

Возбуждение спиновых волн фемтосекундными оптическими импульсами

В.И. Белотелов, М.А. Кожаев, А.И. Чернов, И.В. Савочкин, А.К. Звездин

Russian Quantum Center

Lomonosov Moscow State University

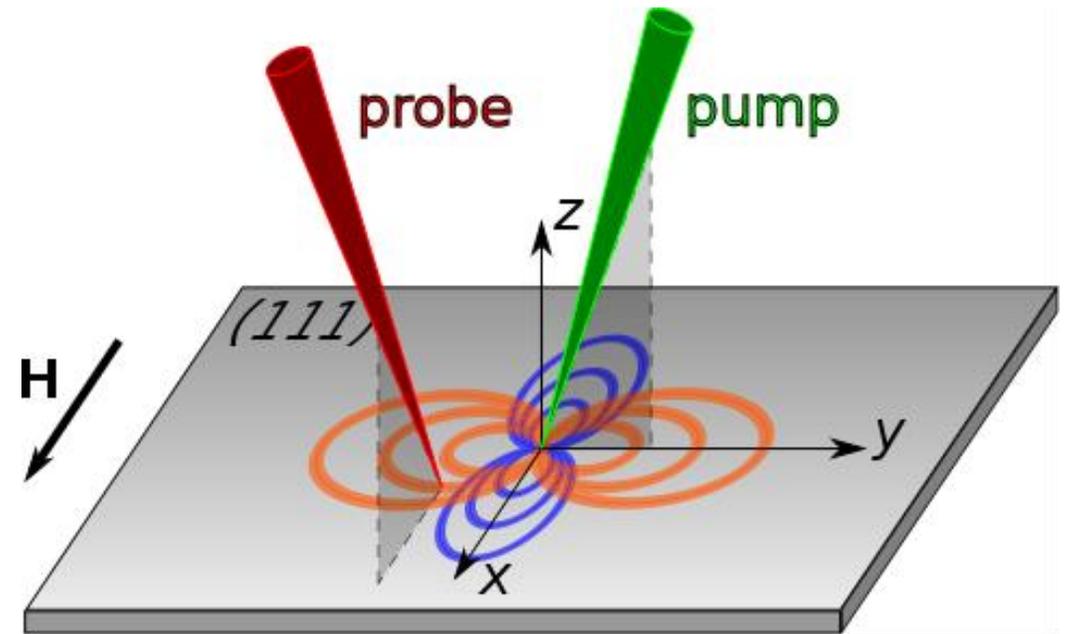
Prokhorov General Physics Institute of RAS

План доклада

- Актуальность
- Сверхбыстрая магнитная динамика
- Методы оптического управления намагниченностью
 - Фотоиндуцированное размагничивание
 - Обратные магнитооптические эффекты
 - Фотомагнитные эффекты
- Особенности оптических методов возбуждения спиновых волн
- Выводы

Актуальность оптических методов

- Сверхбыстрое управление намагниченностью (~ 100 фс)
- Возможность полностью оптических накачки-детектирования
- Изменение расстояния источник-детектор без изменения установки/образца



Сверхбыстрая магнитная динамика

- **Оптическое управление намагниченностью:** Van der Ziel, J. P., et al. *Physical Review Letters*, 15(5), 190(1965).
- Сверхбыстрая магнитная динамика: Beaurepaire, E., et al. *Physical review letters*, 76(22), 4250 (1984).
- Оптическое возбуждение спиновых волн: Van Kampen, M., et al. *Physical review letters*, 88(22), 227201 (2002).
- Оптическое нетермическое возбуждение спиновых волн: Kimel, A. V., et al. *Nature*, 435(7042), 655 (2005).



FIG. 1. Top: oscilloscope traces of dM/dt obtained with right and left circularly polarized light for a 3.1% Eu^{2+} -doped CaF_2 crystal at 4.21°K. Bottom: monitor of the laser intensity.

Сверхбыстрая магнитная динамика

- Оптическое управление намагниченностью: Van der Ziel, J. P., et al. *Physical Review Letters*, 15(5), 190(1965).
- **Сверхбыстрая магнитная динамика:** Beaurepaire, E., et al. *Physical review letters*, 76(22), 4250 (1984).
- Оптическое возбуждение спиновых волн: Van Kampen, M., et al. *Physical review letters*, 88(22), 227201 (2002).
- Оптическое нетермическое возбуждение спиновых волн: Kimel, A. V., et al. *Nature*, 435(7042), 655 (2005).

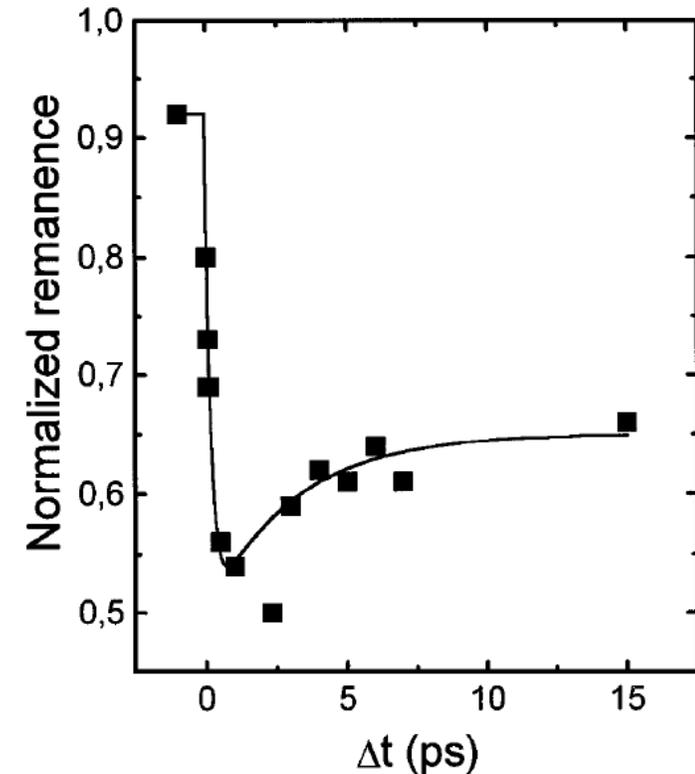


FIG. 2. Transient remanent longitudinal MOKE signal of a Ni(20 nm)/MgF₂(100 nm) film for 7 mJ cm⁻² pump fluence. The signal is normalized to the signal measured in the absence of pump beam. The line is a guide to the eye.

Сверхбыстрая магнитная динамика

- Оптическое управление намагниченностью: Van der Ziel, J. P., et al. *Physical Review Letters*, 15(5), 190(1965).
- Сверхбыстрая магнитная динамика: Beaurepaire, E., et al. *Physical review letters*, 76(22), 4250 (1984).
- **Оптическое возбуждение спиновых волн**: Van Kampen, M., et al. *Physical review letters*, 88(22), 227201 (2002).
- Оптическое нетермическое возбуждение спиновых волн: Kimmel, A. V., et al. *Nature*, 435(7042), 655 (2005).

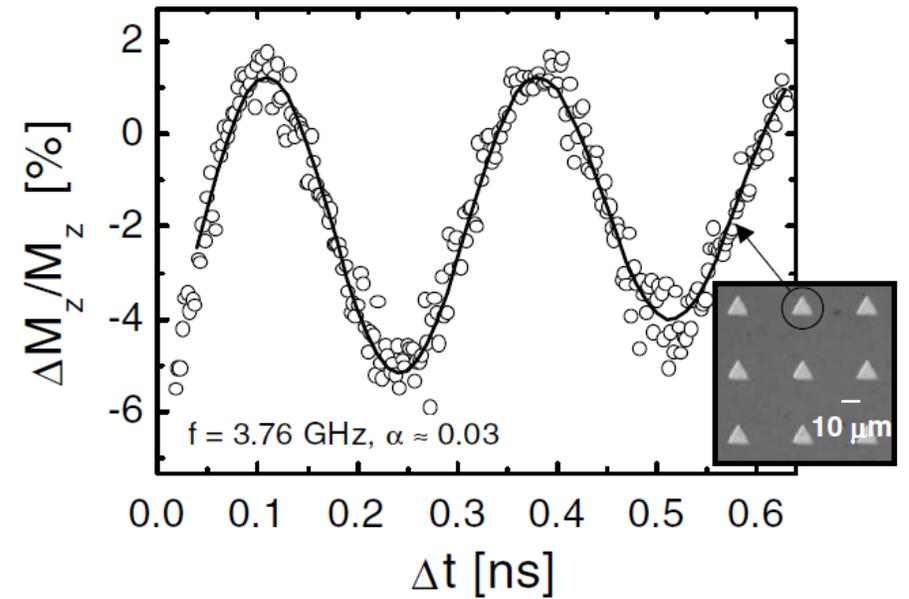


FIG. 3. Measurement on an individually addressed $10 \mu\text{m}$ permalloy element. Inset: optical microscope image of the array.

