Казанский федеральный университет
Кафедра оптики и нанофотоники

Моделирование квантовой памяти на основе нерезонансного рамановского поглощения и испускания фотонов в изотопически чистых примесных кристаллах

Автор работы:
Бережной Александр Дмитриевич
Тел(89870037704)
Email(alex.berezhnoi@mail.ru)

Научный Руководитель
Калачев Алексей Алексеевич
д.ф.-м.н., профессор РАН

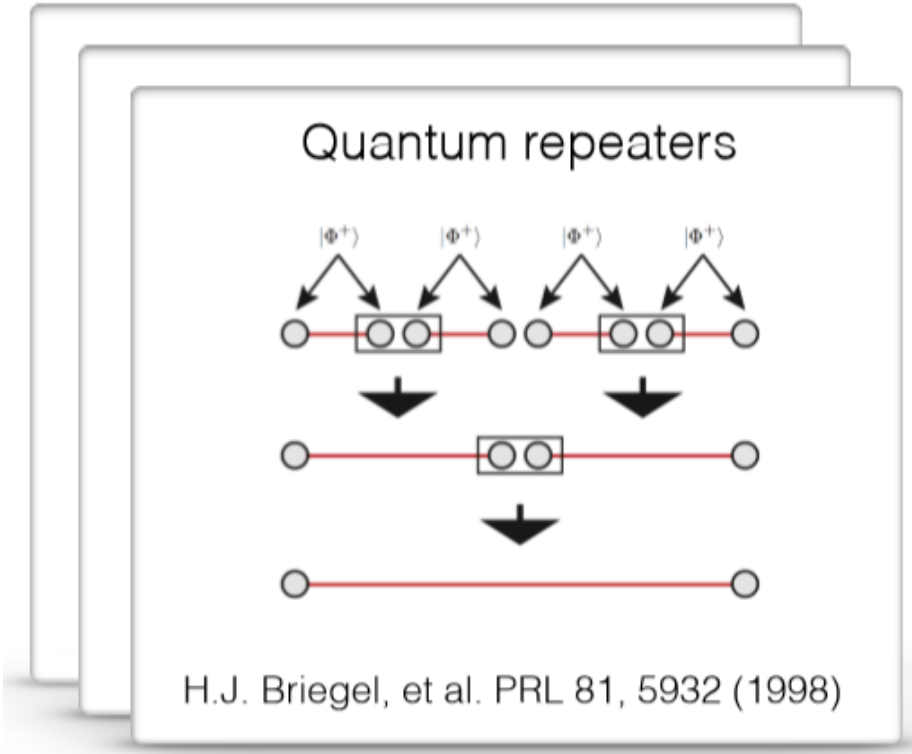
Казань 2018

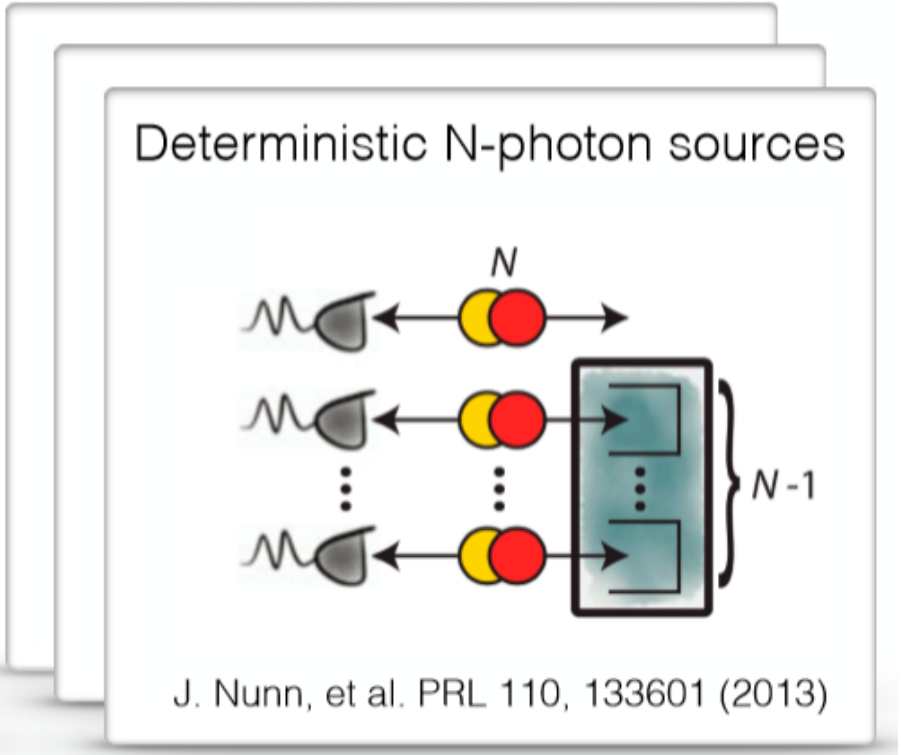
План доклада

- Актуальность
- Цель и задачи
- Основные уравнения
- Моделирование квантовой памяти в кристаллах $^{143}Nd^{3+}:Y^{7}LiF_4$ и $^{167}Er^{3+}:Y^{7}LiF_4$
- Результаты и выводы

Актуальность

Оптическая квантовая память – управляемая оптическая линия задержки для квантовых состояний электромагнитного поля.





Актуальность

Метод градиентного фотонного эха:
M.P. Hetges, at al.//Nature, 465, 1052 (2010) – 69% эффективность, $Pr^{3+}:Y_2SiO_5$
M. Hosseini, at al.//Nature, Commus 2, 174 (2011) – 87% эффективность, горячие атомы

