

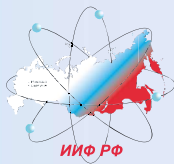
№ 3 +0
2019 [53]

научно-технический журнал
ИЗВЕСТИЯ
ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ



ARMY 2019

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ
НА МЕЖДУНАРОДНОМ ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКОМ
ФОРУМЕ "АРМИЯ-2019"



В НОМЕРЕ

**ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ И
ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И
СИСТЕМЫ**

- 2 Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В.**
Наблюдение универсальной системы утраивающихся периодов в экспериментах с генераторами периодических колебаний
- 8 Порядин А.Ю., Аксёнов В.Е., Пискулин Е.В.**
Алгоритм оптимизации режима измерений при проведении комплексной предстартовой калибровки акселерометров
- 12 Захаров В.Л., Ядренкин А.А.**
К вопросу решения задачи фильтрации помех в информационных оптико-электронных средствах
- 16 Захаров В.Л., Сергеев В.А.**
Методика определения плана проведения натуральных испытаний автономных систем управления
- 20 Коржук Н.Л., Кулешов В.В.**
Математическая модель преобразования аналоговой информации в цифровой код в измерительной системе
- 22 Гордеев Г.А., Попов В.В., Пономарёва А.С., Котов Д.Ю.**
Вычислительное моделирование испытаний изделий радиоэлектронной аппаратуры в вакуумной камере
- 28 Моисеев К.А.**
Методика поэтапной разработки математических моделей динамической взаимосвязанной оболочечно-балочной системы

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

- 33 Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Зеленевский А.В., Шмырин Е.В., Дурнов А.С.**
Методика оценки помехоустойчивости системы передачи с кодовым ортогональным уплотнением данных при воздействии гауссова шума и импульсных помех
- 38 Перунов Ю.М., Дмитриев В.Г., Куприянов А.И.**
Анализ методов и технических решений систем функционального поражения РЭС

**ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ**

- 43 Крехов Е.В., Крехов В.Е., Крехов И.В., Турбал Р.А.**
Обеспечение целостности унитарного кода компьютера с жёсткой логикой для удовлетворения требованиям унитарного преобразования над кубитами квантового компьютера
- 48 Сеницын С.В., Пискулин Е.В.**
Упрощенный алгоритм масштабирования акселерометра
- 52 Кукин Н.С.**
Построение систем идентификации на базе алгоритма оптимального извлечения информации из оптических физически неклонируемых функций

- 56 Кукин Н.С., Корчевая И.О.**
Выявление связей между точками по серии изображений
- 59 Емелин Н.М., Артамонов Ю.Н.**
Методология оценки качества проектов на основе содержательного анализа полученных результатов
- 66 Ананьев А.В., Гончаренко В.И., Рыбалко А.Г.**
Рациональное распределение огневого воздействия свободнопадающих неуправляемых контейнеров беспилотных летательных аппаратов на основе теории рисков
- 73 Волков Г.Г., Масликов А.А., Смурув С.В., Царьков А.Н.**
От геральдового запутывания к безусловной телепортации
- 82 Аляева Ю.В., Артамонов Ю.Н., Беспалов С.В., Карулин В.П.**
Информационно-аналитический инструментальный экспертный оценки критериев стимулирования инновационного развития в сфере образовательной, научной и научно-технической деятельности в субъектах Российской Федерации
- 89 Пантелеев А.В.**
Применение методов «роевого» интеллекта в задачах оптимального в среднем управления нелинейными динамическими системами
- 94 Майструк А.В., Ногин Р.О., Юлдашев А.Ю.**
Математическая модель оценки эффективности разведывательных и поисково-спасательных операций с применением летательных аппаратов
- 101 Никитин А.К., Хижняк Л.Н.**
Термографические гистограммы на основе опорных контуров в медицинских инфракрасных изображениях

**СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И
ФАРМАЦЕВТИКА**

- 104 Рачков Б.М., Курочка В.К.**
Портативная полевая повязка для наложения на рану на поле боя

**ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ**

- 108 Вахрова Л.Г.**
Подход к адаптивному управлению освоением грамматики иностранного языка студентами технического университета

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

- 111 Воронина Е.П.**
Эколого-социо-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации: драйверы экологизации

**НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ • НАУЧНЫЕ
РЕЦЕНЗИИ • ОТЗЫВЫ**

- 118 Емелин Н.М.**
Новый Перечень рецензируемых изданий вышел – что же дальше?

121 AUTHORS

123 ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

**124 ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ
СТАТЕЙ**

Научно-технический журнал

**ИЗВЕСТИЯ
Института инженерной физики
№3 (53) 2019**

Издается с апреля 2006 г. Выходит ежеквартально

ISSN 2073-8110

Включен в «Перечень ВАК»
по научным специальностям:

- 05.11.16. Информационно-измерительные и управляющие системы
05.12.13. Системы, сети и устройства телекоммуникаций
05.13.01. Системный анализ, управление и обработка информации
05.13.19. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность

Главный редактор,
председатель редакционного совета
и редакционной коллегии

Алексей Николаевич Царьков

Президент – Председатель Правления МОУ «ИИФ»,
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

Редакционный совет

Геннадий Иванович Азаров

главный научный сотрудник ФГУП «16 ЦНИИ МО РФ»
заслуженный деятель науки РФ, заслуженный
изобретатель РФ, лауреат Государственной
премии РФ, лауреат премии Правительства РФ,
доктор технических наук, профессор

Сергей Владимирович Дворянkin

начальник департамента Государственной
корпорации «РОСТЕХ» ОАО КРЭТ,
доктор технических наук, профессор

Николай Михайлович Емелин

главный научный сотрудник
ФГБНУ «Госметодцентр»,
заслуженный деятель науки и техники РФСР,
доктор технических наук, профессор

Валерий Иванович Николаев

научный референт ОАО «Концерн «Созвездие»,
лауреат Государственной премии СССР,
лауреат премии Правительства РФ,
доктор технических наук, профессор

Владимир Георгиевич Редько

заместитель руководителя
Центра оптико-нейронных технологий
НИИ системных исследований РАН,
доктор физико-математических наук

