

## Н.Г.Басов – один из величайших учёных двадцатого века

А.З.Грасюк

*Рассказано о некоторых идеях Н.Г.Басова, выдвинутых им в период с 1960 по 1965 гг. и осуществлённых его сотрудниками под его руководством и при его участии. Это «космический мазер» – молекулярный генератор (МГ) на борту ИСЗ; предсказание динамического хаоса (странный аттрактор); лазерный усилитель и возможность создания его с предельной «однофотонной» чувствительностью; усилитель изображений; получение и усиление изображения цели при лазерной локации; регенеративные усилители с кольцевыми резонаторами; когерентное суммирование; полупроводниковые лазеры с лазерной накачкой как пример первых когерентных сумматоров.*

**Ключевые слова:** молекулярный генератор, динамический хаос, лазерные усилители (ЛУ), ЛУ изображений, регенеративные ЛУ, когерентное суммирование, когерентные сумматоры (КС), полупроводниковые лазеры с лазерной накачкой, излучающие зеркала, мощные высокоэнергетические КС на основе ВКР.

«Николай Геннадиевич Басов – один из величайших учёных двадцатого века. А мы этого не понимаем просто потому, что являемся его современниками».

Из выступления Н.А.Ирисовой на собрании, посвященном 75-летию Н.Г.Басова (ФИАН, 1997 г).

### Содержание

1. Введение . . . . .	1054
2. Первая встреча. Каскад идей. Лазеры давай! . . . . .	1055
3. Начало обучения в «школе» Басова. Идея НГ: «космический мазер». Первый урок, преподанный нам НГ. Личный пример . . . . .	1055
4. Аттрактор Ораевского. «Скорая помощь» от НГ . . . . .	1056
5. Лазерная тематика. Очередные новые идеи НГ . . . . .	1057
5.1. Усилитель с предельной энергетической чувствительностью	
5.2. Усиление меняющихся изображений	
5.3. Регенеративный усилитель	
6. «Непрямые» методы НГ нашего воспитания и обучения. . . . .	1059
7. Наш усилитель – «на высшем уровне». Предусмотрительная забота НГ о нас . . . . .	1059
8. Новая тема: от усилителей – к когерентным сумматорам. . . . .	1060
9. Когерентное суммирование. . . . .	1061
9.1. Основополагающая идея	
9.2. Первые реализации: полупроводниковые лазеры с оптической (лазерной) накачкой, «излучающие зеркала» (дисковые лазеры)	
9.3. Когерентные сумматоры на основе ВКР	
10. Заключение . . . . .	1063

### 1. Введение

Цель данной статьи – хотя бы частично, на нескольких конкретных примерах обосновать справедливость замечательной характеристики, которую дала Н.Г.Басову Н.А.Ирисова. Её слова взяты в качестве эпиграфа. Мне посчастливилось работать у Н.Г.Басова в течение почти

сорока лет: с 1961 г. по 2001 г., когда Н.Г.Басова не стало. Разумеется, в ограниченных рамках одной статьи невозможно хотя бы вкратце изложить содержание множества научных и научно-технических идей, выдвинутых Н.Г.Басовым, осуществлённых им, его учениками и сотрудниками, оценить масштаб и уникальность его личности. Поэтому ограничусь описанием сравнительно небольшого промежутка времени (с 1961 по 1966 гг.). Мне тогда посчастливилось участвовать в осуществлении некоторых идей Н.Г.Басова, работая под его непосредственным руководством. В эти годы доводилось особенно часто общаться с НГ, и это общение всегда было вдохновляющим, поучительным и плодотворным.

А.З.Грасюк. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: grasiuk2008@yandex.ru

Поступила в редакцию 30 октября 2012 г.

## 2. Первая встреча. Каскад идей. Лазеры давай!

Первая встреча с Н.Г.Басовым произошла в июле 1960 г. В то время я работал в отраслевом НИИ Министерства радиотехнической промышленности. Начальник нашего отдела Борис Владимирович Богословский – человек энергичный, эрудированный и изобретательный – поручил мне выяснить уровень разработок мазера – молекулярного генератора (МГ) в СССР. Б.В.Богословский в то время предложил очень интересную и перспективную идею: стабилизировать несущую частоту доплеровских радиолокаторов по МГ (длина волны  $\lambda = 1.25$  см). Относительная нестабильность МГ уже в то время была порядка  $10^{-10}$ , а нестабильность кварцевых генераторов (по ним стабилизировалась частота передатчиков) составляла лишь  $10^{-7}$ . Применение МГ повысило бы стабильность частоты передатчиков (а с ней и точность измерения скорости цели) сразу на три порядка.