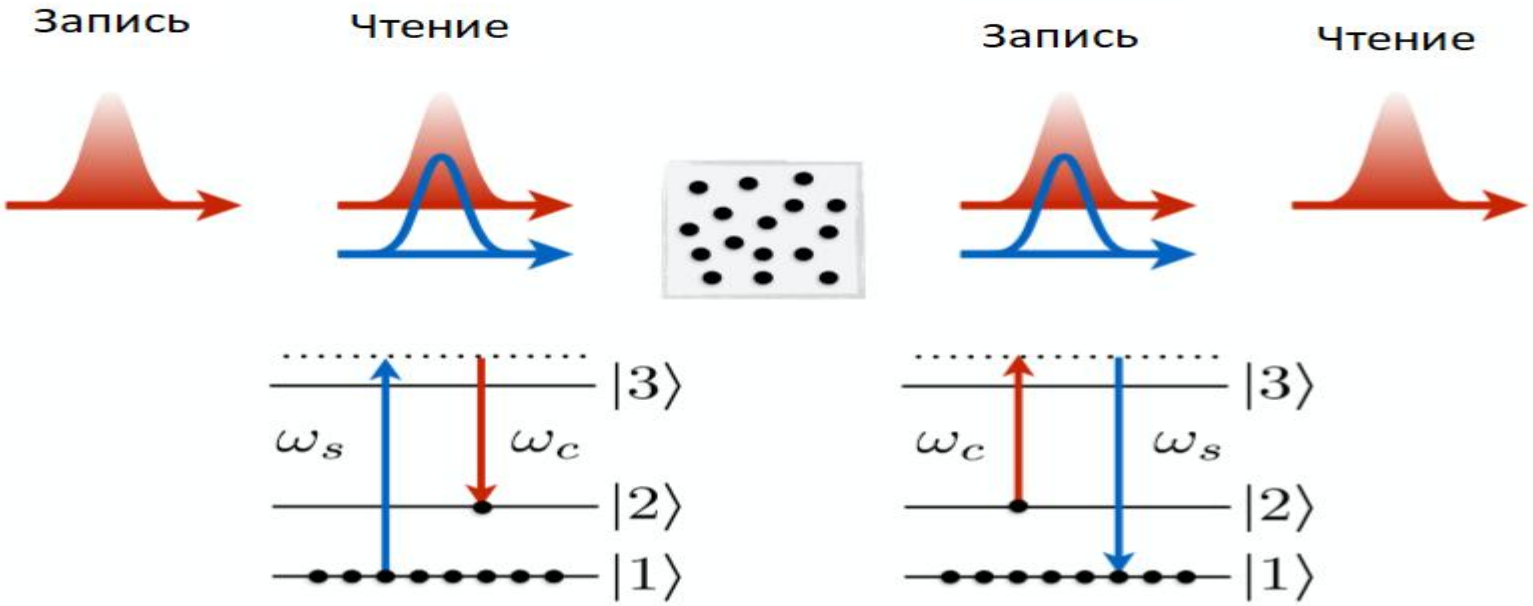
Метод атомной частотной гребенки:
E.Saglamyurek, at al.//Nature, 469, 512 (2011) - 5 ГГц пропускная способность, допированный волновод
M. Sabooni, at al.//PRL, 110, 133604 (2013) – 56% эффективность, $Pr^{3+}:Y_2SiO_5$ в резонаторе
P. Jobez, at al.//New J. Phys. 16, 083005 (2014) – 53% эффективность, $Eu^{3+}:Y_2SiO_5$ в резонаторе
E.Saglamyurek, at al.//Nature Photonics, 9, 83 (2015) - 8 ГГц пропускная способность, допированное волокно

Метод электромагнитно индуцированной прозрачности:
N.B. Phillips, at al.//PRA, 78, 023081 (2008) – 43% эффективность, горячие атомы
Y.-H. Chen, at al.//PRL, 110, 083601 (2013) – 78% эффективность, холодные атомы
G. Heinze, at al.//PRL, 111, 033601 (2013) – одна минута хранения, $Pr^{3+}:Y_2SiO_5$

Метод нерезонансного рамановского взаимодействия:
K.F. Reim, at al.//PRL, 107, 053603 (2011) – групповая задержка 2500, горячие атомы
M.R. Sprague, at al.// Nature Photonics, 8, 287 (2014) – 27% эффективность, волокно с полым сердечником
D.G. England, at al.//PRL, 114, 053602 (2015) – 325 фс импульсы, алмаз

Актуальность

Не резонансная рамановская квантовая память



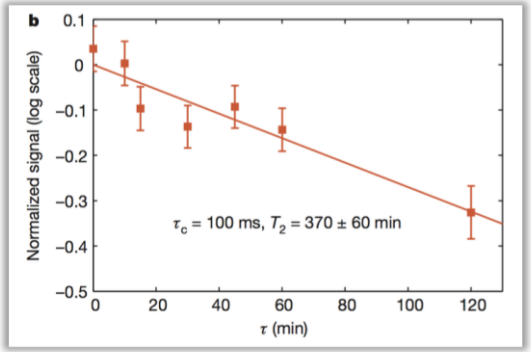
J. Nunn, et al. PRA 75, 011401(R) (2007)

Актуальность

Кристаллы, активированные редкоземельными ионами:

- Большие времена оптической и спиновой когерентности
- Возможность управления частотой переходов с помощью линейного эффекта Штарка или Зеемана

R. M. Macfarlane. Journal of Luminescence 100, 1 (2002)
C.W. Thiel, et al. Journal of Luminescence 131, 353 (2011)
C. W. Thiel, et al. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 45, 124013 (2012)

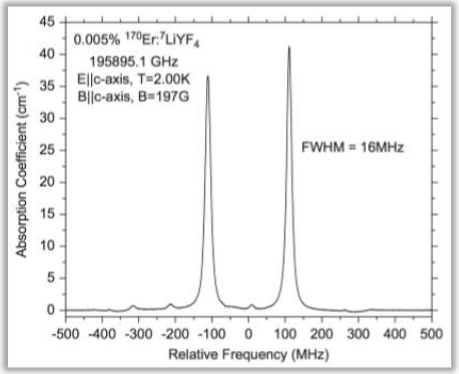


M. Zhong, et al. Nature 517, 177 (2015)

Изотопически чистые примесные кристаллы:

- Малое неоднородное уширение линий (~ 10 МГц)

$Y^7LiF_4 : Er^{3+}$
R.M. Macfarlane et al. PRL 69, 542 (1992)
R. Marino, et al. J. Lumin. 169, Part B, 478 (2016)
K.I. Gerasimov, et al. PRB 94, 054429 (2016)
$Y^7LiF_4 : Nd^{3+}$
R.M. Macfarlane, et al. PRB 58, 5692 (1998)
R.A. Akhmedzhanov, et al. LPL 13, 015202 (2016)



C.W. Thiel, et al.
Journal of Luminescence 131, 353 (2011)

