

УТВЕРЖДАЮ

зам. директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе,  
доктор физико-математических наук

П.Н. Брунков

23 августа 2022 г.



### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Аникина Евгения Викторовича «Туннелирование и многофотонный резонанс в модели квантового нелинейного осциллятора», представленную в диссертационный совет Д002.023.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

Диссертационная работа Е.В. Аникина посвящена теоретическому исследованию стационарных состояний и динамики квантового осциллятора с нелинейностью керровского типа, взаимодействующего с окружением. Особое внимание уделено разработке квазиклассического описания таких систем, анализу процессов туннелирования между состояниями в различных областях фазового пространства, описанию многофотонных резонансных явлений. **Актуальность** темы исследований несомненна и связана с современным развитием квантовой оптики, в особенности квантовой электродинамики резонаторов. Теоретические задачи, решаемые в диссертации, стимулированы экспериментами по изучению твердотельных лазерных систем, ансамблей холодных атомов и квантовых микрорезонаторов с полупроводниковыми наноструктурами. **Новизна** диссертационного исследования состоит в разработке квазиклассических подходов для описания квантового нелинейного осциллятора в условиях бистабильности, исследовании статистических

свойств и динамики осциллятора, определении условий возникновения и параметров многофотонных резонансов.

Диссертация состоит из пяти глав, Заключение, списка литературы и математических приложений.

В первой главе диссертации «Введение» обоснована актуальность исследования, описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, цели и задачи работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, описан личный вклад автора, приведен список основных публикаций по теме диссертации.

Вторая глава диссертации имеет обзорный характер и описывает физику классического нелинейного осциллятора, взаимодействующего с внешним гармоническим полем. В приближении вращающейся волны проанализирован фазовый портрет осциллятора, описаны критерии возникновения бистабильности. Рассмотрено влияние диссипации и внешнего возмущения в виде белого шума на статистические свойства и динамику осциллятора, в частности на переходы между квазистационарными состояниями.

Третья глава диссертации посвящена рассмотрению квантового нелинейного осциллятора. В рамках приближения среднего поля и квазиклассического подхода описаны собственные состояния осциллятора. Методами теории возмущений изучена зависимость квазиэнергий системы от амплитуды внешнего поля. Подробно проанализировано условие возникновения резонансов между состояниями с различным числом фотонов, исследовано влияние многофотонных переходов между состояниями на спектр квазиэнергий. Показано, что рассматриваемая модель имеет дополнительную симметрию, и резонанс для многих пар уровней происходит одновременно, при одном и том же значении управляющих параметров. Важный результат данной главы состоит в применении квазиклассического приближения для описания



многофотонных переходов и расчете амплитуды переходов. Проанализировано также влияние нелинейности шестого порядка на условия возникновения резонансов.

В четвертой главе диссертации исследовано влияние взаимодействия осциллятора с диссипативным окружением на его статистические и динамические свойства. В модели  $\delta$ -коррелированного шума получено обобщенное уравнение Фоккера-Планка и балансное уравнение для диагональных компонент матрицы плотности. Проанализированы решения этих уравнений. Описан метод учета процессов квантового туннелирования в подходе Фоккера-Планка.

Пятая глава диссертации посвящена расчету спектра резонансной флуоресценции нелинейного осциллятора. Методом неравновесной диаграммной техники, разработанной основоположником научной школы, к которой принадлежит автор диссертации, вычислены корреляторы, определяющие спектры флуоресценции. Проанализированы особенности спектров для малых и больших константах связи осциллятора с окружением.

В Заключении сформулированы основные результаты работы. Список цитируемой литературы содержит 36 наименования, соответствует тематике работы и отражает современное состояние дел.

**Достоверность** и **обоснованность** результатов диссертационной работы и положений, выносимых на защиту, обеспечивается последовательными и самосогласованными расчетами современными методами теоретической физики, подробным анализом различных предельных случаев, а также сравнением аналитических результатов с результатами численного счета и с имеющимися литературными данными.

Наиболее интересными **научно значимыми результатами**, полученными в работе, представляются следующие:

1. Разработан квазиклассический подход для описания статистических свойств и динамики квантового нелинейного осциллятора с учетом резонансных многофотонных переходов, которые рассматриваются как квантовое туннелирование между квазистационарными состояниями.

2. Рассчитаны параметры многофотонного резонанса, определены условия возникновения резонанса одновременно между многими парами энергетических уровней.

3. Обосновано уравнение Фоккера-Планка в квазиэнергетическом представлении с учетом процессов туннелирования для описания статистических свойств квантового нелинейного осциллятора.

Несомненна также и **практическая методическая ценность** работы: в работе представлен вывод и обоснование уравнений классической и квантовой динамики, аккуратно рассмотрены предельные случаи и взаимосвязь между различными подходами.