Свою научно-техническую разведку я начал с посещения лаборатории А.Я.Лейкина в Харькове. Там мне помогли пройти научно-практический «ликбез», показали работающий МГ, помогли осознать грандиозность перспектив квантовой электроники (КЭ). А.Я.Лейкин дал полезный совет: прежде чем отправиться к Н.Г.Басову – одному из основоположников КЭ и создателю советского МГ [1,2], следует посетить московскую лабораторию М.Е.Жаботинского в академическом Институте радиотехники и электроники (ИРЭ), что я и сделал. Самого М.Е.Жаботинского в день моего посещения на месте не было, и меня любезно принял его сотрудник В.В.Григорянц. Он показал установку с действующим МГ, подробно рассказал о соответствующей аппаратуре и полученных в лаборатории результатах. В.В.Григорянц также терпеливо старался повысить мой образовательный уровень в области КЭ, который уже был немного выше нулевого благодаря первичному знакомству с соответствующей литературой и в особенности – благодаря визиту в харьковскую лабораторию А.Я.Лейкина и бесед с ним. После этого весьма полезного для меня посещения я позвонил в ФИАН Н.Г.Басову, представился, изложил существо вопроса, попросил о встрече и был принят.

Н.Г.Басов с большим интересом и пониманием отнёсся к изложенной мной идее Б.В.Богословского о стабилизации частоты радиопередатчика по МГ. Дело в том, что это было созвучно с более ранней идеей самого Н.Г.Басова, которая в то время уже начала воплощаться в жизнь: установить радиопередатчик, стабилизированный по МГ, на искусственном спутнике Земли (ИСЗ). Это позволило бы провести ряд уникальных научных и научно-технических экспериментов. Например, измерить смещение частоты электромагнитного излучения в гравитационном поле Земли, т.е. осуществить своего рода опыт Паунда–Ребке в космических масштабах.

Здесь же в кабинете в моём присутствии Н.Г.Басов рассказывал об этих и других предполагаемых космических опытах, об их возможных результатах, делал соответствующие расчёты и оценки, в которых мне посчастливилось принимать посильное участие. Встреча продолжалась около полутора часов и произвела на меня сильнейшее впечатление. Каскад творческих идей, высказанных Н.Г.Басовым, какая-то его поистине сверхъестественная научная интуиция просто ошеломили. На прощание Н.Г.Басов пророчески сказал:

– Конечно, всё, что мы тут обсуждали, очень интересно, полезно и нужно. Но главное требование времени звучит сейчас так: лазеры давай! За ними будущее.

Эта встреча решила мою дальнейшую судьбу. В то время в числе моих знакомых в ФИАНе была Антонина Васильевна Дуденкова. Она работала инженером в секторе Н.Г.Басова – Лаборатории колебаний ФИАНа, которой заведовал А.М.Прохоров. Её я и попросил «по дипломатическим каналам» узнать у Н.Г.Басова, не возьмёт ли он меня к себе на работу. И через А.В.Дуденкову по тем же каналам получил положительный ответ.

## 3. Начало обучения в «школе» Басова. Идея НГ: «космический мазер». Первый урок, преподанный нам НГ. Личный пример

Меня приняли в ФИАН в декабре 1960 г. в сектор Н.Г.Басова, в группу Бориса Михайловича Чихачёва. Первый рабочий день пришелся на 30 декабря. Группа Б.М.Чихачёва в то время занималась исследованиями, направленными на осуществление «космической» идеи НГ: создать радиопередатчик, стабилизированный по МГ, который предполагалось установить на ИСЗ. Работа проводилась совместно с одним из отраслевых НИИ, в котором и планировалось изготовить бортовой МГ и соответствующую аппаратуру для передатчика на ИСЗ. Для меня это была первая работа по воплощению одной из идей НГ: разработать и применить «космический мазер».

Повышать мой теоретический и общефизический уровень взялся Анатолий Николаевич Ораевский. Он был одним из ближайших учеников и сотрудников Н.Г.Басова, главным теоретиком в области МГ [3], о котором знал всё. А.Н.Ораевский, несмотря на свою молодость (ему было тогда всего 26 лет) был широко образованным, высокоэрудированным физиком. А ещё он был прекрасным учителем: терпеливым, снисходительным к невежеству и непонятливости ученика, способным просто и доходчиво объяснять самые сложные вопросы, учителем доброжелательным и с большим чувством юмора.