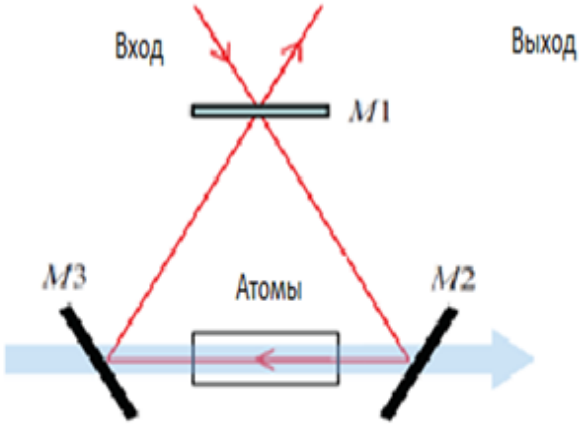
Цель и задачи

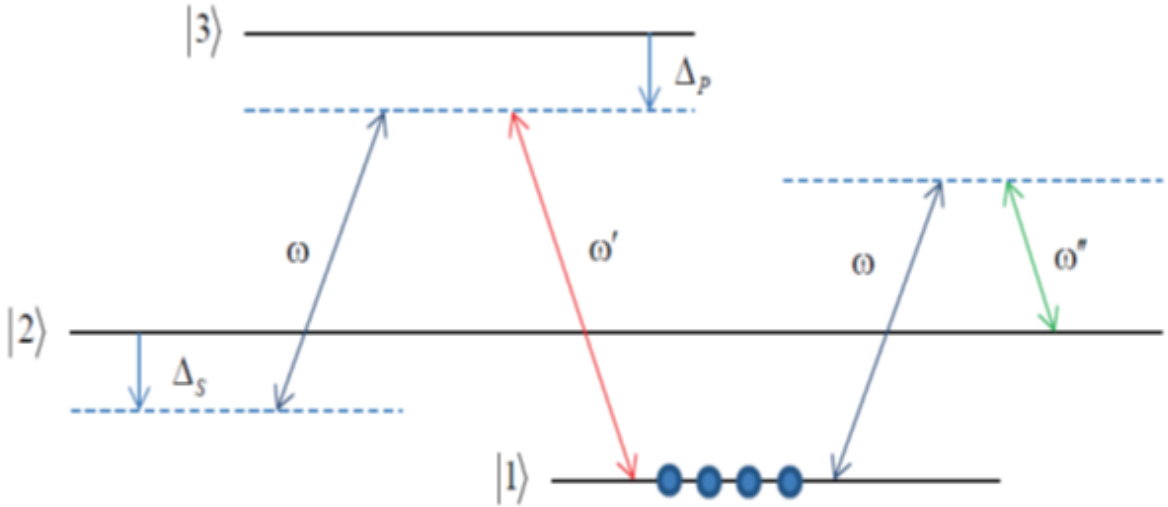
Целью работы является разработка теоретической модели оптической квантовой памяти на основе комбинационного (рамановского) взаимодействия полей в кристаллах, активированных редкоземельными ионами, и оценка соотношения сигнал/шум на выходе оптической квантовой памяти с учётом реальной сверхтонкой структуры оптических переходов примесных ионов.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- Построение теоретической модели, описывающей нерезонансное комбинационное (рамановское) взаимодействие контрольного и сигнального полей с ансамблем многоуровневых примесных атомов.
- Определение оптимальных условий реализации нерезонансного рамановского взаимодействия в кристаллах $^{143}Nd^{3+}:Y^{7}LiF_4$ и $^{167}Er^{3+}:Y^{7}LiF_4$
- Анализ соотношения сигнал/шум на выходе оптической квантовой памяти в кристаллах $^{143}Nd^{3+}:Y^{7}LiF_4$ и $^{167}Er^{3+}:Y^{7}LiF_4$

Основные уравнения





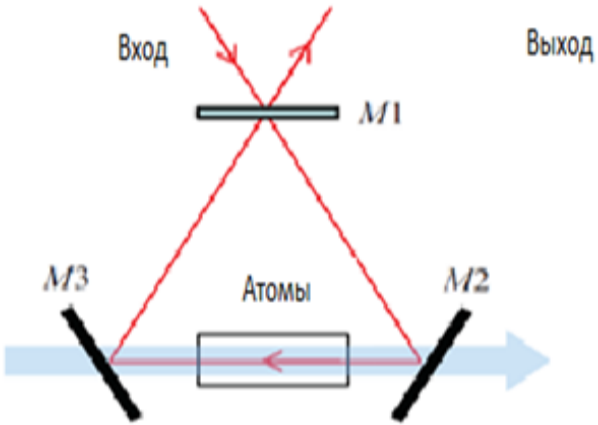
$$H = -\hbar(\Omega_{32}\sigma_{32}e^{-i\omega t} + \Omega_{31}\sigma_{31}e^{-i\omega t} + g_{31}\sigma_{31}a + g_{32}\sigma_{32}a + g_{31}\sigma_{31}b + g_{32}\sigma_{32}b)$$

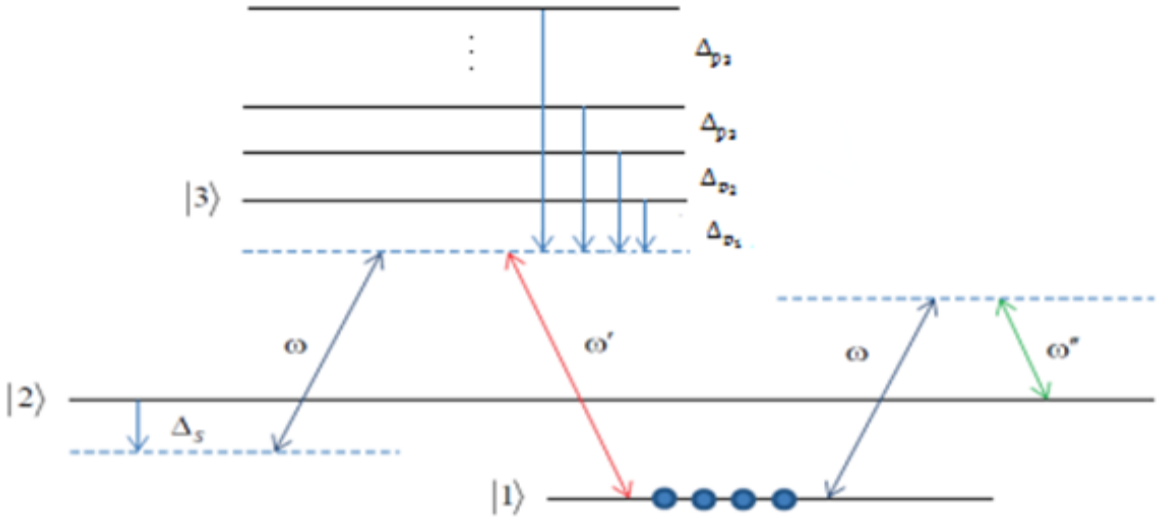
Ω - частота Раби

g - константа связи

A.V. Gorshkov, at al.// Phys. Rev. A. – 2007. – Vol. 76. – P. 033804.

Основные уравнения





$$\dot{P}_j = -i\Delta_{p_j}P_j + i\Omega_{32j}S + i\Omega_{31j}\sqrt{N}e^{-i\delta t} + ig_{31j}\sqrt{N}A + ig_{32j}ASe^{i\delta t} + ig_{31j}\sqrt{N}Be^{i(\delta'-\delta)t} + ig_{32j}BSe^{i\delta' t}$$

$$\dot{S} = -i\Delta_s S + \sum_j^n (i\Omega_{32j}^* P_j - ig_{31j}Q^*A - i\Omega_{31j}Q^*e^{-i\delta t} + ig_{32j}^* PA^*e^{-i\delta t} - ig_{31j}Q^*Be^{i(\delta'-\delta)t} + ig_{32j}^* PB^*e^{-i\delta' t})$$

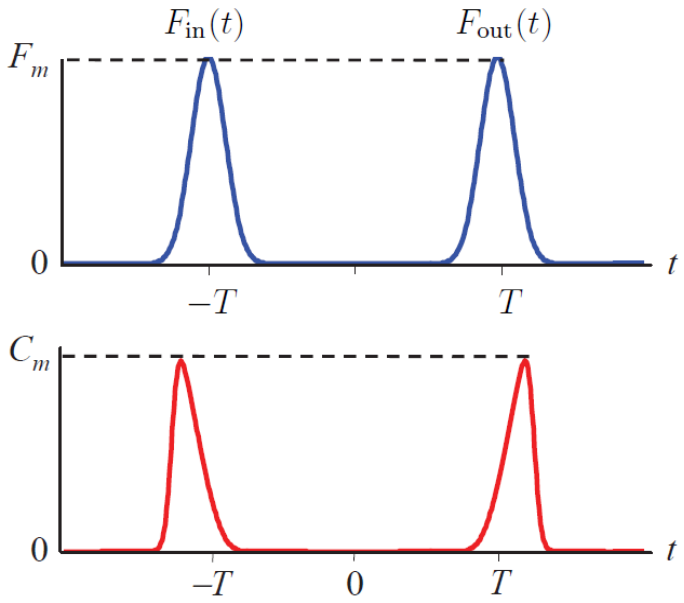
$$\dot{Q} = \Delta_s Q + \sum_j^n -i\Delta_{p_j} - ig_{31j}S^*A - i\Omega_{31j}S^*e^{-i\delta t} - ig_{31j}S^*Be^{i(\delta'-\delta)t}$$