Юрий Александрович Романенко

старший научный сотрудник
филиала ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

Александр Викторович Синьговский

старший научный сотрудник
Европейского центра ядерных исследований (CERN),
Adjunct Assistant Professor
Университета Миннесоты (США),
кандидат физико-математических наук

Анатолий Васильевич Тодосийчук

главный советник аппарата Комитета ГД ФС РФ
по образованию и науке,
почетный работник науки и техники РФ,
доктор экономических наук, профессор

Александр Павлович Царёв

заведующий кафедрой компьютерных архитектур
и телекоммуникаций Западно-поморского
технологического университета (Польша),
доктор технических наук, профессор

Игорь Анатольевич Шеремет

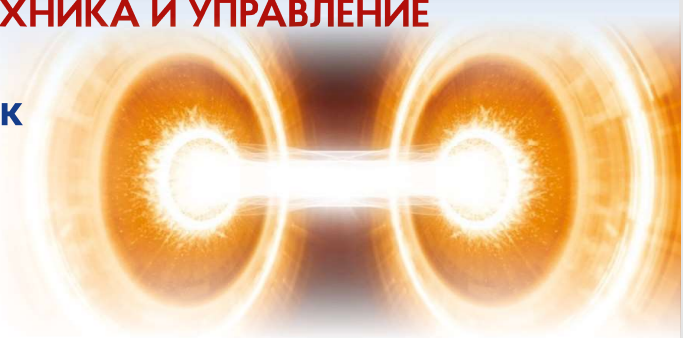
заместитель директора Российского фонда
фундаментальных исследований по науке,
член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 539.182

**ОТ ГЕРАЛЬДОВОГО ЗАПУТЫВАНИЯ К
БЕЗУСЛОВНОЙ ТЕЛЕПОРТАЦИИ**

**FROM HERALDED ENTANGLEMENT
TOWARDS THE NON-CONDITIONAL
TELEPORTATION**



Геннадий Германович Волков
*доктор физико-математических наук,
профессор*
старший научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: gennadii.volkov@rambler.ru

Сергей Владимирович Смуров
*почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, профессор*
Первый Вице-президент Института –
Главный конструктор
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: Svs_ief@mail.ru

Александр Альбертович Масликов
*кандидат физико-математических наук,
доцент*
заведующий комплексной лабораторией физики
Филиал «Протвино»
Государственного университета «Дубна»
Адрес: 142281, Московская обл.,
г. Протвино, Северный проезд, д. 9
Тел.: +7(4967)31-01-92
E-mail: masspref@yandex.ru

Алексей Николаевич Царьков
*заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук, профессор*
Президент Института –
Председатель Правления Института
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210 Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967) 35-31-93
E-mail: tsarkov@iifmail.ru

Аннотация

Мы продолжаем обсуждать механизмы запутывания спин-кубитов электронов и ядер в твердотельных NV-центрах с целью достижения дальней телепортации. Так как наблюдение и контроль спиновых уровней возбужденного состояния существенно связан с температурно-зависящей деформацией в алмазной решетке, то экспериментальные методы запутывания нескольких NV-центров при комнатной и криогенной температурах резко отличаются друг от друга. Так, если при комнатной температуре используется электрон-спин-спиновое взаимодействие двух NV-центров, которое требует очень малых расстояний между ними (20-30 нм), то при криогенной температуре, благодаря контролю и управлению двух триплетных уровней возбужденного состояния возможно было реализовывать геральдово запутывание спиновых кубитов с дальнейшей реализацией безусловной телепортации между значительно удаленными NV-центрами. Использование уже полученных успешных результатов и ряда разработок на этих обоих направлениях требует исследования новых протоколов запутывания и телепортации с целью создания ключевых блоков для твердотельной реализации квантово-оптических сетей

Ключевые слова: NV-центры в алмазе, запутывание, телепортация, спин-электронные и спин-ядерные кубиты, квантовые сети.

Summary

We continue to discuss the entanglement mechanisms of spin-qubits of electrons and nuclei in solid-state NV centers in order to achieve long-distance teleportation. Since the observation and control of the spin levels of the excited state is significantly related to the temperature-dependent deformation in the diamond lattice, the experimental methods of entangling several NV centers at room and cryogenic temperatures are very different from each other. So, if electron-spin-spin interaction of two NV centers is used at room temperature, which requires very small distances between them (20-30 nm), then at cryogenic temperature, due to the possibility of controlling and controlling two triplet levels of the excited state, it was possible to realize the heraldic entanglement of spin qubits with the further implementation of unconditional teleportation between significantly remote NV centers. The use of successful results already obtained and a number of developments in these two areas requires the study of new entanglement and teleportation protocols in order to create key blocks for the solid-state implementation of quantum-optical networks

Keywords: NV-centers in diamond, entanglement, teleportation, spin-electron and spin-nuclear qubits, quantum networks.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Одним из наиболее важных аспектов квантовой механики является запутанность квантовых состояний, явление, при котором несколько квантовых состояний не могут быть описаны независимо, а описываются только как целая система. Это приводит к неклассическим корреляциям между квантовыми состояниями. NV-центр был использован в одной из первых демонстраций спин-фотонного запутывания в твердом состоянии, в котором особый уровень возбужденного состояния соединяется с двумя спиновыми состояниями основного состояния через различные циркулярные поляризации света, в результате поляризация испускаемого фотона запутывается со спиновым состоянием. Аналогично, фотон, поглощаемый NV-центром посредством возбуждения на этот уровень возбужденного состояния, может также запутаться со спиновым состоянием NV-центра. Чтобы расширить такие протоколы запутывания и связать один NV-центр с другим, излучаемые фотоны из каждого должны быть неразличимы. Как твердотельная система, благодаря локальной электростатической среде, каждый NV-центр имеет несколько различных энергии орбитального перехода. Настройка оптических переходов двух отдельных NV-центров может быть достигнута с помощью эффекта Штарка при использовании внешних электрических полей. Благодаря способности настраивать отдельные NV-центры на вырождение, была осуществлена интерференция между испускаемыми фотонами нуль-фононной линии каждого NV-центра. Эти разработки заложили основу для демонстрации фотонного перепутывания двух NV-центров, разделенных на 3 метра [1,2].