Сверхбыстрая магнитная динамика

- Оптическое управление намагниченностью: Van der Ziel, J. P., et al. *Physical Review Letters*, 15(5), 190(1965).
- Сверхбыстрая магнитная динамика: Beaurepaire, E., et al. *Physical review letters*, 76(22), 4250 (1984).
- Оптическое возбуждение спиновых волн: Van Kampen, M., et al. *Physical review letters*, 88(22), 227201 (2002).
- **Оптическое нетермическое возбуждение спиновых волн:** Kimel, A. V., et al. *Nature*, 435(7042), 655 (2005).

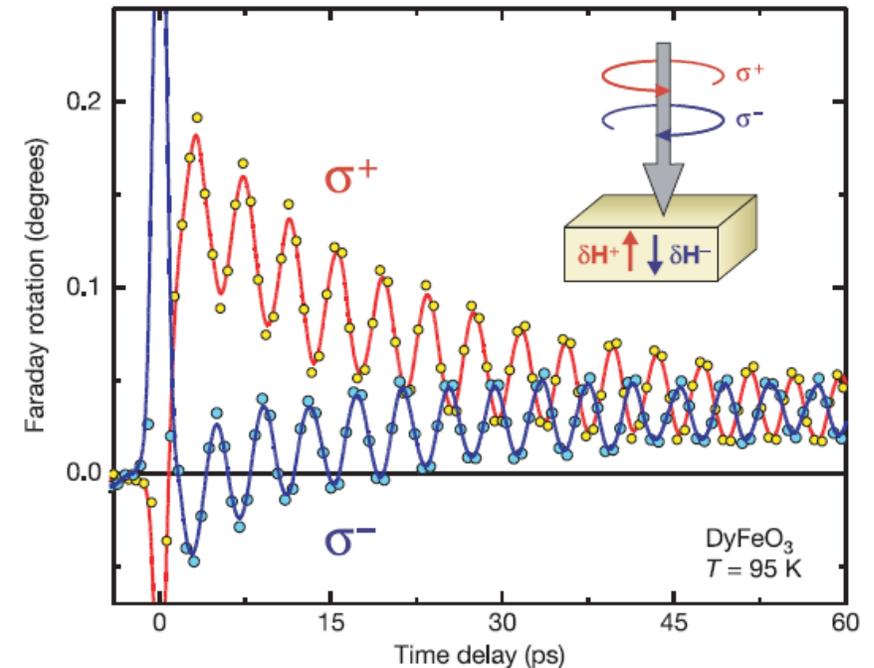
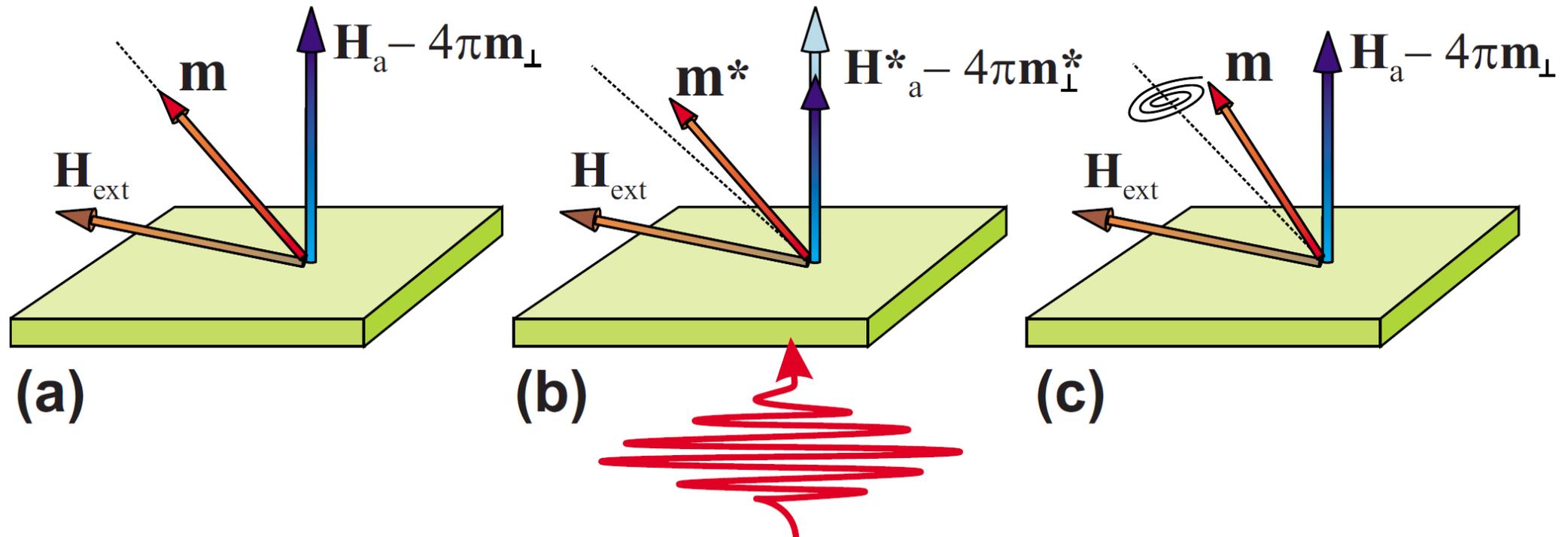


Figure 1 | Magnetic excitations in DyFeO₃ probed by the magneto-optical Faraday effect. Two processes can be distinguished: (1) instantaneous changes of the Faraday effect due to the photoexcitation of Fe ions and relaxation back to the high spin ground state $S = 5/2$; (2) oscillations of the Fe spins around their equilibrium direction with an approximately 5 ps period. The circularly polarized pumps of opposite helicities excite oscillations of opposite phase. Inset shows the geometry of the experiment. Vectors δH^+ and δH^- represent the effective magnetic fields induced by right-handed σ^+ and left-handed σ^- circularly polarized pumps, respectively.

Методы: фотоиндуцированное размагничивание



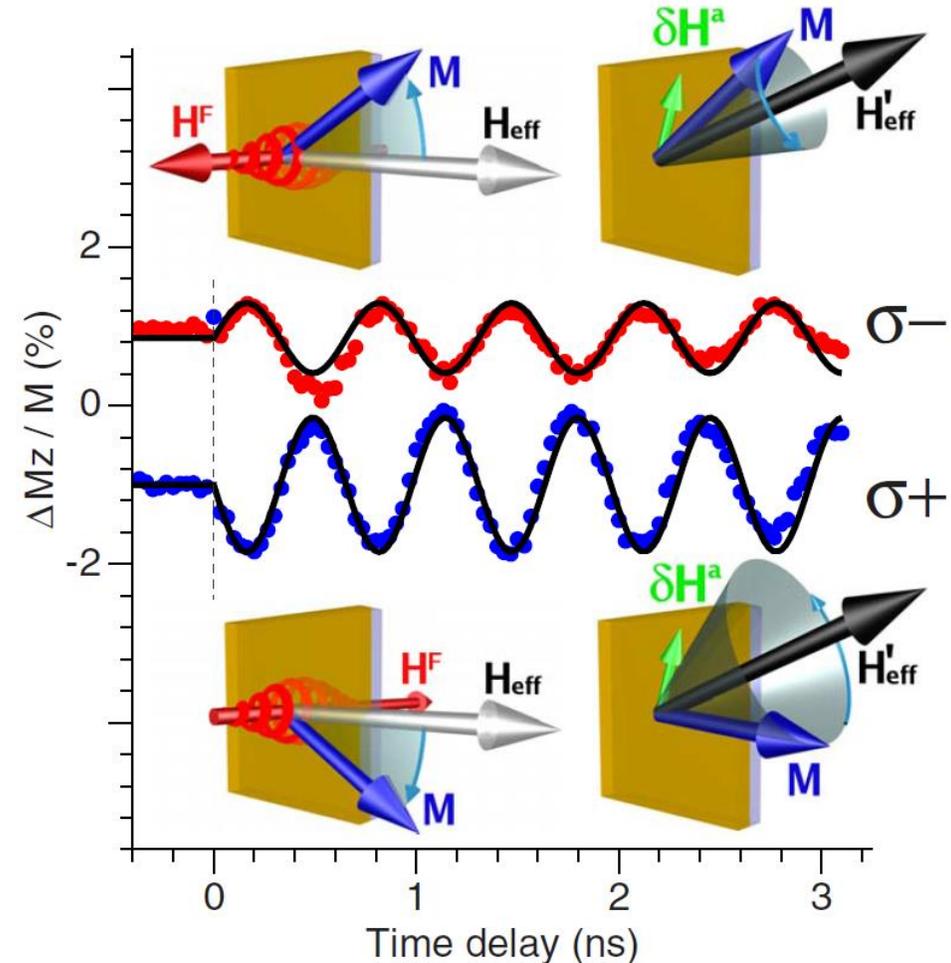
Kirilyuk, et al. *Reviews of Modern Physics*, 82(3), 2731 (2010).