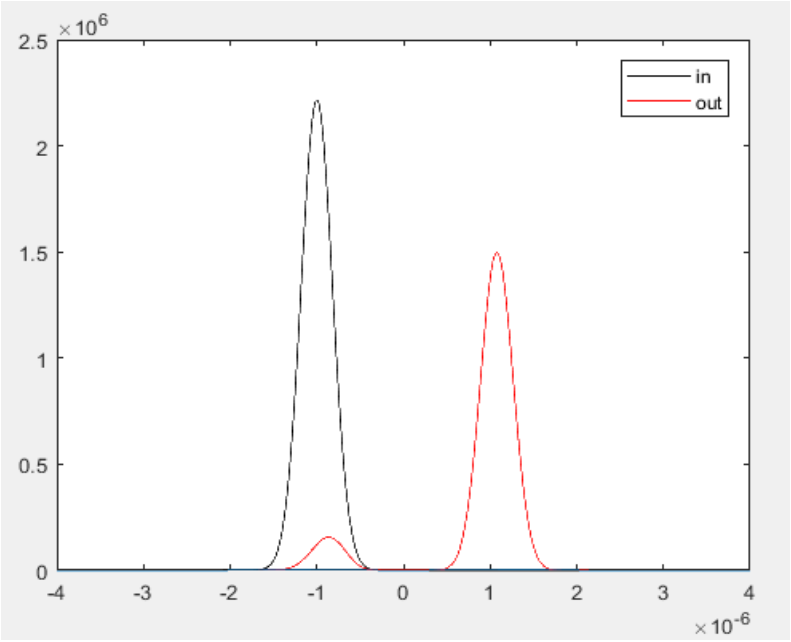
$$\dot{A} = \sum_j^n ig_{31j}^*\sqrt{N}P_j + ig_{32j}^*Q\sqrt{N}e^{-i\delta t} - kA + \sqrt{2k}A_{in}$$

$$\dot{B} = \sum_j^n ig_{31j}^*\sqrt{N}P_j e^{-i(\delta'-\delta)t} + ig_{32j}^*Q\sqrt{N}e^{-i\delta' t} - kB + \sqrt{2k}B_{in}$$

Основные уравнения

Гауссовы импульсы





Аналитические решения:

A. Kalachev // Phys. Rev. A 78, 043812 (2008)

А.А.Калачев // Оптика и спектроскопия, 109, 34 (2010)

Моделирование квантовой памяти в кристаллах $^{143}Nd^{3+}:Y^7LiF_4$ и $^{167}Er^{3+}:Y^7LiF_4$

$$H = g_{||}\beta H_z H_z + g_{\perp}\left(H_x S_x + H_y S_y\right) + A I_z S_z + B\left(I_x S_x + I_y S_y\right) + P\left[I_z^2 - \frac{I(I+1)}{3}\right]$$

$^{167}Er^{3+}:Y^7LiF_4$ ($^4I_{15/2}$-$^4I_{13/2}$, 1530 нм)

Основное состояние [1]

A = - 325.8 МГц, B = 840 МГц

$g_{||}$ = 3.137 $g_{\perp} = 8.105$

Возбужденное состояние [2]

A = - 210 МГц, B = 964 МГц

$g_{||}$ = 1.52 $g_{\perp} = 7.37$

$^{143}Nd^{3+}:Y^7LiF_4$ ($^4I_{9/2}$-$^4F_{3/2}$, 867 нм)

Основное состояние [3]

A=-590 МГц, B=-789 МГц

$g_{||}$ = 1.987 $g_{\perp} = 2.554$

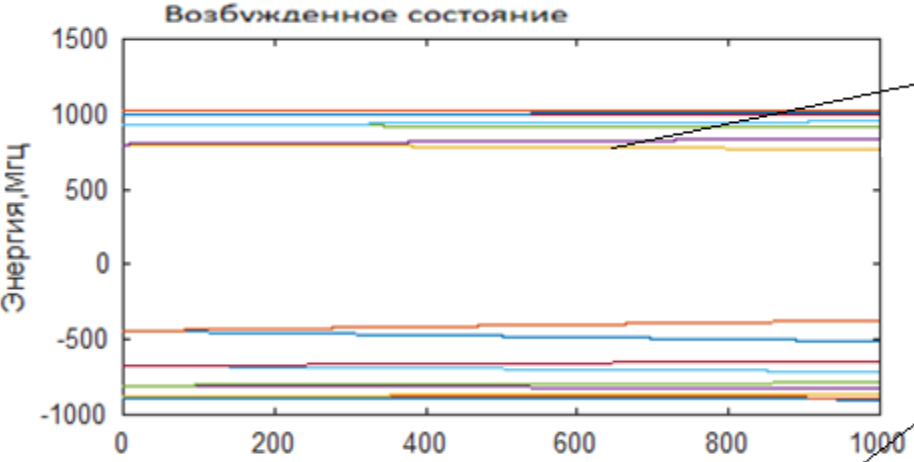
Возбужденное состояние [3]