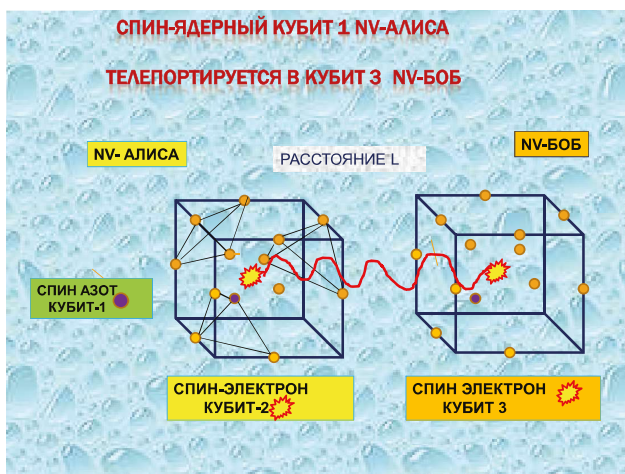


Рис. 1. Телепортирование ядерного спинового состояния NV-центра Алисы (1 кубит) на электронное спиновое состояние удаленного NV-центра Боба (кубит-3) на основе геральдового запутывания спин-электронного кубита-2 Алисы и спин-электронного кубита-3 Боба

В этой демонстрации спин-фотонная пара была создана для каждого NV-центра, и полученные фотоны затем перекрывались на светоделителе и измерялись совместно в базисе Белла. Успешная проекция этих временных бинов фотонов в состоянии Белла подготавливает запутывание NV-центров. Объединение способности распространять запутанность на большие расстояния с усилиями по разработке ядерных спиновых регистров, могло бы быть расширено на безусловное телепортирование ядерного спинового состояния одного NV-центра на электронное спиновое состояние другого удаленного NV-центра [1,2,3] (рисунки 1).

В последнее время стимулируются исследовательские усилия по созданию запутанных состояний отдаленных твердотельных кубитов. Первым кандидатом на твердотельный квантовый регистр является центр дефектов азота (NV) в алмазе. Центр NV объединяет долгоживущий электронный спин ($S=1$) с надежным оптическим интерфейсом, позволяющий измерять и контролировать на высоком уровне спиновой кубит. Кроме того, электронный спин NV можно использовать для доступа и манипулирования спинами путем формирования многоциклового регистра. Для использования таких регистров в квантовой сети требуется механизм для последовательного подключения удаленных NV-центров.

Структура возбужденных состояний NV-центра в алмазе

Благодаря насыщенной триплет-синглетной структуре возбужденного состояния NV-центра и присущей ему оптической адресуемости, NV-центр стал отличным испытанием для ряда



Рис. 2. Структура спин-электронных уровней и оптическое возбуждение NV-центра, представленное 5-ю оптическими переходами (два уровня вырождены) [3]

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

квантовых оптических протоколов, направленных на развитие фотонных сетей и квантовых ретрансляторов для квантовой обработки информации. Фотонный контроль NV-центра использует двух-триплетную структуру возбужденного состояния NV-центра, состоящую из шести спин-орбитальных уровней, имеющих при нулевых магнитных и электрических полях в рамках ряда модельных расчетов следующее распределение (рисунк 2).

Энергетические спектры 6-уровневой оптически возбужденных 2-х триплетных состояний ($S=1$: $m_s=0, \pm 1$) в обоих NV-центрах демонстрируют резкие спин-селективные переходы.

Основное состояние – триплет состояния 3A_2 – может быть оптически возбуждено или резонансно в 3E или не резонансно в более высокие лежащие уровни в боковой полосе фононов (ФБП). Основное состояние нулевым полем, расщепляется на одно $m_s=0$ и на два вырожденных $m_s=\pm 1$ состояния. Спин-спиновые и спин-орбитальные взаимодействия разделяют возбужденное состояние на шесть уровней. Метки обозначают состояния в соответствии с представлениями группы C_{3v} симметрии NV-центра (рис.2). Стрелками обозначены разрешенные оптические переходы. Расщепление возбужденного состояния связано с деформацией (или эквивалентно электрическими полями), перпендикулярной оси симметрии N-V. С увеличением деформации спиновые состояния все более расходятся и начинают перемешиваться. Магнитные поля вдоль оси N-V в соответствии с эффектом Зеемана расщепляют уровни $m_s=+1$ и $m_s=-1$.

Понимание и управление свойствами возбужденного состояния является центральной основой для достижения связного интерфейса между спин-электронными состояниями и оптически фотонами. Одним из важнейшим отличием от изолированных атомов и ионов, квантовые уровни твердотельной системы (NV-центр и др.) имеют более сложную структуру уровней возбужденного состояния, свойства которой в значительной степени зависят от окружающей среды. Неаксиальная кристаллическая деформация должна обязательно учитываться для практической реализации, так как влияет на правила отбора оптических переходов и поляризационные свойства. При отсутствии внешних напряжений и электрических или магнитных полей свойства шести электронных возбужденных состояний определяются симметрией NV-центра C_{3v} и спин-орбитальными и спин-спиновыми взаимодействиями. Оптические переходы между основными и возбужденными состояниями со-

храняют спин, но могут изменять электронный орбитальный угловой момент в зависимости от поляризации фотона.

Удаленная запутанность через фотонный канал

Оптический интерфейс NV-центра позволяет достичь запутывание между удаленными друг от друга регистрами. На базе измерений Белл состояний комбинированное обнаружение фотонов, испускаемых обоими центрами, проецирует спины в запутанное состояние [1,2,3,4]. Этот тип протоколов для центров NV-центров довольно устойчив к потере фотонов.

