

№ 1 +0
2019 [51]

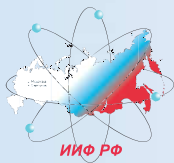
ИЗВЕСТИЯ

научно-технический журнал

ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ



8 февраля
День российской науки



В НОМЕРЕ

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

**2 Бутранов А.С., Ерёмин Б.Г.,
Мартынов С.В., Никитенко В.В.**

Регрессионная зависимость поддержания комфортного физиологического состояния военнослужащего, одетого во всепогодный комплект полевого обмундирования с активной системой электрообогрева в условиях низких температур

**7 Мартынов С.В., Ерёмин Б.Г.,
Назаров А.В., Бутранов А.С.**

Экспериментальная оценка теплозащитных функций средств индивидуальной защиты военнослужащего от холода с применением теплового манекена

13 Смирнов В.А., Шуваева О.В.

Прибор для измерения мощности ультрафиолетового излучения

16 Турбал Р.А., Глазов Д.Н.

Использование производных от пеленга на излучатель электромагнитных волн для определения временной задержки между земной и ионосферными волнами

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

**18 Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В.,
Зеленевский А.В., Шмырин Е.В.,
Ржаных А.В.**

Оценка качества передачи данных в декаметровых радиоканалах с ионосферной волной

**22 Шиманов С.Н., Франков С.В.,
Дёмочкин Е.А., Рыженков В.А.**

Вероятностная маршрутизация в Mesh-сетях с быстроменяющейся топологией

**27 Шиманов С.Н., Прасолов В.А.,
Бобрус С.Ю., Егоров В.В., Рыженков В.А.**

Модификация протокола доведения сообщений HDL в части приема квитанций по обратному каналу

**32 Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В.,
Зеленевский А.В., Дурнов А.С.,
Наконечный Б.М.**

Математическая модель радиоканала передачи данных ОНЧ-НЧ диапазона

**ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ**

39 Емелин Н.М.

Марковские и полумарковские модели сложных систем: преимущества и недостатки

42 Евсиков А.А., Леонов А.П.

Об использовании системы моделирования VisSim для исследования электропривода, работающего при скалярном управлении в повторно-кратковременном номинальном режиме с частыми пусками и электрическим торможением

**49 Боровиков А.Ю., Новиков К.Б.,
Маслов О.А.**

Описание подхода программной реализации модуля доверенной загрузки операционной системы

**55 Коломбет В.А., Лесных В.Н.,
Елистратов А.В.**

О возможной природе осцилляций, приводящих к универсальной системе утраивающихся периодов

58 Смуров С.В., Масликов А.А., Волков Г.Г.

Идеи и методы генерации запутывания твердотельных спин-кубитов. Квантовая запутанность двух систем

**65 Бугаков И.А., Сорокин А.Д.,
Хомяков А.В.**

Показатели эффективности применения группы беспилотных летательных аппаратов при решении задачи воздушной разведки в условиях противодействия противника

**69 Бугаков А.И., Бугаков И.А.,
Лысенко А.В., Шаров Ю.К.**

О комплексировании видеонаблюдения с датчиками физических величин в системах автоматического распознавания нарушителя на охраняемой территории критически важных объектов

**74 Смирнов Д.В., Коротин А.М.,
Воронов Я.Р.**

Определение в рамках методики построения систем контроля целостности ответственной информации в системах АЛС на базе широкополосного радиоканала механизмов защиты от угроз безопасности

86 Андрух О.Н., Дранников С.Г.

Анализ современных подходов к мониторингу удовлетворенности потребителей качеством образовательной деятельности вуза

**СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И
ФАРМАЦЕВТИКА**

**92 Грачёв В.А., Краснова Ю.В.,
Панов П.Б., Умников Е.В., Казакова Е.Ю.**

Направления модернизации комплектов медицинского имущества для кораблей и судов Военно-морского флота Российской Федерации

**ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ**

**95 Баранчук Н.А., Обычный И.А.,
Шугалей Д.В.**

Педагогические управленческие компетенции как составляющая профессиональной компетентности преподавателя военного вуза

**ТЕХНИЧЕСКОЕ
РЕГУЛИРОВАНИЕ**

99 Смурова А.С.

Анализ причин и предпосылок существования проблем при распределении прав на результаты интеллектуальной деятельности между государственным заказчиком и исполнителем в договорах на НИОКР

**НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ. НАУЧНЫЕ
РЕЦЕНЗИИ. ОТЗЫВЫ**

102 Емелин Н.М.