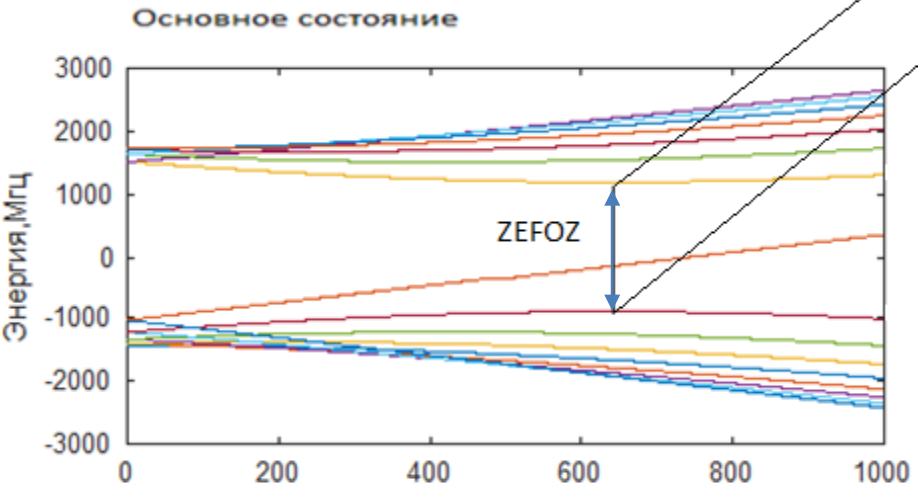
A=-252 МГц, B=--479 МГц

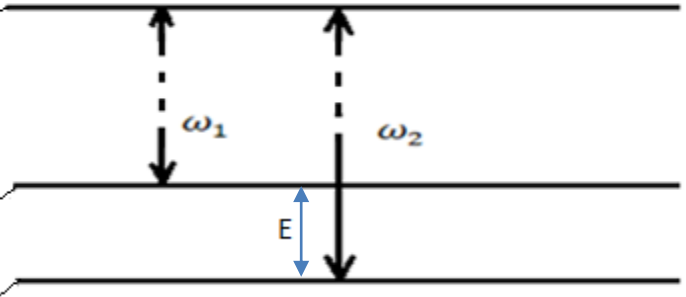
$g_{||}$ = 0.1 $g_{\perp} = 0.8$

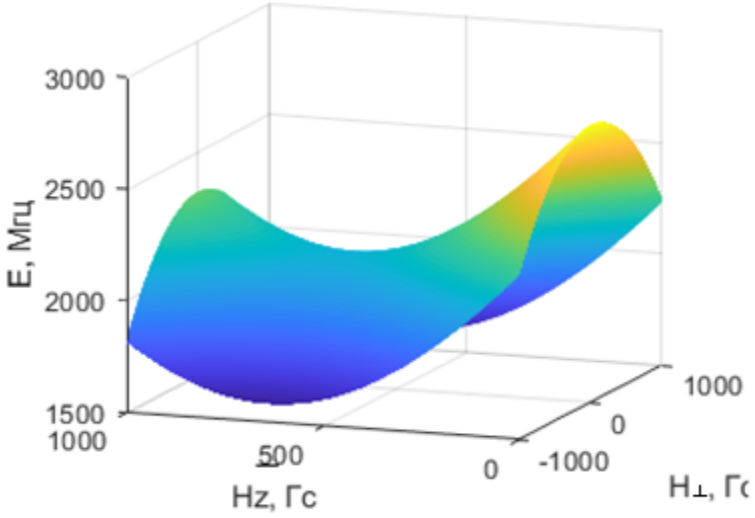
[1] J.P. Sattler, J. Nemarich, PRB 4, 1 (1971)
[2] N. Kukharchyk, et al. (in preparation)
[3] R.M. Macfarlane, et al. PRB 58, 5692 (1998)

