

## Название организации, род деятельности:

- Название организации: Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черноголовка, Московская область
- Род деятельности: физик-теоретик: электродинамика, квантовая оптика, оптоволокно, наноплазмоника

## ФИО и e-mail адрес:

Вергелес Сергей Сергеевич, [vergeles@gmail.com](mailto:vergeles@gmail.com)

## Описание работы:

### ● В состав коллектива входят:

- Вергелес Сергей Сергеевич (ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, Московский физико-технический институт (ГУ), проводит вычисления на кластере)
- Белан Сергей Александрович, аспирант (Московский физико-технический институт (ГУ), ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, соавтор работ, не выполняет непосредственно работы на кластере),
- Парфеньев Владимир Михайлович, аспирант, (ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, Московский физико-технический институт (ГУ), соавтор работ, не выполняет непосредственно работы на кластере),
- Сарычев Андрей Карлович, д.ф.-м.н., (ИТПЭ РАН, Московский физико-технический институт (ГУ), соавтор работ, не выполняет непосредственно работы на кластере)

### ● Постановка задачи (что именно должно быть сделано, какие результаты должны быть получены):

**Работа 1.** Оптимизация параметров головки волновода с целью получить локализацию электромагнитной волны на масштабе одной ферро-магнитной гранулы на поверхности жесткого диска

**Работа 2.** Исследование распространения связанных мод в плотной периодической цепочке металлических гранул малого размера. Дифракции плоской волны на таких структурах.

**Работа 3.** Исследование влияния шероховатостей поверхности на оптический отклик метал-диэлектрических структур

### ● Современное состояние проблемы, с ссылками на источники, предпочтительно доступные в сети Интернет (существующие работы, ваши или других коллективов, на которые вы будете опираться).

**Работа 1.** Большинство работ, связанных с темой локализации световой волны на суб-волновом масштабе, предполагают использование металлических частиц для фокусировки электромагнитной волны. Тем не менее, этот способ может быть неприемлем в силу больших омических потерь в металлических гранулах, вызывающих большое выделение тепла в малых объемах. В работах [1-3]

рассматривается возможность фокусировать свет с помощью волновода, выполненного только из прозрачного диэлектрика. Тем не менее, в этих работах результат оказывается не очень сильным: не удаётся сфокусировать свет до расстояний, заметно меньших длины волны.

[1] Kato, S., Chonan, S., & Aoki, T. (2014). High-numerical-aperture micro-lensed tip on an air-clad optical fiber. *Optics Letters*, 39(4), 773.

[2] Rogers, E. T. F., & Zheludev, N. I. (2013). Optical super-oscillations: sub-wavelength light focusing and super-resolution imaging. *Journal of Optics*, 15(9), 094008.

[3] Wiederhecker, G. S., Cordeiro, C. M. B., Couny, F., Benabid, F., Maier, S. A., Knight, J. C., Cruz, C. H. B. and Fragnito, H. L. (2007) Field enhancement within an optical fibre with a subwavelength air core. *Nature Photonics*, 1(2), 115–118.

**Работа 2.** В недавних работах [4,5] было продемонстрировано численным моделированием и экспериментальной проверкой возможность создания тонких стурктурированных плёнок из оптически плотного диэлектрика, которые изменяют направление прошедшей через них плоской волны. Принцип действия таких плёнок основан на законах дифракции: на периодической решётке плоская волна расщепляется на несколько волн, соответствующих главным дифракционным максимумам; если же сделать так, что элементарные периоды дифракционной решётки излучают неизотропно, то возможно подавить все главные максимумы кроме одного. Результатом и будет «поворот света» при прохождении через плёнку. Толщина которой меньше длины волны. В работах [6,7] этот же эффект был продемонстрирован на периодических металл-диэлектрических пленках. В данном случае плёнки имели значительно меньшую толщину относительно длины волны, поскольку сильный отклик элементарного периода дифракционной решётки достигался за счёт возбуждения поверхностного плазмонного резонанса на металлических гранулах плёнки. Следует отметить, что эти гранулы находились на большом расстоянии друг от друга, так что в главном приближении плазмонные резонансы на каждой грануле можно считать независимыми друг от друга.

