

Мощные ВКР-лазеры – когерентные сумматоры (как это было)

А.З.Грасюк, И.Г.Зубарев, В.Ф.Ефимков, **В.Г.Смирнов**

Изложена история научно-исследовательских работ, выполненных под руководством Н.Г.Басова и направленных на создание высокоэнергетических лазеров – когерентных сумматоров (КС) на основе ВКР в жидком азоте и жидком кислороде. Работы проводились совместно сотрудниками Лаборатории КРФ ФИАНА и ВНИИЭФ. В результате проведения этих работ были решены многие задачи. Установлено, что жидкие азот и кислород являются оптимальными активными средами для мощных ВКР-лазеров с большой энергией в импульсе. Разработан метод очистки этих криогенных жидкостей от микро- и нанопримесей, что позволило устранить нелинейные потери излучения накачки и преобразованного излучения в активной среде и обеспечить эффективную работу ВКР-лазеров – когерентных сумматоров (ВКРЛ-КС) с большой выходной энергией. Созданы криогенные кюветы, обеспечивающие высокую оптическую однородность жидких азота и кислорода, что обеспечило малую (на уровне 0.1 мрад) расходимость преобразованного излучения с большой плотностью энергии. Разработаны растровые фокусирующие системы, создающие оптимальную концентрацию излучения накачки в активной среде. В результате этих исследований были созданы мощные высокоэнергетические и с малой расходимостью пучка ВКРЛ-КС на жидком азоте ($\lambda_S = 1.89$ мкм) и жидком кислороде ($\lambda_S = 1.65$ мкм) с накачкой от иодных взрывных фотодиссоционных лазеров (ВФДЛ) ($\lambda_z = 1.315$ мкм). Характеристики созданных ВКРЛ-КС были рекордными для того времени (конец 1960-х и начало 1970-х годов): энергия – до 2.5 кДж в импульсе длительностью 10 мкс, расходимость пучка $\sim 10^{-4}$ рад, плотность энергии в пучке – сотни Дж/см².

Ключевые слова: когерентное суммирование, когерентные сумматоры, вынужденное комбинационное рассеяние, ВКР-лазеры как когерентные сумматоры, жидкий азот, жидкий кислород, криогенные кюветы, фильтр для удаления микропримесей, растровые фокусирующие системы, мощные ВКР-лазеры с накачкой от ВФДЛ.

Содержание

1. Введение	1064
2. Мощные ВКР-лазеры. Начало	1065
2.1. Необходимость преобразования и когерентного суммирования излучения ВФДЛ	
2.2. ВКР-лазеры как когерентные сумматоры	
2.2.1. Активные среды для мощных ВКР-лазеров: жидкие азот и кислород	
2.2.2. Криогенные кюветы, обеспечивающие высокую оптическую однородность жидкого азота и жидкого кислорода	
3. Мощные комбинационные лазеры с накачкой от ВФДЛ. Совместные работы Лаборатории КРФ ФИАНА и ВНИИЭФ	1067
3.1. Начало совместных работ, их основные участники	
3.2. Неожиданные препятствия и их преодоление	
3.2.1. Фильтр для удаления микропримесей	
3.3. Растровые фокусирующие системы	
3.4. Первый успешный опыт	
3.5. Долгий и трудный путь вперед	
4. Заключение	1071

1. Введение

В начале 1960-х годов Н.Г.Басов выдвинул идею когерентного суммирования лазерных пучков. Сущность этой идеи заключалась в том, чтобы в результате частотного преобразования нескольких лазерных пучков (источников накачки) в активной среде создать так называемый

лазер второго каскада (когерентный сумматор). В таком сумматоре значительная часть энергии лазера (лазеров) накачки должна быть сосредоточена в одном пространственно когерентном пучке, расходимость которого должна быть много меньше расходимости источника накачки. При этом многократно повышается интенсивность излучения и плотность его энергии и, следовательно, увеличивается яркость лазерного излучения по сравнению с суммарной яркостью пучков накачки.

Приоритетные и основополагающие работы (теоретические и экспериментальные), направленные на создание и исследование систем когерентного суммирования лазерных пучков – когерентных сумматоров, проводились

А.З.Грасюк, И.Г.Зубарев, В.Ф.Ефимков, В.Г.Смирнов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: grasiuk2008@yandex.ru

Поступила в редакцию 15 ноября 2012 г.

в Лаборатории квантовой радиофизики (КРФ) ФИАНа с середины 1960-х годов.

Начальным этапом успешного осуществления идеи Н.Г.Басова по когерентному суммированию лазерных пучков стали полупроводниковые лазеры с оптической (лазерной) накачкой [1–8], в частности так называемые излучающие зеркала [8], предложенные Н.Г.Басовым еще в 1963 г. и созданные в 1965 г.

Принципиальное преимущество излучающего зеркала перед другими типами лазеров с лазерной накачкой, например лазерами на красителях, заключается в его конструкции, рассмотренной в [9].

К сожалению, в те годы (середина шестидесятых) еще не были разработаны достаточно мощные, эффективные и сравнительно дешевые лазерные источники накачки, такие, например, как современные полупроводниковые диодные лазеры. Не было и средств доставки их излучения к излучающему зеркалу, таких как современные волоконно-оптические световоды. Потребовалось несколько десятилетий, прежде чем излучающие зеркала Н.Г.Басова возродились под новым названием – дисковые лазеры. В настоящее время они работают как на активированных стеклах, так и на полупроводниках (полупроводниковые дисковые лазеры) [10] и нашли практическое применение.

Во второй половине 1960-х годов были созданы мощные высокоэнергетичные взрывные фотодиссоционные лазеры (ВФДЛ). И тогда остро встала необходимость создания когерентных сумматоров. Н.Г.Басов и И.И.Собельман предложили разрабатывать такие лазеры-сумматоры на основе вынужденного комбинационного рассеяния. Нам было поручено осуществить эту идею на практике в совместных работах с ВНИИЭФ (ВНИИ Экспериментальной физики), который тогда возглавлял Ю.Б.Харитон (ЮБ). В настоящее время ВНИИЭФ носит название Федерального ядерного центра (г.Саров).

К тому времени мы уже накопили опыт эффективно преобразования лазерного излучения методами ВКР [6, 7, 11] в процессе работ по созданию и исследованию полупроводниковых лазеров с оптической накачкой. Этот опыт, а также созданные устройства, схемы и конструкции [12, 13] очень пригодились нам в дальнейшем в совместных работах с ВНИИЭФ по созданию мощных высокоэнергетичных комбинационных (ВКР) лазеров на жидких азоте и кислороде, проводившихся в период с 1967 г. по 1976 г. В результате этих работ были созданы первые мощные ВКР-лазеры – когерентные сумматоры – на жидких азоте и кислороде при накачке излучением взрывных фотодиссоционных иодных лазеров (ВФДЛ) на C_3F_7I .