Моделирование квантовой памяти в кристалле $^{143}Nd^{3+}:Y^{7}LiF_4$

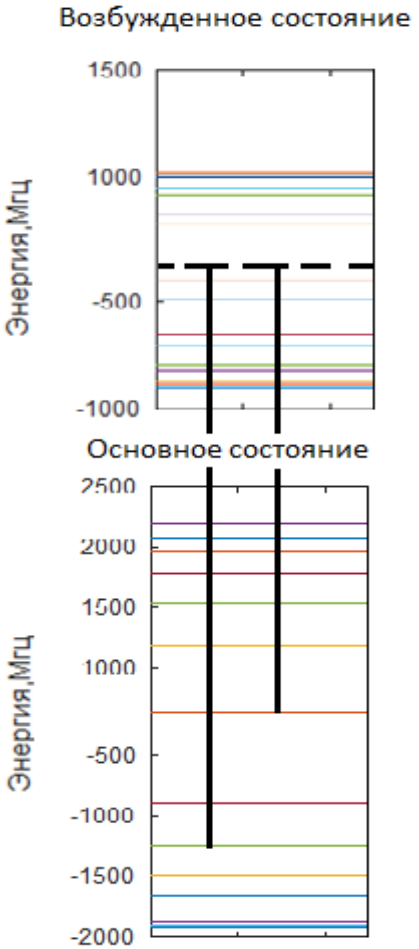


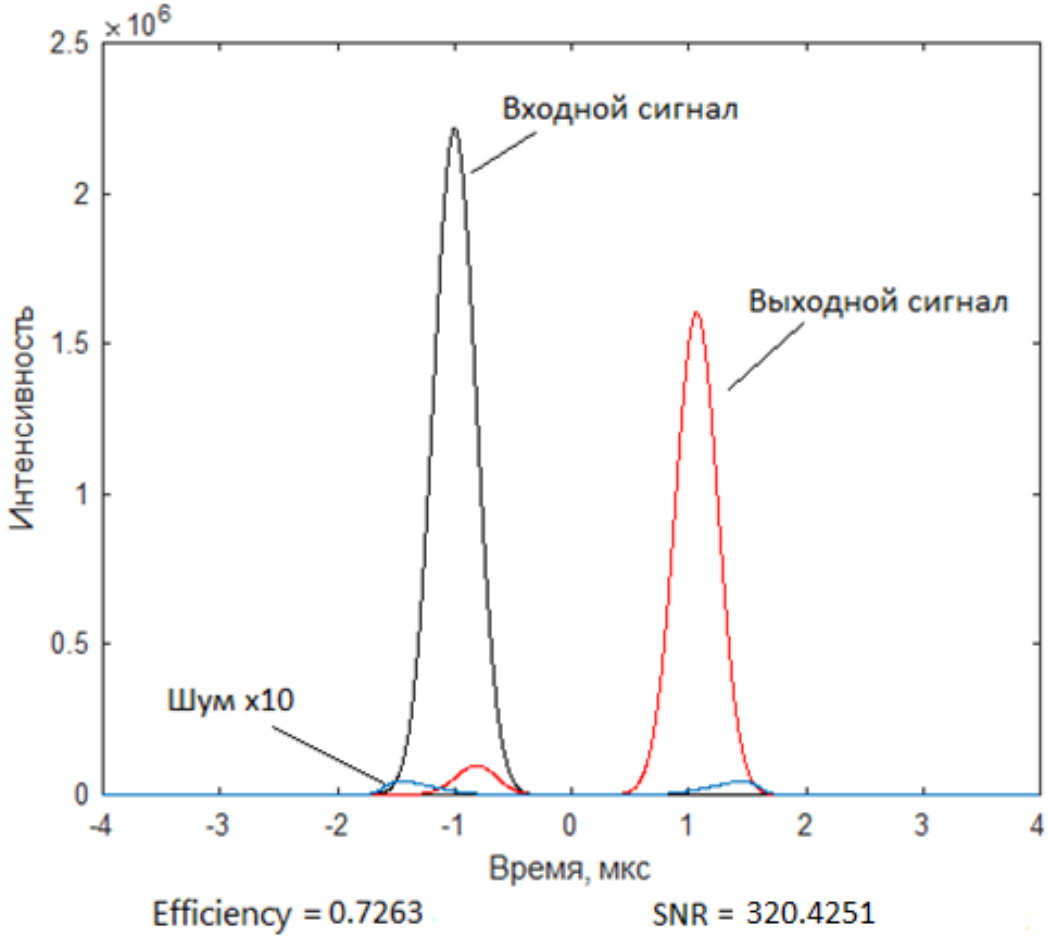




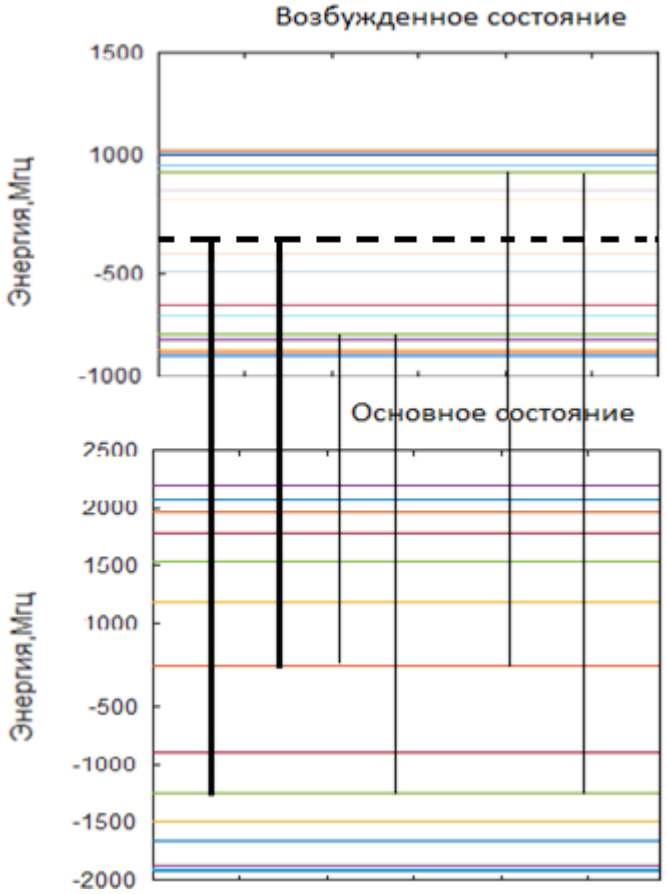


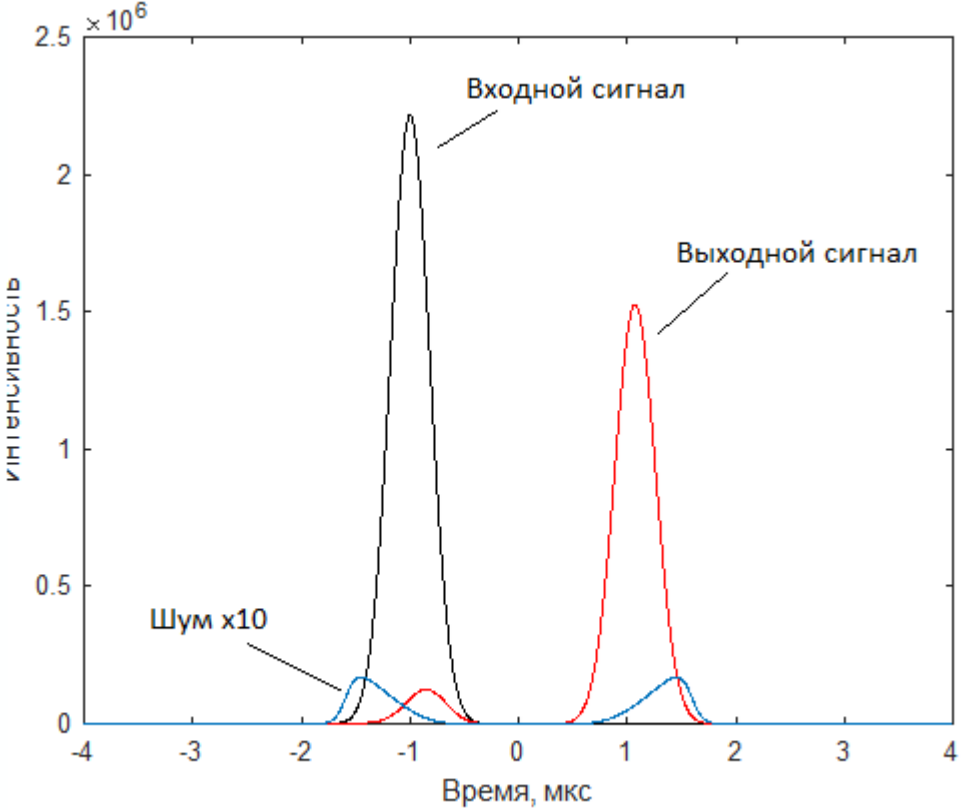
Моделирование квантовой памяти в кристалле $^{143}Nd^{3+}:Y^{7}LiF_4$





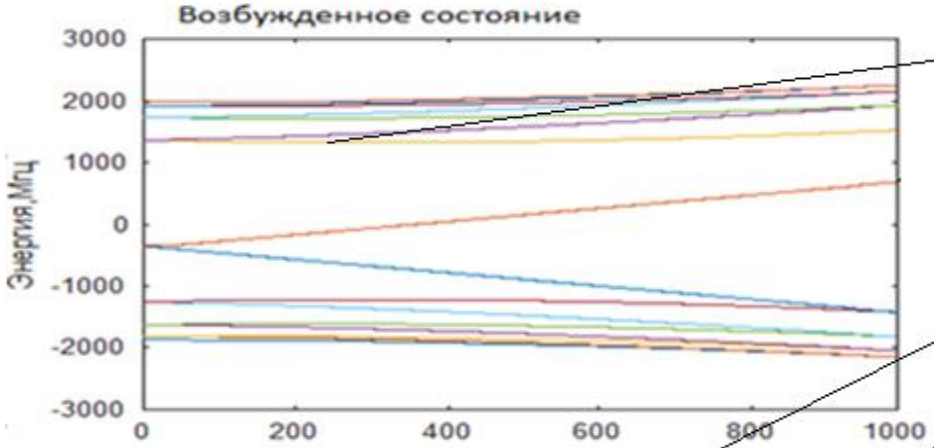
Моделирование квантовой памяти в кристалле $^{143}Nd^{3+}:Y^{7}LiF_4$