Качественный прорыв в формировании Перечня рецензируемых изданий

104 СОБЫТИЯ

105 AUTHORS

107 ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

**108 ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ
СТАТЕЙ**

Научно-технический журнал

**ИЗВЕСТИЯ
Института инженерной физики
№1 (51) 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 ЦНИИИ 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 РСФСР,
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 опико-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

ИДЕИ И МЕТОДЫ ГЕНЕРАЦИИ ЗАПУТЫВАНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СПИН- КУБИТОВ. КВАНТОВАЯ ЗАПУТАННОСТЬ ДВУХ СИСТЕМ

ON THE IDEAS AND METHODS OF THE SOLID SPIN-STATE QUBIT ENTANGLEMENT. THE QUANTUM ENTANGLEMENT BETWEEN TWO SYSTEM

Сергей Владимирович Смуров
*почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, профессор
Первый заместитель Генерального
директора по научной работе –
главный конструктор МОУ «ИИФ»
142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: svsv@mail.ru*

Александр Альбертович Масликов
*кандидат физико-математических наук, доцент
старший научный сотрудник
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*

Геннадий Германович Волков
*доктор физико-математических наук, профессор
ведущий научный сотрудник
ФГБУ Петербургский институт ядерной
физики им. Б.П. Константинова
188300, Ленинградская обл.,
г. Гатчина, Орлова роща, д. 1
Тел.: +7(813)714-60-25
E-mail: gennadii.volkov@rambler.ru*

Аннотация

Нас будут интересовать два направления запутывания спин-электронных состояний, спин-электрон-фотонных, спин электрон-ядерных состояний в системе двух твердотельных кубитов, соответственно разделенных как (а) на малые, так и (б) на достаточно длинные расстояния. Хорошо известно, что эти направления соответствуют двум наиважнейшим практическим целям в квантовой информации – разработке квантовых компьютеров и осуществлению квантовой телепортации на большие расстояния. В последние несколько лет в этих направлениях уже получены первые пионерские результаты по запутыванию спин-электронных состояний двух NV-центров, в одном эксперименте, находящихся на расстоянии 25 нм при комнатной температуре (а), а в другом – удаленных один от другого на три метра в условиях низкой криогенной температуры (б). Несмотря на различие идей и методов этих экспериментов времена жизни запутанных состояний в первом эксперименте ($T^*2 = 20-30$ мкс) и скорость захвата во втором (~ 20 кГц) оказываются небольшими, значительное увеличение которых (10-1000 мс) можно было бы достигнуть, передавая запутывание ядерным спин-кубитам вблизи каждого центра NV. Современные нанотехнологические достижения в интегрированной оптике и электронике совместно с использованием электронов и фотонов в качестве квантовых связей и ядерных спинов для квантовой обработки и памяти открывает путь к реализации твердотельных квантовых сетей, который, с целью получения более сильных эффектов запутанности спиновых состояний двух и более твердотельных кубитов на удаленных расстояниях, должен включать дальнейший прогресс самих идей и методов динамики квантового запутывания составных спин-электронных и спин-ядерных состояний в рамках аппарата матриц плотности.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Ключевые слова: составные квантовые системы, квантовая запутанность, NV-центры в алмазе, спин-электрон кубиты, матрица плотности.

Summary

We will be interested in two directions of entanglement of spin-electron states, spin-electron-photon states, spin-electron-nuclear states in a system of two solid-state qubits, respectively, divided both into (a) into small and (b) into sufficiently long distances. It is well known that these areas correspond to the two most important practical goals in quantum information – the development of quantum computers and the implementation of quantum teleportation over long distances. In the past few years, the first pioneering results on the entanglement of the spin-electronic states of two NV-centers have already been obtained in these directions, in one experiment, located at a distance of 25 nm at room temperature (a), and in the other, three meters distant from each other under conditions of low cryogenic temperatures. Modern nano-technological advances in integrated optics and electronics, together with the use of electrons and photons as quantum links and nuclear spins for quantum processing and memory, opens the way to the implementation of solid-state quantum networks, which, in order to obtain stronger effects of spin states of two or more solid-state qubits at remote distances, should include further progress of the very ideas and methods of quantum entanglement dynamics of composite spin-electron and spin-nucleus states in the framework of the apparatus of density matrices.

Keywords: compound quantum systems, quantum entanglement, NV-centers in diamond, spin-electron qubits, density matrix.

Глава 1. Спин-электронная запутанность двух NV-центров

Изложенная теоретическая схема запутывания была использована в экспериментах [1,2,3] 2-х NV-центров в алмазе, находящихся на таких близких расстояниях ≈ 25 нм (см. рисунок 1), что спин-электронная связь между ними могла бы обеспечить достаточно продолжительное запутывание, которое могло бы быть эффективно обнаружено и доказано с высокой степенью достоверности (см. рисунок 2).