Общая схема генерации запутанности приведена на рисунке 3. Во-первых, оба центра заставляют испускать фотон, который запутан с электронным спином. Общее спин-фотонное состояние тогда имеет вид

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_e |\alpha\rangle_\gamma + |1\rangle_e |\beta\rangle_\gamma)$$

где $|0\rangle_e$, $|1\rangle_e$ являются двумя спин-электронными состояниями, а $|\alpha\rangle_\gamma$, $|\beta\rangle_\gamma$ – два ортогональных состояния фотонов – могут быть выбраны как поляризации, частоты, временные бины, числа состояний.

Для создания запутывания оба фотона должны перекрываться в сплиттере. Такие спин-фотонные запутывания уже были осуществлены в оптических переходах NV-центров при низких температурах. В сплиттере входящие фотоны $|\gamma\rangle_a$, $|\gamma\rangle_b$ преобразуются на выходе как:

$$\begin{aligned} |\gamma\rangle_a &\rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|\gamma\rangle_1 + |\gamma\rangle_2), \\ |\gamma\rangle_b &\rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|\gamma\rangle_1 - |\gamma\rangle_2) \end{aligned}$$

где 1, 2 – обозначают две выходные моды.

Полное состояние двух фотонов и двух спинов выражается в виде прямого произведения состояний, отвечающих каждому удаленному друг от друга NV-центру

$$|\psi\rangle_a \otimes |\psi\rangle_b = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_a |\xi\rangle_a + |1\rangle_a |\zeta\rangle_a) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_b |\tilde{\xi}\rangle_b + |1\rangle_b |\tilde{\zeta}\rangle_b) = \frac{1}{4}(|0\rangle_a (|\xi\rangle_1 + |\xi\rangle_2) + |1\rangle_a (|\zeta\rangle_1 + |\zeta\rangle_2)) \otimes (|0\rangle_b (|\tilde{\xi}\rangle_1 - |\tilde{\xi}\rangle_2) + |1\rangle_b (|\tilde{\zeta}\rangle_1 - |\tilde{\zeta}\rangle_2))$$

Для неотличимых фотонов

$$|\xi\rangle_{1,2} = \tilde{\xi}|_{1,2}, |\zeta\rangle_{1,2} = \tilde{\zeta}|_{1,2}$$

можно получить двух-фотонную квантовую интерференцию, являющуюся наиважнейшей для протокола.

$$|\psi\rangle_a \otimes |\psi\rangle_b = \frac{1}{4}(|00\rangle (|2\xi\rangle_1 - |2\xi\rangle_2) + |11\rangle (|2\zeta\rangle_1 - |2\zeta\rangle_2) + (|01\rangle + |10\rangle) (|\xi\zeta\rangle_1 - |\xi\zeta\rangle_2) + (|01\rangle - |10\rangle) (|\xi\zeta\rangle_1 |\zeta\rangle_2 - |\zeta\rangle_1 |\xi\zeta\rangle_2))$$

Обнаружение определенного фотонного состояния проецирует два излучателя в соответствующее спиновое состояние [1,2,3]. Если, $|\xi\rangle$ и $|\zeta\rangle$ две ортогональные поляризации фотона,

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

то обнаружение одного фотона в каждом выходном порту светоделителя проецирует два спина в запутанное состояние Белла

$$|\psi^-\rangle = (1/2)^{1/2}(|01\rangle - |10\rangle).$$

На эксперименте в протоколе измерения для создания запутывания было предложено рассматривать состояния по числу фотонов $|\xi\rangle = |1\rangle_{1, \text{фотон}}$, $|\zeta\rangle = |0\rangle_{0, \text{фотон}}$.

Хотя в используемых детекторах нельзя явно различить состояния $|2\xi\rangle_1 = |2\rangle_{1, \text{фотон}}$ и $|\xi\rangle_1 |\zeta\rangle_2 = |1\rangle_{1, \text{фотон}} |0\rangle_{2, \text{фотон}}$, это можно осуществить в протоколе, состоящем из двух раундов протоколов со спин флипом в сплитере. Обнаружение ровно одного фотона в каждом раунде затем проецирует два спина в запутанном состоянии.

В эксперименте [1] используются два NV-кубита, расположенные в независимых низкотемпературных установках, разделенных 3 м. Базисные состояния кубита $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$ соответственно выбираются на подуровнях NV: $m_s = 0$ и $m_s = -1$. Каждый кубит может независимо считываться путем обнаружения зависящей от спина флуоресценции в фоновой боковой полосе NV. Кубиты индивидуально контролируются микроволновыми импульсами, применяемыми к стрипам на кристалле. Используя динамические методы развязки, для квантовых состояний, закодированных в кубитах, можно достичь значительного времени когерентности, например, превышающее 10 мс. Оба центра NV A и NV B сначала готовятся в суперпозиции

$$(1/2)^{1/2}(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)_{A,B}.$$

Лазерное возбуждение в каждом центре A и

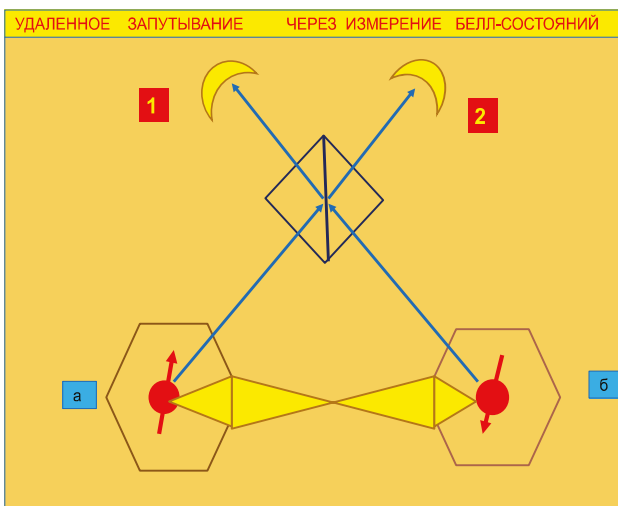


Рис. 3. Измерение на основе создания удаленного запутывания. Каждый спин готовится в состоянии, которое запутано с испущенным фотоном. Два фотона перекрываются на светоделителе. Обнаружение определенных фотонных состояний проецирует спины в запутанное состояние

