

# В ПОГОНЕ за особенным светом

Всю свою научную жизнь, начиная с 4-го курса НГУ, я занимался выдумыванием и усовершенствованием лазеров. Или их применением в уникальных экспериментах, невозможных без таких лазеров. Так сказать, создавал «особый свет». Сейчас, когда научный «творческий голод» в какой-то мере утолен и многие идеи удалось реализовать, часть времени посвящаю попыткам запечатлеть на фотокамеру особый природный свет – каким он бывает рано утром или на закате. Что это такое – объяснить невозможно, это надо увидеть и почувствовать. На моем фотосайте, где я выставляю такие практически бессюжетные фотографии, так и написано: «фотографирую свет». Этим самым я хочу подчеркнуть, что именно свет в данном случае является объектом съемки. Замечу, что эмоциональную часть научной работы не следует недооценивать. Именно страсть движет нами, особенно при достижении высоких, труднодоступных целей. Без этого, в режиме работы обычного клерка, нет никаких шансов добиться успеха в нелегкой работе ученого. С другой стороны, способность периодически выключаться из режима «прямого думанья» над проблемой является ключевой для выживания человека как ученого и для его продуктивной работы. Чтобы не «перегореть». Рыбалка, стихотворчество, футбол, секс – все для этого подходит, и каждый сам находит свой метод релаксации и запасания энергией

В пространстве света.  
Окрестности Гархинской Пустоши  
(Garching Heide), Германия. Фото автора



АПОЛОНСКИЙ Александр Анатольевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института квантовой оптики общества Макса Планка и Мюнхенского университета Людвиг Максимилиана, координатор проектов лаборатории аттосекундной физики Мюнхенского центра развитой фотоники и Центра современных лазерных приложений (Мюнхен, Германия). Автор и соавтор более 80 научных работ, в том числе двух монографий и двух коллективных монографий

**П**ервый лазерный свет, в создании которого мне удалось поучаствовать, относился к среднему инфракрасному диапазону и был невидимым. Но нам в полной мере удалось его «прочувствовать»: во время настройки лазера в лабораторию случайно зашел руководитель нашей группы, импозантный, в новом черном кожаном пиджаке, лацкан которого мы тут же и прожгли.

Затем были годы видимого света от аргонового лазера. Несколько мощных линий генерации этого лазера находятся в спектральном диапазоне длин волн 475–515 нм, попадая в синюю, голубую и зеленую области видимого спектра. Это прекрасные цвета, и мы исторически максимально настроены на них: натренированный глаз может различать линии генерации, разделяемые лишь 15 нм! Но для цвета этих отдельных линий нет специальных названий: обычно про подобную смесь зелено-голубых линий говорят как про цвет морской волны или аквамарин.

Про то, какого цвета был свет следующего моего лазера, – ниже, а сейчас – небольшое, но важное отступление о пути к нему.

**Ключевые слова:** свет, фемтосекундные лазеры, фаза CEP, лазерные медицинские приложения.

**Key words:** light, femtosecond lasers, carrier-envelope phase, laser medical applications

© А. А. Аполонский, 2014



## Соревнование без проигравших

В 1999 г. я выиграл грант INTAS, но понял, что в России реализовать его не удастся Единственным, кто на Западе согласился принять меня с этим проектом, был профессор Венского технического университета Ференц Краус, венгр по происхождению. Он сразу понял идею проекта и сказал, что мы это сделаем.

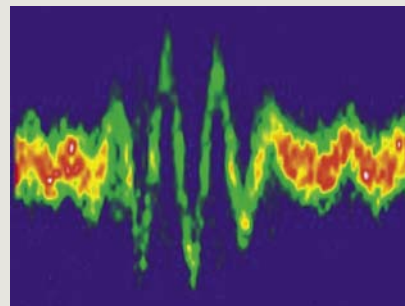
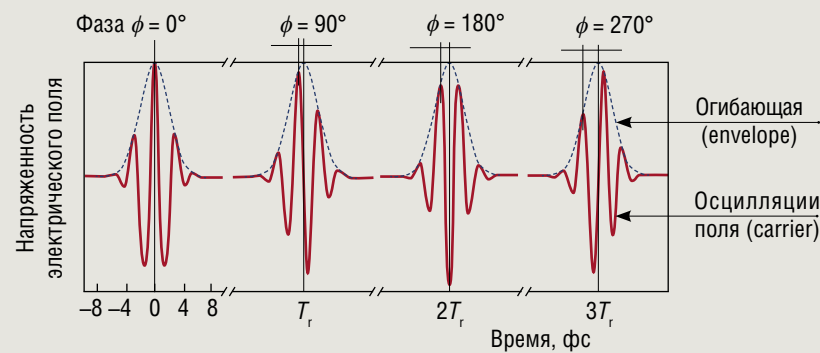
Но когда я приехал в Вену, ситуация перевернулась (и на протяжении последних 15-ти лет остается в состоянии готовности в каждый следующий момент опять перевернуться – это подтверждает старую истину, что мир меняется у нас на глазах). В то время в воздухе прямо носилось ощущение близкого прорыва в деле «поимки» последнего фундаментального физического параметра света импульсных лазеров, который был неподконтролен физикам, а именно фазы СЕР (*carrier – envelope phase*). К сожалению, короткого русского аналога этого названия нет до сих пор.