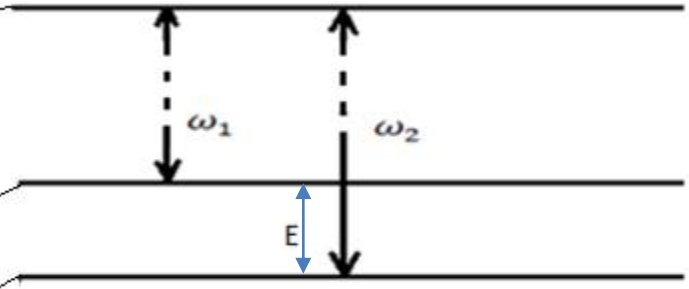


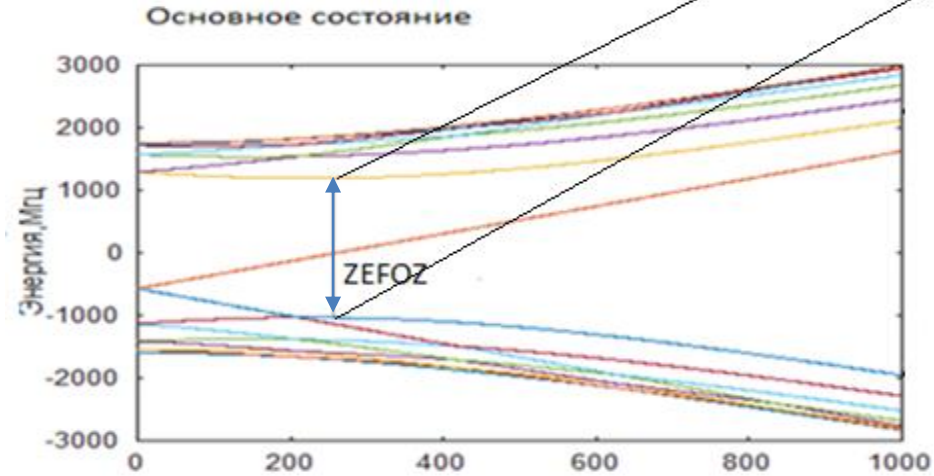


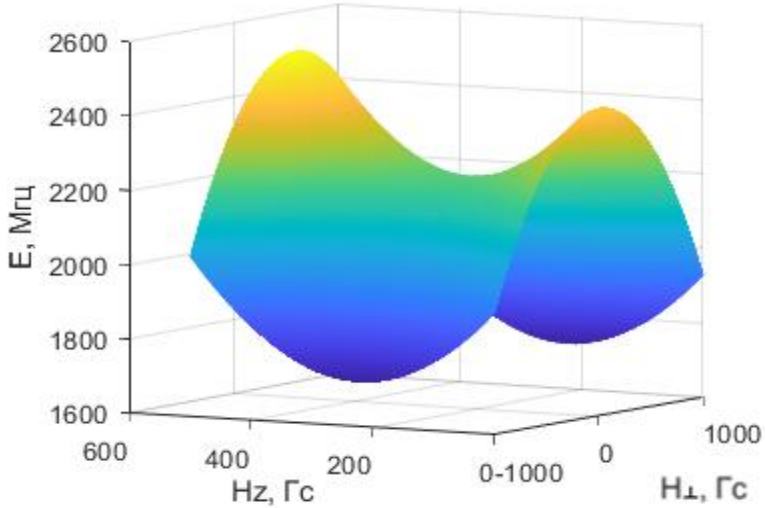
Efficiency = 0.7018 SNR = 81.3942

Моделирование квантовой памяти в кристалле $^{167}Er^{3+}:Y^{7}LiF_4$

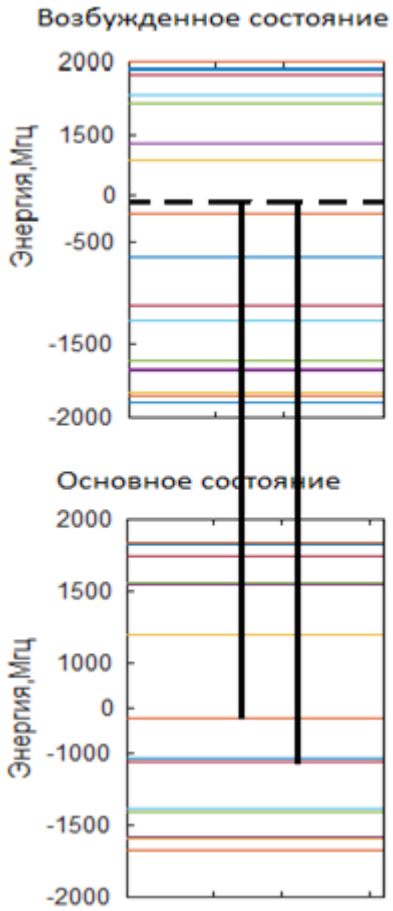


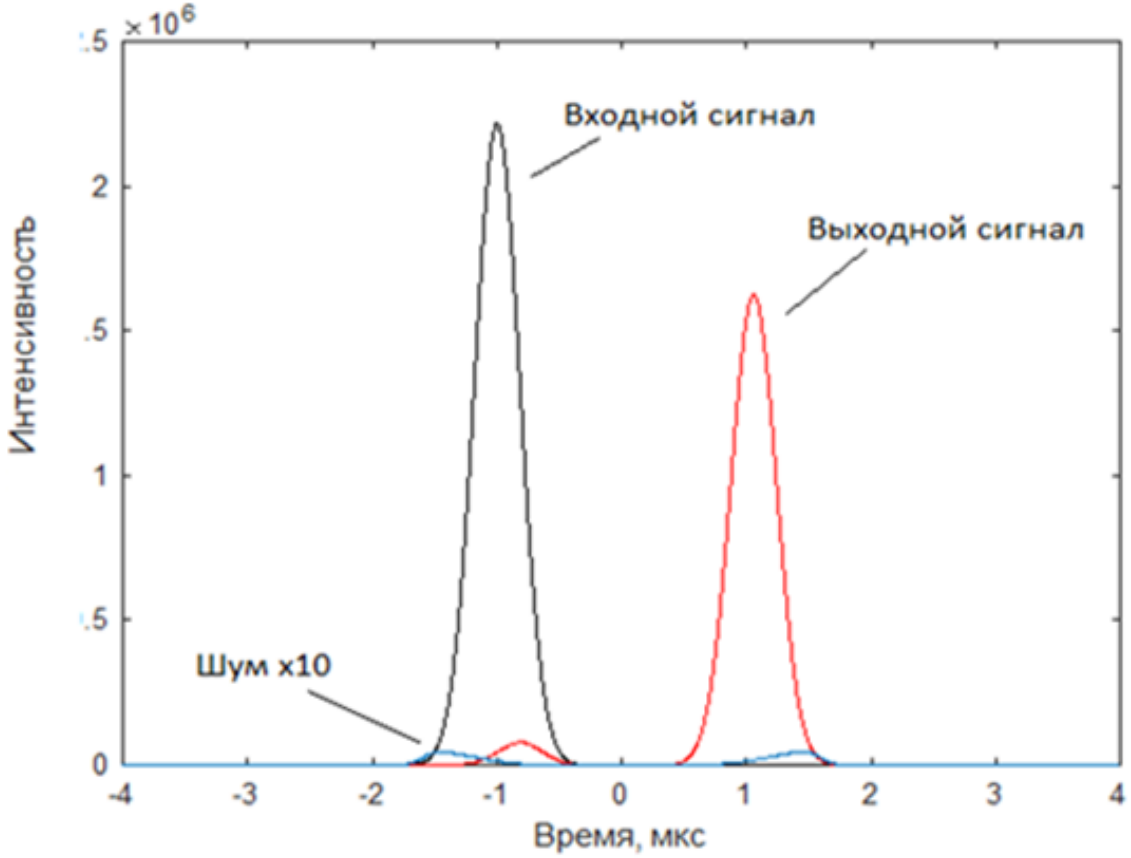






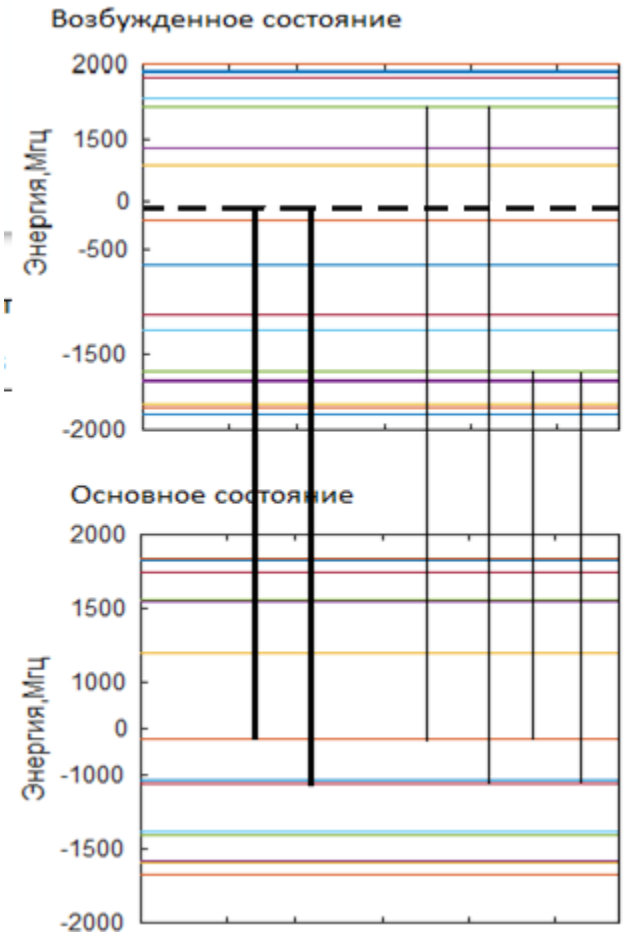
Моделирование квантовой памяти в кристалле $^{167}Er^{3+}:Y^{7}LiF_4$

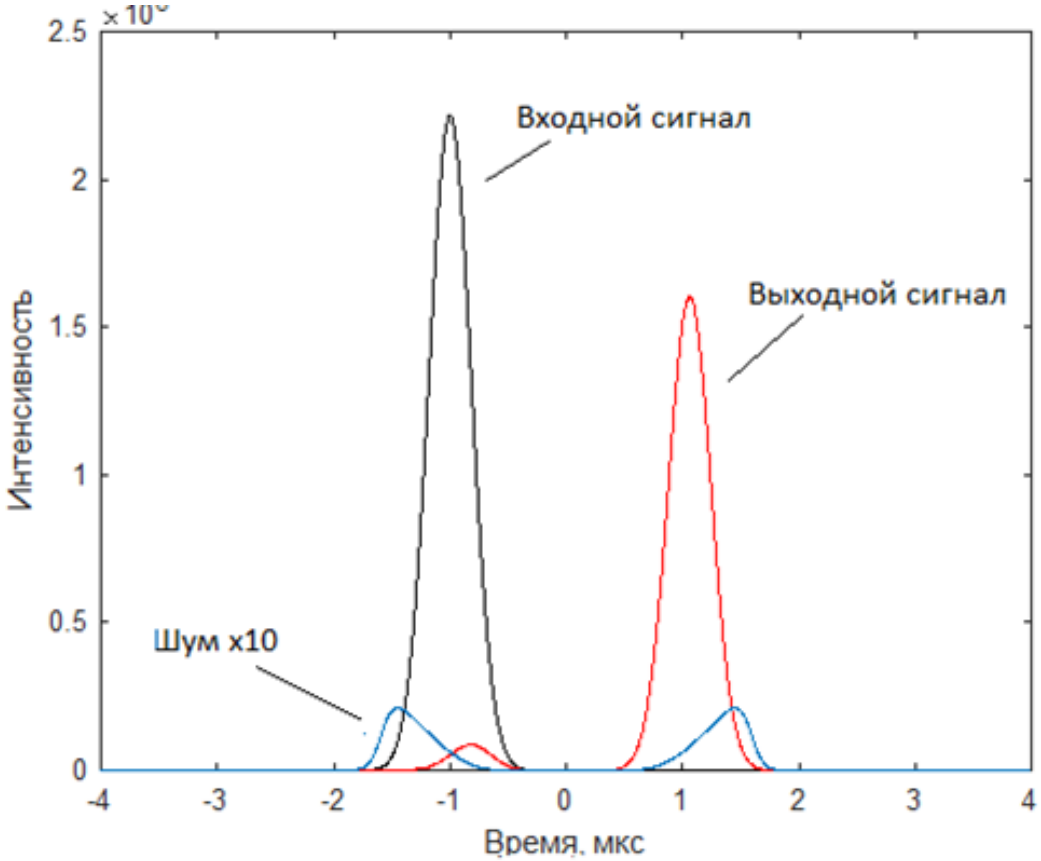




Efficiency = 0.7363 SNR = 342.8274

Моделирование квантовой памяти в кристалле $^{167}Er^{3+}:Y^{7}LiF_4$





Efficiency = 0.7303 SNR =68.4720

Результаты и выводы

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. Развита теоретическая модель, описывающая запись и воспроизведение световых импульсов в режиме нерезонансного рамановского взаимодействия в многоуровневой системе атомов, которая не имеет ортогональной Λ-схемы переходов.

2. С использованием развитой модели сделан анализ соотношения сигнал/шум на выходе оптической квантовой памяти в кристаллах $^{143}Nd^{3+}:Y^{7}LiF_4$ и $^{167}Er^{3+}:Y^{7}LiF_4$.

3. Определены оптимальные условия реализации нерезонансного рамановского взаимодействия в кристаллах $^{143}Nd^{3+}:Y^{7}LiF_4$ и $^{167}Er^{3+}:Y^{7}LiF_4$.

На основании данных результатов можно сделать следующие **выводы:**