Методы: обратные магнитооптические эффекты

- Обратный эффект Фарадея
- Обратный эффект Керра
- Обратный эффект Коттона-Мутона

$$\Delta F \propto [\mathbf{E} \times \mathbf{E}^*] \cdot \mathbf{M}$$

$$H_{\text{eff}} = -\partial \Delta F / \partial \mathbf{M} \propto [\mathbf{E} \times \mathbf{E}^*]$$



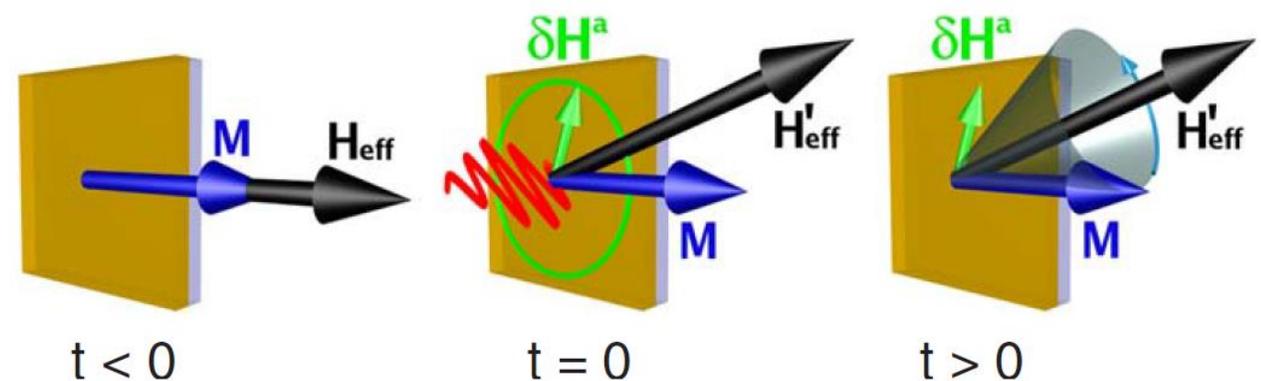
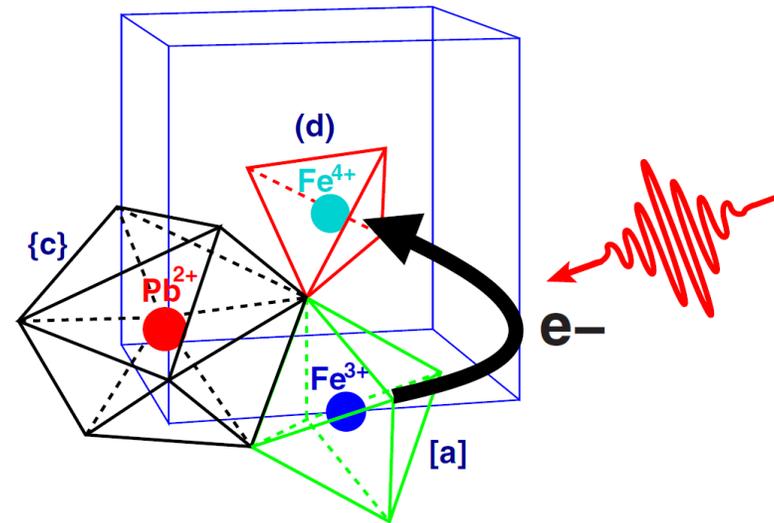
Kirilyuk, et al. *Reviews of Modern Physics*, 82(3), 2731 (2010).

Методы: фотомагнитные эффекты

Оптически меняется магнитная анизотропия кристалла

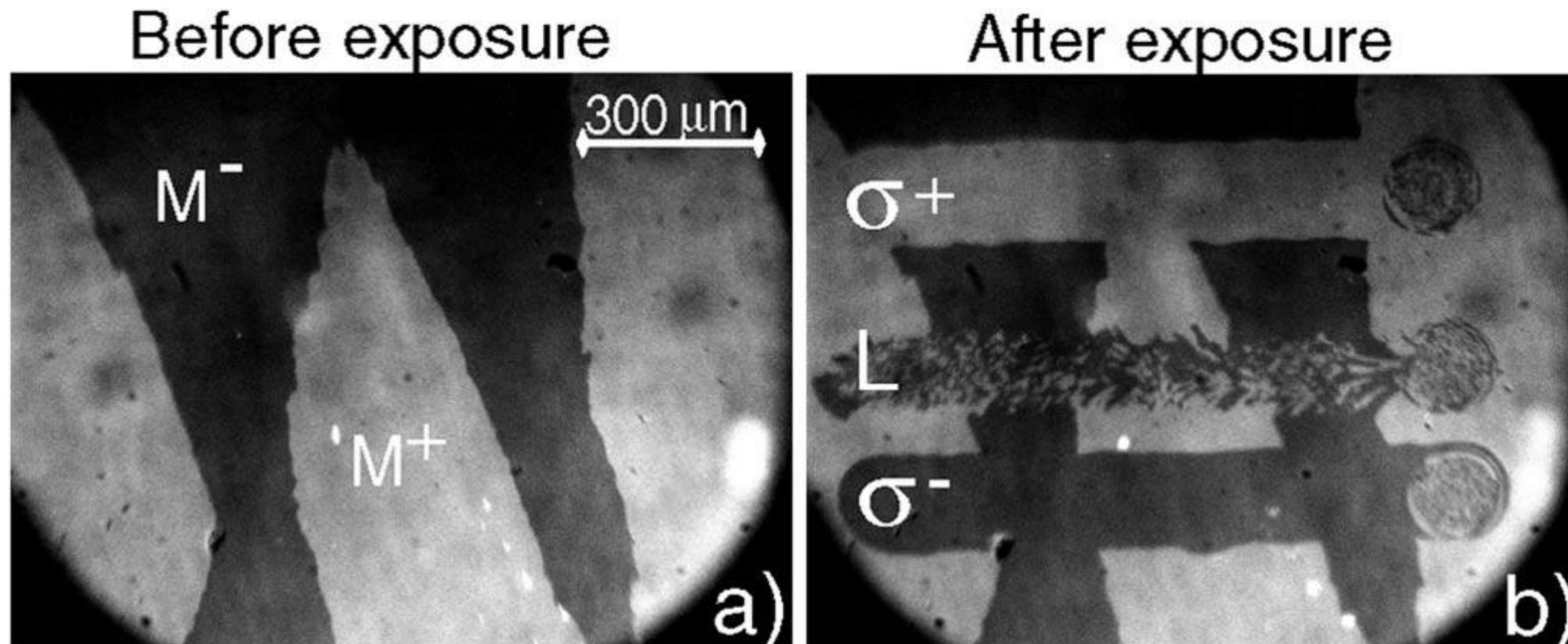
Пример: $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}:\text{Pb}$

- Pb – акцептор электронов
- Возникают дырки на ионах железа ($\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{4+}$)
- Фотовозбуждение меняет местами соседние Fe^{3+} и Fe^{4+}
- Меняется симметрия кристалла



Kirilyuk, et al. *Reviews of Modern Physics*, 82(3), 2731 (2010).