Плёнки с описанными оптическими свойствами представляют интерес с точки зрения проектирования оптических устройств микро-размеров, поскольку они позволяют манипулировать направлением светового луча, имея при этом суб-микронные размеры. Однако все вышеописанные плёнки не позволяют динамически изменять свои свойства с тем, чтобы угол отклонения направления распространения светового луча мог изменяться и контролироваться внешним воздействием. Эта возможность значительно повысит ценность таких световых манипуляторов.

В работе [8] мы показали, что плотноупакованные металл-диэлектрические решётки имеют особенности в характеристиках пропускания и отражения, узкие в частотном диапазоне. Мы планируем изучить свойства таких решёток в качестве манипуляторов направлением распространения светового луча. Далее мы рассчитываем, что в силу сильного отклика характеристик пропускания такой решётки по отношению к материальным параметрам, нам удастся предложить

способ через внешнее воздействие динамически изменять параметры пропускания таких решёток.

[4] Aimin Wu, Hao Li, Junjie Du, Xingjie Ni, Ziliang Ye, Yuan Wang, Zhen Sheng, Shichang Zou, Fuwan Gan, Xiang Zhang, and Xi Wang (2015) Experimental Demonstration of In-Plane Negative-Angle Refraction with an Array of Silicon Nanoposts. *Nanoletters* 15, p. 2055.

[5] Junjie Du, Zhifang Lin, S.T. Chui, Wanli Lu, Hao Li, Aimin Wu, Zhen Sheng, Jian Zi, Xi Wang, Shichang Zou, and Fuwan Gan. (2011) "Optical Beam Steering Based on the Symmetry of Resonant Modes of Nanoparticles", *Physical Review Letters* 106, 203903

[6] Nanfang Yu, P. Genevet, M.A. Kats<sup>1</sup>, F. Aieta, J.-Ph. Tetienne, F. Capasso, Z. Gaburro. (2011) Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction. *Science* 334, 333.

[7] Xingjie Ni, N.K. Emani, A.V. Kildishev, A. Boltasseva, V.M. Shalaev. (2012) Broadband Light Bending with Plasmonic Nanoantennas. *Science* 335, p. 427.

[8] A. Ivanov, A. Shalygin, V. Lebedev, P. Vorobev, S. Vergeles, A.K. Sarychev, (2012) Plasmonic extraordinary transmittance in array of metal nanorods, *Appl. Phys. A* 107(1), 17-21.

**Работа 3.** В экспериментальной работе [9] было, в частности, продемонстрировано, что металлические включения приводят к резкому (7-ми кратному) усилению силы накачки в окружающей диэлектрической матрице. Физическая природа этого эффекта до сих пор не объяснена. Варианты механизмов этого усиления, такие как химическое взаимодействие молекул красителя и металла или взаимодействие молекул красителя с локализованными поверхностными плазмонными модами, были отброшены вследствие того, что первый эффект – незначительный, а второй уже был учтён в численном счёте [9]. В работе [10] было показано, что даже относительно малая шероховатость металлической поверхности может привести к существенному увеличению поглощения. Мы планируем исследовать этот же механизм (он не был учтён в численном счёте работы [9]), но только в присутствии оптически-активной среды.

[9] S. Xiao, V. Drachev, A. Kildishev, X. Ni, U. Chettiar, H.-K. Yuan, and V. Shalaev, *Nature* 466, 735 (2010)

[10] Sun-Kyung Kim et al., *Appl. Phys. Lett.* 98 011109 (2011)

- **Научная новизна, практическая значимость работы** (для чего она выполняется, в чём смысл и практическая / потенциальная польза).

**Работа 1.** В нашем проекте мы разработали концепцию волновода со специальным наконечником, полностью выполненным из прозрачного диэлектрика, позволяющего концентрировать свет на малых расстояниях. Это имеет практический интерес для процесса записи на жёстких дисках при сопровождении теплового нагрева ферромагнитных гранул, см. [11],

[11] Kryder, M. H., Gage, E. C., McDaniel, T. W., Challenger, W. A., Rottmayer, R. E., Hsia, Y.-T., Erden, M. F. (2008). Heat assisted magnetic recording. Proceedings of the IEEE, 96(11), 1810.