Мы «забыли» про INTAS и включились в погоню за ускользающей фазой. Все участники были охвачены азартом гонки: мучала мысль, что когда мы ночью спим, наши главные конкуренты – американцы из Национального института стандартов и технологии (Болдуер, Колорадо), – работают и могут нас опередить. И они действительно опередили нас на месяц! Еще

## ПАРА СЛОВ ПРО СВЕТ И ЦВЕТ

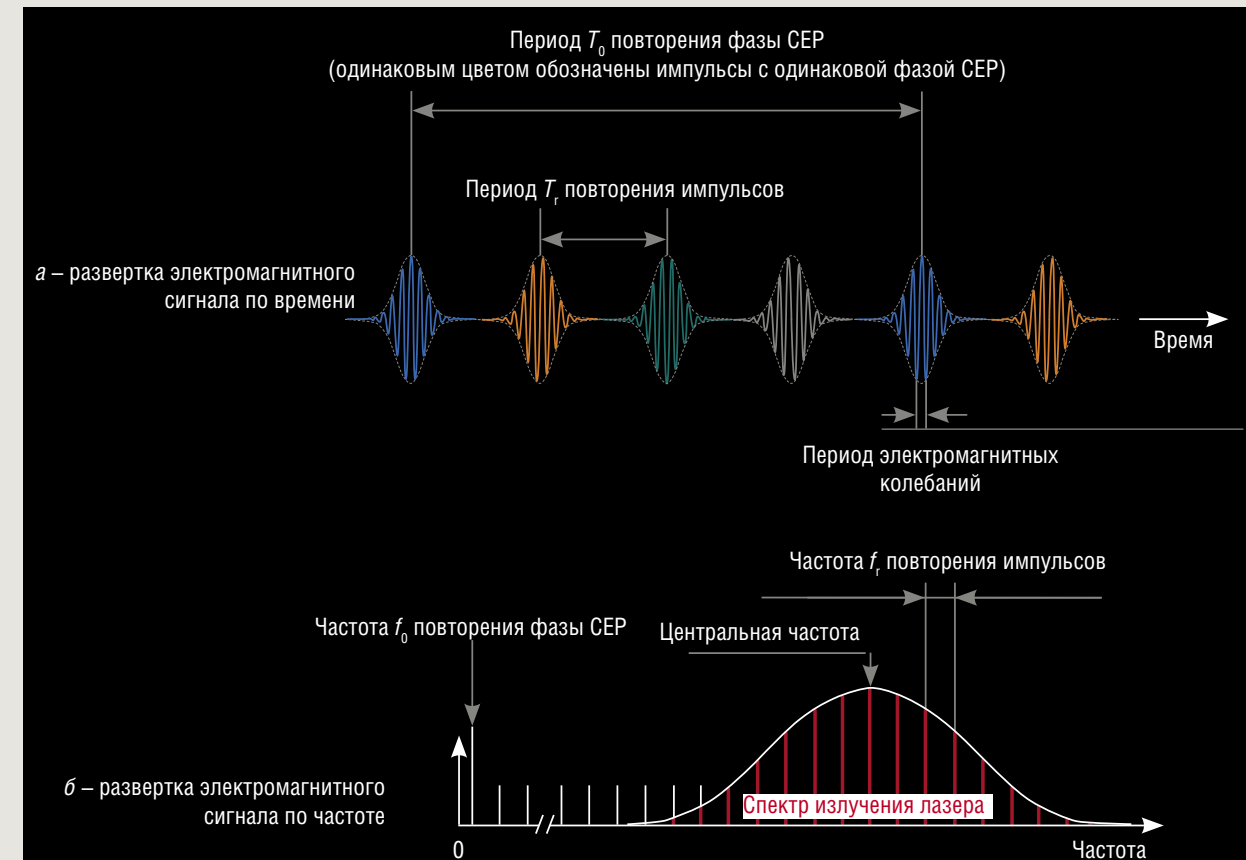
Слова «свет» и «цвет» часто употребляют как синонимы: «красный свет – хода нет». Но это не всегда правильно. Свет – это физически строго определяемая категория, со своими признаками (длиной волны, поляризацией, количеством фотонов). Цвет же связан с психофизическим восприятием света, которое зависит также от освещенности объекта, фона и, конечно, состояния нашего глаза. Крайний пример – монохроматизация – предельный случай дальтонизма, когда человек вообще не различает цвета. Для такого дальтоника есть только свет...