По диссертации имеются следующие **замечания**:

1. Сильной стороной диссертации является сопоставление аналитических результатов с результатами численного счета. Было бы полезно кратко описать алгоритмы численного расчета, пояснить, как обеспечивалась сходимость и устойчивость расчетов.
2. При анализе квазиэнергетического спектра и условий резонанса в главе 3 используется оригинальный подход теории возмущений, связанный с разделением поправок к энергиям на сдвиги уровней и расщепления, который оказывается плодотворным для рассматриваемой нелинейности керровского типа. Было бы полезно обсудить применимость такого подхода и полученных результатов при учете нелинейности высшего порядка, например шестого,



рассмотренного в параграфе 3.8, или при выходе за рамки приближения вращающейся волны.

3. В диссертации встречаются, хоть и редко, опечатки и неточности. В частности, опечатка содержится в первой формуле диссертации – формуле (2.1).

Отмеченные недостатки не влияют на общую, положительную, оценку работы и не снижают ее высокого научного уровня.

Диссертационная работа Е.В. Аникина вносит вклад в развитие теоретической физики, написана хорошим научным языком, характеризуется последовательностью и логичностью изложения. Результаты, составившие основу диссертации, опубликованы в 5 статьях в авторитетных научных журналах: *Physical Review A* и *Laser Physics Letters*, доложены на российских и международных конференциях. Диссертационная работа может быть использована при проведении исследований в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ФИАН, Институте теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Институте физики микроструктур РАН, МГУ, МФТИ и других научных учреждениях физического профиля. Автореферат адекватно и достаточно полно отражает содержание и выводы диссертации.

Диссертация Аникина Евгения Викторовича «Туннелирование и многофотонный резонанс в модели квантового нелинейного осциллятора» представляет собой законченное исследование и полностью соответствует критериям "Положения о присуждении ученых степеней" для ученой степени кандидата наук, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., и её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Доклад Е.В. Аникина по материалам кандидатской диссертации заслушан 21 июля 2022 г. на общеинститутском “Чайном семинаре” ФТИ.



## Список публикаций С. А. Тарасенко по теме диссертации

1. H. Plank, S.A. Tarasenko, T. Hummel, G. Knebl, P. Pfeffer, M. Kamp, S. Höfling, S.D. Ganichev, Circular and linear photogalvanic effects in type-II GaSb/InAs quantum well structures in the inverted regime, *Physica E* **85**, 193 (2017).
2. K.-M. Dantscher, D. A. Kozlov, M. T. Scherr, S. Gebert, J. Bärenfänger, M. V. Durnev, S. A. Tarasenko, V. V. Bel'kov, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretzky, Z. D. Kvon, J. Ziegler, D. Weiss, and S. D. Ganichev, Photogalvanic probing of helical edge channels in two-dimensional HgTe topological insulators, *Phys. Rev. B* **95**, 201103(R) (2017).
3. V.N. Mantsevich and S.A. Tarasenko, Fluid photonic crystal from colloidal quantum dots, *Phys. Rev. A* **96**, 033855 (2017).
4. S. A. Tarasenko, A. V. Poshakinskiy, D. Simin, V. A. Soltamov, E. N. Mokhov, P. G. Baranov, V. Dyakonov, and G. V. Astakhov, Spin and optical properties of silicon vacancies in silicon carbide, Review Article, *Phys. Status Solidi B* **255**, 1700258 (2018).
5. Yu.B. Vasilyev, G.Yu. Vasileva, S. Novikov, S.A. Tarasenko, S.N. Danilov, and S.D. Ganichev, High-frequency rectification in graphene lateral p-n junctions, *Appl. Phys. Lett.* **112**, 041111 (2018).
6. Alexander V. Poshakinskiy, Dmitrii R. Kazanov, Tatiana V. Shubina and Sergey A. Tarasenko, Optical activity in chiral stacks of 2D semiconductors, *Nanophotonics* **7**, 753 (2018).
7. S. Anghel, F. Passmann, A. Singh, C. Ruppert, A.V. Poshakinskiy, S.A. Tarasenko, J.N. Moore, G. Yusa, T. Mano, T. Noda, X. Li, A.D. Bristow, and M. Betz, Field control of anisotropic spin transport and spin helix dynamics in a modulation-doped GaAs quantum well, *Phys. Rev. B* **97**, 125410 (2018).
8. F. Passmann, S. Anghel, T. Tischler, A. V. Poshakinskiy, S.A. Tarasenko, G. Karczewski, T. Wojtowicz, A.D. Bristow, and M. Betz, Persistent spin helix manipulation by optical doping of a CdTe quantum well, *Phys. Rev. B* **97**, 201413(R) (2018).
9. S.A. Tarasenko, A.V. Poshakinskiy, E.L. Ivchenko, I. Stepanov, M. Ersfeld, M. Lepsa, and B. Beschoten, Zitterbewegung of spin split electrons, *JETP Letters* **108**, 326-328 (2018).
10. S.A. Tarasenko, Electron properties of topological insulators. The structure of edge states and photogalvanic effects, *Physics - Uspekhi* **61** (10), 1026 (2018).
11. H. Plank, M.V. Durnev, S. Candussio, J. Pernul, K.-M. Dantscher, E. Mönch, A. Sandner, J. Eroms, D. Weiss, V.V. Bel'kov, S.A. Tarasenko, and S.D. Ganichev, Edge currents driven by terahertz radiation in graphene in quantum Hall regime, *2D Materials* **6**, 011002 (2019).  
M.V. Durnev and S.A. Tarasenko, Optical properties of helical edge channels in zinc-blende-type topological insulators: selection rules, circular and linear dichroism, circular and linear photocurrents, *J. Phys.: Condens. Matter* **31**, 035301 (2019).
12. M.V. Durnev and S.A. Tarasenko, High-Frequency Nonlinear Transport and Photogalvanic Effects in 2D Topological Insulators, *Ann. Phys.(Berlin)* **531**, 1800418 (2019).
13. V.A. Soltamov, C. Kasper, A.V. Poshakinskiy, A.N. Anisimov, E.N. Mokhov, A. Sperlich, S.A. Tarasenko, P.G. Baranov, G.V. Astakhov and V. Dyakonov, Excitation and coherent control of spin qudit modes in silicon carbide at room temperature, *Nature Commun.* **10**, 1678 (2019).
14. F. Passmann, S. Anghel, C. Ruppert, A.D. Bristow, A.V. Poshakinskiy, S.A. Tarasenko, and M. Betz, Dynamical formation and active control of persistent spin helices in III-V and II-VI quantum wells (topical review), *Semicond. Sci. Technol.* **34**, 093002 (2019).