Основные навыки практической работы с МГ, с обслуживающей его аппаратурой мне прививала А.В.Дуденкова. Она была главным экспериментатором и неформальным лидером группы. Будучи высококвалифицированным радиоинженером, А.В.Дуденкова, была, как говорится, мастером на все руки. А знать надо было много, разбираться в различных специальных областях. Среди них были, например, и радиотехника (от радиочастот до СВЧ диапазона), и техника высокого вакуума, и высоковольтные системы. А.В.Дуденкова всё это знала и умела применять на практике.

Перед коллективом группы стояла задача создать макет аппаратуры, которая позволяла бы стабилизировать по МГ частоту задающего (кварцевого) генератора-передатчика. Для этого необходимо было умножить частоту кварцевого генератора, так, чтобы её можно было бы сравнивать, «сбивать» с излучением МГ и соответствующим разностным сигналом управлять частотой кварцевого генератора с целью её стабилизации.

Мне поручили разработать достаточно эффективные умножители частоты от радиодиапазона до СВЧ (длина волны излучения нашего МГ составляла 1.25 см). Через своего знакомого в одном из отраслевых НИИ мне удалось достать только что разработанные самые современ-

ные по тому времени параметрические диоды. С их помощью можно было наиболее эффективно преобразовывать излучение в СВЧ диапазоне: получать гармоники, генерировать суммарные и разностные частоты.

Сначала всё шло относительно благополучно. Опыт работы с техникой СВЧ у меня был, а добытые диоды служили верой и правдой: гармоники начали «выжиматься». Но когда уже казалось, что до требуемого уровня мощности рукой подать, дело застопорилось: мощность перестала расти.

Однажды, уже поздним вечером, когда я довольно безуспешно возился с аппаратурой, пришел Н.Г.Басов. Он, как всегда, приветливо поздоровался и задал свой любимый вопрос:

– Ну, до чего дошла наука?

Пришлось признаться, что наука буксует.

– Ничего, сейчас мы её подтолкнём!

С этими словами НГ снял пиджак и присел рядом со мной к столу, на котором помещалась аппаратура. Долго вводить НГ в курс дела не пришлось: он необычайно быстро всё понял и тут же взялся за регулировки. И через некоторое время произошло то, что в тот момент мне показалось чудом: мощность гармоник начала расти. НГ предлагал и осуществлял всё новые варианты регулировок, которые почти всегда приводили к успеху. Часа через два, когда мощность достигла почти что требуемого уровня, я с радостью заявил:

– Теперь можно остановиться, всё в порядке. Завтра я окончательно доведу всё до нужного значения.

Но НГ не согласился:

– Нельзя откладывать, надо доводить всё до конца именно сейчас, пока установка действует и нам подчиняется. Если сейчас прерваться, то за ночь «процессы релаксации» низведут всё до прежнего нулевого уровня. Успех надо развивать и закрепить!

Снова мы взялись за регулировки, и тут, словно подчиняясь воле НГ, мощность достигла нужного уровня.

– Вот теперь мы вышли на устойчивый режим, теперь «ночной релаксации» не будет, – сказал НГ и забеспокоился обо мне:

– Уже половина двенадцатого! Я-то живу тут поблизости, а Вам ехать на метро далеко. Давайте на этом закончим и разойдёмся по домам. Кстати, нет ли у вас свободного паяльника? А то мой перегорел, а тесть просит починить ему телевизор.

Я вручил НГ паяльник и осторожно посоветовал:

– Может быть, пригласить специалиста из телеателье?

– Можно, конечно, но неудобно отказывать человеку в его просьбе.

В этом проявилась ещё одно замечательное свойство характера НГ: безотказность. Много лет спустя, вспоминая этот эпизод, я не мог припомнить ни одного случая отказа мне со стороны НГ в обращённой к нему личной просьбе. Если по каким-либо причинам он не мог сам исполнить просимое, то всегда находил пути исполнения просьбы с помощью других людей.

В тот вечер мне впервые посчастливилось наблюдать одно из проявлений многогранного таланта НГ как учёного: феноменальную интуицию, позволявшую ему быстро вникать в любую новую проблему (теоретическую или экспериментальную), находить путь её решения. И не только указать этот путь другим, но в случае необходимости пройти его самому вплоть до конечного результата. Одновременно довелось увидеть один из основных прин-

ципов работы НГ: любое возникшее дело надо не откладывая доводить до конца, если к тому есть хоть малейшая возможность. И в случае необходимости действовать самому. Эти качества НГ вспомнились позднее, когда В.С.Зуев, рассказывая мне о запуске первого МГ, сказал:

– НГ запустил его собственными руками. Помогал один радиотехник – Василий Васильевич Никитин.