**Работа 2.** Мы планируем изучить дифракцию световых волн на плотноупакованных периодических металл-диэлектрических решётках. Поверхностные плазмонные резонансы в таких решётках имеют более высокую добротность. Вследствие этого, увеличивается чувствительность таких решёток ко внешним воздействиям. Мы рассчитываем, что эта чувствительность позволит изменять угол отклонения светового луча, если частота падающего света будет близка к резонансной частоте решётки.

**Работа 3.** Существует ряд экспериментов с металл-диэлектрическими структурами, в которых в диэлектрик встроена оптически-активная среда. В этих экспериментах наблюдается аномально большое усиление, которое до сих пор не объяснено. Если нам удастся показать, что исследуемый нами механизм действительно приводит к усилению, то это откроет возможность манипулировать силой эффекта для оптимизации оптических свойств композитных материалов.

- **В чём заключается необходимость использования комплекса ИВЦ** (доступ к лицензиям / ПО, вычислительные ресурсы, другое...)

Необходимость заключается в том, что трёх-мерный расчёт распространения электромагнитной волны требует большого объёма оперативной памяти, который недоступен на обычном PC

- **Полученные результаты.**

**Работа 1.** Проведена оптимизация форма волновода и его оконечника с целью суб-волновой концентрации световой волны. В том числе, проведён численный счёт, в котором учитывается существование подложки, структура которой была взята близкой к структуре подложки жёсткого диска. Было показано, что такая подложка имеет сильный отклик на электромагнитное поле, так что её существование сильно изменяет распределение электромагнитного поля. Была проведена дополнительная оптимизация с учётом этого влияния.

**Работа 2.** Исследован закон дисперсии связанных мод в плотной цепочке металлических цилиндров. По данной теме опубликована работа [12].

**Работа 3.** Эта деятельность пока ещё только планируется.

## Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

**Работа 1.** В процессе оптимизации оконечника волновода, концентрирующего световую волну на суб-волновом масштабе, мы уже достигли желаемых результатов, в частности, благодаря результатам численного счёта, выполненного на расчётном кластере НГУ. В настоящий момент производится Работа по подготовке публикации, для чего могут понадобиться некоторые дополнительные расчёты.

**Работа 2.** При исследовании распространения связанных мод в плотной цепочке металлических гранул малого размера мы построили качественную и

количественную теорию, описывающую распространение (закон дисперсии) связанных электромагнитных волны в цепочке цилиндров. Эта задача имеет некоторую простоту для аналитического исследования в силу своей фактически в двумерной геометрии. Тем не менее, оставался вопрос о том, насколько адекватно наша теория описывает реальные цепочки вытянутых гранул, если они имеют конечную длину. При проведении численного трёх-мерного счёта в среде COMSOL на вычислительном кластере НГУ удалось показать, что при достаточно умеренных отношениях длинной стороны металлической гранулы к её поперечному размеру наша аналитическая теория хорошо приближает закон дисперсии для трёх-мерной задачи

**Работа 3.** Эта деятельность пока ещё только планируется.

**Перечень публикаций, содержащих результаты работы (если есть). Указать импакт-фактор журнала (Thomson Reuters, РИНЦ,...).**

[12] Belan S.A. and Vergeles S.S. “Plasmon mode propagation in array of closely spaced metallic cylinders”, Optical Materials Express (impact factor 2.923), vol. 5, p. 130 (2015)

**Необходимое программное обеспечение:**

COMSOL

**Ваши впечатления от работы вычислительной системы и деятельности ИВЦ НГУ, а также Ваши предложения по их совершенствованию.**

В общем всё нормально. Работать приятно, практически не бывает ситуаций, когда необходимые для счёта обе ноды vкор и vкор2 одновременно по долгу недоступны/заняты.