

РАЗВИТИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ

Из книги «Воспоминания. К 85-летию со дня рождения член-корреспондента РАН В.Л. Тальрозе»



Васильев **Герман**
Константинович - **доктор**
физико-математических наук,
профессор, заведующий
комплексом лабораторий
Института проблем
химической физики РАН,
Черноголовка

Я поступил на Физтех в 1954 г. и учился на кафедре М. А. Лаврентьева под руководством А. А. Дерибаса на Дмитровском полигоне МФТИ. Меня привлекала проблематика взрыва, ударных волн, цунами. Однако в 1956-

1957 гг. М. А. Лаврентьев забрал старшие курсы кафедры с собой под Новосибирск в поселок Лесной для создания Сибирского отделения Академии наук. Я, студент V курса, и еще несколько моих товарищей остались в Москве. Нам было сказано: "Сделаете дипломную работу на других базовых кафедрах, а потом приедете в Сибирь".

Так я попал к Виктору Львовичу Тальрозе. Тематика мне не очень нравилась. Мы вместе с В. Е. Скуратом занимались радиационной стойкостью полимеров, рекомбинацией радикалов при низких температурах, а также выделением водорода при радиоллизе. Мы заметили эффект сильной задержки выделения водорода при низких температурах. Внутри полимера создавалось давление водорода до 150 атм (если пересчитать на газовую фазу). Мы изучали предельные дозы облучения, при которых начиналось выделение водорода в газовую фазу. Это и стало темой моего диплома. В мае 1960 г. я закончил Московский физико-технический институт. В июне я поступил в аспирантуру МФТИ и был командирован в ИХФ АН СССР.

В самом начале 60-х годов за рубежом и в Советском Союзе появились публикации о первых лазерах. Здесь большую роль сыграли работы Поляни (1961 г.), в которых были сформулированы понятия о "частичной" и "полной" инверсии на колебательно-вращательных переходах в молекулах, в том числе и продуктах химической реакции, хотя в то время вообще не было ни молекулярных лазеров, ни тем более химических. Но стало ясно, как, в принципе, могут быть реализованы условия генерации на молекулах.

Я со своим другом Петей Барашевым, с которым мы познакомились на II курсе, как-то беседовали на тему о появившихся лазерах. Окончив свои дела на Физтехе, к нам присоединился и Виктор Львович (Виктор Львович Тальрозе).

Обсуждали вопросы, касающиеся того, как пересекаются химфизика и цепи в лазерах. Пришли к выводу, что они родные братья: химические цепи, нейтронно-ядерные и квантовые (фотонные) цепи в лазерах. Все мы были далеки от лазерной тематики. Виктор Львович занимался масс-спектрометрией, радиационной химией, исследованием ионно-молекулярных реакций, изучением их структурных особенностей, например почему они закручиваются в спирали. Тема лазеров заинтересовала его, возможно, потому что в лазерах - цепная разветвленная фотонная реакция, а химфизика - родина разветвленных цепей.

Подумали, может, имеет смысл заняться этими вопросами. Это было интересно, так как в литературе описывались перспективы получения грандиозных мощностей и вопросы, которые могли бы решить химические лазеры, открывали новые горизонты в технике и технологиях. Первоначально у нас была просто заинтересованность, а потом это все больше и больше поглощало нас. Уж больно было заманчиво (но оказалось совсем не просто): к одному газу добавляешь второй, реакция, вспышка - и острый видимый (или чаще - невидимый) луч вырывается из оптической кюветы...

В то время я занимался радиационной химией, предельными концентрациями накапливаемых при радиоллизе радикалов, масс-спектрометрией. Как я уже отмечал, при выполнении дипломной работы был замечен эффект задержки выделения водорода при радиоллизе органических соединений. Тальрозе сказал, что это хороший эффект и им надо заниматься. Мне был выделен один из первых серийных масс-спектрометров, который был установлен около ускорителя

электронов - под пучком, для того чтобы наблюдать газовыделение.

Часть блоков (ионные источники, развертка, магнит) установили рядом с пучком в радиационной зоне, а всю остальную аппаратуру вынесли в защищенное помещение. Я исследовал радиационную устойчивость различных веществ. Это было моей основной работой.

В 1962 г. на I Конференции по элементарным процессам был сделан доклад ВЛ о перспективах использования разветвленных цепных реакций в лазерах. Это был довольно формальный доклад. Очень многого мы тогда не понимали, хотя по индуцированным процессам нас консультировал И. И. Собельман из ФИАН. Там же я познакомился и с А. Н. Ораевским, который закончил МФТИ на 3 года раньше и работал у Н. Г. Басова в ФИАН. Он тоже интересовался проблематикой химических лазеров.

