

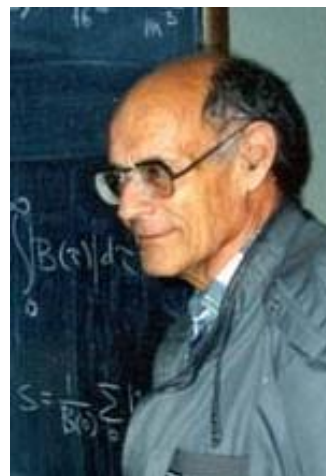
Квантовая оптика в терагерцовом диапазоне частот

Долгое время терагерцовый диапазон частот 0.1-10 ТГц оставался самым труднодоступным «ущельем» на шкале электромагнитных волн, в котором не могли применяться ни оптические, ни радиофизические методы исследования и отсутствовали необходимые для этого приборы. Однако, благодаря многим необычным проявлениям отклика веществ на терагерцовых частотах, этот диапазон чрезвычайно интересен в приложениях. Последние несколько десятилетий в мире прошли под знаком активного освоения терагерцового диапазона. Здесь сошлись силы и знания самых разных специалистов в области современной твердотельной и газовой электроники, астрофизики, ускорения заряженных частиц, лазерной физики, физики полимеров и органических соединений. Сегодня уже можно говорить об успешном создании терагерцовых источников и приемников, подходящих для применения в медицинской диагностике, спектроскопии, визуализации объектов в терагерцовых лучах. Обсуждаются вопросы передачи и обработки информации на терагерцовых частотах. Однако речь идет об источниках только классического излучения. На «квантовых» секциях терагерцовых конференций в основном речь идет о квантовых принципах работы некоторых приборов, например, о квантово-каскадных лазерах, излучателях на квантовых точках и т.д., но при этом само излучение, создаваемое в таких источниках, не имеет каких-либо выраженных квантовых свойств.

Между тем мы наблюдаем, как в соседнем оптическом диапазоне развитие квантовой оптики дало много интересных и важных результатов, стимулировало создание новых квантовых методов спектроскопии, сенсорики, метрологии. Поля с неклассической статистикой оптического и микроволнового диапазонов являются необходимым звеном в проектируемых сегодня системах квантовых вычислений, передачи информации по квантовым линиям связи. Продвижение квантово-оптических представлений в терагерцовый диапазон может дать много нового и, безусловно, будет происходить в течение самых ближайших лет.

Однако уже сейчас начинается процесс наведения «мостов» между квантовым оптическим и, пока еще классическим, терагерцовым пространствами исследований. Среди первых работ в этом направлении – изучение статистических параметров нулевых флуктуаций электромагнитного вакуума на терагерцовых частотах методом электрооптического стробирования (*Nature* 2019), генерация квантово-коррелированных пар фотонов, один из которых имеет оптическую, а другой – почти на 2 порядка меньшую терагерцовую частоту (*Physical Review A* 2018, 2020), разработка методов терагерцовой квантовой сенсорики на основе эффекта спонтанного параметрического рассеяния света (*Science Advances* 2020, *Applied Physics Letters* 2020).

Явление спонтанного параметрического рассеяния света (СПР) было впервые предсказано профессором физического факультета, основателем школы квантовой оптики в России и автором основополагающих трудов по исследованию и применению СПР Давидом Николаевичем Клышко в 60-х годах прошлого столетия. Сегодня это явление широко используется в



Д. Н. Клышко (1929-2000)

квантовых технологиях для создания неклассических состояний света. Специалисты из лаборатории СПР, созданной Давидом Николаевичем Клышко и Александром Николаевичем Пениным на кафедре квантовой электроники физического факультета МГУ, известны в нашей стране и за рубежом в качестве организаторов новых групп и квантово-оптических направлений в России, Германии, США, Сингапуре и других странах. При спонтанном параметрическом рассеянии фотоны лазерной накачки распадаются на квантово-коррелированные пары фотонов с меньшими частотами, образующими «запутанные» (entangled) квантовые состояния - бифотоны. Частоты фотонов, образующих бифотонную пару, принципиально ограничены только одним условием – согласно закону сохранения энергии, их сумма должна быть равна частоте фотонов лазерной накачки. Это значит, что также возможна генерация пар фотонов с сильно различающимися частотами, одна из которых может попадать в терагерцовый диапазон. Наша научная группа на кафедре квантовой электроники, которая теперь называется лабораторией квантовой оптико-терагерцовой фотоники, первой в мире взялась за реализацию этой возможности несколько лет назад.