В запутывает спин-электрон кубит с числом фотонов 1 или 0:

$$(1/2)^{1/2}(|\uparrow 1\rangle + |\downarrow 0\rangle)_{A,B}.$$

Если эмиссионные фотоны из центров A и B – неразличимы, то наблюдение = измерение одного фотона будет выделять как состояние

$$(1/2)^{1/2}(|1_A 0_B\rangle \pm \exp(-i\phi) |1_A 0_B\rangle)$$

так и будет проектировать спин-электронный кубит на максимально запутанное состояние

$$(1/2)^{1/2}(|\uparrow_A \downarrow_B\rangle \pm \exp(-i\phi) |\downarrow_A \uparrow_B\rangle) [1,2].$$

Обнаружение фотона в обоих раундах, таким образом, предвещает возникновение запутанного состояния. Любой реалистичный эксперимент, однако, страдает от потери фотонов и несовершенной эффективности детектора. В результате, обнаружение одного фотона может также согласоваться с созданием состояния $|\uparrow\uparrow\rangle$. Чтобы устранить эту возможность, оба кубита переворачиваются и оптически возбуждаются во второй раз. Поскольку $|\uparrow\uparrow\rangle$ флиппируют в $|\downarrow\downarrow\rangle$, во втором раунде для этого состояния фотоны не излучаются. Напротив, состояния $|\psi\rangle$ снова дают один фотон. Таким образом, обнаружение фотона в обоих раундах предвещает возникновение запутанного состояния. Второй раунд не только делает протокол устойчивым к потере фотонов, но также изменяет ϕ на глобальную фазу, что делает протокол нечувствительным к разности оптических путей. Кроме того, переворачивание кубитов обеспечивает механизм перефокусировки, который противодействует дефазировке спинов во время генерации запутывания. Конечным состоянием является одно из двух состояний Белла

$$|\psi^\pm\rangle = (1/2)^{1/2}(|\uparrow_A \downarrow_B\rangle \pm |\downarrow_A \uparrow_B\rangle)$$

со знаком в зависимости от того, сработали ли те же самые детекторы (+) или разные детекторы (-) в двух раундах. Ключевой задачей для воссоздания запутывания с твердотельными кубитами является получение большого потока неразличимых фотонов, отчасти потому, что локальная деформация в решетке носителя может вызывать большие изменения частоты фотонов.

NV-центр был использован в одной из первых демонстраций спин-фотонного запутывания в твердом состоянии, в котором особый подуровень возбужденного состояния (например, уровни $|A_1\rangle, |A_2\rangle$) соединяется с двумя состояниями основного состояния спина через различные круговые поляризации света, в результате поляризация испускаемого фотона запутывается со спиновым состоянием [4]. Аналогично, фотон, поглощаемый NV-центром посредством возбуждения к этому состоянию, может также запутаться со спиновым состоянием.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Запутанное состояние между одним фотоном и электронным спином NV-центра:

$$|\psi\rangle = (1/2)^{1/2} (|\sigma_+\rangle | +1\rangle + |\sigma_-\rangle | -1\rangle)$$

где $|\sigma_+\rangle$ и $|\sigma_-\rangle$ – циркулярно-поляризованные ортогональные фотонные состояния. NV-центр подготавливается в определенном возбужденном состоянии ($|A_2\rangle$ на рисунке 4), которое распадается с равной вероятностью на два разных долгоживущих спиновых состояния $|\pm 1\rangle$ с излучением ортогонально поляризованных оптических фотонов при 637 нм.

Переходы между основным и возбужденным состояниями происходят под излучением или поглощением линейно поляризованной (x , y) или циркулярно поляризованного (σ_+ , σ_-) фотона.

Запутанное состояние, создается, так как поляризация фотона однозначно связана с конечным состоянием спина.

Эта запутанность подтверждается измерением спинового состояния с использованием циклического оптического перехода после обнаружения фотона с длиной волны 637 нм выбранной поляризации.

Оптические переходы между основными и возбужденными состояниями сохраняют спин, но могут изменять электронный орбитальный угловой момент в зависимости от поляризации фотона [4]. Возбужденные состояния, обозначенные $|E_x\rangle$ и $|E_y\rangle$, в соответствии с их орбитальной симметрией, соответствуют проекции спина $m_s=0$. Взаимодействуя с основным состоянием $|0\rangle$, они обеспечивают хорошие циклические переходы, и подходят для считывания популяции состояний $|0\rangle$ через детектирование флуоресценции. Другие четыре возбужденных состояния являются запутанными состояниями спина и орбитального момента импульса. В частности, состояние $|A_2\rangle$ имеет вид

$$|A_2\rangle = (1/2)^{1/2} (|E_-\rangle | +1\rangle + |E_+\rangle | -1\rangle)$$

где $|E_{\pm}\rangle$ – орбитальные состояния с проекцией углового момента ± 1 вдоль оси NV.

В то же время основные состояния ($|0\rangle$, $|\pm 1\rangle$) связаны с орбитальным состоянием $|E_0\rangle$ с нулевой проекцией углового момента (для

	A_1	A_2	E_1	E_2	E_x	E_y
${}^3A_2(m_s = -1)$	σ_+	σ_+	σ_-	σ_-		
${}^3A_2(m_s = 0)$					y	x
${}^3A_2(m_s = +1)$	σ_-	σ_-	σ_+	σ_+		

Рис. 4. Правила оптического отбора

простоты пространственная часть волновой функции не выписана явно). Следовательно, вследствие полного сохранения момента импульса, состояние $|A_2\rangle$ распадается с равной вероятностью в основное состояние $| -1\rangle$ через σ_+ -поляризованное излучение и $| +1\rangle$ через σ_- -поляризованное излучение.