Получаемые результаты передавались для дальнейшего масштабирования в НПО «Астрофизика», где соответствующие разработки велись в подразделении В.К.Орлова под непосредственным руководством Е.М.Земскова. Замечательные достижения НПО «Астрофизика» в этой области представлены в книге [14], в которой, к сожалению, не нашли отражения результаты наших совместных работ с ВНИИЭФ [15, 16]. Н.Г.Басов был генератором идей, организатором и участником всех основных работ этого направления (как и многих других). Можно очень много говорить об этом уникальном человеке, одном из величайших ученых XX века, общение с которым было всегда вдохновляющим и плодотворным.

Вклад в развитие всего этого направления внесли многие сотрудники Лаборатории КРФ ФИАНа, ВНИИЭФ, НПО «Астрофизика», ГОИ и других организаций. К со-

жалению, некоторых из участников этих работ уже нет в живых. Считаю своим долгом перед ними, равно как и перед теми, кто сейчас здравствует, рассказать о выполненных работах, в которых нам посчастливилось участвовать.

2. Мощные ВКР-лазеры. Начало

2.1. Необходимость преобразования и когерентного суммирования излучения ВФДЛ

В течение 1965–1966 гг. в результате совместных работ Лаборатории КРФ ФИАН (В.С.Зуев, В.А.Катулин, О.Ю.Носач и др.) и ВНИИЭФ (С.Б.Кормер и др.) были созданы мощные высокоэнергетичные иодные ВФДЛ на длине волны $\lambda = 1.315$ мкм.

Энергия такого лазера уже тогда достигала нескольких килоджоулей в импульсе длительностью ~ 10 мкс и было очевидно, что в ближайшие годы она может увеличиться еще на два порядка. Перспектива применения лазеров, например в системе ПРО, становилась реальной. Однако существенным недостатком ВФДЛ, препятствовавшим их практическому использованию, была сравнительно большая расходимость пучка, $\Theta_{pdl} \cong (0.5-1) \times 10^{-2}$ рад, что затрудняло применение лазера, снижая его «дальнобойность».

Необходимо было найти и разработать способ преобразования излучения ВФДЛ и на его основе создать преобразователь со следующими характеристиками.

1. Энергия W_{pdl} нескольких (N) лазеров накачки должна быть сосредоточена с максимальным КПД η в одном пространственно когерентном пучке преобразователя с энергией W_{cs} :

$$W_{cs} = \eta \sum_{i=1}^N W_{pdl_i} \cong \eta N W_{pdl}$$

т.е. должно осуществляться когерентное суммирование излучения нескольких лазеров. Сам же преобразователь представляет собой когерентный сумматор (КС).

2. Расходимость Θ_{cs} лазерного пучка КС должна быть во много раз меньше расходимости излучения накачки Θ_{pdl} : $\Theta_{cs} \ll \Theta_{pdl}$.

3. Диаметр d_{cs} пучка преобразователя должен быть много меньше диаметра d_{pdl} лазеров накачки: $d_{cs} \ll d_{pdl}$.

Таким образом, основные и принципиальные требования к КС вкратце можно сформулировать следующим образом: энергия и мощность нескольких лазеров накачки должны быть сконцентрированы с максимальным КПД в одном пучке КС с диаметром, меньшим диаметра пучка каждого из «слагаемых» ВФДЛ. При этом расходимость лазерного пучка КС должна быть много меньше расходимости лазеров накачки.

Как было сказано, в 1966 г. для преобразования и когерентного суммирования мощных высокоэнергетичных лазерных пучков ВФДЛ Н.Г.Басов и И.И.Собельман предложили использовать вынужденное комбинационное рассеяние. Таким образом, преобразователем – когерентным сумматором – должен был стать комбинационный лазер (КЛ). Достоинствами ВФДЛ как источников накачки для ВКР были большая мощность и, главное, высокая монохроматичность. Большая мощность давала возможность получать достаточно высокую интенсивность накачки I_p , необходимую для оптимального режима работы КЛ.

При ВКР усиление стоксовой компоненты интенсивностью $I_{st}(0)$ на длине L происходит по экспоненциальному закону [15–20]:

$$I_S(L) = I_S(0) \exp(gI_p L),$$

где g – коэффициент усиления при ВКР. Для жидкого кислорода при длине волны накачки $\lambda_p = 1.315$ мкм $g = 1.5 \times 10^{-10}$ м/Вт. Отсюда следует, что инкремент $b = gI_p L$ экспоненциального усиления стоксовой компоненты ВКР пропорционален интенсивности накачки I_p , которая должна быть весьма значительной. Например, чтобы получить инкремент $b = 15$ нужна интенсивность накачки $I_p = 10^{11}$ Вт/м².

2.2. ВКР-лазеры как когерентные сумматоры. Начало работ по КЛ в Лаборатории КРФ

В конце 1966 г. под руководством Н.Г.Басова началась практическая разработка мощных ВКР-лазеров как когерентных сумматоров. Теоретическим обоснованием этих работ занимались И.И.Собельман, его сотрудники Е.А.Юков, В.Д.Алексеев а также О.Н.Крохин и В.С.Летохов.

Большим авторитетом среди нас пользовался И.И.Собельман. У него был особый дар предельно ясно, доступно, живо, увлекательно и образно изложить любую идею, любой результат. Вот два характерных примера.

В ФИАНе для молодых физиков был организован цикл лекций. Их читали ведущие ученые, среди которых был и И.И.Собельман. Его лекция произвела особенно сильное впечатление на слушателей. После нее они обратились к организатору цикла с просьбой еще раз пригласить И.И.Собельмана. Организатор попытался возразить:

– Ребята, Собельман занимался с нами два часа. При подготовке лекции минимальная затрата времени втрое превышает ее длительность. Нельзя так злоупотреблять добротой человека.

– Не нужно ему никакой подготовки, – ответили слушатели, – и без нее нам будет интересно и полезно. Так и скажи ему: «Игорь Ильич, расскажите нам что-нибудь!»

На одном из межведомственных совещаний, в котором принимал участие И.И.Собельман, обсуждались «оружейные» лазеры, их возможности как средства борьбы с ракетами. Один из участников совещания, военный, возразил:

– Ну что особенного в вашей лазерной «противоракете», даже если она несет энергию в десять мегаджоулей. Ведь это всего-навсего полтора килограмма тротила. Стоит ли лазерный «огород городить»? Не проще ли разработать для этой задачи обычную противоракету, которая может нести взрывчатку с гораздо большей энергией?

Ответ И.И.Собельмана на этот вопрос был таким:

– Разумеется, ваша противоракета – вещь хорошая. Но у нашей, лазерной, есть одно небольшое преимущество: она летит со скоростью света.

Всем стало все ясно, и на этом дискуссия по заданному вопросу закончилась.

Просвещать нас в области физики ВКР И.И.Собельману самоотверженно и плодотворно помогал его ученик Е.А.Юков – тогда еще совсем молодой, но, несмотря на возраст, удивительно глубоко и зрело мыслящий теоретик. Он наглядно и просто, «по-собельмановски», растолковывал нам физические модели и механизмы ВКР.