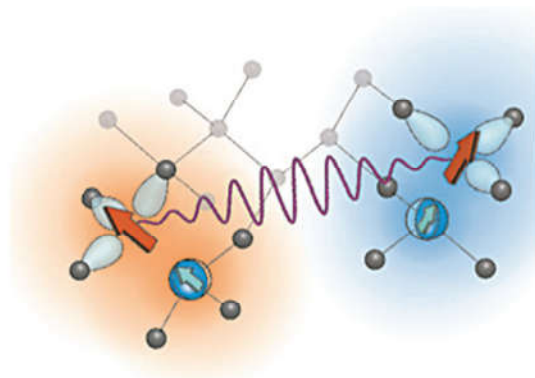


Рис. 1. Два NV-центра имеют разные ориентации с расстоянием между ними r_{AB} 25 нм (см.[2])

Система двух NV-центров описывается гамильтонианом

$$H = H_A + H_B + H_{\text{дип}} \quad (1)$$

где H_A и H_B – гамильтонианы двух независимых NV-центров, NVA и NVB, соответственно, и $H_{\text{дип}}$ описывают дипольное взаимодействие между ними.

Два центра NV имеют разную ориентацию.

Их гамильтонианами (пренебрегая деформацией) являются

$$H_A = \Delta(S_{zA})^2 - \gamma_e \vec{S}_A \cdot \vec{B} + a_N \vec{S}_A \cdot \vec{I}_A \quad (2)$$

$$H_B = \Delta(S_{z'B})^2 - \gamma_e \vec{S}_B \cdot \vec{B} + a_N \vec{S}_B \cdot \vec{I}_B \quad (3)$$

$$H_{\text{дип}} = \frac{\mu_0 \gamma_e^2}{4\pi r_{AB}^3} (S_A \cdot S_B - 3(S_A \cdot n_{AB})(S_B \cdot n_{AB})) \quad (4)$$

где $z \parallel [111]$ и $z' \parallel [1\bar{1}\bar{1}]$;

$\Delta = 2,87$ GHz – нулевое поле расщепление электронного спина-центра NV-центра (эл-спин=1 состояния обозначаются через \vec{S}_A и \vec{S}_B); $r_{AB} = r_{AB} n_{AB}$ – вектор смещения, указывающий от NVA до NVB.

В дальнейшем простое для направлений x,y,z NVB опускается (например, $S_{z'B} \rightarrow S_{zB}$). Каждый NV-центр содержит 14N-ядерный спин- $I=1$ со сверхтонкой константой связи a_N (или может

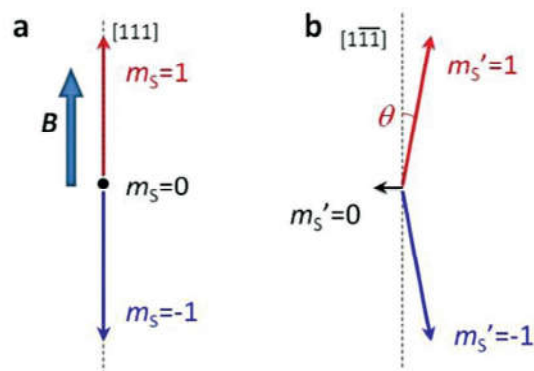


Рис. 2. а) Магнитное поле B выровнено с осью NVA, спиновые векторы для NVA вдоль направления $[111]$. В этом случае магнитное квантовое число m_S является хорошим квантовым числом. б) Спин-векторы для NVB в том же поле, что и в а). Спиновые векторы отклоняются от оси NV-центра (см.[2])

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

иметь 15N ядерный спин $I=1/2$, $a_N=3,05$ МГц). Приложенное магнитное поле выровнено с осью NVA и в соответствии с ее направленностью собственные состояния гамильтониана H_A можно определить через $|\pm\rangle_A$ и $|0\rangle_A$. Несоответствие магнитного поля оси симметрии NVB вызывает смешение состояний. Однако для силы магнитного поля ($B \approx 40$ гаусс $\ll |\frac{Y_e}{\Delta}|$), эффект мал [2,3] и все еще можно использовать квантовое число (приблизительно) m_S^B , обозначая собственные состояния гамильтониана H_B т.е. $|\pm\rangle_B, |0\rangle_B$.

Таким образом, магнитные квантовые числа m_S^A и m_S^B являются хорошими квантовыми числами. Собственные состояния гамильтониана H_A и H_B можно обозначить через $|\pm\rangle_A$ и $|0\rangle_A, |\pm\rangle_B$ и $|0\rangle_B$. Заметим, что в силу различной направленности осей квантования NVA и NVB-центров электронное спиновое состояние NVB имеет сверхтонкое взаимодействие. Отметим, что расщепление нулевого поля намного больше, чем сверхтонкая сила связи (т.е. $\Delta \gg a_N$)

В общем случае дипольное взаимодействие между двумя спинами может вызывать когерентность и/или перенос популяции из-за процесса спин-флип-флопа. Однако дипольная связь ($\sim 10-20$ кГц) значительно слабее, чем разность энергий (~ 10 МГц) двух NV. В результате, в $\mathcal{H}_{\text{дип}}$ можно оставить только слабое энергетического сдвига

$$H_{\text{дип}} = \hbar \kappa_{\text{дип}} S_{zA} S_{zB} \quad (5)$$

$\hbar \kappa_{\text{дип}}$ – сила дипольного взаимодействия, которое можно определить с помощью двойного спин-электрон-спин-электронного резонанса.