Возможности оптической накачки: магнитная запись



*Магнитный круговой дихроизм;

*Ниже точки Кюри

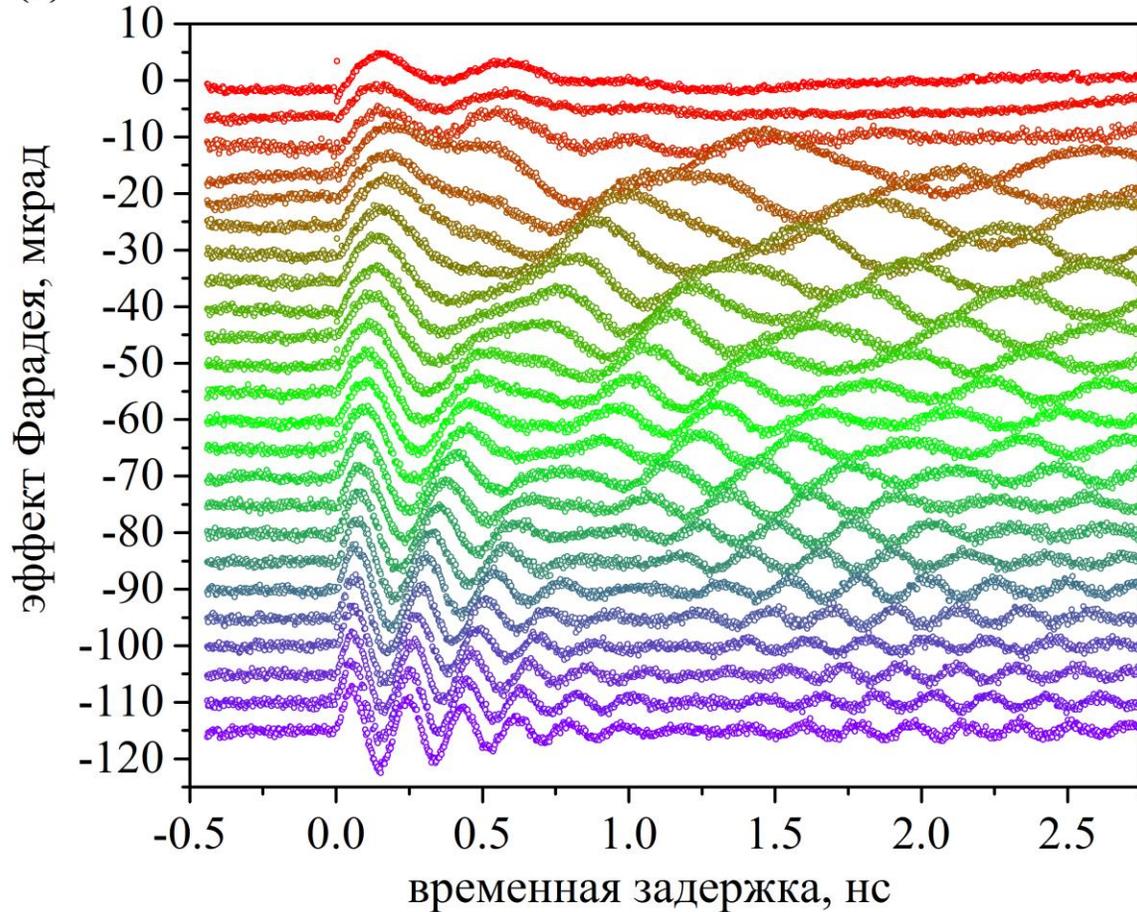
Stanciu, C. D., et al. *Physical review letters*, 99(4), 047601 (2007).

*11.7 mJ/cm²

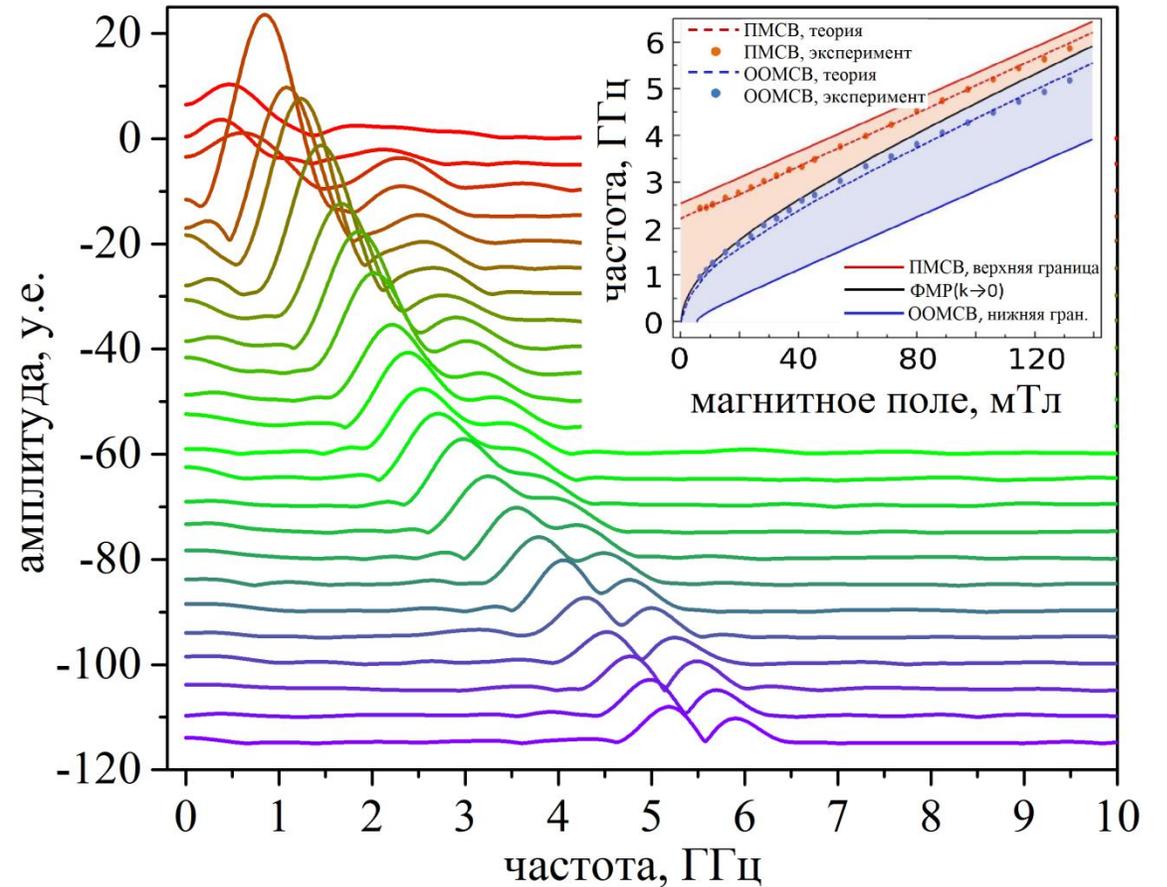
Возможности оптической накачки: одновременное возбуждение разных