Лабораторные экспериментальные исследования проводила группа в то время еще совсем молодых, двадцати-

летних физиков, инженеров и техников. В эту группу входили И.Г.Зубарев (был неформальным лидером группы), В.Ф.Ефимков, В.Г.Смирнов, В.И.Мишин, М.Г.Смирнов, А.В.Котов, Ю.И.Карев, В.В.Бочаров, А.Н.Киркин, М.Г.Гангардт, О.А.Логунов, А.К.Запольский и В.Н.Волков.

2.2.1. Активные среды для мощных ВКР-лазеров – жидкие азот и кислород

Первая проблема, которую необходимо было решить, заключалась в выборе активного вещества для мощного и высокоэнергетического ВКР-преобразователя. Это вещество должно было быть оптически прозрачным в широком диапазоне длин волн, включая ближний ИК диапазон. Оно должно было выдерживать без повреждения большие световые потоки лазерного излучения, обладать достаточно высоким коэффициентом усиления на стоксовой частоте, иметь достаточно большую критическую мощность самофокусировки и не иметь других конкурирующих нелинейных эффектов со сравнимыми пороговыми интенсивностями накачки. Кроме того, это вещество должно было быть доступным в достаточно больших количествах. После проведенного анализа и соответствующих опытов мы пришли к заключению, что практически есть только два вещества, которые удовлетворяют всем перечисленным требованиям, – жидкие азот и кислород.

2.2.2. Криогенные кюветы, обеспечивающие высокую оптическую однородность жидких азота и кислорода

Для их использования в качестве активной среды ВКР-преобразователя были разработаны специальные криогенные оптические кюветы. За основу были взяты те, которые мы применяли для накачки полупроводниковых лазеров стоксовой компонентой ВКР рубинового лазера в жидком азоте. Главная задача, которую предстояло решить в процессе борьбы за малую расходимость КЛ, состояла в достижении высокой оптической однородности его активной среды. Эксперименты показали, что для получения криогенного вещества с необходимой оптической однородностью одной вакуумной изоляции сосуда с жидким азотом недостаточно, поэтому были сконструированы кюветы с двумя дополнительными охлаждающими рубашками и двумя вакуумными промежутками.

Конструкция такой оптической криогенной кюветы-криостата «Супер» показана на рис.1. Особенность конструкции заключалась в том, что рабочая (оптическая) камера помещалась в термостатирующую камеру, заполненную жидким азотом. При этом обе они находились внутри охлаждаемого экрана, расположенного в вакуумной части кюветы. Такой экран защищал как термостатирующую, так и рабочую (оптическую) камеру от теплового воздействия. Все это в целом минимизировало температурные градиенты и тем самым обеспечивало высокую оптическую однородность активной среды. Оптическая однородность «сверхчистой» криогенной жидкости (жидкий азот) была такова, что неопытный наблюдатель не мог на глаз определить, есть ли в рабочем объеме кюветы жидкий азот или его там нет. С жидким кислородом было проще: он «выдавал» себя голубоватой окраской.

На рис.2 показаны фотографии кювет, а также изображения миры и крестов автоколлиматора, сфотографированных через кювету с жидким азотом длиной 1 м. Максимальное число штрихов миры 12 мм⁻¹, толщина линий на кресте автоколлиматора соответствует угловому разрешению 10" (5 × 10⁻⁵ рад).

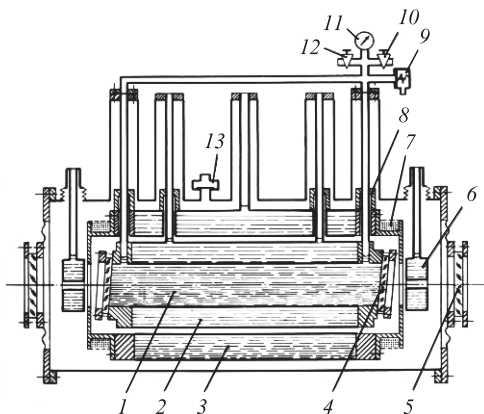


Рис.1. Конструкция оптической криогенной кюветы-криостата «Супер»:

1 – рабочая камера; 2 – охлаждающая камера; 3 – экранирующая камера; 4 – окно рабочей камеры; 5 – наружное окно; 6 – подвижная охлаждаемая шторка; 7 – торцевой экран; 8 – хладопровод, 9 – аварийный клапан; 10, 12 – вентили; 11 – манометр; 13 – клапан.

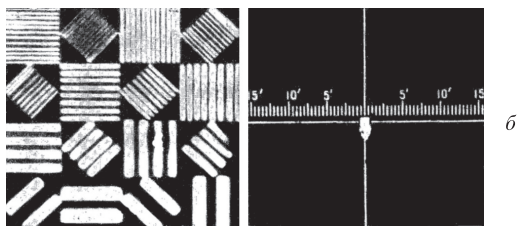
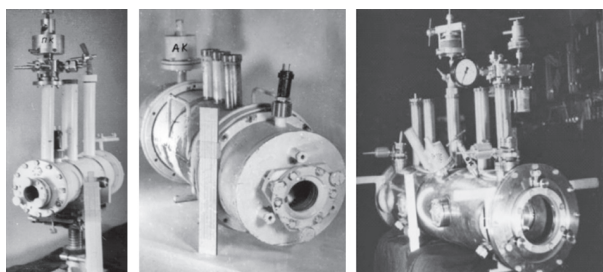


Рис.2. Оптические криогенные кюветы для комбинационных лазеров на жидком азоте и жидком кислороде, разработанные В.Ф.Ефимковым и В.Г.Смирновым. Рабочие диаметр и длина кювет (слева направо): 2 и 20 см (1965 г.), 7 и 50 см (1968 г.), 10 и 100 см (кювета «Супер», 1972 г.) (а). Мира и крест автоколлиматора, сфотографированные через кювету с жидким азотом длиной 1 м. Максимальное число штрихов мира 12 мм⁻¹, толщина линий на кресте автоколлиматора соответствует угловому разрешению 10'' (5×10⁻⁵ рад) (б).

В лабораторных условиях проводились предварительные экспериментальные исследования. Были изучены различные схемы комбинационных лазеров, их физические характеристики, свойства и особенности. Рассматривались различные схемы накачки – от продольной под разными углами до поперечной. Измерялись пороговые интенсивности возбуждающего излучения, определялась оптическая прочность всех элементов схемы. Разрабатывались оптимальные конструкции резонаторов, калибровалась измерительная аппаратура и проводились другие предварительные работы. Эксперименты проводились с импульсами накачки наносекундного диапазона с энергиями на уровне нескольких джоулей.

В лабораторных опытах в качестве источников накачки применялись твердотельные лазеры на рубине и неодимовом стекле с модулированной добротностью. Они успешно моделировали ВФДЛ по интенсивности и тем

самым позволяли изучать основные физические свойства будущих мощных комбинационных лазеров. Однако малые (наносекундные) длительности импульсов, а значит, и малые плотности энергии накачки не позволили нам заранее обнаружить и устранить такие неприятные эффекты, как разрушение окон кювет и потеря прозрачности активной среды.