Сотрудники П.А. Прудковский, К.А. Кузнецов, Г.Х. Китаева, аспиранты и студенты лаборатории квантовой оптико-терагерцовой фотоники в 2019 г. В.Д. Султанов, А.М.Рудяк, Д.А. Сафроненков, А.А. Гайсаров, А.Д. Фролов, Е.И. Малкова, Е. Д. Воробьева, Т.И. Новикова.

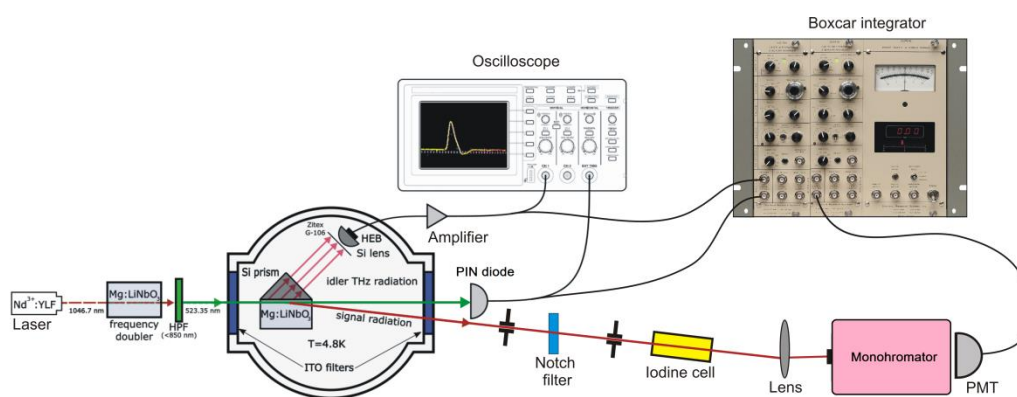
Опыт работы в лаборатории СПР по квантовой фотометрии и спектроскопии ИК излучения позволил нам сравнительно легко «перейти» в терагерцовый диапазон. Но вначале - только в части измерений оптических фотонов, без проведения прямых измерений мощности терагерцовой составляющей оптико-терагерцовых бифотонных пар. К примеру, уже в 2010 г. было показано, что без прямых измерений терагерцовых волн можно определять показатели преломления и коэффициенты поглощения материалов на терагерцовых частотах, в 2018-2020 г. аналогичным образом была проведена диагностика температурного поведения корреляционных характеристик бифотонов. В 2019 г. к разработке подобных квантовых терагерцовых сенсоров независимо подключились

исследователи немецкой группы из Кайзерслаутерна, а нашими соавторами стали сотрудники кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета МГУ. С 2017 года работы поддержаны грантом РФФИ № 17-12-01134.

Самые интересные и многообещающие результаты в ближайшем будущем мы ждем от продвижения в терагерцовый диапазон квантово-оптических технологий калибровки квантовой эффективности фотоприемников, построения изображения объектов в скрытых лучах (quantum ghost imaging), создания источников одиночных фотонов и приемников, определяющих число падающих фотонов. Все эти методы требуют не только одновременного прямого детектирования потоков терагерцовых фотонов, но и измерения корреляционных характеристик оптических и терагерцовых фотонов. Однако здесь терагерцовый диапазон начинает показывать свой неподатливый характер. При комнатных температурах на этих частотах все объекты экспериментальной установки испускают большое число фотонов равновесного теплового излучения, в которых могут просто утонуть терагерцовые сигналы от бифотонных полей. Возможное поглощение излучения на терагерцовых частотах в кристалле будет приводить к генерации полей не в чистых, а в смешанных квантовых состояниях. Размеры области в кристалле, в которой происходит генерация бифотонов, не так уж велики по сравнению с длиной волны терагерцового фотона. Это приводит к чрезвычайно высокой расходимости терагерцовых фотонов, способной удивить и озадачить квантовых оптиков, которые привыкли легко собирать фотоны всех сопряженных условием пространственного синхронизма мод на своих оптических детекторах. Наконец, технические трудности, связанные с необходимостью подавления шума от упруго рассеянного излучения накачки при регистрации оптических фотонов на частотах, расположенных в непосредственной близости от частоты накачки, и необходимостью работы с терагерцовыми детекторами, пока еще не способными разрешать импульсы фототока от отдельных терагерцовых фотонов слишком малой энергии. Прогресс экспериментальной квантовой оптики во многом опирается на изобретение высокоскоростных схем, измеряющих совпадения одиночных показаний счетных фотодетекторов. Эти схемы успешно применяются при измерении корреляционных характеристик коррелированных полей как низкой (при СПР), так и высокой интенсивности (при генерации так называемых макроскопических квантовых состояний в условиях высокого коэффициента параметрического усиления волн в кристалле). В терагерцовом диапазоне пока все имеющиеся приемники работают в аналоговом режиме, нет ни счетных детекторов, ни аналогичных схем совпадения.