МДГ

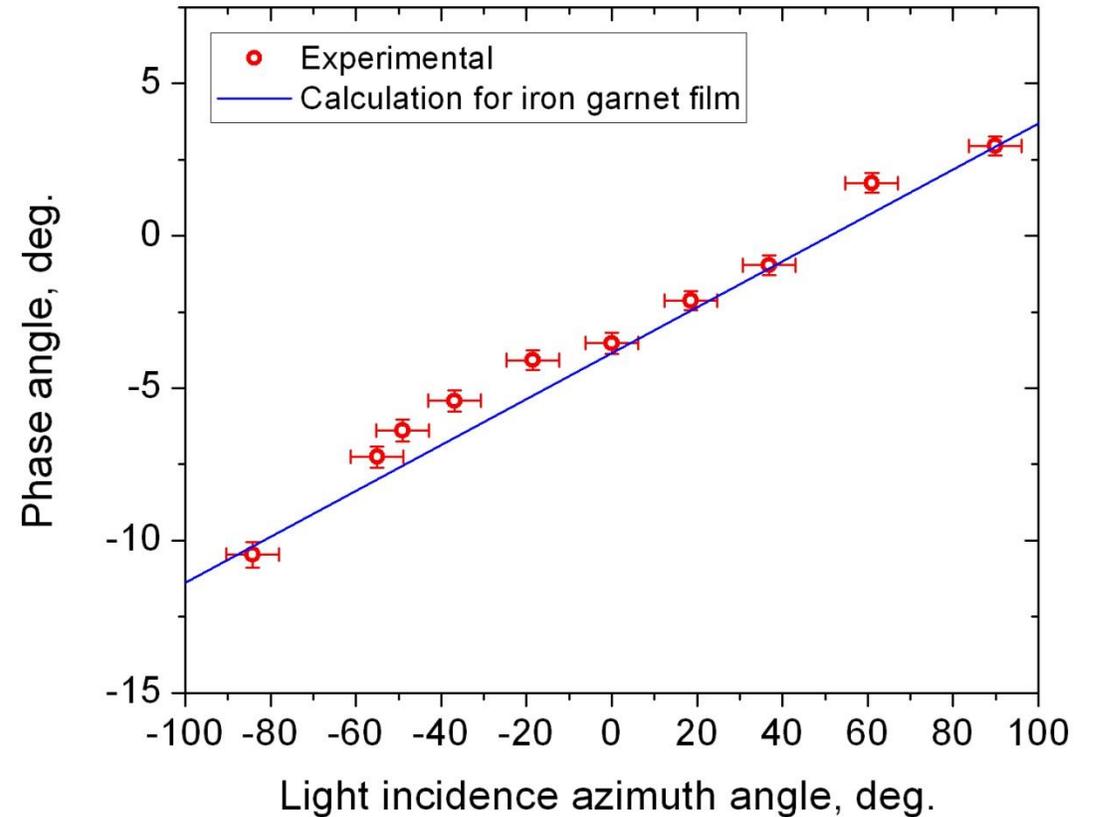
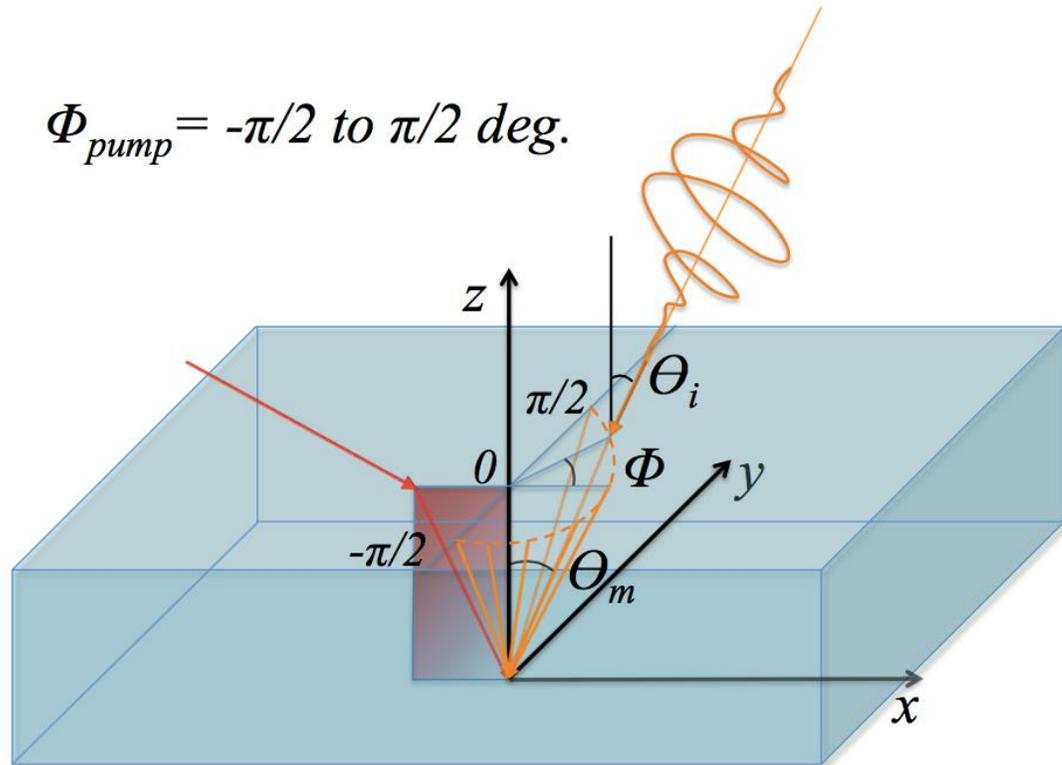
(а)



(б)

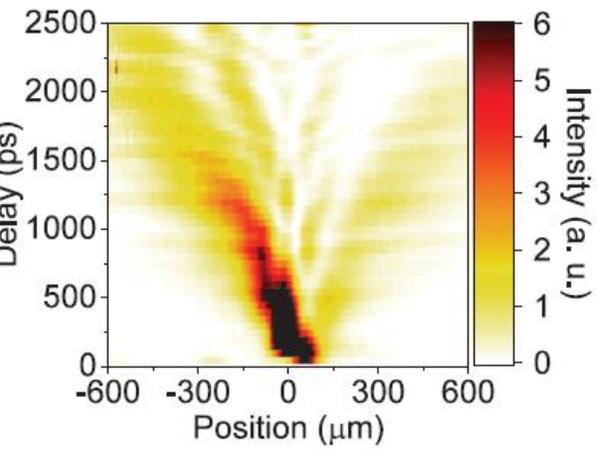
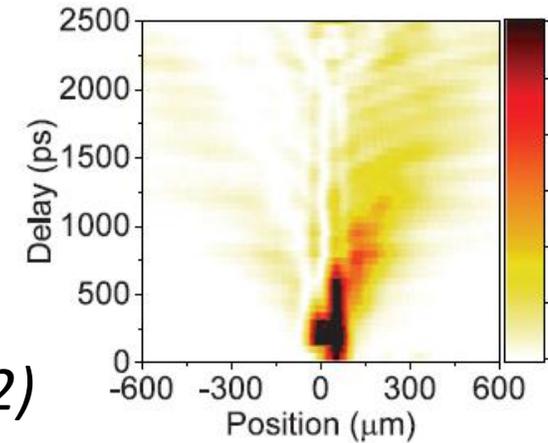
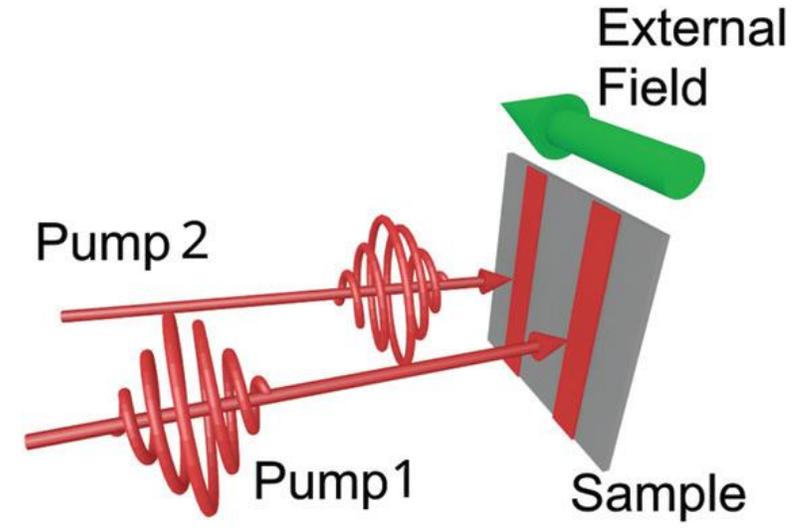
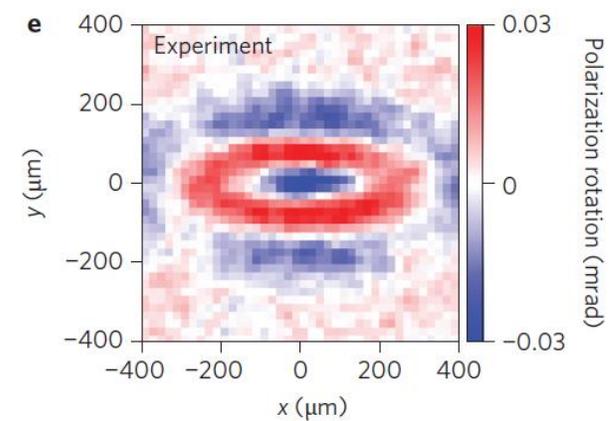
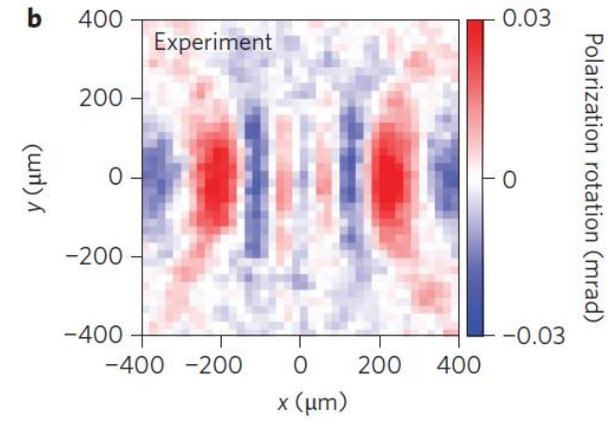
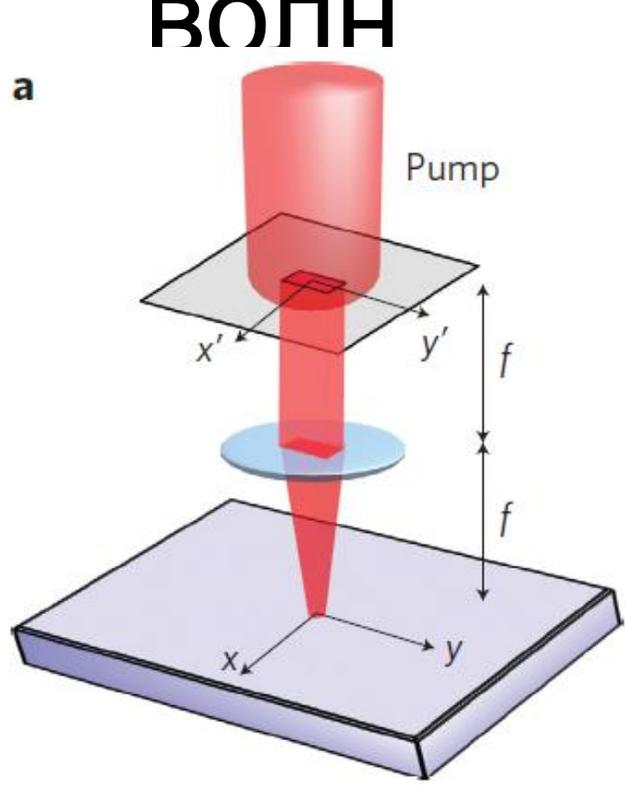