В 1966 г. установку, на которой проводились опыты, посетил знаменитый ЮБ – Юлий Борисович Харитон, один из создателей советской атомной бомбы, трижды Герой Социалистического Труда, который в то время возглавлял ВНИИЭФ. Демонстрация действующего КЛ на жидком азоте понравилась ЮБ, и он заметил принимавшему и сопровождавшему его Н.Г.Басову:

– Вы всего две недели назад рассказывали мне об идее, а здесь – уже ее воплощение.

Ответ Н.Г.Басова звучал как похвала нашим трудам:

– Наши сотрудники работают оперативно.

Нам не хватило духу признаться, что первые результаты по ВКР мы получили еще до беседы на эту тему ЮБ с Н.Г.Басовым и что решающую роль здесь сыграли оптические криогенные кюветы, ранее разработанные В.Ф.Ефимковым и В.Г.Смирновым для накачки полупроводниковых лазеров на арсениде галлия.

3. Мощные комбинационные лазеры с накачкой от ВФДЛ. Совместные работы Лаборатории КРФ ФИАНа и ВНИИЭФ

3.1. Начало совместных работ, их основные участники

Успешные лабораторные опыты с КЛ на жидком азоте (а позже и на жидком кислороде) показали, что их можно масштабировать, применяя для накачки излучение мощных взрывных иодных ВФДЛ на C₃F₇I с λ_{pd1} = 1.315 мкм. Длины волн КЛ (первая стоксова компонента ВКР) при возбуждении излучением ВФДЛ составляли 1.89 мкм (жидкий азот) и 1.65 мкм (жидкий кислород).

Однажды в начале 1967 г. Н.Г.Басов сказал:

– Я решил направить вас в «поле».

И мы «пошли в поле», т.е. поехали во ВНИИЭФ. Совместные с ВНИИЭФ полигонные опыты начались весной 1967 г. Основным составом, станovým хребтом научнотехнического «десанта» Лаборатории КРФ во ВНИИЭФ были В.Ф.Ефимков и В.Г.Смирнов. В разное время вместе с ними работали также М.Г.Гангардт, А.Н.Кирикин, В.Н.Волков. Возглавляли выездную группу А.З.Грасюк с И.Г.Зубаревым, сменяя друг друга. Нашим опекуном и наставником, особенно во время первых опытов, был В.А.Катулин. Он в качестве представителя Лаборатории КРФ трудился во ВНИИЭФ с 1965 г. и знал все особенности работы «в поле».

Во ВНИИЭФ мы непосредственно сотрудничали с отделом С.Б.Кормера, в основном с лабораторией, которую возглавлял К.Б.Юшко. Хочется сказать несколько слов об этом замечательном человеке, безвременно скончавшемся в 1977 г. Ким Борисович (КБ) был не только высококвалифицированным физиком, отличным организатором работ, но еще и добрым, отзывчивым, трудолюбивым, терпеливым человеком. Мы работали с ним и его сотрудниками (А.С.Елутин, В.М.Изгородин, Ю.В.Куратов, Ю.В.Долгополов и др.) в течение ряда лет в полном согласии. Однажды А.З.Грасюк спросил его:

– Мы с тобой работаем почти пять лет, и за все это время не только ни разу не поругались, но и ни разу не поспорили на повышенных тонах. И это при моем, мягко выражаясь, не мирном характере. Как тебе это удается?

КБ улыбнулся:

– Есть такое слово: терпение. Его я всегда стараюсь помнить во всех производственных отношениях с людьми.

Один из его сослуживцев как-то заметил:

– Ким никогда не «разряжается» на людей, все удерживает в себе. Это очень трудно и далеко не безвредно для здоровья.

К этому следует добавить, что такое самопожертвование и есть истинная любовь к людям, которая была у КБ.

Отдел ВНИИЭФ, с которым мы сотрудничали, возглавлял Самуил Борисович Кормер (СБ), который отнюдь не был формальным руководителем-администратором. Он вникал во все подробности нашей совместной работы, участвовал в планировании опытов и особенно в обсуждении их результатов. Его профессиональные знания при всей их обширности и глубине до встречи с нами не включали в себя нелинейную оптику, поэтому в процессе таких обсуждений он большое внимание уделял «общеобразовательным» вопросам, быстро повышая свой научный уровень в этой области. Такие «учебные» беседы были очень полезны и для нас, ибо ничто, пожалуй, так не способствует повышению глубины понимания профессионалом полученных им результатов, как изложение их непрофессионалу на понятном ему уровне.

А.З.Грасюк вспоминает:

«Многому можно было поучиться у СБ, например умению быстро постигать новое, ответственности, обязательности, чрезвычайной работоспособности, упорству, твердости в вопросах, которые он считал принципиальными, а также великодушию и чувству юмора. Однажды плановая серия опытов, на которые мы прибыли, не состоялась. СБ сказал мне, что их аппаратура подготовлена не полностью, и поэтому проводить опыты слишком рискованно. Все доводы в пользу безотлагательного проведения опытов, аргументы типа «риск – благородное дело» разбивались о непоколебимое решение СБ. Он пытался (совершенно справедливо, но, увы, безрезультатно) втолковать, что в данном случае рисковать нельзя, так как моральные потери в случае неудачи будут слишком велики.

– Вы срываете план-график работ, кипятился я, мне придется доложить об этом Басову!

– Докладывайте, Николай Геннадиевич меня поймет, – невозмутимо отвечал СБ и, как говорится, как в воду глядел.

НГ на мою жалобу-ябеду среагировал совершенно спокойно, предложил продолжать подготовку к новым опытам. И вот через несколько месяцев последовало наказание за мою вздорность и нетерпимость. У нас «забарахлила» аппаратура, и приступить своевременно к запланированным опытам не смогли на этот раз мы. СБ был в это время в Москве, мы встретились, и я с виноватым видом изложил ситуацию.

– Вы срываете план-график работ! – повторил СБ мои в свое время произнесенные неразумные слова, но эта его шутка до меня «не дошла». Видимо, вид у меня был очень расстроженный, и СБ поспешил меня успокоить:

– Не волнуйтесь, Аркадий, и не огорчайтесь, я на Вас жаловаться Харитону не побегу.

Наконец-то я все понял, поднял вверх руки и сказал:

– Сдаюсь!

Мы рассмеялись, и инцидент был исчерпан».

3.2. Неожиданные препятствия и их преодоление

В первых же опытах мы столкнулись с двумя явлениями, препятствовавшими успеху. Во-первых, из-за недостаточной оптической прочности стекла окна кювет разрушались. Во-вторых, при достаточно высокой плотности энергии и интенсивности накачки активная среда теряла прозрачность.