Два дефекта ориентированы вдоль двух разных направлений решетки алмаза и, следовательно, ориентационная зависимость члена тонкой структуры позволяет индивидуальную адресацию с помощью разных микроволновых частот. Чтобы исследовать величину магнитной дипольной связи между двумя дефектами, были индуцированы спиновые переходы ($\Delta_{ms} = \pm 1$) на обоих дефектах и NVA использовалось в качестве чувствительного магнитометра для измерения магнитного дипольного поля NVB, что позволило определить константу дипольной связи $\kappa_{\text{дип}} \approx 4,9$ кГц. В эксперименте ДЭЭР (двойной электрон-электронный резонанс) NVA используется для определения спинового состояния NVB. Перевернув спиновое состояние NVB, наблюдается разность фаз, масштабируемая в зависимости от величины дипольного взаимодействия. Спин-электронное состояние NVA приобретает случайную фазу шума (для простоты

формулы мы рассмотрим фазу шума позже) вместе с эволюционирующей дипольной фазой

$$\phi_{\text{дип}}(\tau) = 2\pi \kappa_{\text{дип}} \tau, \quad (6)$$

вызванной дипольным взаимодействием с NVB. Именно величина этой фазы и послужит генерации запутанности электрон-спин состояний двух NVA- и NVB-центров.

Поэтому измеренная временная интенсивность флуоресценции

$$I_{\text{ДЭЭР}}^A(t, \tau) = I_A(t) \cos(2\pi \kappa_{\text{дип}} \tau) \quad (7)$$

и период колебаний по переменной τ позволяет получить величину дипольной связи $\kappa_{\text{дип}}$.

При рассмотрении унитарных операций над спин-электронными “кутритными” состояниями двух NV-центров

$$\{|+\rangle_A, |0\rangle_A, |-\rangle_A\} \text{ и } \{|+\rangle_B, |0\rangle_B, |-\rangle_B\} \quad (8)$$

лучше перейти в 9-мерный базис

$$\{|+\rangle_A, |0\rangle_A, |-\rangle_A\} \otimes \{|+\rangle_B, |0\rangle_B, |-\rangle_B\} \equiv \{|+\rangle_+, |+\rangle_0, |+\rangle_-, |0\rangle_+, |0\rangle_0, |0\rangle_-, |-\rangle_+, |-\rangle_0, |-\rangle_-\} \quad (9)$$

или

$$\begin{matrix} |+\rangle_+ = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, |+\rangle_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, |+\rangle_- = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, |0\rangle_+ = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, |0\rangle_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, |0\rangle_- = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \\ |-\rangle_+ = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, |-\rangle_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, |-\rangle_- = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \end{matrix}, \quad (10)$$

Следуя идеям формализма описания составных квантовых систем в рамках матрицы плотности и работам [1,2,7], можно детально проследить механизм возникновения запутывания, начиная с простого чистого сепарабельного состояния $|\Phi_{00}\rangle = |00\rangle$ и получить в ходе унитарных преобразований запутанные состояния Белла, такие как

$$\begin{aligned} |\Phi_{0+}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - i|+\rangle_+), \\ |\Phi_{+-}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|+\rangle_+ - i|-\rangle_-), \\ |\Phi_{DQ}^+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|-\rangle_- - |+\rangle_+) \end{aligned} \quad (11)$$

и другие. Заметим, что реально спин-электронная система состояний 2-х NV-центров составлена из 2-х кутритов, реально запутывание происходит на уровне 2-х кубитов, состоящих из одно-кубитных состояний систем NVA и NVB. Основная идея заключается в построении оператора эволюции [1,2,3], являющегося результатом последовательного применения унитарных операций и в прямом соответствии с возможными управляющими воздействиями над NV-центрами (см. рисунки 3, 4).

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

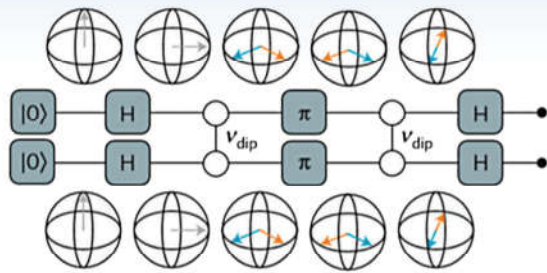


Рис. 3. Квантовая схема запутывания.