По историческим причинам мы считаем, что у радуги семь цветов. Это – наследие великого Исаака Ньютона: именно он сначала выделил в радуге шесть основных цветов, а затем, исходя из принципов гармонии, увеличил их число до семи подобно числу основных тонов в музыке. Реально же цветов столько, сколько мы можем различить глазом. Есть чистые спектральные цвета, такие как цвета радуги, но большинство красок в нашей жизни представляют собой смесь цветов. Например, цвет мокрого асфальта или увядшей розы. Важно, что по этому описанию мы сразу понимаем, какой цвет имеется в виду



Лазер генерирует свет импульсами одинаковой длительности и одинаковой энергии. При этом для фемтосекундных (фс) импульсов становится важна их «структура» во времени. Один из фундаментальных параметров этой структуры – фазу СЕР – можно наглядно определить как «расстояние» во времени между максимальной осцилляцией электрического поля импульса и максимумом воображаемой огибающей импульса по отношению к периоду колебаний поля. Обратите внимание, что от фазы зависит максимальная амплитуда электрического поля. При нулевой фазе амплитуда наибольшая, что соответствует максимальной интенсивности импульса при его фокусировке. Так, на графике (слева) для импульса длительностью в 3 колебания поля изменение фазы приводит к ослаблению интенсивности импульса примерно на 10%. Но для более коротких импульсов фаза СЕР оказывает более сильное влияние на интенсивность импульса. Чем выше нелинейность исследуемого или используемого в эксперименте процесса, тем сильнее проявление фазы. Стабилизация фазы приобретает особую важность для долговременных нелинейных экспериментов.

Справа – цветная визуализация импульса, состоящего всего из двух осцилляций электромагнитного поля. *Courtesy of E. Goulielmakis*

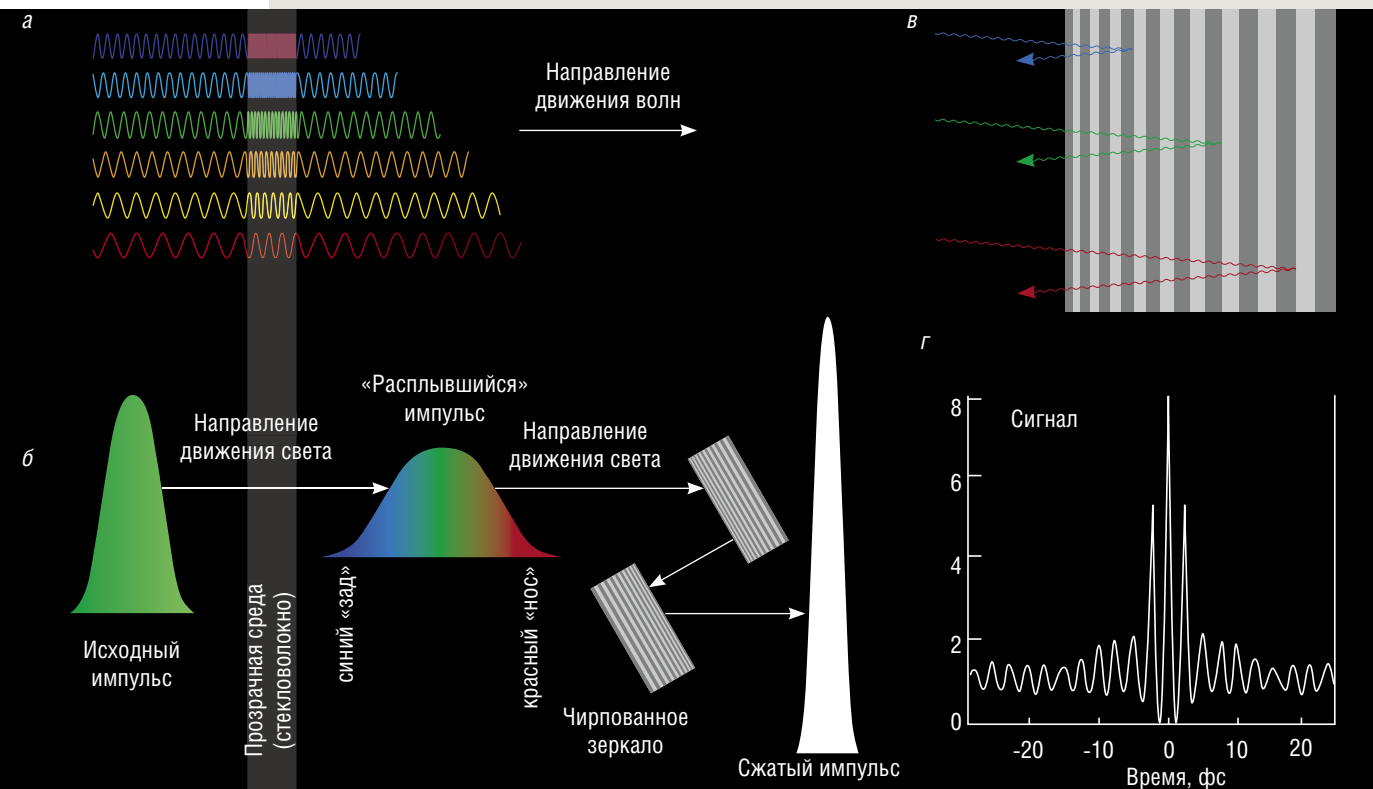


Цуг (цепочку) импульсов света можно представить не только как развертку во времени (а), но и в виде спектра – развертку по частоте (б). В случае периодически повторяющихся импульсов фемтосекундного лазера спектр имеет вид частотокола, расстояние между зубцами которого соответствует частоте  $f_r$  следования импульсов из лазерного осциллятора. Если продлить этот частотокол от оптических частот к нулевым, разница  $f_0$  между нулем и первым зубом и есть то, что измерили американцы (Jones *et al.*, 2000). С изменением  $\Delta\phi$  фазы СЕР она связана простым отношением:  $f_0/f_r = \Delta\phi/2\pi$