Возможности оптической накачки: управление начальной фазой волны



A.I. Chernov, et al. (to be published)

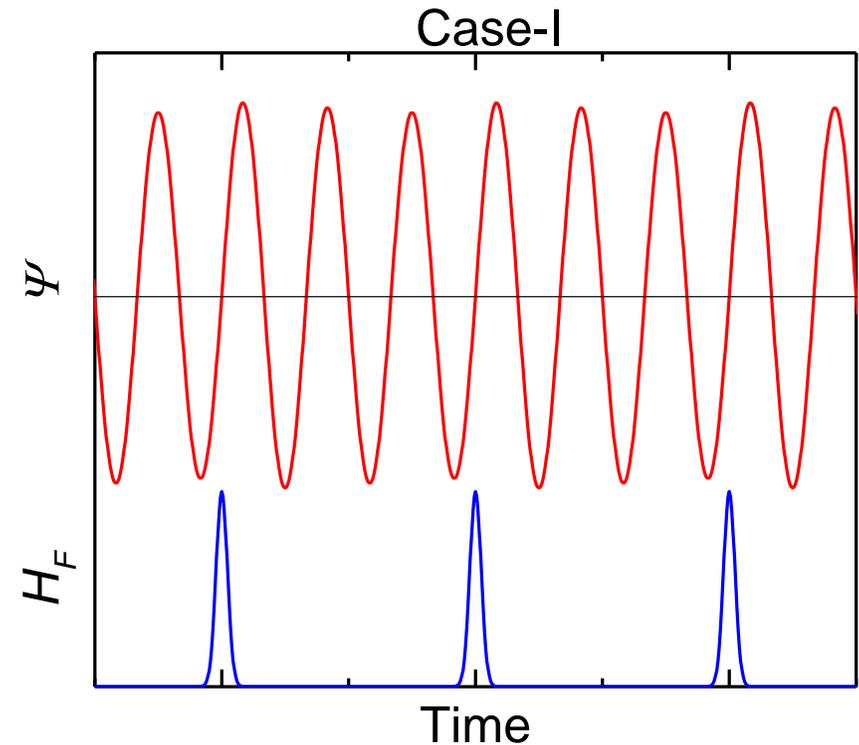
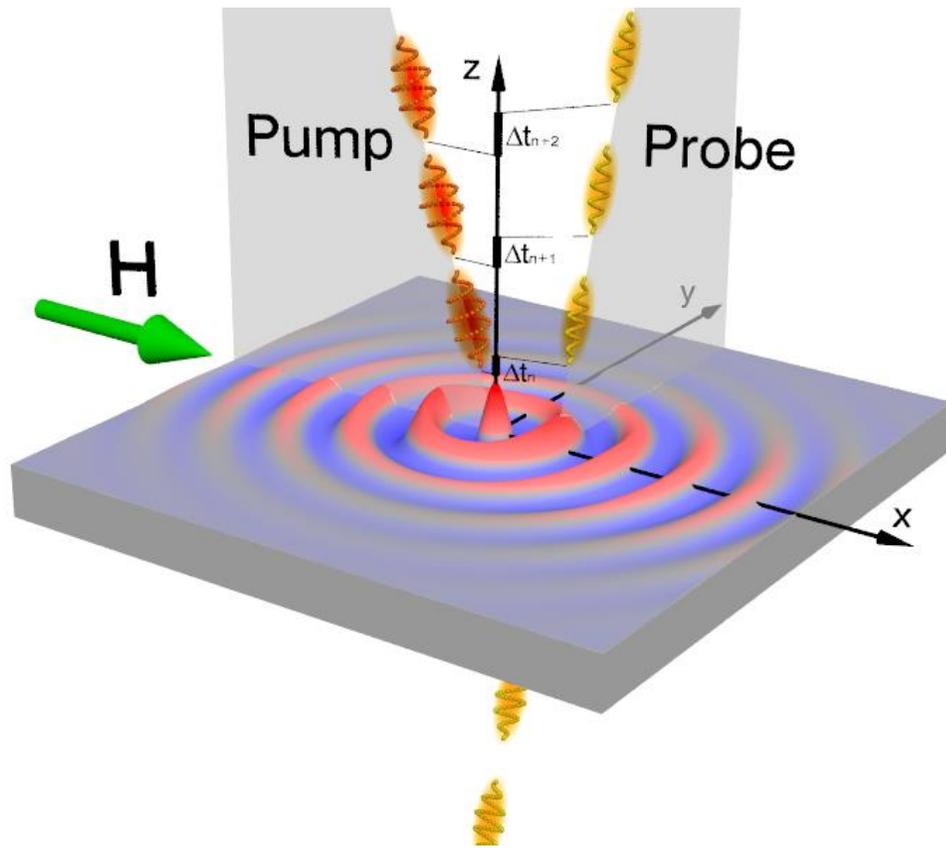
Возможности оптической накачки: управление направлением спиновых ВОЛН