Последовательность спинового эха на обоих отдельных спинах уменьшает эффект локального шума при сохранении спин-спинового взаимодействия. Последний реализует управляемый фазовый вентиль, который окончательно приводит к состоянию Белла после времени эволюции $1/8\kappa\text{ДИП}$ (см.[2])

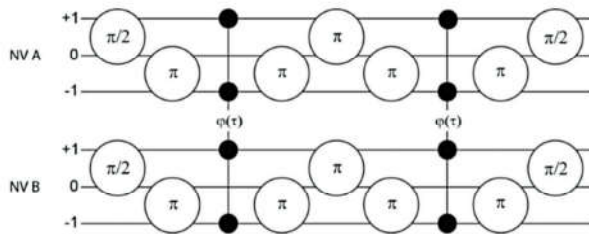


Рис. 4. Импульсная последовательность, используемая для создания запутывания между электронными спиновыми состояниями $m_S=0$ и $m_S=+1$ обоих NV-центров (см. [3])

Последовательность спинового эха на обоих отдельных спинах уменьшает эффект локального шума при сохранении спин-спинового взаимодействия. Последний реализует управляемый фазовый вентиль, который окончательно приводит к состоянию Белла после времени эволюции $1/8\kappa\text{ДИП}$.

В ходе унитарных преобразований запутанные состояния Белла создаются диагональной фазовой ($\Phi_{\text{дип}} \equiv \Phi$) матрицей:

$$U_{\text{дип}}(\tau) = \text{diag}(e^{-i\Phi}, 1, e^{i\Phi}, 1, 1, 1, e^{i\Phi}, 1, e^{-i\Phi}) \neq U_A(\tau) \otimes U_B(\tau)! \quad (12)$$

Этот оператор не факторизуется, что будет служить главным источником спин-электронного запутывания состояний NVA и NVB-центров. Это также послужит причиной обращения для вычислений к 9-мерному пространству квантовых состояний. Эволюционная генерация запутанного спин-электронного состояния $|\Phi_{0+}\rangle$ в соответствии с диаграммой на рисунке 3.

$$U_{\text{фин}}(\tau)|00\rangle = |\Phi_{0+}\rangle \quad (13)$$

осуществляется следующим унитарным оператором

$$U_{\text{фин}}(\tau) = U_3 U_{\text{ДИП}2}(\tau_2) U_2 U_{\text{ДИП}1}(\tau_1) U_1 \quad (14)$$

τ_1, τ_2 – интервалы эволюции;

$\tau = \tau_1 + \tau_2$ – полный временной интервал;

матрица $U_i, i=1,2,3$ принимает в 9-мерном тензорном $\mathcal{H} = \mathcal{H}^A \otimes \mathcal{H}^B$ пространстве спин-электронных состояний двух NV-центров следующий вид

$$U_1 = U_{1A} \otimes U_{1B} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix}^A \otimes \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix}^B = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sqrt{2} & \sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$U_2 = U_{2A} \otimes U_{2B} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}^A \otimes \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}^B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$U_3 = U_{3A} \otimes U_{3B} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}^A \otimes \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}^B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}_{A \otimes B} \quad (17)$$

Отметим следующее соотношение между матрицами U_i :

$$U_{3A} U_{2A} U_{1A} = U_{3B} U_{2B} U_{1B} = \hat{1}_3 \quad (18)$$

Теперь надо вычислить последовательное воздействие унитарных операторов в прямом соответствии с операциями манипулирования на спин-электронные состояния обоих NV-центра. Так, на первом шаге после оптической инициализации системы в

$$|m_{SA}, m_{SB}\rangle = |00\rangle$$

двойное квантовое $n/2$ вращения на обоих NV-центрах приводит к чистому, еще не запутанному состоянию

$$1/2 (|-1-1\rangle - |-11\rangle - |1-1\rangle + |11\rangle):$$

$$U_1 |00\rangle = U_1 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{дает } 1/2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (19)$$

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Под влиянием взаимной дипольной спиновой связи

$U_{\text{дип}}(\tau) = \text{diag}(e^{-i\phi}, 1, e^{i\phi}, 1, 1, 1, e^{i\phi}, 1, e^{-i\phi})$, система свободно эволюционирует в течение времени τ , приводя к зависящему от состояния фазовому захвату

$1/2 (e^{-i\phi} |11\rangle - |1-1\rangle - |-11\rangle + e^{i\phi} |-11\rangle)$, где $\phi = 2\pi\kappa_{\text{дип}}\tau$ – коррелированная фаза.

$$U_{\text{дип}}(\tau)U_1|00\rangle = U_2 \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{дает } \frac{1}{2}} \begin{pmatrix} e^{-i\phi} \\ 0 \\ -e^{i\phi} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -e^{i\phi} \\ 0 \\ 0 \\ e^{-i\phi} \end{pmatrix} \quad (20)$$

Результат действия двух операций определяется следующей матрицей $U_{\text{дип}}U_1 =$

$$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} e^{-i\phi} & -e^{-i\phi} & 0 & -e^{-i\phi} & e^{-i\phi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e^{i\phi} & e^{i\phi} & 0 & -e^{i\phi} & -e^{i\phi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sqrt{2} & \sqrt{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 0 & 0 \\ e^{i\phi} & -e^{i\phi} & 0 & e^{i\phi} & -e^{i\phi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e^{-i\phi} & e^{-i\phi} & 0 & e^{-i\phi} & e^{-i\phi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (21)$$

