проведено сравнение автокорреляционной функции с одного и того же NV центра, измеренной как с помощью лавинного фотодиода Perkin-Elmer (SPCM-AQRH-14-FC), так и с помощью

сверхпроводящего фотодиода, изготовленного в работе. Обращаю внимание, что сегодня доступны однофотонные кремниевые фотодиоды той же компании, но с темновыми шумами в четыре раза ниже, чем использованные в диссертационной работе (SPCM-AQRH-16). Основной результат этой главы заключается в подтверждении вывода о том, что широкий динамический диапазон сверхпроводящих детекторов и низкий джиттер позволяют их использовать для измерения корреляционной функции второго порядка для сравнительно больших интенсивностях света.

В четвертой Главе обсуждается технология создания интерфейса между NV центром и оптическим волокном, когда наноалмазы с одиночным NV центром помещаются на поверхности перетяжки адиабатически вытянутого оптического волокна. Детально обсуждаются нюансы экспериментов, в частности, новый способ нанесения одиночного NV центра на перетяжку вытянутого волокна. Метод состоит в использовании двух скрещенных вытянутых волокон «донор» и «акцептор». Анализируются причины возникновения шума и способов борьбы с паразитным фоновым излучением, создаваемым самим волокном. Подробно описан оригинальный метод создания нанофотонного устройства, состоящего из наноалмаза с единичным NV центром и вытянутого нановолокна

К работе имеется несколько замечаний.

1. В Главе 3 говорится, что "...специально для задач решаемых в ходе данной работы, совместно с группой Г. Гольцмана на основе идей, сформулированных ранее [129, 130], были разработаны и протестированы сверхпроводящие детекторы нового поколения. В отличие от предыдущих детекторов, работающих преимущественно в инфракрасной области спектра, данные детекторы были оптимизированы под диапазон длин волн 600-1100 нм, соответствующий области излучения таких перспективных центров окраски в алмазе как NV, SiV, GeV и SnV центры". Вместе с тем, на сайте компании SCONTEL (http://www.scontel.ru/data/uploads/datasheet/brochure_sspd-newest.pdf) перечислены параметры коммерчески доступных детекторов, среди них: спектральный диапазон 0.6-2.5 мкм, квантовая эффективность (отнесенная к оптич.входу) $\geq 85\%$, скорость темновых отсчетов ≤ 10 Гц (вплоть ≤ 0.1 Гц), джиттер ≤ 45 пс (для сверхбыстрых систем ≤ 25 пс). Эти параметры не уступают значениям, приводимым в диссертации. Возникает вопрос, зачем разрабатывать "детекторы нового поколения" когда они уже коммерчески доступны, если верить информации, размещенной на сайте SCONTEL?

2. В главе 4 на рисунке 4.6в показаны кривые насыщения. Однако в тексте не говорится, являются ли "скорость счета" интегральной, т.е. включающей шумовые отсчеты, или шумы были вычтены. Это принципиальный вопрос, поскольку речь идет о количественном сравнении двух методов сбора.

3. Там же при обсуждении эффективности сбора излучения от NV-центра при помощи вытянутого волокна утверждается, что десятикратное падение (по сравнению с расчетом) вызвано "низким пропусканием волоконного канала 15%, имеющего потери на стыках между отдельными участками волокна". Даже если использовались стандартные разъемы (не говоря о сварных соединениях), это значение представляется слишком большим.

Кроме того, в работе имеется ряд неточных выражений/формулировок. В частности, во Введении говорится, что "Принцип защиты квантовых линий связи базируется на невозможности копирования единичного квантового состояния". Это не совсем верно, клонирование запрещено для *неизвестных квантовых* состояний. "Ловушка Паули" - это ловушка Пауля и т.д. В тексте присутствуют жаргонизмы, скажем, термин "статистика" используется слишком вольно (например, в подписи к Рис.2.6 говорится "Пример данных, учитываемых в статистике..."). Также отмечу, что в работе имеется большое число досадных опечаток, например, в Главе 1 при описании звездного интерферометра он назван тремя именами (Ханбури, Браун и Твисс [42] - перечислены через запятую), хотя известно, что интерферометр носит имена двух ученых (Robert Hanbury Brown и Richard Q. Twiss). Явление спонтанного параметрического рассеяния (СПР) света, предсказанного Д.Н.Клышко, в работе неоднократно называется "параметрическим понижающим преобразованием света" - очевидно, используется калька английского термина "parametric down-conversion". Досадно, что в работе игнорируется общеизвестный факт: эффект СПР был впервые предсказан Д.Н.Клышко (Письма в ЖЭТФ, 1967), им же рассмотрена статистика двухфотонного (Письма в ЖЭТФ 1969) и трехфотонного света (Письма в ЖЭТФ 1970), заложены основы абсолютной квантовой фотометрии (Квантовая электроника 1977, 1980) - задолго до работ Л.Манделя, про которого в работе сказано, что "Первооткрывателем этого метода является Л.Мандель (1986)".