два месяца ушло на отправку работы в журнал *Science*, получение отсюда отказа (у них уже имелась американская статья) и переделку ее под формат другого журнала – *Physical Review Letters* (Apolonski *et al.*, 2000). Несмотря на более позднюю публикацию по сравнению с конкурентами, эта работа процитирована на сегодня уже свыше 400 раз. Чуть позже мы научились не только измерять изменение фазы, но и стабилизировать ее.

Замечу, что наши и американские результаты вполне дополняли друг друга: мы смогли измерить изменение фазы  $\Delta\phi$  между последовательными короткими импульсами, поворяющимися с частотой  $f_r$ , в то время как американцы научились определять частоту  $f_0$  повторения фазы  $\phi$ . При этом обе величины связаны простым соотношением ( $f_0/f_r = \Delta\phi/2\pi$ ), т. е., по сути, речь шла о двух адекватных описаниях одного параметра для случая коротких и длинных импульсов. Фаза важна для определения максимального электрического поля импульса, а знание частоты  $f_0$  позволяет точно измерить частоту неизвестного сигнала. Измерение частот таким способом сделало прорыв в метрологии и было отмечено нобелевской премией, врученной немецкому физика Т. Хэншу в 2005 г. Кстати, соавтору нашей упомянутой выше работы.

А интасовский проект был реализован лишь через 11 лет моими тогдашними коллегами, которые к тому времени работали уже не в Вене. Факт подобной высокой мобильности научного населения западного мира поразителен,



При прохождении через вещество короткие световые волны распространяются медленнее, чем длинные (а). Из-за этого изначально короткий импульс широкополосного спектра расплывается, приобретая «красный нос» и «синий зад» (б). Скомпенсировать эффект дисперсии для разных волн и получить вновь короткий импульс можно после отражения в чирпованном зеркале, представляющем собой многослойный диэлектрический материал.

Принцип действия такого зеркала прост: многоцветное излучение падает на зеркало, и чем «краснее» свет, тем глубже он проникает вглубь материала (в). Благодаря различным по длине путям внутри слоистой структуры происходит конструктивное сложение полей отраженного света, соответствующее реализации короткого импульса (б). На графике (г) изображена автокорреляционная функция этого импульса, регистрируемая в интерферометре Майкельсона.

На фото – так выглядит спектральная палитра полученных нами импульсов света в компрессоре из шести пар чирпованных зеркал. Для визуализации луча в оптическую часть компрессора добавлены пары азота из дьюара. Центральная длина волны спектра импульса равна 750 нм; она соответствует инфракрасному свету, но спектр импульса настолько широкополосный, что свет становится видимым. Наблюдаемый цвет обусловлен тем, что глаз видит лучше красные и желтые компоненты этого спектра. Если бы не было воздуха, паров азота и рассеяния на дефектах зеркал, то свет мы бы не увидели. Фото автора

Однако выходящий из волокна импульс становится длиннее за счет дисперсии. Чтобы вновь получить короткий импульс, нужно его сжать, то есть пропустить через световой компрессор, который скомпенсирует эффект дисперсии. Для работы с таким широким спектром подходит лишь компрессор из специальных зеркал (подробнее ниже), а в то время подобных зеркал не было ни в продаже, ни даже среди лучших лабораторных образцов.

Набор таких зеркал по специальному заказу сделали наши венгерские друзья. Их конструктивная особенность заключалась в тоненьких стеклянных клиньях (толщиной в лист бумаги в тонкой части), присоединенных на оптическом контакте к внешней поверхности зеркал. Каждое утро, приходя в лабораторию, мы с дрожью в сердце бросались к компрессору, чтобы убедиться, что все клинышки на месте. Кстати, этот компрессор в полной сохранности сейчас стоит у меня в шкафу как музейный экспонат.

Даже с помощью этого устройства нам удавалось лишь очень слабо компенсировать дисперсию в волокне – единственном оптическом элементе установки, сквозь который проходил свет (остальные работали на отражение). Поэтому нам пришлось сделать самый короткий в мире кусок волокна, длиной всего 1,5 мм – только такую длину волокна компрессор мог компенсировать.