В 1963 г. В Л опубликовал работу, в которой был дан теоретический анализ того, каким требованиям должна удовлетворять химическая реакция, чтобы на ее основе можно было создать химический лазер. Там были отмечены особые преимущества использования цепных разветвленных реакций.

В мае 1963 г. меня распределили в Черноголовку, где я был зачислен на должность заместителя начальника АХО. В то время со ставками в Академии наук были сложности. В середине сентября я переехал в Черноголовку, где уже кроме лазеров ничем другим не занимался.

Эксперименты начали с протяженного, во всю длину криогенного корпуса (там зарождался черноголовский Отдел свободных радикалов и ионов) гелий-неонового лазера, протяженного настолько, что он должен был светить ("генерить") без зеркал. Светил, но...

Это была труба диаметром 3 см. Никто не знал, что и как с ней делать. Тогда действовали интуитивно, не совсем понимая, чего же от нее ждать (конечно, с сегодняшних позиций мы бы действовали совсем по-другому). Формировался случайный шум, который усиливался в виде отдельных импульсов. Так оно, в принципе, и было. Когерентный шум можно было получить, и мы это делали вместе с моим студентом Женей Макаровым. Мы не могли решить данную задачу с наносекундным временным разрешением, у нас не было технических возможностей. Это было безнадежно в то время. Мы измеряли угловое распределение излучения... Шумовая

составляющая четко выписывалась на фоне остальных, хотя угловые размеры были небольшие, поскольку длина была большой, но тем не менее направленность шума наблюдалась. Женя Макаров смотрел, видел шум, подтверждая теорию насыщения. Мы не могли мерить короткие импульсы, мерили только усредненные характеристики.

Это была первая лазерная работа в ИХФ. Никто больше ничего не знал и подобного не делал. Федор Иванович Дубовицкий заходил из любопытства. Многие считали это пустым занятием.

Следующим направлением исследований было возбуждение активных лазерных кристаллов светом от ударной волны, получаемой при взрыве ВВ. Однако одно дело получить излучение света на взрывной площадке, другое - получить в установке, где есть кристалл, который надо накачать. Это обернулось тяжелой проблемой.

Большого выбора кристаллов не было, мы использовали иттриевый гранат. Очень маленький. Его надо было накачивать интенсивней, чем мы могли. С гранатом мы получили хорошую мощную люминесценцию. Внутри трубки без резонатора бежала ударная волна. Все взрывалось, все тряслось.

Мы делали конструкцию, которая сохраняла кристалл. В качестве ВВ использовали чистый ТЭН в виде таблеток массой 2- 5 г, которые инициировали разрядом через проволочку. Заряды для нас очищали и готовили в лаборатории А. Н. Дремина. В других местах работали просто варварски: помещали кристалл внутри взрывчатки, инициировали светящуюся ударную волну, которая накатывалась на поверхность кристалла, в нем происходило лазерное излучение, а кристалл впоследствии превращался в порошок.

В 1965 г. в группе была начата работа по созданию лазера на основе реакции смеси фтора и водорода. К этому времени изменилась ситуация в отношении перспективы создания химических лазеров - существовавший большой скептицизм был поколеблен первым успехом Каспера и Пиментеля (Университет Калифорнии в Сан-Франциско), получивших генерацию на модулях HCl в реакции хлора с водородом, инициированным мощным световым импульсом. Наш выбор реакции фтора с водородом для химического лазера был обусловлен тем, что незадолго до этого Н. Н. Семеновым и А. Е. Шиловым с сотрудниками был доказан ее разветвленно-цепной механизм, осуществляемый через колебательно-

возбужденные молекулы HF. В этой смеси в отличие от использовавшихся американскими исследователями, где для возбуждения лазерного излучения затрачивалась электрическая энергия, на 1- 3 порядка превышающая запас химической энергии в системе и на 6- 8 порядков - энергию в лазерном излучении, можно было ожидать получения существенно иных характеристик.

Помимо того, что это реакция разветвленная, количественно о ней в то время не было известно практически ничего. Правильным был подход - все установки делать в металле. На первых порах нам помог Л. Ю. Русин, работавший в Москве в лаборатории А. Е. Шилова. Взрывной режим реакции решили осуществлять переходом верхнего предела самовоспламенения за счет сброса давления в реакторе. Это удавалось сделать с большим трудом и в редких случаях. Не было никакой воспроизводимости, иногда смесь взрывалась непредсказуемым образом с печальными разрушительными последствиями. Желаемых результатов не было (как мы понимаем сегодня - и не могло быть). ВЛ приезжал редко, в основном нам приходилось ездить в Москву.