Начались поиски физических механизмов обнаруженных неприятностей, и вскоре причина была установлена. Она оказалась одинаковой для обоих явлений. Это был эффект, в свое время открытый Г.А.Аскарьяном: «вскипание» облучаемого вещества в результате нагрева лазерным излучением поглощающих центров (микропримесей), содержащихся в веществе. В жидкой среде вокруг поглощающих центров из-за их нагрева образуются пузырьки, на которых как в тумане рассеивается излучение. В твердой среде (стекло) такие пузырьки приводят к разрушению стекла. Оба явления (как потеря прозрачности, так и разрушение окон кюветы) проявились лишь в полевых опытах, где длительность импульсов составляла ~ 10 мкс. В лабораторных условиях они не наблюдались, т.к. там использовались наносекундные импульсы, и для роста пузырьков не хватало времени нагрева. Способ решения обеих проблем был один и тот же – очистка вещества от поглощающих микропримесей.

Следует отметить, что уже в первых лабораторных экспериментах (1966 г.) по реализации идеи Н.Г.Басова (ОКГ второго каскада) в лазере на красителе мы убедились в эффективности фильтрации его жидкой активной среды. Такая фильтрация привела к увеличению КПД генерации с 6% до 30% при одинаковой накачке. В отличие от эффекта Аскарьяна, это был, скорее всего, линейный эффект, обусловленным большой концентрацией рассеивающих микровключений.

Очистка стекла от микропримесей – это разработка технологии изготовления абсолютно чистого (беспримесного) стекла. Ратовать за него мы начали сразу же после первых полевых опытов во ВНИИЭФ, когда догадались о причинах разрушения окон наших криогенных кювет. Однако убедить научно-техническое сообщество в этом удалось не сразу. Не все соглашались с тем, что, как сказано в одной из басен И.А.Крылова, «ларчик просто открывался». На одном из совещаний мы заявили, что все дело в «грязи», т.е. в поглощающих микропримесях. Однако нам возразили, что проблема гораздо сложнее, чем мы предполагаем, ею надо заниматься всерьез, привлекать теоретиков. Присутствовавший на совещании И.И.Собельман заметил как бы про себя, но достаточно громко:

– Теоретиков по грязи.

И все же нам поверили. Одним из первых, кто поверил, был директор филиала ГОИ Г.Т.Петровский. Под его руководством в филиале ГОИ была разработана уникальная технология изготовления беспримесного кварцевого стекла. Из него были изготовлены оптически прочные подложки, которые дали возможность многократно повысить энергию мощных КЛ.

3.2.1. Фильтр для удаления микропримесей

Кюветы мы заполняли жидким азотом из сосудов Дьюара, получаемых с азотной станции ФИАНа. В ходе экспериментов было установлено наличие потерь излучения, причем как линейных, так и нелинейных, в криогенной среде. Причиной этих потерь были различные

твердые микровключения самых разных размеров – от одного до нескольких сотен микрон. Имевшимися в нашем распоряжении фильтрами Петрянова и металлокерамическими фильтрами с размерами пор 20–50 мкм полностью избавиться от этих микровключений не удавалось.

Для очистки криогенных жидкостей требовались специальные и весьма дорогостоящие импортные фильтры, которых у нас не было. Однако В.Г.Смирнов придумал фильтрующую систему, которая оказалась ничуть не хуже и даже в определенной мере лучше заграничной. Фильтр состоял из 40 стеклянных шайб диаметром 60 мм и толщиной 2 мм с отверстием в центре диаметром 10 мм. Набор помещался в специальный сосуд, криогенная жидкость (азот или кислород) нагнеталась в центральную часть набора и очищалась, просачиваясь наружу между шайбами, подобно тому, как проходит масло в автомобильном масляном фильтре. Поверхности стеклянных шайб обрабатывались специальным образом, в результате чего между ними получались субмикронные каналы (по современной терминологии – нанопоры). Проходя по этим каналам, криогенная жидкость оставляла в них свои микропримеси и в результате практически полностью от них очищалась. Такой фильтр можно было разобрать, очистить пластины от накопившихся на них микропримесей и собрать снова. Это было большим преимуществом фильтров В.Г.Смирнова перед невозобновляемыми импортными.

В СССР качество обработки поверхностей оптических изделий характеризовалось классами точности. Поверхности подложек, предназначавшихся для напыления на них диэлектрических зеркал или для внесения их в лазерный пучок, полировались по 14-му классу точности. Поверхности пластин, использовавшихся нами для создания фильтра, были отполированы по 12-му классу точности, что обеспечило средний размер шероховатости поверхности ~ 200 нм. Поэтому фильтр из набора таких пластин позволял нам очистить жидкий азот от твердых микровключений с размерами свыше 200–300 нм. Это позволило решить проблему ухудшения прозрачности активной среды при лазерном облучении импульсами с интенсивностью $\sim 10^7$ Вт/см² и длительностью ~ 10 мкс.

В результате необходимости очистки возникла другая проблема. Заполнение кюветы через фильтр требовало значительного времени, порядка всего рабочего дня. Теперь уже нельзя было, как раньше, готовить кювету для экспериментов в начале каждого рабочего дня, поэтому мы разработали устройство для автоматического поддержания уровня жидкого азота в охлаждающей рубашке [12], благодаря чему однажды заполненная кювета поддерживалась в рабочем состоянии в течение нескольких месяцев! Обычно перебирать кювету приходилось только после оптического разрушения ее окон лазерным излучением накачки или генерации.

Результаты очистки были впечатляющими. Так, например, пучок юстировочного лазера, проходящий через такую «сверхчистую» рабочую среду, оставался невидимым даже при наблюдении под самым малым углом, т.е. отсутствовал эффект Тиндаля. Это свидетельствовало о том, что концентрация центров рассеяния (а значит, и поглощающих микропримесей) была ничтожно малой. Но самое главное: криогенная рабочая жидкость оставалась прозрачной при любых рабочих значениях интенсивности и плотности энергии накачки. Эффект Аскарьяна удалось устранить.

3.3. Растровые фокусирующие системы

Весьма непростой оказалась проблема оптимального ввода мощного высокоэнергетичного излучения накачки в оптическую кювету. Схема КЛ такова, что его плотное зеркало расположено «на фоне» фокусирующей системы, на которой сосредоточено излучение накачки, например несколько ее пучков. Поскольку зеркало частично перекрывает излучение накачки, это перекрытие должно быть минимальным. Иначе говоря, площадь плотного зеркала КЛ должна быть много меньше площади фокусирующей системы. В то же время поперечный размер пятна фокусировки в активной среде должен быть примерно равен соответствующему размеру зеркала или немного меньше его. И самое главное: распределение интенсивности накачки в пятне должно быть максимально однородным по сечению. Из этого следует еще одно требование к фокусирующей системе. Она должна быть достаточно короткофокусной: фокусное расстояние должно составлять порядка половины длины активной среды, чтобы произведение расходимости накачки на фокусное расстояние было минимальным. Из сказанного понятно, что сферическая оптика (линза или зеркало) были непригодны в качестве фокусирующей системы.