Решать этот груз проблем, стоящих перед новой областью, мы начали с теоретического рассмотрения особенностей параметрического рассеяния при генерации оптико-терагерцовых бифотонов. И здесь вновь проявилось удивительное значение научного наследия, оставленного нам Д.Н. Клышко. В своей знаменитой монографии «Фотоны и нелинейная оптика» он сформулировал так называемый обобщенный закон Кирхгофа, описывающий параметрическое рассеяние в условиях тепловых флуктуаций и поглощения кристаллом излучения на одной из частот бифотонной пары. Проанализировав наш случай СПР с позиций обобщенного закона Клышко-Кирхгофа, мы определили, при каких температурах кристалла и его окружения возможно наблюдение высоких корреляций оптических и терагерцовых полей, каков точный модовый состав генерируемого излучения. Теперь в нашей экспериментальной установке нелинейный кристалл помещается в один гелиевый криостат с высокочувствительным терагерцовым болометром, где температура всех элементов поддерживается равной 4.8 К. В организации пространства криостата нам помогли сотрудники Российской компании Scontel,

производящей быстродействующие сверхпроводниковые болометры на горячих электронах. Преодоление многих экспериментальных трудностей позволило нам разработать подход к экспериментальному измерению корреляционной функции бифотонов, основанный на статистическом анализе показаний аналоговых детекторов, измеряемых за короткие времена длительности импульсного лазера накачки. Конечно, создание оптимальной экспериментальной установки, какой она видится сегодня по нашим расчетам, еще требует больших финансовых вложений и труда. Однако уже к настоящему моменту, при использовании наносекундного лазера накачки и недостаточно высокого уровня подавления шумов в оптическом тракте установки, нам удалось впервые в мире измерить квантово-коррелированную составляющую измеряемых сигналов СПР. Впереди увеличение уровня измеряемых корреляций за счет введения дополнительных оптических фильтров и перехода на более короткие, пикосекундные импульсы нового лазера накачки. Приобретение такого лазера планируется в МГУ в рамках национального проекта «Наука».



Действующая установка для наблюдения квантовых корреляций оптических и терагерцовых фотонов

Так постепенно, шаг за шагом, раскрываются пути для продвижения квантовых технологий в терагерцовый диапазон. Диапазон, который благодаря необычному отклику вещества обещает много новых интересных физических эффектов и их применений.

- [1] I.-C. Benea-Chelmus *et al.* Nature 568, p.202 (2019), C. Riek *et al.* Science 350, 420 (2015).
- [2] G.Kh. Kitaeva *et al.* Phys. Rev. A v.98, 063844 (2018), v.101, 053810 (2020).
- [3] M. Kutas *et al.* Sci. Adv. 6, 8065 (2020), B. Haase *et al.* Opt. Express v. 27, 7458 (2019).
- [4] T.I. Novikova *et al.* Appl. Phys. Lett. v. 116, 26 (2020).
- [5] K.A. Kuznetsov *et al.* Appl. Phys. B v.101, 811 (2010), v. 122, 223 (2016), V.V. Kornienko *et al.* APL Photon. 3, 051704 (2018).
- [6] R.V. Zakharov *et al.* Laser Phys. v. 29, 124010 (2019), K. A. Kuznetsov *et al.* Phys. Rev. A v.101, 053843 (2020).
- [7] G.Kh. Kitaeva *et al.* Opt. Lett. 44, 1198 (2019), Sultanov *et al.* JETP Lett. v.112, 269 (2020).



Галия Китаева, профессор кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ.