## Важнейшие (уникальные) результаты исследований 2019 года

**1.**

*Высокоэффективная схема генерации однофотонных частотных кубитов в фотонных молекулах*

*Аннотация.* Предложена схема условного приготовления однофотонных частотных кубитов в режиме спонтанного четырёхволнового смешения (СЧВС) в системе кольцевых микрорезонаторов (фотонной молекуле), позволяющая управлять состоянием кубита с помощью спектральной амплитуды поля накачки и, тем самым, достичь максимально возможной эффективности условного приготовления фотонов. Поскольку состояние частотного кубита получается независящим от частоты моды резонатора, предложенная схема открывает возможность существенного повышения скорости генерации квантовых однофотонных состояний за счет частотного мультиплексирования.

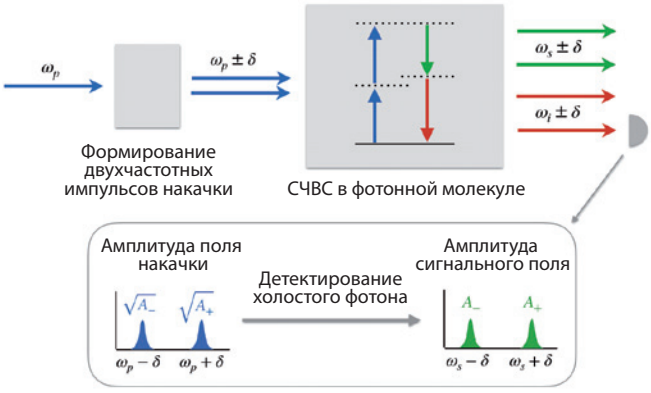



Схема условного приготовления однофотонных частотных кубитов. Амплитуда двухчастотного сигнального поля получается равной квадрату амплитуды двухчастотного поля накачки при условии детектирования только одной частотной компоненты холостого поля. В результате, состояние сигнального поля полностью определяется полем накачки, что позволяет генерировать однофотонные кубиты с минимальными потерями на выходе источника.

*Руководитель*: Калачев А.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН)
*Исполнители*: Чуприна И.Н. (КФУ)
*Публикации:*

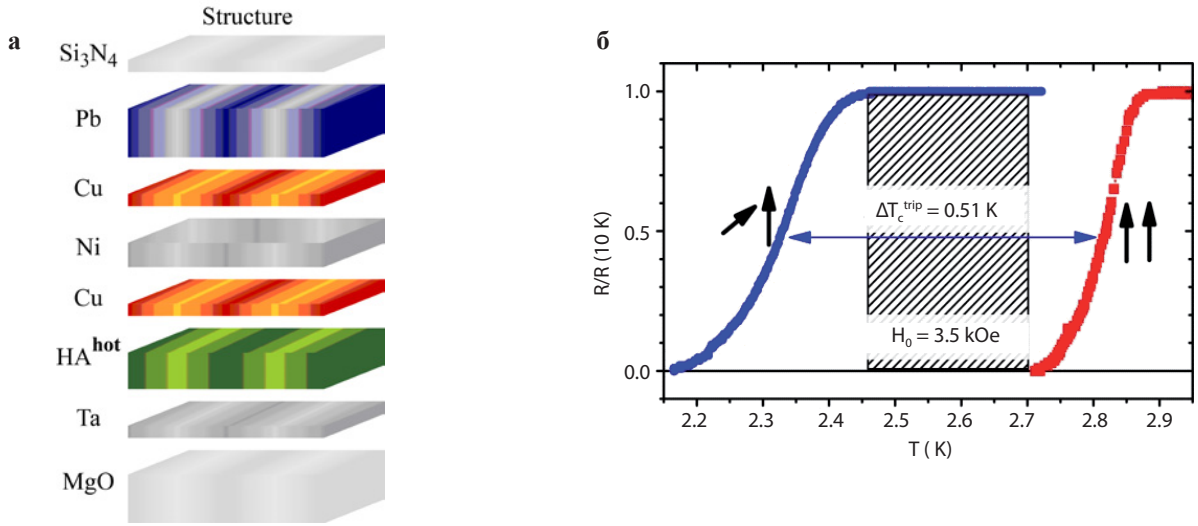
Chuprina I.N., Kalachev A.A.: Generating frequency-bin qubits via spontaneous four-wave mixing in a photonic molecule. Physical Review A **100**, 043843 (2019)

Направление: II. Физические науки, направление 10.
Тема 0217-2018-0005 (частично)

**2.**

*Гигантский эффект сверхпроводящего спинового клапана*

*Аннотация.* Исследованы сверхпроводящие свойства структур спинового клапана $Co_2Cr_{1-x}Fe_xAl_y$/Cu/Ni/Cu/Pb. Обнаружено, что разница в температуре сверхпроводящих переходов, измеренных при параллельной и перпендикулярной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоев сплава Гейслера (HA = $Co_2Cr_{1-x}Fe_xAl_y$) с высокой степенью спиновой поляризации и никеля (Ni), достигает 0.5 K. Для всех образцов зависимость $T_c$ от угла между направлением намагниченностей ферромагнитных слоев демонстрирует глубокий минимум вблизи ортогональной ориентации. Этот минимум обусловлен дальнодействующими триплетными компонентами сверхпроводящего конденсата в ферромагнетике. При перпендикулярной ориентации намагниченностей HA-слой с высокой степенью спиновой поляризации вбирает в себя спин-поляризованные куперовские пары из пространства между слоями HA и Ni. Среди многочисленных результатов, полученных в данной области, обнаруженная величина эффекта спинового клапана не уступает рекордной величине, опубликованной Лейденской группой в Нидерландах с использованием $CrO_2$ в качестве ферромагнитного слоя, (A. Singh et al.: Phys. Rev. X **5**, 021019 (2015)). При этом эти рекордные данные получены в существенно меньших магнитных полях.




**а** Схематическое изображение структуры спинового клапана. **б** Кривые сверхпроводящих переходов для параллельной и перпендикулярной ориентации плоскости образца относительно направления приложенного магнитного поля.

*Руководитель*: Гарифуллин И.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН)
*Исполнители*: Камашев А.А., Гарифьянов Н.Н., Валидов А.А., Гарифуллин И.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Шуманн И., Катаев В., Бюхнер Б. (IFW Dresden), Фоминов Я.В. (ИТФ РАН)
*Публикации*:

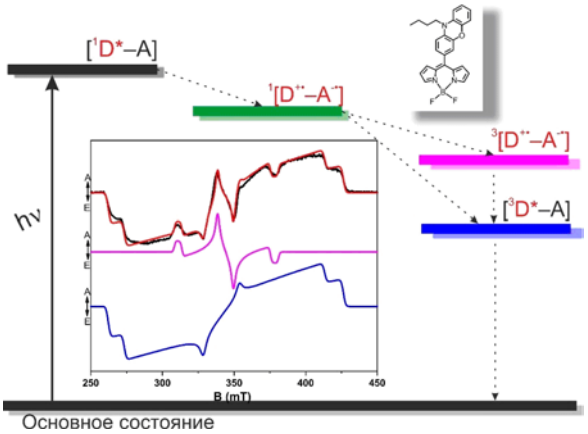
1. Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Validov A.A., Schumann J., Kataev V., Büchner B., Fominov Y.V., Garifullin I.A.: Superconducting switching due to a triplet component in the Pb/Cu/Ni/Cu/$Co_2Cr_{1-x}Fe_xAl_y$ spin-valve structure. Beilstein J. Nanotechnol. **10**, 1458–1463 (2019)
2. Камашев А.А., Гарифьянов Н.Н., Валидов А.А., Шуманн И., Катаев В., Бюхнер Б., Фоминов Я.В., Гарифуллина И.А.: Гигантский эффект сверхпроводящего спинового клапана. Письма в ЖЭТФ **110**, вып. 5, с. 325–330 (2019)
3. Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Validov A.A., Schumann J., Kataev V., Büchner B., Fominov Ya.V., Garifullin I. A.: Superconducting spin-valve effect in heterostructures with ferromagnetic Heusler alloy layers. Phys. Rev. B **100**, 134511 (2019)