Как оказалось, легче всего было перевести реакцию во взрывной режим перехода нижнего предела самовоспламенения в результате ее инициирования короткоимпульсным электрическим разрядом. В конце 1968 г. первый химический лазер на фторводородной смеси заработал у нас в Черноголовке в импульсном режиме с возбуждением лазерного излучения и одновременно взрывного режима реакции. Не обошлось без курьезов. Мощность излучения уже в этом первом лазере оказалась столь большой (около 100 кВт), что при изучении спектрального состава лазерного излучения с помощью установленного на пути пучка монохроматора пришлось сильно уменьшать ширину его входной щели, так что возникли большие дифракционные потери и соответственно, как выяснилось позже, резко возросло рассеяние излучения на всех элементах внутри монохроматора. В результате приемник регистрировал сигнал на любой длине волны в широком спектральном интервале. Когда во время приезда академика Н. Г. Басова в Черноголовку ему рассказали о "необычном" спектре излучения, его реакцией была немедленная постановка соответствующих исследований в ФИАН. И уже вскоре после первой нашей публикации вышли в свет работы, содержавшие результаты подробного исследования спектра

генерации фторводородного лазера, выполненного Н. Г. Басовым и А. Н. Ораевским с сотрудниками.

Эти исследования способствовали выборам Виктора Львовича членом-корреспондентом АН СССР. Им он стал в декабре 1968 г.

В течение последующих нескольких лет у нас в стране и за рубежом были подробно изучены все основные элементарные процессы, идущие в лазерных смесях, и проведена широкая оптимизация характеристик генерации. В настоящее время по изученности фтор- водород- дейтериевая реакция является, пожалуй, рекордсменом (известны количественные данные о более 100 элементарных процессах). Естественно, возник вопрос о том, в какой мере " работает" процесс разветвления в реальных лазерных условиях. Количественное изучение привело к отрицательному ответу: в течение лазерного импульса разветвление в смеси не осуществляется. Однако реализуемая в лазере высокая эффективность преобразования химической энергии в излучение, имеющая место до больших глубин химического превращения, свидетельствовала о наличии эффективного самоускоряющегося процесса. Ответственным за такой режим оказалось тепловое ускорение реакции (длины химической цепи), причем его конкуренция с процессами гибели активных центров обусловила появление своеобразных критических условий возникновения (или отсутствия) взрывного режима и соответственно возникновения за порогом взрыва и порога генерации. Этот режим был назван нами фототепловым взрывом, он и обеспечивает высокую эффективность преобразования химической энергии в излучение.

В 1969 г. Виктор Львович стал более интенсивно заниматься этой тематикой. Основной задачей было быстрое освоение этой области. Мы стали проводить исследования реакций, происходящих и при атмосферном давлении.

В этом же году у нас заработал по тем временам феноменальный лазер, имевший примерно 40 МВт импульсной мощности, причем без оптических окон - просто труба с механическими заглушками. В ней готовилась рабочая смесь при давлении 1 атм. Затем заглушки открывались, приводилось инициирование реакции светом уникальных импульсных ламп (собственной конструкции) и лазерное излучение выводилось из резонатора с металлическими зеркалами в лабораторное помещение. В то время необходимые оптические материалы

(флюорит и др.) были большим дефицитом. Полученная величина удельной энергии лазерного излучения достигала 80 Дж/ л • атм. Это наш рекорд. Получали и больше: у С. Б. Кормера (

в Сарове) до 200 Дж/ л • атм, но в других условиях - с взрывной накачкой от света ударной волны в ксеноне (из доклада директора ИЛФИ в г. Сарове Г. А. Кириллова на IV Харитоновских тематических научных чтениях 18- 21 февраля 2002 г.).

По постановлению директивных органов в связи с развитием " астрофизики" были начаты серьезные лазерные разработки, причем не только на основе химических реакций. ИХФ тоже проводил работы в рамках этого постановления. В это же время состоялись ряд визитов и встреч с С. Б. Кормером, Ю. Б. Харитоновым, В. С. Шпаком (тогда директором ГИПХ), Н. Г. Басовым в Москве и Ленинграде.

Встала острая необходимость подготовить развернутый план работ по химическим лазерам. С этой просьбой ВЛ обратился ко мне. Я взял большой лист миллиметровой бумаги, расчертил его и представил детально прописанную программу наших исследований.

Я пытался понять, какой мощности лазер мы можем сделать. Мы считали, что при оптимальном размере оптическая плотность должна соответствовать диаметру сосуда. И в конце концов я остановился на лазере объемом 200- 300 л. Это мне казалось максимумом того, что мы могли бы реализовать.