Неизбежное присутствие небольшого поля напряжений, характеризующегося деформационным расщеплением (Δ_S) $|E_{x,y}\rangle$, уменьшает симметрию NV-центра и сдвигает энергии уровней возбужденного состояния в соответствии с их орбитальными волновыми функциями. Для умеренной и высокой деформации возбужденные состояния разделены на две ветви и происходит смешивание между уровнями. В верхней ветви, энергетическая щель защищает $|A_2\rangle$ от малых деформаций и магнитных полей, сохраняя поляризационные свойства его оптического перехода. Чтобы убедиться, что $|E_y\rangle$ является хорошим циклическим переходом, а $|A_2\rangle$ действует как переход генерации запутанности, как требуется для текущего исследования, необходимо выбирать NV-центр с относительно небольшим расщеплением деформации ($\Delta_S \approx 2 \times 1.28 \text{ ГГц}$).

Для создания запутанного состояния, используется когерентное излучение в пределах узкополосной нулевой фононной линии (НФЛ), которая включает только 4% от общего объема излучения NV-центра. Оставшееся оптическое излучение происходит в сдвинутом по частоте фоне боковой полосы (ФБП), которое сопровождается излучением фононов, что приводит к ухудшению спин-фотонной запутанности.

Изолирующее слабое излучение НФЛ представляет значительную экспериментальную проблему из-за сильных отражений резонансного импульса возбуждения, достигающего детектор.

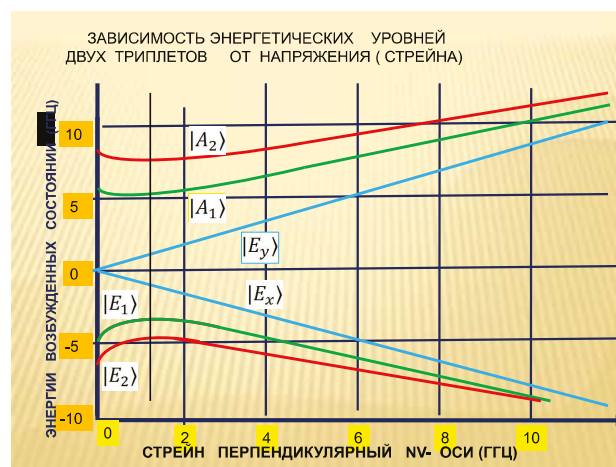


Рис. 5. Представлен энергетический спектр 6-уровней (два триплета $S=1$) возбужденного состояния в зависимости от напряжения-стрейна

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Возбуждая центр NV с круговой поляризацией 2-нс-импульс, который короче шкалы времени излучения, можно использовать время обнаружения для отделения отражения от фотонов флуоресценции. Сочетание конфокального отклонения, модуляторов и конечной пропускной способности оптики подавляет отражения достаточно, чтобы четко обнаружить излучение НФЛ NV-центра за время ≈ 20 нсек.

Для определения состояния фотонов, НФЛ фотоны в базисе $|\sigma_{\pm}\rangle$ или

$$|H\rangle = (1/2)^{1/2} (|\sigma_+\rangle + |\sigma_-\rangle),$$

$$|V\rangle = (1/2)^{1/2} (|\sigma_+\rangle - |\sigma_-\rangle)$$

выбираются на стадии поляризационного анализа и обнаружения после подобранного оптического пути.

Возбужденные уровни могут быть сдвинуты, применяя напряжение, а также применяя электрические поля в центр NV (рисунк 5). Электрические поля вдоль оси N-V не влияют на расстояние между уровнями, но влияют на весь спектр. Электрические поля перпендикулярно этой оси нарушают C_{3v} симметрию и изменяют раздвижки между уровнями (рисунк 5). Это также влияет на компоненты спиновых уровней, которые все больше смешиваются с более высоким напряжением.

При температуре жидкого гелия оптические переходы центра NV сужаются близко к их ограниченному по времени значениям в несколько МГц.

Оптически разрешенные переходы и структуру возбужденного уровня можно определять с помощью резонансного оптического возбуждения в нулевой фоновой линии комбинируя с управлением спином в основном состоянии с помощью микроволн. В эксперименте при низкой температуре длина волны возбуждающего лазера «подметается» при мониторинге флуоресценции излучения фоновой боковой полосы, разделенной спектрально от резонансного излучения и лазерного отражения дихроичным фильтром. Кроме того, необходимо постоянно управлять

$$m_s = 0 \leftrightarrow m_s = \pm 1$$

спиновыми переходами в основном состоянии, чтобы заселять все спиновые состояния и, тем самым, позволяют обнаружение переходов, связанных с любым спиновым состоянием [1,2].

Характеристика состояний возбужденного состояния NV-центров

Нулевая фоновая линия центра NV составляет 637 нм. Сканирование лазера по этой длине волны при сборе флуоресценции фоновой боковой полосы, показывает различные оптиче-

ские переходы в структуре спинового состояния NV-центра.

Этот спектр зависит от деформации и отличается для разных центров NV. Каждый пик в спектре помечен переходом, который он представляет. Для доступа к переходам, которые соединяются с $m_s = \pm 1$, а также значениям, которые соединяются с $m_s = 0$, применяется непрерывное MW-возбуждение, резонансное переходу между этими основными состояниями. Представляющие интерес оптические переходы $m_s = 0 \rightarrow E_y$ и $m_s = \pm 1 \rightarrow A_2$ NV-центра в проводимых экспериментах находятся под непрерывным микроволновым излучением [1,2,3] (рисунк 6).

Безусловная квантовая телепортация

Реализация надежной передачи квантовой информации между долгоживущими регистрами кубитов является ключевой задачей для квантовой информатики и техники. Демонстрация безусловной телепортации произвольных квантовых состояний между спиновыми кубитами алмаза, разделенными на 3 метра, была осуществлена через опосредованное фотонами геральдового запутывания между двумя удаленными электронными спинами и кодировке исходного кубита в одном ядерном спине азота [2].

Осуществляя полностью детерминистическое измерение состояния Белла в сочетании с прямой связью в реальном времени, телепортация была достигнута. При каждой попытке, получалась средняя величина, превышающая классический предел.