#### 4. Аттрактор Ораевского. «Скорая помощь» от НГ

Как уже отмечалось выше, на ИСЗ стабилизатором частоты передатчика должен быть МГ. НГ поручил нам можно тщательнее исследовать возможные «нестандартные» режимы МГ, чтобы избежать каких-либо сюрпризов в его работе на борту ИСЗ. Во исполнение этих поручений мы с А.Н.Ораевским и И.Г.Зубаревым (он был первым моим студентом-дипломником и к тому времени стал одним из основных экспериментаторов) решили исследовать экспериментально и теоретически поведение МГ в нештатных ситуациях. Например, изучить переходные режимы: посмотреть, как будут изменяться амплитуда и частота колебаний при неустойчивости (скачках) высокого напряжения на сортирующей системе, которая формирует пучок активных молекул аммиака, возбуждающих резонатор МГ. Были проведены соответствующие опыты и обнаружены интересные переходные процессы: регулярные периодические отклонения амплитуды и частоты колебаний от стационарного режима.

Попутно возникла идея теоретически изучить неустойчивые режимы квантового генератора на примере некоего гипотетического МГ. А.Н.Ораевским был теоретически разработан режим квантового генератора, при котором нарушались условия устойчивости, определённые в работах [4, 5]. И.Г.Зубарев в процессе выполнения своей дипломной работы ввёл этот режим в качестве специальной программы в ЭВМ – самый мощный тогда компьютер ФИАНА.

И компьютер выдал результат, который сначала показался нам абсурдным: хаотические пульсации (рис.1). Анализ полученных данных провёл А.Н.Ораевский. Он установил, что полученные пульсации представляют собой особого рода неустойчивый режим автоколебательной системы – динамический хаос, или специальный аттрактор, который впоследствии получил название «странный аттрактор». Об этом режиме А.Н.Ораевский доложил на международной конференции в 1962 г. [6]. В зарубежной литературе этот режим ещё называют «аттрактор Лоренца», хотя Лоренц опубликовал аналогичную работу годом позже, в 1963 г. Так что подобный режим по справедливости должен иметь другое название –

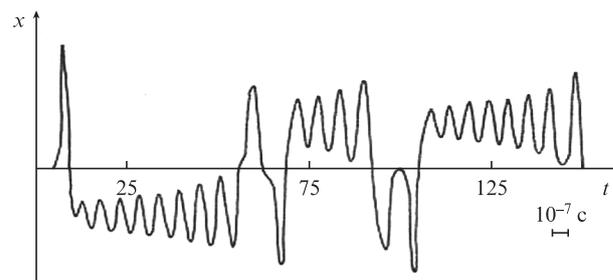


Рис.1. Динамический хаос (аттрактор Ораевского).

аттрактор Ораевского. У Анатолия Николаевича спустя многие годы была идея восстановить историческую справедливость и оформить аттрактор в виде открытия. В соавторы он включил И.Г.Зубарева и меня. Мы даже решили запечатлеть начало совместной работы по составлению соответствующей заявки (рис.2), но идея не получила развития из-за моей нерасторопности.

С аттрактором Ораевского связана любопытная история, показывающая замечательные человеческие свойства НГ: отзывчивость, заботу о людях, готовность немедленно прийти на помощь. Статью [7] с результатами теоретических и экспериментальных исследований переходных процессов в МГ, а также с численным предсказанием динамического хаоса (аттрактор Ораевского) мы с А.Н.Ораевским в июне 1962 г. направили в журнал «Радиотехника и электроника», главным редактором которого в то время был А.М.Прохоров. Рецензия на статью была очень странная: рецензент предлагал отклонить статью, так как, по его словам, некоторые теоретические результаты (т.е. динамический хаос, аттрактор Ораевского) не подтверждены экспериментально. Попытки письменно объяснить рецензенту, что «результаты, не подтвержденные экспериментально» – это на самом деле предсказание принципиально нового явления, ни к чему не привели: рецензент стоял на своём. Переписка с рецензентом только «съедала» время.

Огорчённый происходящим, я сообщил обо всём НГ (А.Н.Ораевский в это время был в командировке). Помощь от НГ после моего скорбного доклада пришла поистине молниеносно. На другой день мы с И.Г.Зубаревым занимались в нашей комнате текущими делами. Я куда-то ненадолго отлучился, а когда вернулся, И.Г.Зубарев невозмутимо мне сообщил:

- Тут приходили, спрашивали Вас.
- Кто спрашивал?
- Да Басов с Прохоровым.