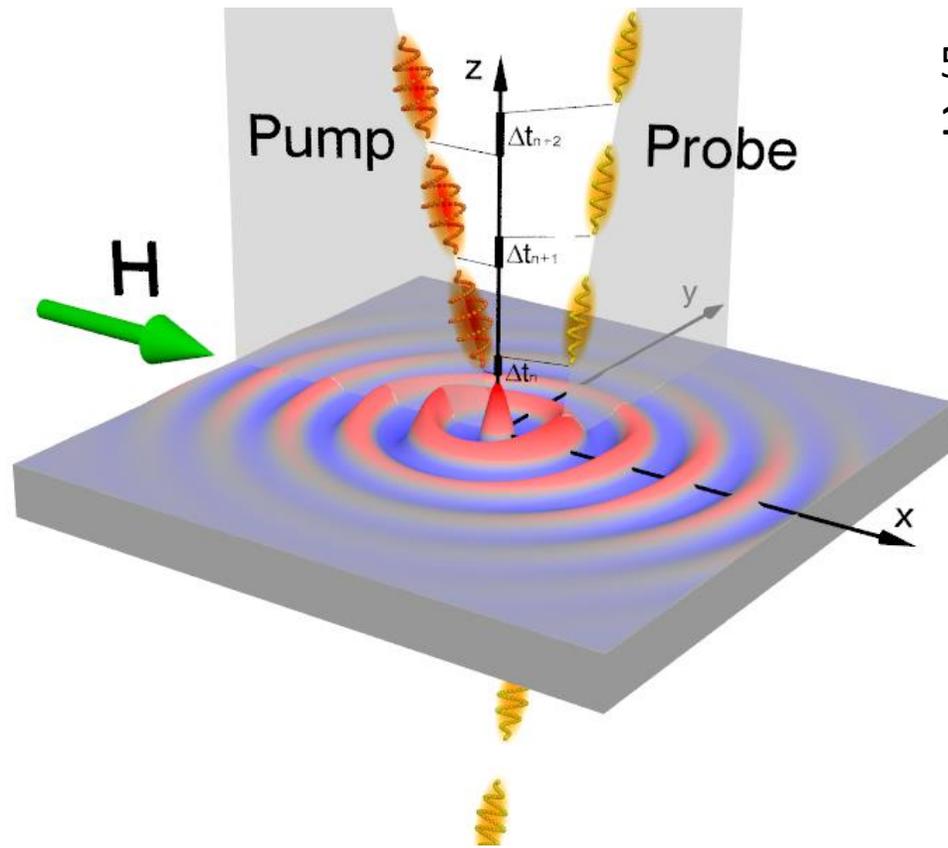
T. Satoh, et al., Nature Photonics 6 (10), 662 (2012)

I. Yoshimine, et al., Europhysics Letters 117 (6), 67001 (2017)

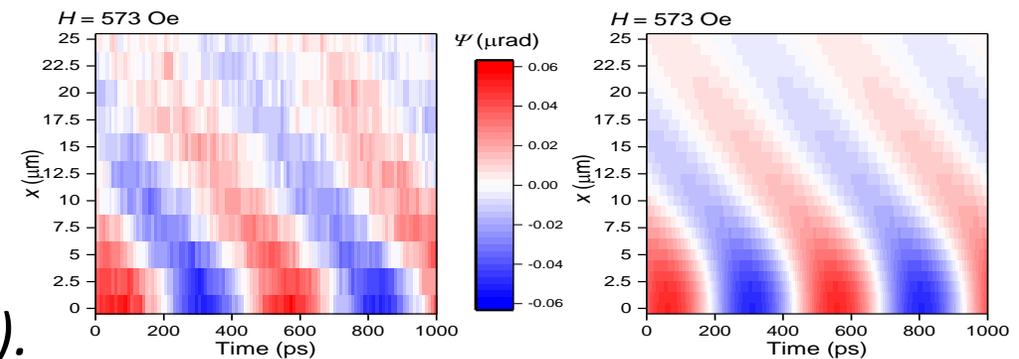
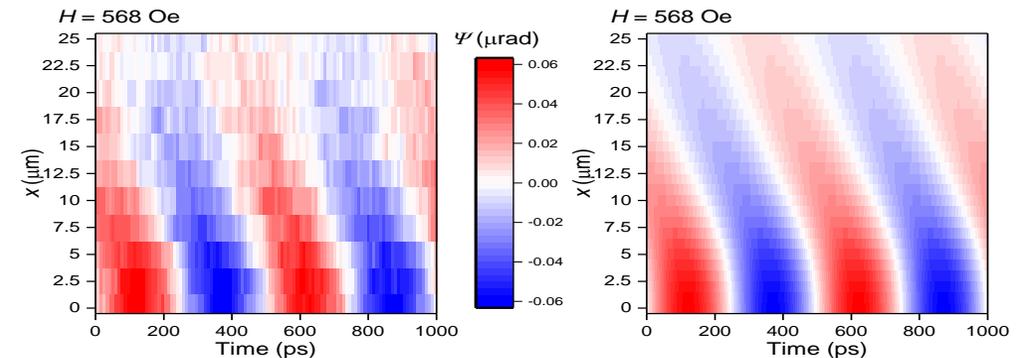
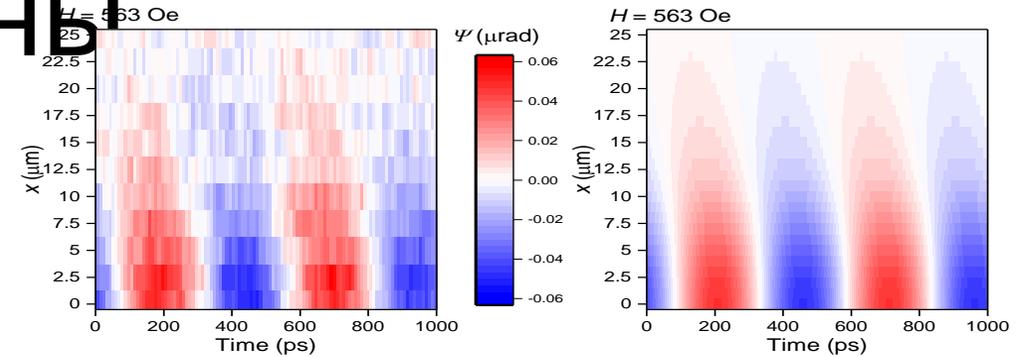
Возможности оптической накачки: управление длиной волны



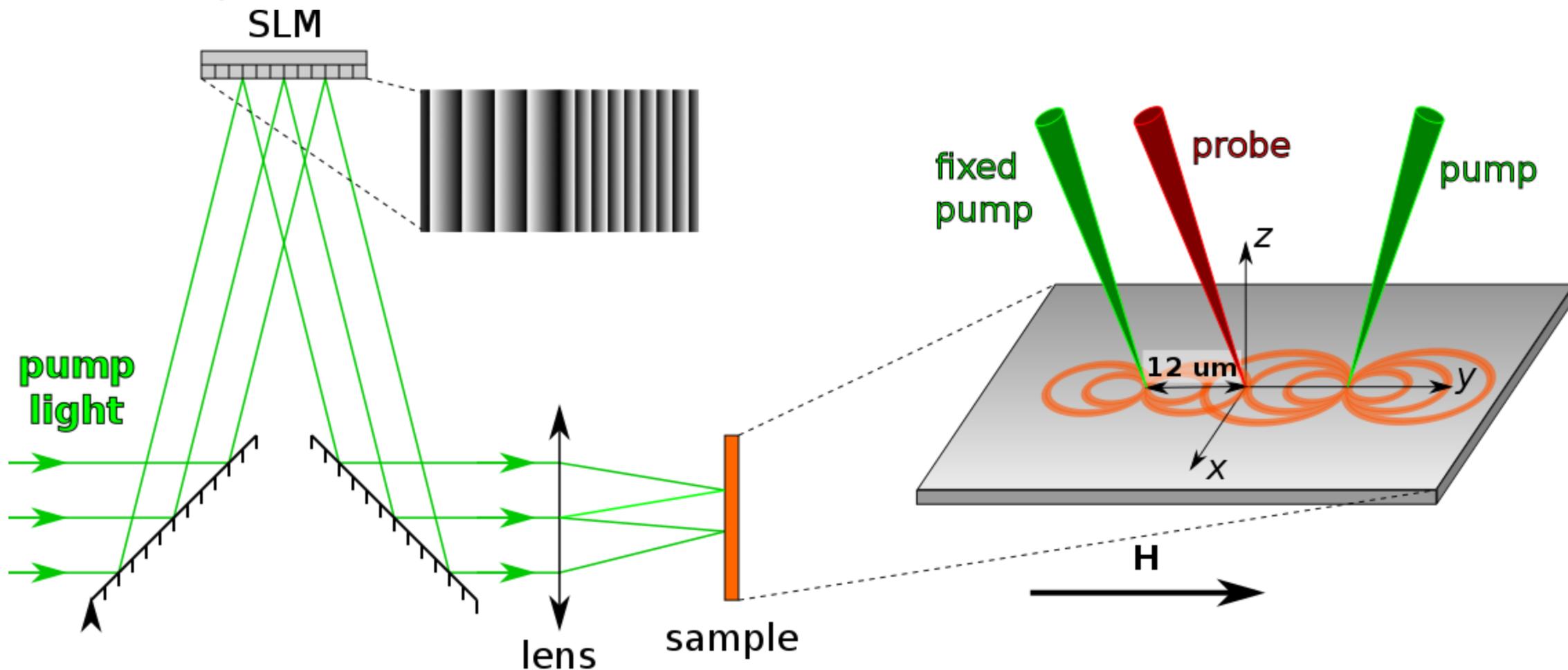
Возможности оптической накачки: управление длиной волны