1. В обоих рассматриваемых кристаллах $^{143}Nd^{3+}:Y^{7}LiF_4$ и $^{167}Er^{3+}:Y^{7}LiF_4$ возможна эффективная запись и воспроизведение однофотонных импульсов с низким уровнем шума в режиме нерезонансного рамановского взаимодействия, что делает их перспективными материалами для реализации нерезонансной рамановской квантовой памяти.

2. Для достижения низкого уровня шума в многоатомных системах с неортогональной Λ-схемой переходов необходимо снизить число рабочих частиц до уровня порядка 10^5, что возможно при использовании микрорезонаторов.

Список публикаций по теме работы

- А.Д. Бережной, А.А. Калачев. Квантовая электроника, 47, 790 (2017)
- A. Berezhnoi, A. Kalachev, Solid-state Raman quantum memory in whispering gallery mode resonators: signal-to-noise ratio// EPJ Web Conf. Volume 161, 2017 XI International Symposium on Photon Echo and Coherent Spectroscopy (PECS-2017)
- А.Д. Бережной Моделирование квантовой памяти в кристалле $^{143}Nd^{3+}:Y^{7}LiF_{4}$ методом нерезонансного рамановского взаимодействия // Сборник статей XX юбилейной международной молодежной научной школы "Когерентная оптика и оптическая спектроскопия". – Казань: Изд-во Казанского университета, 2016.
- А.Д. Бережной Моделирование квантовой памяти в кристалле $^{143}Nd^{3+}:Y^{7}LiF_{4}$ методом нерезонансного рамановского взаимодействия // Сборник тезисов участников форума «Наука будущего наука молодых». – Нижний Новгород. – 2017. – с 471-472.

Спасибо за внимание!