Со всех ног я бросился в погоню за визитёрами. Догнать удалось лишь одного НГ в его кабинете. Он сказал, что обсудил нашу статью с А.М.Прохоровым (АМ), и она сейчас находится у АМ, который уже ознакомился со статьёй (вот это скорость!), считает её заслуживающей публикации, но имеет по тексту некоторые замечания, которые изложит мне при встрече. Я помчался к АМ, и был им тут же принят. Свои замечания АМ изложил в своей обычной остроумной и доходчивой манере. Одно из них звучало приблизительно так (передаю, как говорится, близко к тексту):



Рис.2. Слева направо: И.Г.Зубарев, А.Н.Ораевский, А.З.Грасюк (24.04.2003 г.).

– Вот эти места статьи выглядят как некие абстрактные рассуждения с большими претензиями. К делу они непосредственно не относятся, но могут вызвать раздражение у излишне образованного, а потому придирчивого рецензента и читателя. Выкиньте их, и это только улучшит текст!

Я постарался как можно точнее исполнить указания АМ, и статья была принята к печати.

Остроумные, нестандартные критические замечания были характерны для АМ. Помню, как в 1962 г. в Лаборатории колебаний обсуждалась одна экспериментальная докторская диссертация, которую автор готовил к защите. В своём выступлении АМ, дав в целом положительную оценку работе, заметил:

– При доработке следует уделить внимание теории. Я вообще считаю, что в докторской диссертации, даже если она сугубо экспериментальная, должна быть, по крайней мере, одна формула!

## 5. Лазерная тематика. Очередные новые идеи НГ

Просить НГ переключить нас на лазерную тематику не пришлось. В один прекрасный день 1962 г. он пришел в нашу комнату и поручил нам осуществить следующие свои (очередные) три новые идеи по лазерным усилителям и по возможности разработать следующие устройства: 1) усилитель с предельной энергетической чувствительностью; 2) усилитель изображений; 3) регенеративный усилитель.

Наша молодая команда с энтузиазмом взялась за исполнение задач, поставленных НГ.

В команду в разное время входили: И.Г.Зубарев, В.Ф.Ефимков, В.Г.Смирнов, М.Г.Смирнов, В.Г.Бочаров, А.И.Котов, Ю.И.Карев, А.И.Киркин, В.И.Волков, М.Г.Гангардт, Л.В.Тевелев, В.И.Мишин, П.А.Пашков, О.А.Логоунов, А.К.Запольский, В.Ф.Муликов. Большую помощь оказали нам В.С.Зуев и П.Г.Крюков: они представили в наше распоряжение свои лазерные схемы и разработки.

### 5.1. Усилитель с предельной энергетической чувствительностью

Такой усилитель должен в результате усиления размножить принятые фотоны, но сохранить ту информацию (амплитудную, частотную, фазовую), которая была заложена в исходном передаваемом сигнале. Предельная чувствительность усилителя ограничивается, как известно, шумовым (в данном случае спонтанным) излучением. Несложный анализ режима усиления с учётом спонтанного излучения [8, п.1.6.3] показывает, что при определённых условиях (когда на выходе усилителя находится пространственный селектор мод) возможен так называемый одномодовый приём. В этом случае достигается предельная («однофотонная») чувствительность усилителя. Результат усиления оказывается таким же, как и в случае ситуации, когда на вход за время импульса поступает лишь один шумовой фотон спонтанного излучения. И если полезный сигнал на входе содержит какое-то число фотонов, то отношение сигнал/шум на выходе усилительной системы равно числу фотонов полезного сигнала.

К сожалению, получить такую предельную чувствительность в то время было невозможно по чисто техническим причинам.

Дело в том, что число  $M_{\text{ph}}^{\text{sp}}$  приведённых ко входу усилителя спонтанных фотонов («входных» фотонов) за импульс определяется выражением [8, гл.1 (1.110)]

$$M_{\text{ph}}^{\text{sp}} = \frac{N_2}{\Delta N_{21}} \Delta \nu \tau F^2. \quad (1)$$

Здесь  $\Delta N_{21} = N_2 - (g_2/g_1)N_1$ ;  $N_2$  и  $N_1$  – населённости верхнего и нижнего уровней активной среды соответственно;  $g_2$ ,  $g_1$  – кратности вырождения этих уровней;  $\Delta \nu$  и  $\tau$  – ширина спектральной линии и длительность импульса соответственно;

$$F = \frac{D^2}{\lambda L} \quad (2)$$

– число Френеля;  $D$  – диаметр усилителя;  $L$  – его длина;  $\lambda$  – длина волны. Для рубина произведение  $\Delta \nu \tau$  было очень большим. Действительно, ширина линии  $\Delta \nu \cong 6 \text{ см}^{-1} = 1.8 \times 10^{11} \text{ Гц}$ . Таким образом, даже при минимальной в то время длительности импульса  $\tau \sim 50 \text{ нс}$  произведение  $\Delta \nu \tau$  составляло  $\sim 9 \times 10^3$ .