Даже сейчас мало кто верит, что такое было возможно. Ведь волокно надо было еще как-то закрепить в оптической схеме, и менять по десять раз на дню, поскольку во время работы лазера он попросту сгорал. Это ноу-хау не было подчеркнuto ни в одной статье, но мы им очень гордились и гордимся до сих пор. Несмотря на свою длину, волокно прекрасно выполняло свою работу, выдавая бело-желтый луч широкого спектра, что подтверждает фотография.

Итак, длительность импульса после зеркального компрессора сократилась до 4 фс – за это время происходит менее трех осцилляций поля. При этом в зависимости от фазы максимальная амплитуда электрического поля изменяется не более чем на 10%. Столь малое изменение связано с тем, что даже такой короткий импульс слишком длинен для полной демонстрации фазы СЕР.

Когда я объясняю русскоговорящим студентам величину эффекта фазы, я обычно привожу в пример знаменитый вопрос из антрепризы А. Райкина про портного и клиента: «талию где делать будем?» Ведь чем толще клиент (длиннее импульс), тем менее понятия талии (фазы) имеют смысл. Фазовые изменения наиболее ярко проявляются в импульсах с одной-двумя осцилляциями, которые научились делать в нашей научной группе несколько лет назад. Практически эти действия по генерации импульсов разнообразных форм выглядят как упражнения с радиочастотным генератором

хотя вполне понятен: открытых временных вакансий очень много, а исследователь после защиты диссертации не может получить профессорскую должность, пока не поработает хотя бы в двух местах.

## Самое короткое ноу-хау

Поиски неуловимой фазы СЕР мы вели на созданном нами титан-сапфировом лазере, который производил импульсы длительностью менее 10 фс ( $10^{-14}$  с), состоящие всего из трех осцилляций поля, и энергией 10 нДж ( $10^{-8}$  Дж). Кстати, даже 14 лет спустя никто не достиг большей энергии таких импульсов в лазере этого типа.

Излучение этого лазера со средней длиной волны 750 нм, видимое как темно-красный свет, мы пропустили через кусок обычного оптического волокна. За счет нелинейного процесса в кварце, из которого состоит такое волокно, мы рассчитывали расширить спектр излучения хотя бы до октавного (содержащего частоты, различающиеся вдвое), как того требовал эксперимент.



сигналов произвольной формы. Но здесь несущая частота в миллион раз выше!

## В многослойном зазеркалье

Имея особенный во всех отношениях свет от лазера, мы хотим довести его до места эксперимента, которое может находиться на расстоянии в десятки метров, в целостности и сохранности. Но, проходя через любую среду (воздух, стекло), импульс, как выше уже упоминалось, расплывается за счет дисперсии. В видимом диапазоне спектра это означает, что у светового импульса становится красным «нос» и синей «спина».

Поэтому для сохранения «стройности» импульса при его передаче нужны специальные дисперсионные (*чирпованные*) зеркала, которые скомпенсируют запаздывание коротковолновой компоненты. Они представляют собой структуру из десятков тонких слоев чередующихся материалов, в которую красная часть спектра излучения проникает глубже, нежели голубая. В результате этой неравномерной по спектру задержки после выхода из зеркала все спектральные части импульса вновь совпадают, воссоздавая тем самым изначальный короткий импульс.

Студенты на моем практикуме по фемтосекундному лазеру (кстати, единственному в мире, насколько мне известно), мгновенно воспринимают эту красивую идею, предложенную в 1994 г. Ф. Краусом и его коллегой, также венгром по происхождению.

С «рекламой» этих зеркал нам повезло: они попали на обложку журнала *Science* от 10 августа 2007 г. Сейчас, создав дисперсионные зеркала для ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, мы пытаемся перенести эту идеологию в среднюю ИК-область. Но для контроля всего диапазона спектра 3–18 мкм\* нужно использовать иные, неоксидные, материалы, нежели для более коротких световых волн.

Проведя тотальный поиск, мы сначала обрадовались, когда обнаружили, что все подходящие на первый взгляд материалы имеют высокий показатель преломления, что обещает создание достаточно широкополосных зеркал. Но потом огорчились, когда поняли, что в этом случае нам не удастся так же успешно контролировать относительные задержки разных спектральных компонент.

Вообще разработка таких зеркал, включающая подбор материалов, толщины каждого слоя и их количества, является сложной задачей оптимизации, решаемой методами математического моделирования. Успех

\* Пока статья готовилась к печати, эта цель была уже достигнута. Но появилась потребность в материалах, работающих в более широком (3–25 мкм) диапазоне

## ЗАГЛЯНУТЬ ВНУТРИ КЛЕТКИ

Свет широкого (550—950 нм) спектра востребован для медицинского приложения – *когерентной оптической томографии*. Дело в том, что чем шире спектр излучения, которое посылается на исследуемый участок ткани или органа (например, глаза), тем лучше пространственное разрешение в глубину ткани. Следовательно, при анализе рассеянного тканью света появляется возможность различить все мелкие (микронного размера) детали ее пространственной структуры. В поперечной плоскости пространственное разрешение определяется качеством фокусирующей оптики.