В протоколе телепортации (рисунк 7) Алиса изначально имеет для телепортации кубит 1, который чаще всего задается как

$$|\psi\rangle_1 = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

У Алисы и Боба есть по одному кубиту, запутанная пара (кубиты 2 и 3) в объединенном состоянии

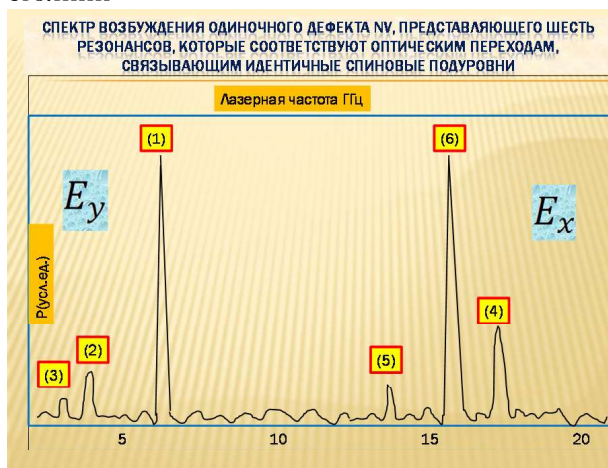


Рис. 6. Спектр возбужденного состояния для NV-центра

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$$|\psi^-\rangle_{23} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle_{23} - |10\rangle_{23})$$

Комбинированное состояние всех трех кубитов может быть переписано как

$$|\psi\rangle_{12} |\psi^-\rangle_{23} = \frac{1}{2} \left(|\phi^+\rangle_{12} (\alpha|1\rangle_3 - \beta|0\rangle_3) + |\phi^-\rangle_{12} (\alpha|1\rangle_3 + \beta|0\rangle_3) \right) + \frac{1}{2} \left(|\psi^+\rangle_{12} (-\alpha|0\rangle_3 + \beta|1\rangle_3) - |\psi^-\rangle_{12} (\alpha|0\rangle_3 + \beta|1\rangle_3) \right)$$

где $|\phi^\pm\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle_{12} \pm |11\rangle_{12})$, $|\psi^\pm\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle_{12} \pm |10\rangle_{12})$ –

четыре состояния Белла. Для телепортации квантового состояния Алиса проводит совместное измерение своих кубитов (кубиты 1 и 2) в базисе Белла, проецируя кубит Боба в состояние, равное $|\psi\rangle$ с точностью до унитарной операции, которая зависит от результатов измерения Алисы. Алиса отправляет результаты по классическому каналу связи Бобу, который затем может восстановить исходное состояние, применяя соответствующее локальное преобразование. Поскольку состояние исходного кубита на стороне Алисы навсегда исчезает, то, если протокол не работает, оно безвозвратно теряется всякий раз. Поэтому, чтобы гарантировать, что каждое состояние кубита, используемое для телепортации, безоговорочно появляется на стороне Боба, Алиса должна уметь различать все четыре состояния Белла в одном кадре измерения, и Боб должен сохранить последовательность передаваемого кубита во время получения результата и окончательного условного унитарного его преобразования.

Демонстрация безусловной телепортации между алмазными спиновыми кубитами, находящимися в независимых установках, разделенных на 3 метра, была проведена в [2]. Этот результат был достигнут путем генерации полного разделенного дистанционного запутывания,

благодаря измерениям Белл-состояний с двумя кубитами, и прямой связи между Алисой и Бобом.

В частности, фотонный канал используется для генерации скрытого геральдового запутывания между спин-электронными состояниями двух азотно-вакансионных NV-центров, тогда как протокол телепортации исключительно эксплуатирует кубиты материи, которые, в отличие от фотонных кубитов – позволяют проводить детерминированные измерения состояний Белла с использованием современных технологий. Состояние источника закодировано в ядерном спине, ближайшем к электронным спинам одного из NV-центров. Этот протокол гарантирует, что исходное состояние успешно телепортируется в каждом из экспериментальных прогонов [2,3].

Безусловная телепортация произвольных квантовых состояний между алмазными спиновыми кубитами, разделенных на 3 метра [2] (рис. 7). Телепортер готовится через фотон-опосредованное запутывание между двумя удаленными спинами электронов и последующее кодирование источника кубита в виде одного ядерного спина. Осуществляя полностью детерминированное измерение состояния Белла в сочетании с прямой связью в реальном времени, квантовая телепортация достигается на каждой попытке со средней верностью-точностью фиделитете состояний, превышающей классический предел. Алиса и Боб используют независимую установку низкотемпературного конфокального микроскопа, которая адресована одному NV-центру. Два электронных спина NV (помеченные как кубиты 2 и 3) используются в качестве распределенной запутанной пары, которая является средой для телепортации. Эти спины могут быть инициализированы и считаны в одном кадре спин-разрешающим оптическим воз-

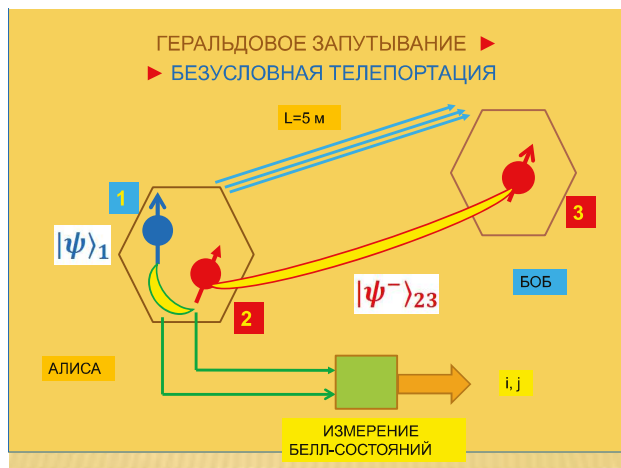


Рис. 7. Схема телепортации. Измерение состояния Белла. Результат связи. Операция прямой связи

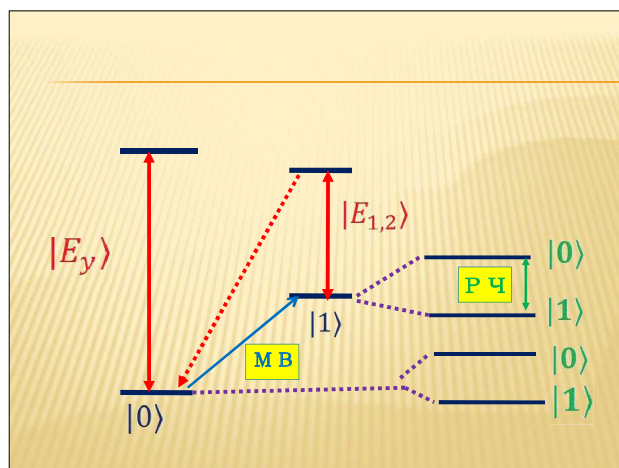


Рис. 8. Схема уровня энергии и методы управления кубитом

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

буждением и когерентно проманипулированы с помощью микроволновых (МВ) импульсов.