Продолжая следующий 3-й этап воздействия оператором-матрицей

$$U_2U_{\text{дип}}U_1 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} e^{-i\phi} & e^{-i\phi} & 0 & e^{-i\phi} & e^{-i\phi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e^{i\phi} & -e^{i\phi} & 0 & e^{i\phi} & -e^{i\phi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{2} & \sqrt{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{2} & -\sqrt{2} & 0 & 0 \\ e^{i\phi} & e^{i\phi} & 0 & -e^{i\phi} & -e^{i\phi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e^{-i\phi} & -e^{-i\phi} & 0 & -e^{-i\phi} & e^{-i\phi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (22)$$

И затем на 4-ом этапе совершаем второй фазовый поворот:

$$U_{\text{дип}2}U_2U_{\text{дип}1}U_1 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} E & E & 0 & E & E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/E & -E & 0 & 1/E & -1/E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{2} & \sqrt{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{2} & -\sqrt{2} & 0 & 0 \\ 1/E & 1/E & 0 & -1/E & E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ E & -E & 0 & -E & E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (23)$$

где $E = e^{-i(\varphi_1+\varphi_2)}$, $\phi_i(\tau_i) = 2\pi\tau_i\kappa_{\text{дип}}$, $i = 1, 2$.

Последняя, 5-я операция, дает результирующую матрицу эволюции системы приводящую к запутанному состоянию Белла

$$U_{\text{фин}} = U_3U_{\text{дип}2}U_2U_{\text{дип}1}U_1 = \begin{pmatrix} A+B & 0 & 0 & 0 & A-B & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A+B & 0 & A-B & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A-B & 0 & A+B & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A-B & 0 & 0 & 0 & A+B & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (24)$$

$$A = \frac{1}{2}e^{-i(\varphi_1+\varphi_2)}, \quad B = \frac{1}{2}e^{i(\varphi_1+\varphi_2)}$$

$$c = A + B = \cos(\varphi_1 + \varphi_2), \quad s = A - B = -i \sin(\varphi_1 + \varphi_2)$$

$$U_{\text{фин}} = U_3U_{\text{дип}2}U_2U_{\text{дип}1}U_1 = \begin{pmatrix} c & 0 & 0 & 0 & s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c & 0 & s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 & c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (25)$$

При совпадающих фазах $\varphi_1 = \varphi_2 = \phi$ результирующий оператор эволюции приобретает вид, соответствующий деталям эксперимента [2]

$$U_{\text{фин}} = \begin{pmatrix} \cos 2\phi & 0 & 0 & 0 & -i \sin 2\phi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\phi & 0 & -i \sin 2\phi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -i \sin 2\phi & 0 & \cos 2\phi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -i \sin 2\phi & 0 & 0 & 0 & \cos 2\phi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (26)$$

В результате, стартуя из чистого сепарабельного состояния $|00\rangle$ эти 5 последовательных операций могут трансформировать его в максимально запутанное состояние Белла $|\Phi_{0+}\rangle$:

$$U_{\text{фин}}|00\rangle = \begin{pmatrix} -i \sin 2\phi \\ 0 \\ 0 \\ \cos 2\phi \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{\phi = \frac{\pi}{4}} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -i \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = |\Phi_{0+}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - i|++\rangle) \quad (27)$$

Соответственно, с учетом действия данного оператора эволюции $U_{\text{фин}}(\tau)$ матрица плотности $\rho_{00}(\tau)$ в момент времени τ приобретает вид

$$\rho_{00}(\tau) = U_{\text{фин}}(\tau)\rho_{00}(0)(U_{\text{фин}}(\tau))^+ \quad (28)$$

где $\rho_{00} = |00\rangle\langle 00|$ – начальная матрица плотности.

$$\rho_{00}(\tau) = \begin{pmatrix} \sin^2 2\phi & 0 & 0 & 0 & -\frac{i}{2} \sin 4\phi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{i}{2} \sin 4\phi & 0 & 0 & 0 & \cos^2 2\phi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (29)$$

При условии $2\phi = \frac{\pi}{4}$ мы получаем матрицу плотности

$$\rho_{00}(\tau) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (30)$$

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

отвечающую максимально запутанному состоянию Белла

$$U_{\text{фин}} |00\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - i|++\rangle) = |\Phi_{0+}\rangle \quad (31)$$

Рассмотрим другой пример

$$U_{\text{фин}} |0+\rangle : \rho_{0+}(0) = |0+\rangle \langle 0+|$$

$$\rho_{0+}(\tau) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin^2 2\phi & 0 & -i\sin\phi\cos 2\phi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & i\sin 2\phi\cos\phi & 0 & \cos^2 2\phi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (32)$$

при $\phi = \frac{\pi}{4}$, отвечающей запутанному состоянию Белла

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|+0\rangle - i|0+\rangle)$$

Исходя из запутанного состояния

$$|\Phi_{0+}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - i|++\rangle),$$

применяя локальные операции, можно сгенерировать другие запутанные состояния, например,

$$|\Phi_{+-}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|++\rangle + |--\rangle),$$

применяя для данного случая n импульсы на ($|0\rangle \rightarrow |-\rangle$ переходах NVA и NVB, соответственно, происходит преобразование такое, что

$$|\Phi_{+-}\rangle = (U_{\pi A} \otimes U_{\pi B})|\Phi_{0+}\rangle.$$

Полученные матрицы плотности

$$\rho_{\{0+\}}, \rho_{\{+-\}} \dots$$

позволяют вычислить достоверность

$$F_{\{0+\}}(\tau), F_{\{+-\}}(\tau)$$

запутанных состояний

$$F_{\{0+\}}(\tau) = \text{Tr}\{\rho_{\{0+\}}(\tau)|\Phi_{0+}\rangle\langle\Phi_{0+}|\}, F_{\{+-\}}(\tau) = \text{Tr}\{\rho_{\{+-\}}(\tau)|\Phi_{+-}\rangle\langle\Phi_{+-}|\} \quad (33)$$

интенсивность их флуоресценций, отвечающей нуль-состоянию популяции

$$\langle P_0 \rangle = \langle \text{Tr}\{\hat{P}_M U_{FIN}(\tau)\rho(\tau)U_{FIN}^+(\tau)\},$$

где оператор проективного измерения:

$$\hat{P}_M = \alpha|0\rangle_A\langle 0| + \beta|0\rangle_A\langle 0| \quad (34)$$

Эффективная сила сцепления может быть увеличена до четырех раз, используя кутритный характер триплетного вращения в каждом центре NV.

На эксперименте [2]

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau, \quad 2\tau = \frac{1}{2\kappa_{\text{дип}}} \approx 25 \text{ мкс}$$

$$\varphi_1(\tau) = \varphi_2(\tau) = \phi(\tau) = 2\pi\tau\kappa_{\text{дип}} = \frac{\pi}{48}.$$

При $\tau = 12,5 \mu\text{s}$ состояние эволюционировало до $\Phi_{\text{дв}}^+$. А именно, квантовая фаза состояния суперпозиции с

$$\Delta m_s = \pm 2$$

эволюционирует в два раза быстрее в заданных магнитных полях как суперпозиция

$$\Delta m_s = \pm 1.$$

Кроме того, спин-флип на

$$\Delta m_s = \pm 2$$

индуцирует изменение в два раза сильнее магнитного поля по сравнению с случаем

$$\Delta m_s = \pm 1.$$

Следовательно, используя

$$\Delta m_s = \pm 2$$

(двойные квантовые переходы DQ) на обоих NV-центрах дает

$$\kappa_{\text{дип-дв}} \cong 19 - 20 \text{ кГц}$$

$$\kappa_{\text{дип-дв}} \cong 5 \text{ кГц} [2,3].$$

Глава 2. Обсуждение фотонных корреляций и доказательство запутанности

Запутанность между спинами выводится из флуоресцентных эмиссионных свойств запутанной пары дефектов во всех экспериментах, но только со своими некоторыми отличиями. Электронно-фотонный интерфейс объединяет реализованные уже эксперименты [2,3,4,5,6]. Так в экспериментах стационарное флуоресцентное излучение [2,3]

$$\Psi^- = (1/\sqrt{2})(|01\rangle - i|10\rangle),$$

$$\Phi^- = (1/\sqrt{2})(|00\rangle - i|11\rangle)$$

также как и соответственно сепарабельное спиновое состояние обоих NV-центров

$$(1/2)(|00\rangle + |10\rangle + |01\rangle + |11\rangle)$$

идентично. Однако двух-фотонные корреляции показывают разницу между спин-запутанными и смешанными состояниями. Состояние Φ имеет более высокую вероятность одновременного излучения двух фотонов, чем некоррелированное состояние суперпозиции, тогда как Ψ состояние имеет меньшую вероятность [2,3,4,5].

Важнейшим фактором для всех экспериментов является время запутывания, которое должно быть значительно больше времени дефазировки состояний.

Так, время жизни запутанных состояний в эксперименте [2,3], ограничено дефазировкой электронного спина, измеренной как

$$T_{2A \text{ DQ}}^* = 27,8 \pm 0,6 \text{ мкс} \text{ и}$$

$$T_{2B \text{ DQ}}^* = 22,6 \pm 2,3 \text{ мкс}$$

Измеренное время жизни сцепления

$$T(\Phi_{\text{DQ}}^+) = 28,2 \pm 2,2 \text{ мкс и}$$

$$T(\Psi_{DQ}^+) = 23,7 \pm 1,7 \text{ мкс}$$

Представленные в [2,3] эксперименты означают первый шаг к масштабированию квантовых регистров алмаза при комнатной температуре, демонстрируя детерминированное переплетение электронных спинов на расстоянии около 10 нм. С появлением нанотехнологий с алмазным дефектом, более эффективная генерация дефектных пар и более крупных дефектных массивов кажется приемлемой.