Как выяснилось немного позже, на тематическом закрытом заседании в АН СССР С. Б. Кормер и Ю. Б. Харитон заявили гораздо большие габариты лазера. И в общем они его сделали. Как-то Виктор Львович приехал в Черноголовку и сказал, что мы взяли на себя обязательство сделать систему даже большую по габаритам по сравнению с Кормеровской. Все присутствовавшие (Е. Б. Гордон, Ю. Л. Москвин, А. Н. Пономарев, Г. К. Васильев) чуть со стульев не попадали ...(так по крайней мере мне показалось).

На тот момент фундаментальная проблематика химических лазеров была далека от решения. Мы только получили возможность серьезно этим заняться: изучить закономерности химической реакции, распределение неравновесной колебательной энергии в продуктах, исследовать перенос и релаксацию колебательной энергии и другие важные вопросы.

В то время подобные обязательства подкреплялись крупными финансовыми вливаниями, так мы стали работать в рамках крупной программы. Скорее всего, как я думаю, ВЛ принимал это решение, посоветовавшись с Н. Н. Семеновым, Ф. И. Дубовицким, но нас в тот момент уже не спрашивали. Мы продолжали работать по тем направлениям, которые были за нами закреплены.

Мы начали писать научно-техническое обоснование цепного мощного химического лазера. В этой работе принимали участие А. М. Чайкин, Ю. Л. Москвин, Е. Б. Гордон, А. А. Борисов (ИХФ, Москва) и я. Написали хотя и много (150- 170 с), но быстро. Недели за две все было закончено. В заключении были названы три главных ожидаемых параметра лазерной системы: 100 Дж/ л • атм, КПД (по инициированию) 100%, импульс инициирования 10 мкс. Это были лишь желаемые показатели, ведь не были проведены достаточные исследования, подтверждающие возможность таких параметров. Дальнейшие исследования показали, что достижимыми являются 80 Дж/ л • атм, КПД 60- 80%, иницирующий импульс ~ 3 мкс. Позже, в конце 70-х годов, я предложил отказаться от нереальной разработки, так как в рамках заявленных габаритов лазеров эти характеристики получить было невозможно, но вместо этого реализовать многомодульную лазерную систему и научиться правильно ("когерентно") суммировать излучение отдельных модулей. На что мне было сказано: " Вместо того чтобы решать проблемы, вы от них уходите и создаете новые". Тогда я думал, что делать - уходить или заниматься этим тупиковым направлением. Наши отношения с Виктором Львовичем приобретали сложный характер. В конце 1977 г. мне, Москвину и Гордону дали лаборатории. Дальнейшее наше сотрудничество в рамках данных работ не сложилось.

Постепенно начали формироваться (в значительной степени по нашей инициативе) другие направления исследований в рамках проблематики химических лазеров: дистанционный анализ и распознавание примесей в атмосфере (в том числе опасных ВВ), накачка излучением химических лазеров для создания сильно неравновесных сред, системы оптико-электронного противодействия. Установились новые контакты и сотрудничество с соответствующими организациями. В конце 1985 г. произошло наше окончательное научное размежевание с ВЛ (нужно сказать, не

без определенных проблем и вмешательства Отдела науки ЦК, чтобы сохранить нашу научную проблематику).

Что же касается разветвления в реакции, оно оказалось серьезным "противником" при практических разработках импульсных фтор-водород-дейтериевых лазерных систем, так как обусловило низкую стабильность смесей и необходимость использования сложных процедур их безопасного приготовления. Лишь в начале 80-х годов на основе проведенных фундаментальных исследований имеющего место необычного процесса самостабилизации смесей (возбужденный HF - причина разветвления, невозбужденный - главный канал гибели возбуждения) и соответственно возникновения лишь относительной их неустойчивости. При определенных типах перехода через предел самовоспламенения были найдены способы и технические решения систем быстрого (масштаба секунд или менее) заполнения активных объемов химических лазеров (Е. Ф. Макаров, Ю. А. Чернышев). Тем самым было снято главное препятствие на пути конструкторских разработок фтор-водород-дейтериевых лазеров и их практического использования.

Импульсные химические лазеры, созданные нами, изначально обладали высокой мощностью. Увеличивая энергию за счет давления и объема, можно без особых усилий получать мощности 10^2 — 10^3 МВт. Сейчас, укорачивая импульс в особом преобразователе, мы хотим получить мощность еще на 7 порядков больше. Если удастся, то это будет серьезный прорыв к лазерному термояду, к нейтронной и гамма-диагностике, к новым принципам ускорения элементарных частиц (электронов, протонов).

Пока обязательства, данные Виктором Львовичем по лазерной тематике, так и остаются нереализованными. На мой взгляд, это сыграло существенную роль в академической карьере Виктора Львовича. Ему не смогли этого простить, а потом пришло другое время, и другое поколение "молодых и горячих".