В эксперименте Алиса и Боб управляет своим одним NV-центром в монокристаллическом CVD-выращенном алмазе, используя независимый криогенный конфокальный микроскоп ($T=8\text{K}$ для Алисы и $T=4\text{K}$ для Боба) (рисунк 7).

Состояние источника закодировано в спине азота- ^{14}N у Алисы (зеленый) с базовыми состояниями $|0\rangle = m_1 = 0$, $|1\rangle = m_1 = -1$. Два удаленных NV электронных спина (фиолетового цвета) с базовыми состояниями, закодированными как $|0\rangle = m_s = 0$, $|1\rangle = m_s = -1$, образуют удаленную запутанную пару, совместно используемую Алисой и Бобом. Спин электрона инициализируется оптической спиновой накачкой на $E_{1,2}$ NV-центров, 2-перехода (ярко-красные стрелки), и считывается с помощью спин-селективного оптического возбуждения через переход E_y (темно-красная стрелка) (рисунк 8). Микроволновые (МВ) импульсы позволяют манипулировать спином электронов, а радиочастотные (РЧ) импульсы используются для манипулирования спином ядра, когда электрон находится в состоянии $|1\rangle$. Сканирующее электронное микроскопическое изображение алмазного устройства с твердотельной иммерсионной линзой для повышения эффективности сбора, полосковая линия для спиновых манипуляций с помощью магнитного резонанса и электроды для приведения оптических переходов Алисы и Боба в резонанс с использованием Д.С. Старк-эффект.

В заключение отметим, что геральдово запутывание использует надежный протокол, основанный на создании зацепления спин-фотонов в каждом раунде и последующем совместном измерении фотонов. Обнаружение фотонов предвещает проекцию спиновых кубитов на запутан-

ное состояние. Достигнутый прогресс на пути создания дальней связи, объединенной с операциями инициализации, считывания и запутывания на локальных долгоживущих ядерных спиновых регистрах, прокладывает путь для детерминированной дальней телепортации, квантовых повторителей и расширенных квантовых сетей [1-5]. Квантовая сеть может быть построена путем использования сцепления для соединения локальных вычислительных узлов, каждая из которых содержит регистр хорошо управляемых и долгоживущих кубитов. Твердые тела являются привлекательной платформой для таких регистров, так как использование нанопроцессорки и дизайна материалов может обеспечить хорошо контролируемые и масштабируемые квантовые системы. Анализируя уже достигнутые результаты и дальнейшие исследования использования NV-центров для создания дальней квантовой сети надо выделить два направления, связанные с двумя различными температурными режимами (криогенные и комнатные температуры), в которых квантовые механизмы в соответствии с наблюдаемыми спектрами спиновых уровней (рисунк 9) запутывания пары спиновых кубитов различны, (сравни [1-5] и [6]), соответственно, уже известные и новые протоколы квантовой телепортации будут также значительно отличаться друг от друга [7,8].

Литература

1. Bernien H., Hensen B., Pfaffl W., Koolstra G., Blok M.S., Robledo L., Taminiu T.H., Markham M., Twitchen D.J., Childress L., Hanson R. Heralded entanglement between solid-state qubits separated by three metres // Nature, 2013. Vol. 497. Pp.86-90.
2. Pfaff W., Hensen B., Bernien H., Dam S.B. van, Blok M.S., Taminiu T.H., Tiggelman M.J., Schouten R.N., Markham M., Twitchen D.J., Hanson R. Unconditional quantum teleportation between distant solid-state quantum bits // Science, 2014. Vol. 345. Issue 6196. Pp.532-535.
3. Hensen B. et al. Experimental loophole-free violation of a Bell inequality using entangled electron spins separated by 1.3 km // Quantum Physics, 2015.
4. Togan E., Chu Y., Trifonov A.S., Jiang L., Maze J., Childress L., Dutt M.V.G., Sorensen A.S., Hemmer P.R., Zibrov A.S., Lukin M.D. Quantum entanglement between an optical photon and a solid-state spin qubit // Nature, 2010. Vol. 466. Pp.730-734.
5. Tchegotareva A., Hermans S.L.N., Humphreys P.C., Voigt D., Harmsma P.J., Cheng Lun K., Verlaan Ad.L., Dijkhuizen N., Jong Wim de, Dreau A., Hanson R. Entanglement between a diamond



Рис. 9. Наблюдаемые спиновые уровни возбужденного состояния и оптические переходы при комнатной и криогенной температурах

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

spin qubit and a photonic time-bin qubit at telecom wavelength // Quantum Physics, 2019.

6. Dolde F., Jakobi I., Naydenov B., Zhao N., Pezzagna S., Trautmann C., Meijer J., Neumann P., Jelezko F., Wrachtrup J. Room-temperature entanglement between single defect spins in diamond // Nature Phys, 2013. Vol.9. Pp.139-143.

7. Смуров С.В., Масликов А.А., Волков Г.Г. Идеи

и методы генерации запутывания твердотельных спин-кубитов // Известия Института инженерной физики, 2019. №1(51), С.58-67.

8. Волков Г.Г., Масликов А.А., Смуров С.В., Царьков А.Н. О многокубитных схемах запутывания и телепортации на основе NV-центров в алмазе // Известия Института инженерной физики, 2019. №2(52), С.103-105.