Как видно из (1), даже при полной инверсии, когда  $N_2/\Delta N_{21} = 1$  и  $F = 1$  (одномодовый приём), число «входных» шумовых фотонов будет равно  $\sim 9 \times 10^3$ .

Потребовалось почти 40 лет, прежде чем авторам работы [9] удалось получить чувствительность лазерного усилителя, близкую к предельной ( $M_{\text{ph}}^{\text{sp}} \cong 3$ ). В приёмном устройстве на основе иодного фотодиссоционного лазера ( $\lambda = 1.315 \text{ мкм}$ ) при угле приёма, равном трём дифракционным углам, чувствительность (при отношении сигнал/шум равном единице) составила три фотона при длительности импульса 40 нс. К настоящему времени теми же авторами достигнут теоретический предел: один «входной» фотон (при одномодовом приёме).

## 5.2. Усиление меняющихся изображений

Ещё до подключения нас к лазерной тематике НГ однажды изложил мне свою замечательную идею: принимать и усиливать движущееся изображение, или, как он выразился, «кадры кино», вплоть до сверхбыстрых и сверхслабых таких кадров. Степень «сверхбыстроты» (максимальная скорость смены кадров) определяется временем, необходимым для усиления (время одного или нескольких проходов через усиливающую среду). Степень «сверхслабости» таких картинок на входе определяется чувствительностью усилителя.

По существу НГ предложил принципиально новую многоканальную систему передачи и приёма информации с пространственным разделением каналов [10]. Действительно, каждый кадр (картинка) – это совокупность рассредоточенных на её плоскости элементарных кадров, каждый из которых соответствует входу отдельного информационного канала. Изменение, смена элементарного кадра, происходит в результате передачи сигнала по такому каналу, изменение всей картинке соответствует передаче информации уже по многоканальной системе связи с пространственным разделением каналов – элементарных кадров. Приёмная система – это лазерный усилитель. Он может быть как одноканальным (одномодовым), так и многоканальным (многомодовым). В первом случае он принимает сигналы от одного из элементарных кадров изображения – картинки, а во втором – принимает

и усиливает всю картинку, т.е. совокупность элементарных кадров, из которых состоит изображение.

Например, при лазерной локации усиление принимаемого сигнала, отраженного от цели, позволит не только обнаружить цель и определить её местоположение, но и увидеть её. Действительно, если оптическая система способна пространственно разрешить достаточное число элементов изображения (точечных источников), то по ним можно восстановить и всё изображение.

Мы провели довольно успешные опыты по усилению различных изображений. Однако относительно низкий коэффициент усиления и низкая чувствительность усилителей на рубине не позволили осуществить идею НГ в полном объёме: добиться многократного (на несколько порядков) усиления яркости слабой картинке.

Эта идея НГ почти в полной мере была осуществлена в работе [11]. В усилителе на основе иодного фотодиссоционного лазера авторами было получено усиление в 3000 раз яркости изображения самолёта при сохранении дифракционного разрешения. Тем самым была доказана принципиальная возможность увидеть удалённую цель при лазерной локации.

## 5.3. Регенеративный усилитель

Несколько слов о терминах. В начале шестидесятых годов лазерная терминология отличалась от сегодняшней. Например, вместо «лазер-генератор», «лазер-усилитель» применялись термины «оптический квантовый генератор» (ОКГ) или «оптический квантовый усилитель» (ОКУ). Поэтому вместо современного термина «регенеративный лазерный усилитель» (РЛУ) говорили и писали «регенеративный оптический квантовый усилитель» (РОКУ).

Чтобы увеличивать слабые входные импульсные сигналы (вплоть до отдельных фотонов) до заданного, «макроскопического» энергетического уровня, необходим усилитель с коэффициентом усиления в несколько (много) порядков. А этого можно достичь только если усиливаемый сигнал будет многократно проходить через активную среду. Короче говоря, режим усиления должен быть регенеративным.