Техническая сложность в том, что такой свет очень слабый – его интенсивность в миллион раз меньше интенсивности света, подаваемого на объект. Поэтому для реализации данной методики необходимы как фемтосекундные лазеры, генерирующие импульсы необходимой мощности и спектра, так и чувствительная детектирующая и обрабатывающая сигнал техника. Работа, в которой удалось заглянуть внутрь живой человеческой клетки, пораженной раком (Povazay *et al.*, 2002), является одной из самых цитируемых работ автора (на эту статью сослались уже более 400 раз)

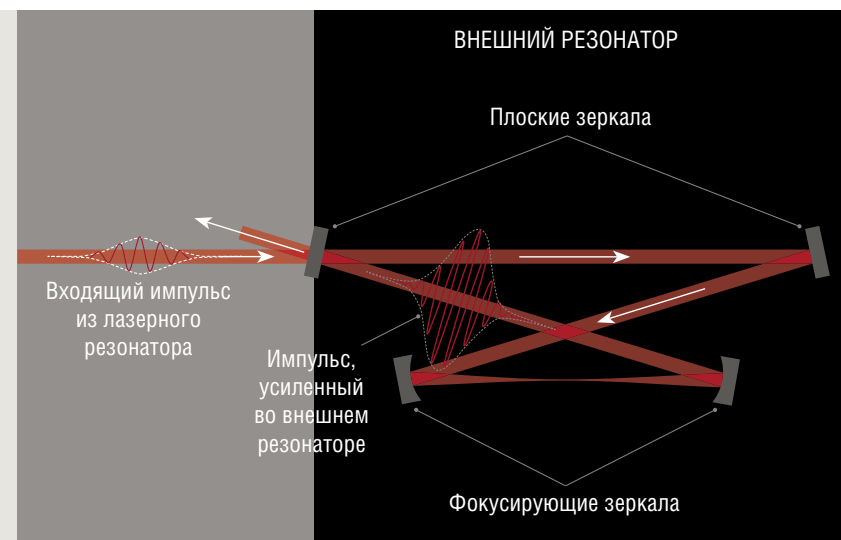
зависит как от наличия эффективных алгоритмов, так и от скорострельности вычислительной техники.

Проблема с этими зеркалами для среднего ИК-диапазона состоит еще и в том, что они получаются очень толстыми и вследствие своего веса имеют тенденцию отслаиваться от подложки. Таким образом, природа оказалась не столь богата на материалы с нужными свойствами, как бы нам того хотелось. Конечно, можно попытаться модифицировать уже имеющиеся, но такие материалы «обещают» быть очень хрупкими и способными «жить» только в вакууме.

Сейчас мы стараемся понять, насколько вообще разрешима эта проблема. Является ли она следствием неизвестного нам пока закона природы, который требуется математически сформулировать, либо все дело только в несовершенстве наших вычислительных алгоритмов и напылительной технологии. На данный момент у нас есть пока три плодотворные идеи, которые потребуют нескольких лет для проверки их доброкачественности. И эта работа может закончиться поражением, к которому мы готовы. Как, впрочем, и к победе.

## На карусели резонатора

Австрия – маленькая страна с небольшим бюджетом. Стоимость же наших лазерных проектов тяготела к масштабам с шестью нулями, для нее неподъемными. Поэтому, когда в 2003 г. Ф. Крауса избрали директором



Внешний резонатор предназначен для усиления света. Даже когда он пустой, усиление происходит благодаря когерентному сложению полей. Но если в резонаторе присутствует нелинейная среда, то в результате нелинейного взаимодействия света с ней возникают новые спектральные компоненты, что в конечном итоге приводит к значительному уширению спектра импульса

Института квантовой оптики общества Макса Планка, расположенном в Гархинге под Мюнхеном, мы поняли, что наши исследования переходят на иную ступень.

Здесь мы сразу взялись за амбициозные трудноподъемные проекты типа создания внешнего фемтосекундного резонатора, одного из самых замечательных устройств в лазерной физике. В отличие от «внутреннего» резонатора лазера, заполненного активной средой, «внешний» может быть пустым, но также предназначен для усиления света за счет когерентного сложения полей. Таким образом на каждом его обходе энергия импульса увеличивается, и это увеличение может стать тысячекратным.

Совсем новое качество возникает, если во внешний резонатор поместить нелинейную среду, например, истекающий из сопла газ. В этом случае импульс света, проходя по внешнему резонатору, взаимодействует, хотя и очень редко, с частицами газа. Тем не менее, результат такого «малоэффективного» взаимодействия есть, и заключается он в рождении новых спектральных компонент, спектрально очень далеких от циркулирующего основного излучения. Часть этих новорожденных фотонов выводится наружу после каждого прохода импульса «туда-сюда».

Мы надеемся, что подобный внешний резонатор оправдает надежды на реализацию излучения в так называемом «водяном окне» (длина волны 3–4 мкм), что необходимо для биологической спектроскопии. В этом диапазоне вода прозрачна, в то время как углеродные связи поглощают свет, позволяя исследовать живые структуры. Недавно нам удалось реализовать фотоны с энергией выше 100 эВ, т.е. длиной волны порядка 10 нм (Popeza *et al.*, 2013).