563 \rightarrow 573 Э
15 \rightarrow 290 мкм

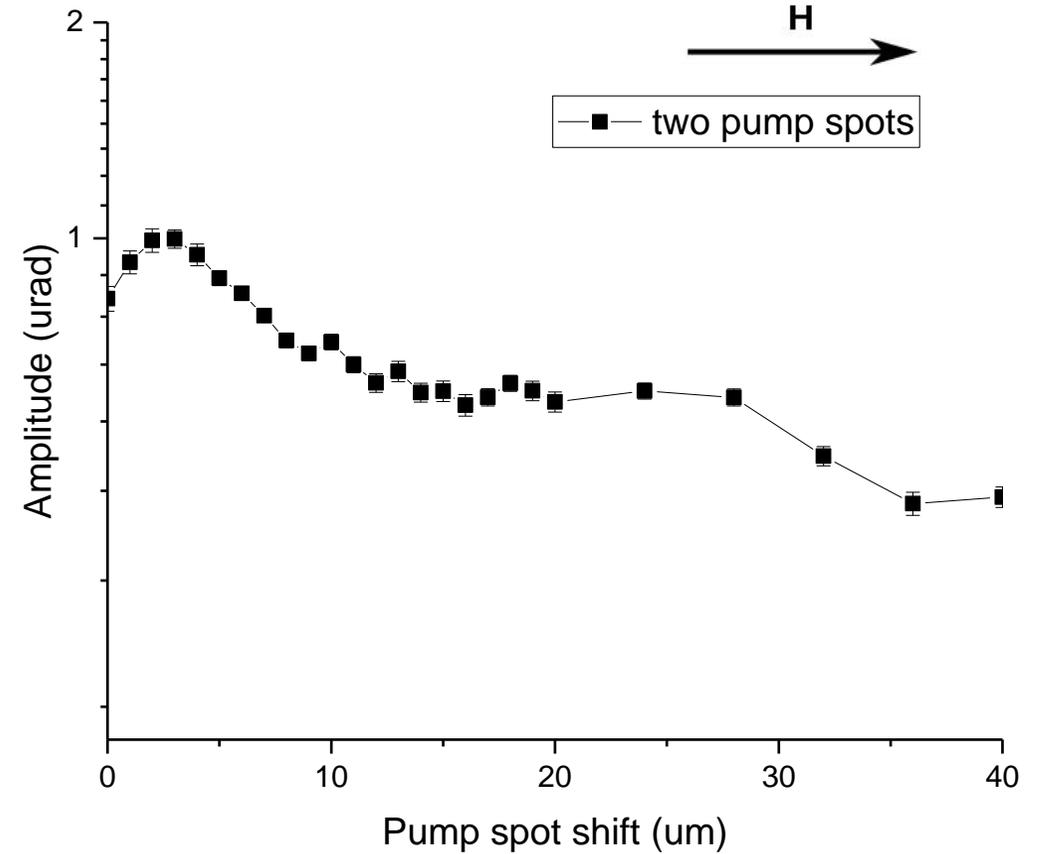
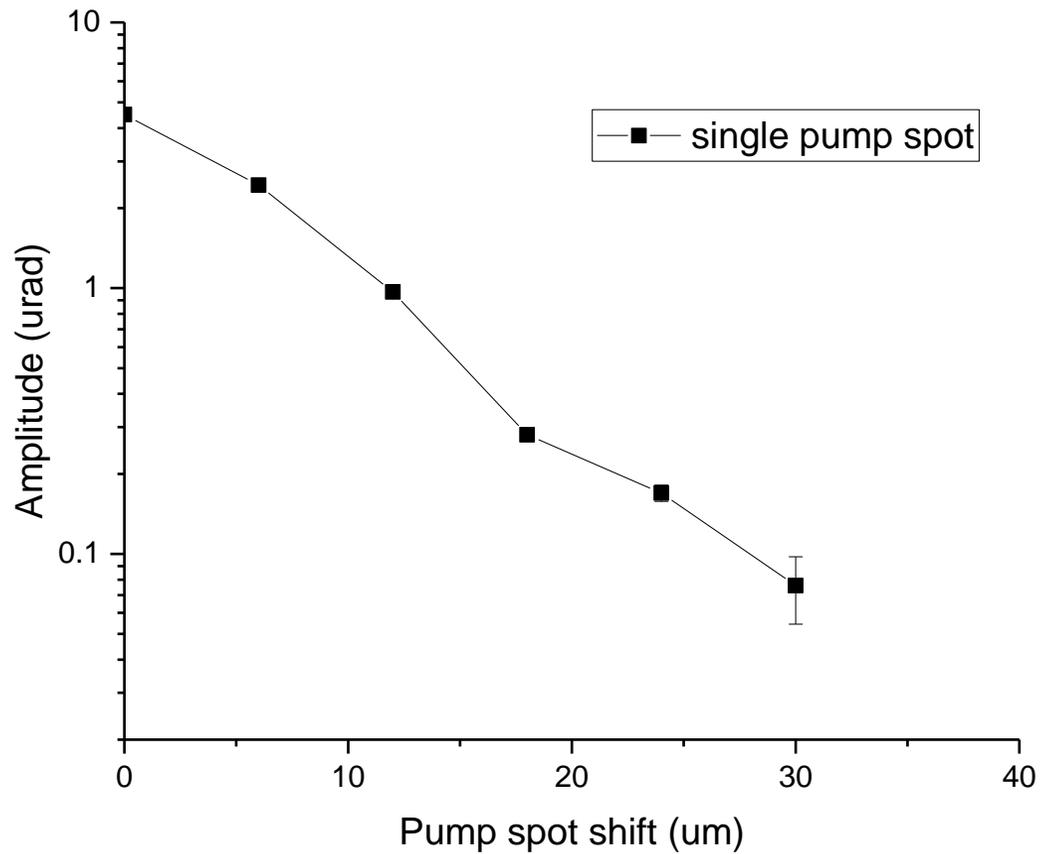
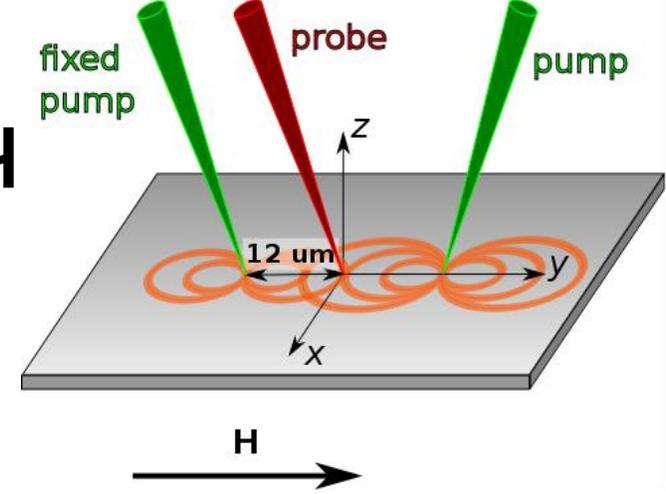


Возможности оптической накачки: возбуждение сложной картины СВ



I.V. Savochkin, et al. (to be published)

Возможности оптической накачки возбуждение сложной картины



Выводы

- Оптическая техника управления намагниченностью является быстрой (~ 100 фс) и самодостаточной (полностью оптическая накачка-зондирование)
- Оптическим путем возможно перемагничивать материал
- Возможно возбуждать спиновые волны с контролируемыми фазой и направлением
- Возможно одномоментное возбуждение сложного распределения (картины) спиновых волн. Не требуется перестройка оптической схемы или изменение образца

Спасибо за внимание