Для реализации РОКУ мы применили так называемую однонаправленную кольцевую трёхзеркальную (треугольную) схему резонатора [12] (рис.3). При усилении наносекундных импульсов такая схема имеет ряд преимуществ перед обычной, когда используется резонатор Фабри–Перо. Во-первых, усиленный сигнал идёт в одном направлении (однонаправленное усиление). Во-вторых, входной и выходной (усиленный) пучки пространственно разделены. Это не только существенно упрощает рабо-

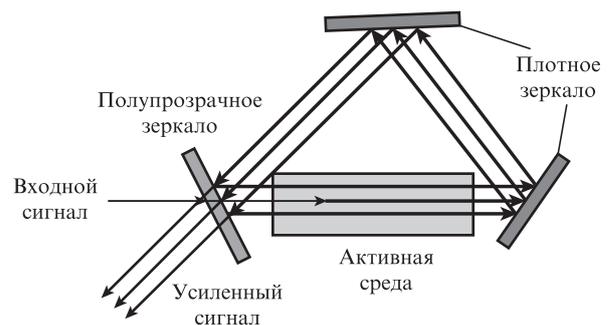


Рис.3. Кольцевой (трёхзеркальный) регенеративный усилитель.

ту, но и позволяет включать последовательно несколько РОКУ без специальных развязок между ними. В-третьих, однонаправленный РОКУ устойчивее по отношению к самовозбуждению, чем РОКУ на резонаторе Фабри–Перо.

В наших экспериментах были изучены основные характеристики РОКУ: коэффициент усиления в зависимости от коэффициента усиления на одном проходе и величины положительной обратной связи, чувствительность, ширина полосы пропускания; была исследована возможность усиления изображений [13, 14].

В настоящее время РЛУ используются в устройствах, генерирующих лазерные импульсы различной длительности, в частности УКИ. Например, при усилении в РЛУ фемтосекундных импульсов пространственная протяженность усиливаемого импульса меньше длины резонатора. Это позволяет регулировать число проходов УКИ в резонаторе и в нужный момент выводить из него усиленный УКИ подобно тому, как это описано в [15]. На основе этой схемы компанией «Авеста-Проект» создан регенеративный усилитель, испускающий импульсы фемтосекундного диапазона (50 и 120 фс) с пиковой мощностью до  $10^{12}$  Вт [16]. Известно, что в Ливерморской лаборатории (США) в предварительных каскадах мегаджоулевого лазера для усиления наносекундных импульсов сегодня используется регенеративный усилитель с кольцевым резонатором, аналогичным применённому нами в [12–14].

## 6. «Непрямые» методы НГ нашего воспитания и обучения

Работы по исследованию РОКУ продолжались весь 1963 год. НГ уделял этим работам большое внимание, ставил новые задачи, участвовал в обсуждении получаемых теоретических и экспериментальных данных. И, что ещё очень важно отметить, постоянно повышал наш профессиональный уровень, непрестанно воспитывал нас, причём иногда необычными методами. К таким методам можно отнести визиты гостей. НГ поручал нам рассказывать им о нашей работе, демонстрировать результаты и, что особенно полезно, обсуждать их. Подбор посетителей явно не был случайным, ибо дискуссии с некоторыми из них были весьма плодотворными.

Вот характерный пример. Однажды НГ в очередной раз привёл гостя, представил ему нас и удалился, сказав перед уходом:

– Покажите всё Евгению Константиновичу.

Посетитель оказался весьма любознательным, проявил большой интерес к нашей деятельности. Мы с И.Г.Зубаревым рассказывали ему о лазерных усилителях, стараясь делать это популярно, с оттенком снисходительности к возможной неосведомленности гостя в области физики, особенно лазерной. Говоря о достигнутой нами чувствительности, я посоветовал, что до предельного её «однофотонного» значения нам не хватает нескольких порядков, что предстоит большая и длительная работа на пути к «малофотонной» и тем паче «однофотонной» цели. Гость попытался утешить меня. Он сказал, что сейчас уже разрабатываются квантовые счётчики, которые смогут регистрировать отдельные фотоны. Поэтому создание усилителей, с однофотонной и малофотонной чувствительностью не столь уж обязательная задача в настоящее время. Но потом немного подумал и изменил своё мнение, сказав:

– Нет, такой сверхчувствительный лазерный усилитель делать нужно. Ведь он, размножая фотоны, сохраняя их частоту.

Тут до меня дошел глубинный смысл сказанного нашим собеседником, и меня «осенило»:

– Ну конечно, ведь при сохранении частоты сохраняется вся информация, с ней связанная, например частотная модуляция. И если частота модуляции составляет даже сотни мегагерц, то энергия фотона изменяется лишь в пятом-шестом знаке. Такое изменение энергии никакой квантовый счётчик не почувствует!