Другое применение наших лазеров, которое развивается в нашем строящемся Центре «продвинутых» лазерных приложений (CALA), связано с ге-

нерацией для медицинских целей узконаправленного рентгеновского излучения. В отличие от обычных рентгеновских медицинских аппаратов наша система позволит видеть изменения в тканях с разрешением всего в 1 мм, т.е. почти на порядок выше. Это означает, например, что раковую опухоль можно будет обнаружить на самой ранней стадии, когда лечение наиболее эффективно. Если, конечно, знать, что надо ее искать и в каком месте ее искать. Об этом – ниже. Другие лазеры этого центра, генерирующие ионы нужных энергий в районе десятков и сотен МэВ, позволят разрушать опухоли в процессе так называемой ионной терапии.

Не менее ценная особенность генерации нового света во внешнем резонаторе сводится к тому, что он позволяет увеличить мощность

## ЦЕНТР СОВРЕМЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ CALA

Центр CALA строят рядом с университетским зданием в Гархинге, на краю поля. Один его корпус, в котором располагается Лаборатория экстремальной фотоники LEX, уже функционирует; второй, где будут лазерные станции и клиническая часть, еще строится. При этом баварское правительство, которое вложило крупные средства в строительство центра, потребовало, чтобы здание не имело окон со стороны поля. Суть этого требования – не тревожить обитателей там диких животных в темное время суток, когда животные наиболее активны.

Наши же сотрудники работают и днем и ночью, а на некоторых лазерах время расписано на месяцы вперед. В результате нам пришлось отказаться от размещения в этом здании офисов, поскольку по строгим немецким законам подобные помещения должны иметь естественное освещение. Лазеры же будут расположены в подвале, в помещениях с защитой от ионизирующего излучения

излучения на много порядков величины: недавно нам удалось достичь почти мегаваттного уровня мощности – 0,7 МВт! Другие же исследовательские группы пока научились работать лишь на киловаттном уровне. Для сравнения: в начале моей научной карьеры в Новосибирске рекордный уровень мощности, достигнутый группой В.И. Донины внутри резонатора аргонового лазера в непрерывном режиме, составлял 5 кВт.

## Цветные солитоны

Световые импульсы, циркулирующие в нашем лазере, по сути, являются *солитонами*, т.е. структурно устойчивыми волнами, распространяющимися в нелинейной среде. Они так же стабильны и слабо меняются при обходе резонатора. Недавно нам удалось сделать цикл работ с Новосибирским государственным университетом и рядом институтов СО РАН по генерации солитонов нового типа, где впервые было продемонстрировано, что концептуально лазеры оказались значительно богаче, чем даже мы, специалисты, себе представляли (Бабин и др., 2014).

Одной из целей этих работ было увеличение энергии импульсов внутри резонатора лазера. При этом более предпочтительной представлялось использовать для этого схему с одним резонатором, нежели с двумя (под вторым резонатором подразумевается внешний), поскольку она более надежна и проста, особенно если ее реализовывать в волоконном варианте.

Проблема увеличения энергии солитонов в резонаторе может быть продемонстрирована на примере стакана с водой, в котором объем воды соответствует энергии импульса. Полный стакан соответствует максимальной энергии, которую может иметь один солитон, так как при попытке добавить в стакан еще воды она будет стекать вниз. Если же снизу подставить второй стакан (т.е. реализовать в резонаторе второй солитон), то его также можно наполнить водой. Если постараться, то и второй солитон будет иметь энергию, сравнимую с энергией основного солитона.

Упражнения с добавлением стаканов (солитонов) можно продолжать и далее, в результате чего суммарное количество воды в стаканах (полная запасенная энергия лазера) может стать весьма значительной. Важно то, что по выбранной схеме нижний стакан нельзя наполнить без заполнения водой вышерасположенных стаканов.

В нашем случае многоцветность солитонов достигается успешным использованием нелинейного рамановского процесса, который переводит частоту (и энергию) нового солитона в другой спектральный диапазон. Удивительно, но, похоже, никто до нас даже не обсуждал такую возможность. Эта концепция, подобно конструктору Лего, позволяет однотипным образом строить дополнительные внутренние резонаторы для каждого

из спектральных диапазонов, что решает проблему разных скоростей импульсов в резонаторе лазера, возникающую из-за их разной дисперсии. В конечном итоге таким образом можно осуществить сложение разных цветов на выходе лазера, что аналогично применению чирпованного зеркала.

## Красноречивый выдох

Зачем же нам так нужны зеркала среднего ИК диапазона, о которых упоминалось выше? Речь идет о медицинском проекте: этот особый, невидимый, но очень широкополосный свет должен помочь определить компоненты выдыхаемого нами воздуха с относительными концентрациями порядка триллионных долей. Эти молекулы, переносящиеся от органов и тканей через кровеносную систему к легким, несут важнейшую и достаточно полную информацию о нашем метаболизме.