Стало ясно, что всем этим требованиям может удовлетворить только растровая фокусирующая система. Лучше всего подошло бы мозаичное составное (адаптивное) зеркало, элементы которого расположены на управляемой сферической поверхности. Подобный зеркальный растр впоследствии был создан и успешно применялся в НПО «Астрофизика». Но в те годы (1967 г.) возможности изготовить такое адаптивное зеркало у нас не было, да и время не позволяло. И в результате наших совместных поисков, в которых участвовал О.Ю.Носач, решение было найдено: использовать стеклянный растр, или, пользуясь терминологией его создателей, «ребристую линзу» [13]. Такая оптическая система представляла собой две скрещенные граненые цилиндрические линзы. Ширина грани на каждой линзе делалась равной требуемому размеру фокального пятна. В результате такие скрещенные цилиндрические граненые линзы образовывали набор призм – призмный растр (рис.3). Он разлагал проходящий сквозь

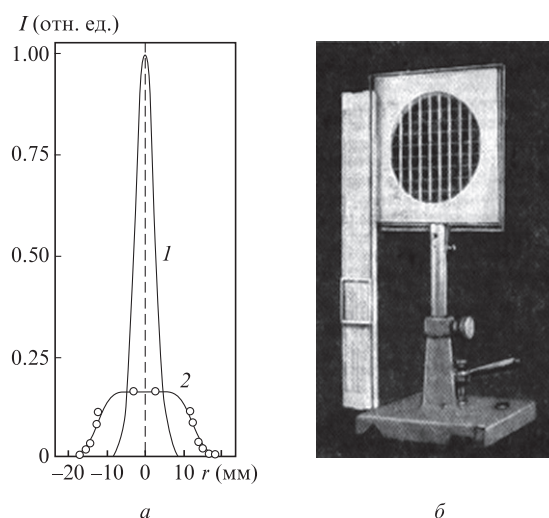


Рис.3. Фокальное распределение интенсивности излучения накачки (а) при использовании обычной линзы (1) и фокусирующего растра (2), а также фотография растровой фокусирующей системы (б).

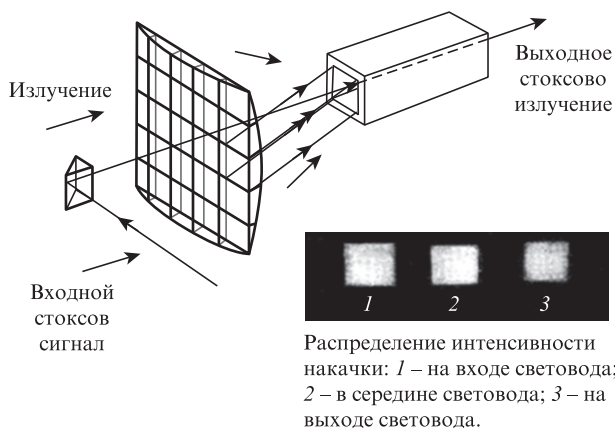


Рис.4. Растровая фокусирующая система – призмный растр в сочетании со световодом.

него пучок (пучки) накачки на множество элементарных пучков квадратного сечения. При этом каждый такой элементарный пучок проходил через одно и то же место фокальной плоскости, образуя квадратное фокальное пятно. В результате такая растровая фокусирующая система собирала излучение от одного или нескольких независимых лазеров в пятно квадратного сечения с однородным распределением интенсивности.

Для более эффективного взаимодействия накачки с генерируемым (или усиливаемым) стоксовым излучением в активную среду в некоторых лабораторных опытах помещался световод такого же квадратного сечения (рис.4). Такая конструкция использовалась нами для когерентного суммирования излучения нескольких лазерных пучков с помощью как ВКР, так и ВРМБ.

3.4. Первый успешный опыт

В первые несколько месяцев работы (весна 1967 г. – начало 1968 г.) полевые опыты не давали результатов, которые уже были получены в лабораторных опытах. КЛ по «классической» схеме запустить долго не удавалось. Шла борьба с упомянутой выше потерей прозрачности жидкого азота. Он использовался как рабочее вещество вплоть до перехода на жидкий кислород в 1971 г. Испытывались также различные оптические схемы ввода накачки и вывода преобразованного излучения в попытках избежать разрушения окон криогенных кювет, совершенствовались сами кюветы.

И вот, наконец, в марте 1968 г. наши упорные труды увенчались первым успехом. КЛ на жидком азоте с накачкой от ВФДЛ заработал, «теорема существования» была доказана! Его характеристики были скромными: энергия – порядка сотни джоулей в импульсе длительностью около 7 мкс, расходимость 2 мрад, КПД около 20%. Но и этот, казалось бы, весьма скромный результат дался всем нам нелегко.

В процессе подготовки опыта нас, фиановцев, преследовали неудачи. Почти в каждом звене сложной цепи последовательных действий, как нарочно, случались сбой и перебои. По правилам полигона, после определенного этапа действий наших коллег из ВНИИЭФ работа не могла быть остановлена вплоть до срабатывания «изделия». Нашей фиановской группе не оставалось иного выхода, как оставаться на площадке и биться до победного конца, пока не будут преодолены все возникшие на нашем

пути препятствия. Сотрудники ВНИИЭФ трудились по-сменному, нас же некому было заменить. В результате до момента срабатывания «изделия», до объявления по связи знаменитой команды «Работаем!» мы проработали практически без перерыва, без сна и отдыха тридцать шесть (36!) часов. И наша трудовая вахта была вознаграждена: получен первый результат!

А.З.Грасюк вспоминает:

– Было около девяти утра, рабочий день во ВНИИЭФ уже начался, когда я позвонил С.Б.Кормеру и сообщил об удаче. Он попросил меня приехать с полигона и рассказать подробности опыта. В проходной корпуса надо было оттянуть на себя задвижку ячейки, где помещался пропуск, который проверит часовый. После выполнения этого несложного действия у меня, по-видимому, произошло какое-то «отключение», сбой во времени. Открыв глаза, я увидел часового и еще двух его товарищей, с интересом смотревших на меня. На мой вопрос, все ли в порядке с моим пропуском, часовый, улыбаясь, ответил, что с пропуском все в порядке, но что они впервые видят человека, который спит стоя, ни к чему не прислоняясь и ни за что не держась. До сих пор сам не могу понять, как это у меня получилось.

После обсуждения результатов с С.Б.Кормером, которое было, как обычно, интересным и полезным, меня доставили в гостиницу, где я присоединился к моим товарищам (В.Ф.Ефимкову и В.Г.Смирнову), спавшим богатырским сном после трудов праведных.

Начало было положено, «процесс пошел»!

3.5. Долгий и трудный «полигонный» путь вперед

Успех вдохновил нас. Теперь надлежало его развить – увеличивать энергию КЛ, КПД преобразования накачки, уменьшать расходимость. Казалось, теперь все пойдет быстро и результативно. Но вскоре стало ясно, что впереди еще долгий и трудный путь, на котором будут не только успехи, но и неудачи.

Сначала (с 1967 по 1970 г.) в качестве активной среды мы использовали жидкий азот. При длине волны накачки 1.315 мкм длина волны первой стоксовой компоненты, на которой работали наши КЛ, составляла 1.89 мкм. Однако соответствующие измерения, проведенные сотрудниками ВНИИЭФ, показали, что такое излучение сильно поглощается в атмосфере. Поэтому с 1971 г. мы перешли на жидкий кислород в качестве активной среды. В этом случае длина волны первой стоксовой компоненты составляла 1.65 мкм и как раз попадала в полосу прозрачности атмосферы.

Применялись две основных схемы КЛ: генератор и усилитель в режиме насыщения внешним стоксовым сигналом (на длине волны первой стоксовой компоненты).

Базовая схема КЛ-генератора показана на рис.5. Использовались ее варианты с различными типами резонатора: «плоским» (т. е. с плоскими зеркалами), неустойчивым и «плоским длинным», в котором расстояние между зеркалами достигало 23 м.

Каждый из вариантов схемы исследовался в специальной серии опытов. В табл.1 представлены результаты тех из них, в которых удавалось решить задачи, имевшие принципиальное значение.

Так, в декабре 1968 г. впервые одновременно были релизованы две принципиальные идеи: когерентное суммирование и увеличение яркости. Для накачки использова-

Табл.1. Комбинационные лазеры-генераторы с накачкой от иодных ВФДЛ ($\lambda_p = 1.315$ мкм). Активные среды: жидкий азот (N_2 , $\lambda_S = 1.89$ мкм) и жидкий кислород (O_2 , $\lambda_S = 1.65$ мкм).

Дата	Актив-ная среда	Резонатор		Накачка		Генерация		Плот-ность энергии (Дж/см ²)	Пло-щадь сечения пучка (см ²)	КПД по энергии W_g/W_p (%)	Расходи-мость Θ (мрад)	Увели-чение яркости $\beta = B_g/B_p$
		Тип	Длина L (м)	Энергия W_p (Дж)	Длитель-ность τ_p (мкс)	Энергия W_g (Дж)	Длитель-ность τ_g (мкс)					
Декабрь 1968 г.	N_2	Плоский	2.3	$2 \times 340 = 680$	7	176	5	40	4.4	26	2.5	2×10^2
Декабрь 1972 г.	O_2	Плоский	2.3	6250	15	2500	10	110	23	40	2	3.6×10^2
Август 1973 г.	O_2	Неустой-чивый	2.5 $M = 4$	1000	7	200	5	58	3.5	20	0.26	6×10^3
Декабрь 1973 г.	O_2	«Плоский, длинный»	12	6600	15	1100		92	12	17	0.35	1.1×10^4

Табл.2. Комбинационные лазеры на жидком кислороде по схеме генератор–усилитель.

Дата	Накачка ($\lambda_p = 1.315$ мкм)			Входной сигнал ($\lambda_{St1} = 1.65$ мкм)		Усиленный сигнал			КПД по энергии W_{out}/W_p (%)	Увели-чение яркости B_{out}/B_p	
	Энергия W_p (Дж)	Длитель-ность τ_p (мкс)	Площадь сечения пучка накачки S_p (см ²)	Энергия W_{in} (Дж)	Площадь сечения пучка входного сигнала S_{in} (см ²)	Расходи-мость Θ (мрад)	Энергия W_{out} (Дж)	Площадь сечения пучка вы-ходного сигнала S_{out} (см ²)			Расходи-мость Θ (мрад)
Май 1976 г.	590	7	200	22	4	0.09	250	4	0.16	40	3×10^4
Сентябрь 1976 г.	4800	15	2500	61	10	0.2	1250	10	0.44	25	1×10^4

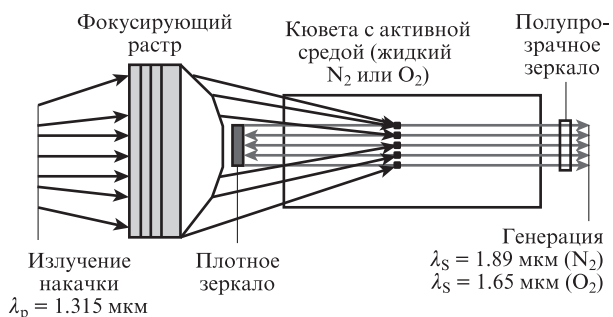


Рис.5. Схема ВКР-лазера – когерентного сумматора.

лись два ВФДЛ с энергией по 340 Дж в каждом при длительности импульса 7 мкс. Активной средой служил жидкий азот, заполнявший криогенную кювету с рабочей длиной 1 м и рабочим диаметром 7 см.

В «кислородном» опыте 28 декабря 1972 г. были получены рекордные для того времени характеристики КЛ-генератора: энергия в импульсе 2.5 кДж при КПД преобразования 40%. Активной средой служил жидкий кислород в нашей лучшей криогенной кювете «Супер» с рабочей длиной 1 м и рабочим диаметром 10 см.

В «кислородном» опыте в августе 1973 г. с использованием кюветы «Супер» достигнуты первые успехи в борьбе за уменьшение расходимости преобразованного излучения и увеличение его яркости. Применение неустойчивого резонатора позволило уменьшить расходимость до 0.26 мрад и почти на четыре порядка увеличить яркость по сравнению с яркостью накачки.

В «кислородном» опыте в декабре 1973 г. наряду с энергией в импульсе 1.1 кДж было получено увеличение яркости более чем на четыре порядка (в 1.1×10^4 раз).

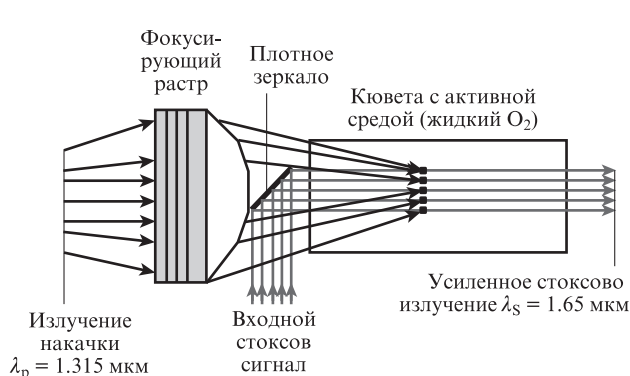


Рис.6. Схема ВКР-лазера – когерентного сумматора, режим усиления.

Результаты опытов по схеме генератор–усилитель (рис.6) с насыщающим внешним сигналом на длине волны первой стоксовой компоненты 1.65 мкм представлены в табл.2. Достоинство этой схемы состоит в том, что она позволила получить сочетание малой расходимости (0.16 мрад) с относительно высоким КПД (40%). Увеличение яркости достигало рекордного значения 3×10^4 . Недостаток схемы заключался в ее большей сложности: необходимо было иметь специальный генератор в качестве источника насыщающего внешнего сигнала на длине волны первой стоксовой компоненты.

4. Заключение

Мы представили результаты развития одной из идей Н.Г.Басова, связанной с когерентным суммированием и повышением качества лазерных пучков. В первой поло-

вине 1960-х годов для реализации этой идеи использовались полупроводниковые лазеры с лазерной накачкой и, в частности, излучающие зеркала, называемые ныне дисковыми лазерами. Перспективными когерентными сумматорами мощных лазерных пучков с большой энергией в импульсе стали предложенные Н.Г.Басовым и И.И.Собельманом и описанные здесь комбинационные лазеры на ВКР в жидком азоте и жидком кислороде с накачкой от иодных взрывных фотодиссоциационных лазеров. Такие КЛ с энергией в импульсе до 2.5 кДж и расходимостью $\sim 10^{-4}$ рад были созданы в результате совместных работ ФИАНа и ВНИИЭФ.

В процессе подготовки и проведения этих работ в Лаборатории КРФ были решены следующие основные задачи, обеспечившие успех совместных работ.

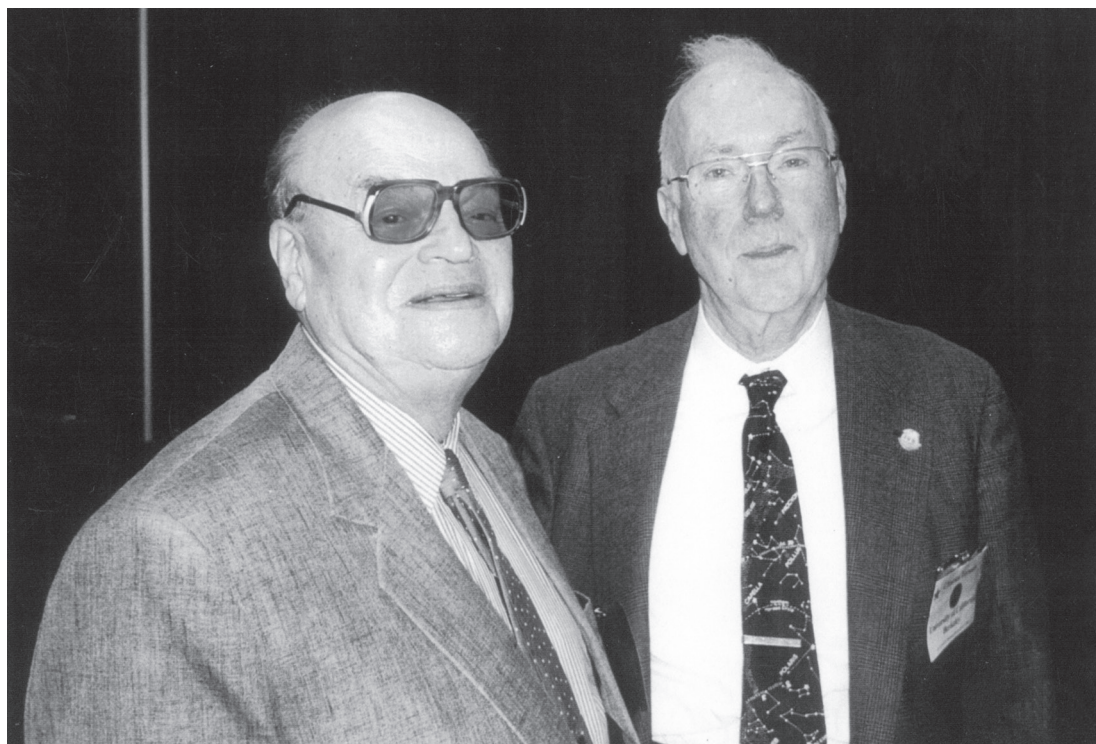
– Найдены, изучены и обоснованы оптимальные активные среды (жидкие азот и кислород) для мощных КЛ с большой энергией в импульсе.

– Разработаны способы очистки этих криогенных жидкостей от микро- и нанопримесей, что позволило устранить нелинейные потери излучения накачки и преобразованного излучения в активной среде. Это обеспечило эффективную работу КЛ – когерентных сумматоров с большой выходной энергией (несколько килоджоулей) и открыло пути ее дальнейшего увеличения.

– Созданы криогенные кюветы, обеспечивающие высокую оптическую однородность жидких азота и кислорода, что позволило получать малую расходимость преобразованного излучения (~ 0.1 мрад) с большой плотностью энергии (сотни Дж/см²).

– Разработаны растровые фокусирующие системы, создающие оптимальную концентрацию излучения накачки в активной среде.

1. Басов Н.Г., Грасюк А.З., Катулин В.А. *Докл. Акад. наук СССР*, **161**, 1306 (1965).
2. Басов Н.Г., Грасюк А.З., Зубарев И.Г., Катулин В.А. *Письма в ЖЭТФ*, **1** (4), 2933 (1965).
3. Басов Н.Г., Грасюк А.З., Зубарев И.Г., Катулин В.А., Крохин О.Н. *ЖЭТФ*, **50**, 551 (1965).
4. Басов Н.Г., Грасюк А.З., Зубарев И.Г., Катулин В.А. *ФТТ*, **7** (12), 3639 (1965).
5. Грасюк А.З., Ефимков В.Ф., Зубарев И.Г., Катулин В.А. Менцер А.Н. *ФТТ*, **8** (6), 1953 (1966).
6. Басов Н.Г., Грасюк А.З., Ефимков В.Ф., Катулин В.А. *ФТТ*, **9** (1), 88 (1967).
7. Грасюк А.З., Логунов О.А., Смирнов В.Г. *ФТП*, **1** (10), 1502 (1967).
8. Basov N.G., Bogdankevich O.V., Grasiuk A.Z. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-2** (9), 594 (1966).
9. Грасюк А.З. *Квантовая электроника*, **42** (12), 1054 (2012).
10. Охотников О.Г. *Квантовая электроника*, **38** (12), 1083 (2008).
11. Грасюк А.З., Ефимков В.Ф., Зубарев И.Г., Мишин В.И., Смирнов В.Г. *Письма в ЖЭТФ*, **8** (9), 474 (1968).
12. Грасюк А.З., Смирнов В.Г. *ПТЭ*, № 3, 245 (1975).
13. Грасюк А.З., Ефимков В.Ф., Смирнов В.Г. *ПТЭ*, № 1, 174 (1976).
14. Зарубин П.В. *Лазерное оружие – миф или реальность?* (Владимир: Транзит-ИКС, 2009).
15. Грасюк А.З. *Докт. дисс.* (М.: ФИАН, 1973).
16. Ефимков В.Ф. *Канд. дисс.* (М.: ФИАН, 1978).
17. Зуев В.С., Катулин В.А. *Квантовая электроника*, **24** (12), 1105 (1997).
18. Грасюк А.З. *Квантовая электроника*, **1** (3), 485 (1974).
19. Басов Н.Г., Грасюк А.З., Зубарев И.Г. *Природа*, № 12, 38 (1978).
20. Грасюк А.З. *Взаимодействие излучения с веществом (Курс лекций по лазерной физике)* (М.: изд-во ФИАН, 2004).



Н.Г. Басов и Ч.Таунс