15. G.V. Budkin and S.A. Tarasenko, Thermal generation of shift electric current, *New J. Phys.* **22**, 013005 (2020).
16. A. V. Poshakinskiy and S. A. Tarasenko, Spin noise at electron paramagnetic resonance, *Phys. Rev. B* **101**, 075403 (2020).
17. S. Hubmann, G.V. Budkin, M. Otteneder, D. But, D. Sacré, I. Yahniuk, K. Diendorfer, V. V. Bel'kov, D.A. Kozlov, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, V.S. Varavin, V.G. Remesnik, S.A. Tarasenko, W. Knap, and S. D. Ganichev, Symmetry breaking and circular photogalvanic effect in epitaxial CdHgTe films, *Phys. Rev. Materials* **4**, 043607 (2020).
18. S. Candussio, M.V. Durnev, S.A. Tarasenko, J. Yin, J. Keil, Y. Yang, S.-K. Son, A. Mishchenko, H. Plank, V. V. Bel'kov, S. Slizovskiy, V. Fal'ko, and S.D. Ganichev, Edge photocurrent driven by terahertz electric field in bilayer graphene, *Phys. Rev. B* **102**, 045406 (2020).
19. M.V. Durnev and S.A. Tarasenko, Rectification of ac electric current at the edge of 2D electron gas, *Phys. Status Solidi B* **258**, 2000291 (2021).
20. S. Anghel, A.V. Poshakinskiy, K. Schiller, F. Passmann, C. Ruppert, S.A. Tarasenko, G. Yusa, T. Mano, T. Noda, and M. Betz, Anisotropic expansion of drifting spin helices in GaAs quantum wells, *Phys. Rev. B* **103**, 035429 (2021).
21. M.V. Durnev and S.A. Tarasenko, Edge photogalvanic effect caused by optical alignment of carrier momenta in two-dimensional Dirac materials, *Phys. Rev. B* **103**, 165411 (2021).
22. I.D. Breev, Z. Shang, A.V. Poshakinskiy, H. Singh, Y. Berencén, M. Hollenbach, S.S. Nagalyuk, E.N. Mokhov, R.A. Babunts, P.G. Baranov, D. Suter, S.A. Tarasenko, G.V. Astakhov, A.N. Anisimov, Inverted fine structure of a 6H-SiC qubit enabling robust spin-photon interface, *NPJ Quantum Information* **8** (2022).
23. G.V. Budkin and S.A. Tarasenko, Spin splitting in low-symmetry quantum wells beyond Rashba and Dresselhaus terms, *Phys. Rev. B* **105**, L161301 (2022).
24. J. Michl, C.C. Palekar, S.A. Tarasenko, F. Lohof, C. Gies, M. von Helversen, R. Sailus, S. Tongay, T. Taniguchi, K. Watanabe, T. Heindel, B. Rosa, M. Rödel, T. Shubina, S. Höfling, S. Reitzenstein, C. Anton-Solanas, and C. Schneider, Intrinsic circularly polarized exciton emission in a twisted van der Waals heterostructure, *Phys. Rev. B* **105**, L241406 (2022).