Представляется интересным попытаться использовать результаты этих исследований совместно с идеями работ второй направленности [4,5,6], в которых удалось добиться как геральдовой, так и детерминистской запутанности удаленных на три метра NV-центров. В следующей работе мы предполагаем обсудить эксперименты из класса второй направленности, в которых используются два NV-кубита, расположенные в независимых низкотемпературных установках, разнесенных на 3м [4,5,6]. Главной особенностью таких экспериментов является использование всей тонкой структуры спин-электронных состояний NV-центров и, следовательно, необходимость применения низких температур 4-8 градусов Кельвина (см. рисунок 5).

Спектры оптического возбуждения NV-центров демонстрируют резкие спин-селективные переходы, которые можно использовать при низких температурах в различных схемах запутывания [4,5,6].

Используемая схема запутывания в работах [4,5] выглядит следующим образом. Оба центра NVA и NVB первоначально подготовлены в суперпозиции

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)_{A,B}$$

Лазерное возбуждение запутывает

<спин-электрон>-<число появившихся фотонов>: $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow 1\rangle + |\downarrow 0\rangle)_{A,B}$
два NV-центра, общее состояние

$$\frac{1}{2}(|\uparrow_A \uparrow_B\rangle + |\uparrow_A \downarrow_B\rangle + |\downarrow_A \uparrow_B\rangle + |\downarrow_A \downarrow_B\rangle)$$

Фотонный разделитель – а) если эмиссионные фотоны из центров А и В – неразличимы, то наблюдение = измерение одного фотона будет выделять как состояние

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|\mathbf{1}_A \mathbf{0}_B\rangle \pm e^{-i\varphi} |\mathbf{0}_A \mathbf{1}_B\rangle)$$

Наблюдение = измерение одного фотона проектирует электронный кубит на максимально запутанное состояние

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow_A \downarrow_B\rangle \pm e^{-i\varphi} |\downarrow_A \uparrow_B\rangle)$$

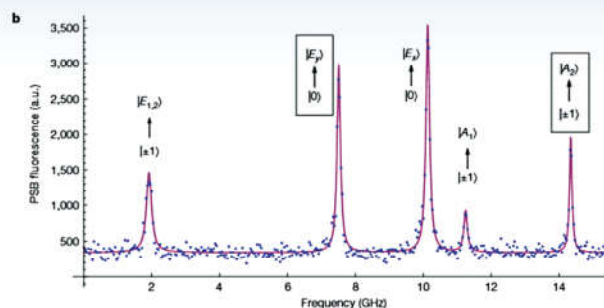


Рис. 5

Обнаружение фотона в обоих раундах, таким образом, предвещает возникновение запутанного состояния. Ключевой задачей для создания дистанционного сцепления с твердотельными кубитами является получение большого потока неразличимых фотонов, отчасти потому, что локальная деформация в решетке алмаза может вызывать большие изменения частоты фотонов.

Обсуждаемые в статье различные температурные варианты запутывания двух кубитов нам будут нужны для изложения главной цели проекта – составления проколов телепортации Земля-Земля и Земля-Космос, в которых требуется использование трех, четырех или более кубитов (кутритов) с практической реализацией как при комнатных (Земля), так и при криогенных температурах (Космос).

Литература

- Nielsen M.A., Chuang I.L. Quantum Computation and Quantum Information (Cambridge Univ. Press, 2000).
- 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.9, 139–143(2013).
- 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. Supplementary information DOI: 10.1038/NPHYS2545 Nature Physics.
- Bernien H., Hensen B., Pfaff W., Koolstra G., Blok M.S., Robledo L., Tamirniau T.H., Markham M., Twitchen D.J., Childress L., Hanson R. Heralded entanglement between solid-state qubits separated by three metres/ 86 | Nature | Vol. 497 | 2 MAY 2014
- Pfaff W., Hensen B., Bernien H., van Dam S.B., Blok M.S., Tamirniau T.H., Tiggelman M.J., Schouten R.N., Markham M., Twitchen D.J., Hanson R. Supplementary Materials for Unconditional quantum teleportation between distant solid-state quantum bits./ 29 May 2014 on Science Express DOI: 10.1126/science.1253512.
- Togan E. et al. Quantum Entanglement Between an Optical Photon and a Solid-State Spin Qubit, Nature 466(7307):730-4 August 2010.
- Weng Cho Chew Quantum Mechanics Made Simple: Lecture Notes September 23, 2013
- Белокуров В.В., Тимофеевская О.Д., Хрусталев О.А. Квантовая телепортация – обычное чудо. Ижевск: Научно-издательский центр Регулярная и хаотическая динамика, 2000. 255 с.