В целом, диссертационная работа В.В.Воробьева оставляет хорошее впечатление. Особенно подчеркну тщательность описания деталей проведенных экспериментов, методики подготовки образцов и обработки данных - это, на мой взгляд, подтверждает высокую квалификацию Автора как физика-экспериментатора.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, вполне обоснованы.

Достоверность и новизна полученных в диссертации результатов не вызывает сомнений.

Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации.

Результаты работы опубликованы в трех статьях в тематических реферируемых журналах, индексируемых в базе данных Web of Science (Laser Photonics Review, The European Physical Journal D и Optical Materials Express).

На основании вышеизложенного считаю, что работа В.В.Воробьева отличается высоким уровнем профессионализма, удовлетворяет всем требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика, а сам В.В.Воробьев заслуживает присвоения искомой ученой степени.

профессор кафедры квантовой электроники
физического факультета Московского государственного
университета им. М.В. Ломоносова,
руководитель лаборатории квантовых оптических технологий,
доктор физико-математических наук, доцент

06.12.17

Сергей Павлович Кулик

Москва, 119992, Ленинские горы, 1, стр.2

sergei.kulik@physics.msu.ru

тел: +7 910 4840622

Подпись С.П.Кулика удостоверяю
Декан физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова,
доктор физико-математических наук, профессор





Сысоев Николай Николаевич

Москва, 119992, Ленинские горы, 1, стр.2

nn.sysoev@physics.msu.ru

Список публикаций официального оппонента д.ф.-м. н. С. П. Кулика по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях.

- [1] A. N. Klimov, S. P. Kulik, S. N. Molotkov, and T. A. Potapova, "On a simple attack, limiting the range transmission of secret keys in a system of quantum cryptography based on coding in a sub-carrier frequency," *Laser Phys. Lett.*, vol. 14, no. 3, p. 35201, Mar. 2017.
- [2] М. С. Н. Балыгин К.А., Зайцев В.И., Климов А.Н., Климов А.И., Кулик С.П., "Практическая квантовая криптография," *Письма в "ЖЭТФ"*, vol. 105, no. 9, pp. 570–576, 2017.
- [3] E. V. Kovlakov, I. B. Bobrov, S. S. Straupe, and S. P. Kulik, "Spatial Bell-State Generation without Transverse Mode Subspace Postselection," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 118, no. 3, p. 30503, Jan. 2017.
- [4] G. I. Struchalin, I. A. Pogorelov, S. S. Straupe, K. S. Kravtsov, I. V. Radchenko, and S. P. Kulik, "Experimental adaptive quantum tomography of two-qubit states," *Phys. Rev. A - At. Mol. Opt. Phys.*, vol. 93, no. 1, p. 12103, Jan. 2016.
- [5] I. V. Dyakonov, A.A. Kalinkin, M. Yu. Savygin, A.G. Abroskin, I.V. Radchenko, S.S. Straupe, S.P. Kulik, "Low-loss single-mode integrated waveguides in soda-lime glass," *Appl. Phys. B Lasers Opt.*, vol. 122, no. 9, p. 245, Sep. 2016.
- [6] I. Pogorelov, G. Struchalin, S. Straupe, I. Radchenko, K. Kravtsov, and S. Kulik, "Experimental adaptive process tomography," *Phys. Rev. A*, vol. 95, no. 1, p. 12302, Jan. 2016.
- [7] М. С. Н. Балыгин К.А., Климов А.Н., Корольков А.В., Кулик С.П., "О противодействии атаке с яркими состояниями в двухпроходной системе квантовой криптографии," *JETP Lett.*, vol. 103, no. 12, pp. 883–890, 2016.
- [8] К. С. Кравцов, С. П. Кулик, and И. В. Радченко, "Квантовый генератор случайных чисел," *Математические вопросы криптографии*, vol. 7, no. 2, pp. 111–114, 2016.
- [9] М. С. Н. Балыгин К.А., Климов А.Н., Кулик С.П., "Активная стабилизация оптической части в волоконной квантовой криптографии," *JETP Lett.*, vol. 103, no. 6, pp. 469–474, 2016.
- [10] A. V. Paterova, S. Lung, D. A. Kalashnikov, S. P. Kulik, and L. A. Krivitsky, "Infrared spectroscopy assisted by entangled photons," 2016, p. 100300X.
- [11] D. A. Kalashnikov, A. V. Paterova, S. P. Kulik, and L. A. Krivitsky, "Infrared spectroscopy with visible light," *Nat. Photonics*, vol. 10, no. 2, pp. 98–101, Jan. 2016.
- [12] K. S. Kravtsov, I. V. Radchenko, S. P. Kulik, and S. N. Molotkov, "Minimalist design of a robust real-time quantum random number generator," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 32, no. 8, p. 1743, Aug. 2015.