Сегодня эта идея использовать запахи для диагностики частично реализована путем использования собак, умеющих «вынюхивать» определенные заболевания. Современные же технологии в этом смысле пока тормозят – лишь для нескольких заболеваний достигнут успех в виде подтверждения уже поставленного диагноза. Это относится как к традиционным методам масс-спектрометрии и хроматографии, так и к лазерным методам, на которые нацелен наш проект.

Дело в том, что у молекул разных газов свой спектральный диапазон поглощения энергии, и чтобы все их сразу зарегистрировать, нужен широкий многооктавный спектр и соответствующие зеркала. С помощью мощного лазерного света мы планируем работать во всем доступном диапазоне среднего инфракрасного излучения. Такой лазер уже заработал, причем с опережением графика. Кроме того, цуг коротких импульсов лазера можно сначала пропустить через ячейку с исследуемым газом, а потом через нелинейный кристалл и лишь потом задетектировать. Это позволяет измерить поглощение с беспрецедентной чувствительностью, в чем мы и убедились, сравнив наши первые результаты с результатами, полученными другими методами.

Существенно то, что лазерный метод анализа дыхания неинвазивный и принципиально быстрый. Проект имеет большое число и немедицинских приложений: поиск наркотиков, взрывчатки, течи в трубопроводах, дистанционная разведка нефти и газа – вот далеко не полный список возможных практических применений.

Для нас очень важно, что все эти лазерные методы, объединенные в единую концепцию, станут существенным вкладом в борьбу с раком. На первом этапе по анализу дыхания можно будет поставить диагноз, на втором – точно определить место поражения. Затем с помощью лазерной рентгеновской технологии провести сканирование большого органа с высоким



Для меня самый лучший свет – утренний. Мягкий и ровный, практически осязаемый... На этом фото прекрасный свет встретился с прекрасным объектом.  
Гархинская пустошь. Май, 5:30 утра.  
Фото автора

пространственным разрешением. Следующий шаг – лазерная операция по разрушению опухоли, а затем повторное сканирование.

На сегодняшний день группа из Национального института стандартов и технологии Боулдера (США) уже научилась распознавать лазерным методом бактерию *Helicobacter pylori*, вызывающую гастрит, язву и рак желудка. Правда, пока в относительной концентрации на уровне одной сотой процента. Многие другие научные группы также активно включились в гонку, однако они, насколько известно, используют маломощные узкополосные лазеры, уступающие нашему по всем параметрам помимо стоимости. Кто же победит? У нас опять, по Пушкину, «есть упоение в бою».

Сейчас мы подбираем специалистов, формируем команду по анализу дыхания. В частности, мы рассматриваем возможность создания так называемой «зеркальной» лаборатории при НГУ.

На какие деньги мы будем реализовывать этот проект? Пока мы получаем германскую финансовую поддержку, на подходе средства из Саудовской Аравии. Российских денег мы пока не получили, хотя и просили. В этой ситуации с горечью хочется процитировать известную поговорку про «ложку к обеду». В любом случае это проект будет реализован, мы уверены. С Россией или без.

Таким образом, мы имеем или скоро будем иметь все необходимые элементы для получения «особого света», включая лазеры и зеркала для их контроля. Уже проведены первые обнадеживающие эксперименты, результаты которых обещают людям новое качество жизни.

Кредо нашей группы: мы работаем там, где еще никто не был. И уходим оттуда раньше, чем другие туда придут. Это – сильное кредо, которому в реальности очень трудно следовать. Еще один ударный пункт сильной группы – психология победителей. То, за что мы беремся, будет сделано – впервые в мире. Для этого мы готовы идти «по минному полю» без карты, медленно, но верно подбираясь к цели. Те, кто придет после нас, пройдут быстрее, без потерь финансов и времени. Но они не соберут той славы. И того кайфа от успеха...

*Литература*  
Крюков П.Г. Лазеры ультракоротких импульсов // *Квантовая электроника*. 2001. Т. 31. №2.

Филиппов А.Т. Многоликий солитон. М.: Наука, 1990. 288 с.

Apolonski A. et al. Controlling the Phase Evolution of Few-Cycle Light Pulses // *Phys. Rev. Lett.* 2000. Vol. 85. P. 740.

Babin S.A. et al. Multicolour nonlinearly bound chirped dissipative solitons // *Nature Communications*. 2014. Vol. 5. Article 4653.

Goulielmakis E. et al. Attosecond Control and Measurement: Lightwave Electronics // *Science*. 2007. Vol. 317. P. 769–775.

Jones D.J. et al. Carrier-Envelope Phase Control of Femtosecond Mode-Locked Lasers and Direct Optical Frequency Synthesis // *Science*. 2000. Vol. 288. P. 635–639.

Povazay B. et al., Submicrometer axial resolution optical coherence tomography // *Opt. Lett.* 2002. Vol. 27. P. 1800–1802.

Pupeza I. et al. Compact high-repetition-rate source of coherent 100 eV radiation // *Nature Phot.* 2013. Vol. 7. P. 608–612.