Направление ПФНИ РАН: II. Физические науки, направление 08.
Тема 0217-2018-0005

**3.**

*Особенности фотоиндуцированных процессов в компактных донор-акцепторных диадах*

*Аннотация.* Выполнено комплексное исследование фотоиндуцированных процессов целого ряда компактных донор-акцепторных диад, в которых хромофоры донора и акцептора жестко связаны непосредственно друг с другом. Методом время разрешенного ЭПР впервые показано сосуществование в донор-акцепторных диадах одновременно фотоиндуцированного триплета, локализованного на одном из хромофоров, и триплета, сформированного делокализацией неспаренных электронов по обоим партнерам (рис. 1). Для жестких ортогональных BODIPY-диад показано сосуществование двух локализованных триплетных состояний, а также наличие процессов переноса энергии между двумя партнерами диады. Наши исследования показали, что фотоиндуцированные процессы разделения и рекомбинации заряда в таких компактных диадах дают существенный вклад в механизм формирования метастабильных триплетных состояний, который может значительно превосходить вклад интеркомбинационных переходов (ИКП) мономера. Полученные данные вносят




Диаграмма, демонстрирующая фотофизический процесс в BDP-PXZ диаде, которая показана на верхней вставке, при фотовозбуждении. На центральной вставе показаны экспериментальный (черный) и модельный (красный) ВР ЭПР спектры замороженного раствора BDP-PXZ диады и две составляющиемодельного спектра, соответствующие двум триплетам.

весомый вклад в создание фундаментальной основы для разработки новых оптически-активных материалов.

*Исполнители*: Воронкова В.К., Кандрашкин Ю.Е., Суханов А.А. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Zhao J. (State Key Laboratory of Fine Chemicals, School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, China)

*Публикации*:


1. Dong Y., Sukhanov A.A., Zhao J., Elmali A., Li X., Dick B., Karatay A., Voronkova V.K.: Spin orbit charge transfer intersystem crossing (SOCT-ISC) in bodipy-phenoxazine dyads: effect of the chromophore orientation and conformation restriction on the photophysical properties. J. Phys. Chem. C **123**, 22793−22811 (2019)
2. Imran M., Sukhanov A.A., Wang Z., Karatay A., Zhao J., Mahmood Z., Elmali A., Voronkova V.K., Hayvali M., Xing Y.H. et al.: Electronic coupling and spin-orbit charge-transfer intersystem crossing in phenothiazine-perylene compact electron donor/acceptor dyads. J. Phys. Chem. C **123** (12), 7010–7024 (2019)
3. Wang Z., Sukhanov A.A., Toffoletti A., Sadiq F., Zhao J., Barbon A., Voronkova V.K., Dick B.: Insights into the efficient intersystem crossing of bodipy-anthracene compact dyads with steady-state and time-resolved optical/magnetic spectroscopies and observation of the delayed fluorescence: J. Phys. Chem. C **123** (1), 265–274 (2019)
4. Zhao Y., Sukhanov A.A., Duan R., Elmali A., Hou Y., Zhao J., Gurzadyan, G.G., Karatay A., Voronkova V.K., Li C.: Study of the spin-orbit charge transfer intersystem crossing of perylenemonoimide-phenothiazine compact electron donor/acceptor dyads with steady-state and time-resolved optical and magnetic spectroscopies. J. Phys. Chem. C **123** (30), 18270–18282 (2019)
5 . Kandrashkin Y.E., Wang Z., Sukhanov A.A., Hou Y., Zhang X., Liu Y., Voronkova V.K., Zhao J.: Balance between triplet states in photoexcited orthogonal bodipy dimers. J. Phys. Chem. Lett. **10**, 4157–4163 (2019)
6. Geliang Tang, Andrey A. Sukhanov, Jianzhang Zhao, Wenbo Yang, Zhijia Wang, Qingyun Liu, Violeta K. Voronkova, Mariangela Di Donato, Daniel Escuderog, Denis Jacquemin: Red Thermally-activated delayed fluorescence and the intersystem crossing mechanisms in compact naphthalimide-phenothiazine electron donor/acceptor dyads: J. Phys. Chem. C 2019


Направление ПФНИ РАН: II Физические наук, направлеие 08.

Темы: №0217-2018-0005, 0217-2018-0021

## Наиболее значимые результаты института, выполняемые в рамках государственного задания

**1.**

*Новая парадигма спинового обмена и его проявлений в ЭПР спектроскопии*

Сформулирована новая парадигма спинового обмена, которая раскрывает ряд принципиально новых свойств этого явления и его проявления в ЭПР спектроскопии, которые не были отражены в существующей парадигме.

Существующая парадигма пытается объяснить проявления спинового обмена в ЭПР спектроскопии на основе одночастичного подхода к описанию спиновой релаксации, а новая парадигма основана на рассмотрении коллективных мод движения спинов. В результате получены следующие основополагающие положения:

– В области медленного спинового обмена каждая линия спектра ЭПР имеет смешанную форму, т.е. является суммой поглощения и дисперсии.
– В области обменного сужения спектра в спектре наблюдается только одна из коллективных мод движения спинов.
– В сильных СВЧ полях формируются связанные состояния спинов и фотонов, которые можно назвать магнитными поляритонами.
– Диполь-дипольное взаимодействие “деструктивно интерферирует“ с обменным взаимодействием.

*Руководитель*: Салихов К.М.

*Публикации*:


1. Salikhov K.M.: Fundamentals of Spin Exchange. Story of Paradigm Shift”. Springer 2019.
2. Салихов К.М.: Состояние теории спинового обмена в разбавленных растворах парамагнитных частиц. УФН **189**, 1017–1043 (2019)
3. Салихов К.М., Хайруждинов И.Т.: Теоретическое исследование эффекта насыщения спектра ЭПР с учетом спектральной диффузии в системе с гауссовским распределением резонансных частот спинов. ЖЭТФ **155**, вып. 5, 806–823 (2019)
4. Bakirov M.M., Salikhov K.M., Peric M., Schwartz R.N., Bales B.L.: A simple, accurate method to determine the effective value of the magnetic induction of the microwave field from the continuous saturation of epr spectra of fremy’s salt solutions. Representative values of $T_1$. Appl. Magn. Reson. **50**, 919–942 (2019)


Направление ПФНИ РАН II. Физические науки, направление 08

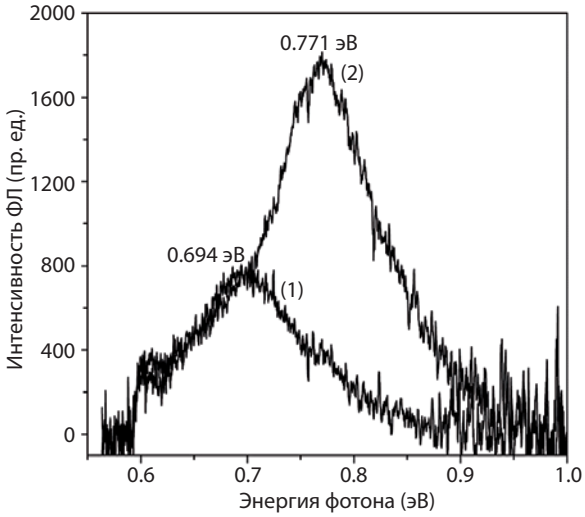
Тема госзадания: 0217-2018-0005

**2.**

*Создание сильнолегированных и светоизлучающих в ИК области слоев германия с использованием импульсной ионной обработки*

Впервые созданы монокристаллические сильнолегированные донорной примесью (сурьма) слои германия с использованием непрерывной ионной имплантации и последующего импульсного отжига мощными ионными пучками (протоны, углерод) наносекундной длительности. За счет равномерного по глубине выделения энергии мощных ионных пучков происходит глубокое плавление и быстрая ориентированная кристаллизация от монокристаллической подложки германия. Показано, что импульсный ионный отжиг приводит к созданию глубоких (до 0.3 мкм) сильнолегированных слоев германия с высокой электропроводностью и концентрацией электронов проводимости до $3 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$, что более, чем на порядок величины превышает равновесный предел растворимости сурьмы в германии. Исследование излучательных свойств сильнолегированных слоев германия при комнатной температуре показало возникновение прямозонной люминесценции с максимумом при 0.77 эВ (1.6 мкм) при сохранении сигнала при 0.69 эВ, обусловленного непрямозонной люминесценцией от германиевой подложки. Полученный сигнал соответствует области длин волн оптоволоконных каналов связи.

*Исполнители*: Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Новиков Г.А., Шустов В.А., Лядов Н.М. (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН); Новиков А.В., Бушуйкин П.А., Байдакова Н.А., Дроздов М.Н., Юнин П.А. (Институт физики микроструктур РАН, Федеральный исследовательский центр “Институт прикладной физики РАН”, Нижний Новгород)




Спектры фотолюминесценции ($T$ = 300 К) германия после имплантации ионами сурьмы ($E$ = 80 кэВ, $\Phi = 10^{16}$ см$^{-2}$) (кривая 1) и последующего импульсного ионного отжига ($C^+$, $H^+$, $E$ = 300 кэВ, $W$ = 0.5 Дж/см$^2$) (кривая 2).

*Публикации*:

– Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Новиков Г.А., Шустов В.А., Лядов Н.М., Новиков А.В., Бушуйкин П.А., Байдакова Н.А., Дроздов М.Н., Юнин П.А.: Импульсный ионный отжиг германия, имплантированного ионами сурьмы. Автометрия **55**, №5, 5–13 (2019)

Направление ПФНИ РАН II. Физические науки, направление 09.

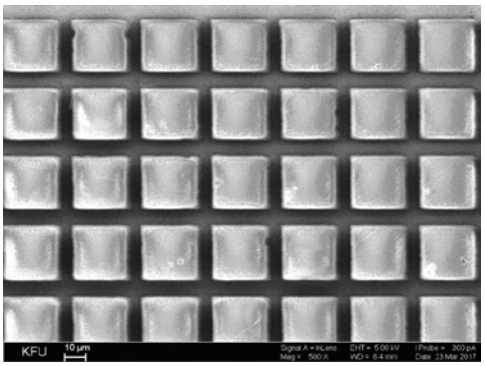
Тема госзадания: 0217-2018-0004.

## Наиболее значимые результаты института, готовые к практическому применению

**1.**

*Разработка новой методики изготовления фазовых периодических микроструктур на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников*

Исследование относится к тематике оптоэлектроники, а именно, к способам изготовления периодических микроструктур на основе материалов с фазовой памятью – халькогенидных стеклообразных полупроводников, выполненных на поверхности оптически-прозрачных подложках. На практике такие микроструктуры могут быть использованы для создания перезаписываемых оптических дисков формата DVD и Blu-Ray, а также энергонезависимых ячеек фазовой памяти (Phase-Change-




Изображение, полученное на сканирующем электронном микроскопе, периодических микроструктур из халькогенидного стеклообразного полупроводника $(GeSe_5)_{80}B_{20}$, после его имплантации ионами $Ag^+$ через маску.

Memory, PCM cells) и др. Решаемая техническая задача заключается в обеспечении возможности изготовления фазовых периодических микроструктур на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников за один технологический цикл в вакууме с помощью имплантации ионами благородных металлов с энергией 4–100 кэВ, дозой облучения $1.0 \cdot 10^{15}$–$6.5 \cdot 10^{20}$ ион/см$^2$ и плотностью тока ионного пучка 2–50 мкА/см$^2$ через поверхностную маску. *Авторы*: Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Рогов А.М.

*Публикации*:

1. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Рогов А.М., Осин Ю.Н.: Способ изготовления фазовых периодических микроструктур на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников, Патент РФ на изобретение № 2687889, 2019;
2. Stepanov A.L., Rogov A.M., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Kavetskyy T.S., Stronski A.L., Petkova T., Petkov P.: Diffraction graiting on chalcogenide glass $(GeSe_5)_{80}B_{20}$ fabricated by mask ion implantation, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B **462**, 187–190 (2020)

ПФНИ РАН – II. Физические науки, направление 9