Вскоре вернулся НГ и повёл посетителя в другую группу. Улучив момент, я сказал НГ:

– А ведь этот человек неплохо разбирается в физике!

НГ улыбнулся:

– Да, он в физике неплохо разбирается. Это – Евгений Константинович Завойский.

Я остолбенел:

– Как, тот самый Завойский, который открыл электронный парамагнитный резонанс???

НГ снова улыбнулся:

– Да, тот самый. Он ещё много чего открыл.

Очень огорчила меня моя невнимательность и негодливость. Ведь НГ по существу сделал нам прекрасный подарок: привёл выдающегося учёного, назвал его имя и отчество и решил, что этого достаточно, явно зависив степень нашей осведомленности. Немало важных общеобразовательных (для нас) вопросов можно было бы задать Е.К.Завойскому. Тут и квантовые счётчики, и турбулентный нагрев плазмы, и управляемый термоядерный синтез, и многое другое. И конечно, болезненный для всех нас (своей исторической несправедливостью) вопрос, который сохраняется у меня до сих пор. Почему за электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) Е.К.Завойскому не была присуждена Нобелевская премия? А вот за ядерный магнитный резонанс (ЯМР) Нобелевская премия была присуждена в 1952 г. Э.Парселлу и Ф.Блоху. Ведь ЯМР был открыт в 1946 г., а ЭПР – в 1941 г., и в 1944 г. опубликован, причём на два года раньше открытия ЯМР. Не говоря уже о том, что после открытия ЭПР существование ЯМР было уже достаточно очевидно.

Впрочем, по-видимому, такой острый вопрос тогда задавать не стоило. К тому же ответ на вопрос «почему» был достаточно очевиден: потому, что Завойский – советский учёный. А в то время наши были «за бугром» не ко двору. Ведь первая «советская» Нобелевская премия была присуждена только в 1958 г. (П.А.Черенков, И.Е.Тамм, И.М.Франк).

## 7. Наш усилитель – «на высшем уровне». Предусмотрительная забота НГ о нас

Заканчивался 1963 год. Мы готовились к важному для судьбы всей лазерной физики и техники событию. В самом начале 1964 года предстояла демонстрация достижений в области создания и применения лазеров на самом высоком уровне: должен был приехать сам Н.С.Хрущёв в сопровождении высших партийных и государственных руководителей. Надо было представить выставку действующих лазерных установок, в числе которых находился и наш усилитель. Такая выставка была создана и заработала. В ней участвовали помимо ФИАНа и другие организации, в частности ГОИ. Перед нами встал вопрос: какое усиленное изображение показывать Н.С.Хрущёву?

О демонстрации креста (первое изображение, которое нам удалось усилить) и думать было нечего: Н.С.Хрущёв к тому времени уже заявил на всю страну своим согражданам:

– Я вам последнего попа по телевизору покажу!

И тогда мы решили показывать усиленный круг: уж круг-то не подведёт. К середине января 1964 года всё было готово. Наступил день визита Н.С.Хрущёва. Рядом с нашей установкой располагалась аппаратура Н.Б.Делоне, на которой демонстрировался управляемый лазером высоковольтный разряд. Все мы пребывали в состоянии напряженного ожидания.

Неожиданно появился НГ в сопровождении крепкого вида человека средних лет. Указав ему на нашу установку, НГ сказал:

– Эта установка стреляет.

Затем то же самое объявил, указав на стенд Н.Б.Делоне, после чего повёл гостя к другим лазерным экспонатам. На мой недоуменный вопрос по поводу странных слов НГ Н.Б.Делоне разъяснил:

– НГ приводил начальника охраны Хрущёва. Громкие хлопки, которые издают лампы-вспышки наших импульсных лазеров, похожи на выстрелы. Если охранников не предупредить об этих хлопках, то они примут их за выстрелы террористов и откроют по нам ответный огонь на поражение. Так что НГ, можно сказать, спас наши жизни!

И вот появился Н.С.Хрущёв в сопровождении большой свиты, включая охранников. Дошла очередь до показа нашего усилителя. НГ дал необходимые пояснения и указал Хрущёву на два экрана, отметив, что на одном из них будет исходное изображение, а на другом – усиленное, т. е. во много раз более яркое. Грянул «выстрел», и на экранах появились наши демонстрационные круги. Но, о ужас, круги были одинаково малой яркости! Как выяснилось потом, первый каскад (задающий генератор) в штатном режиме не сработал из-за запотевания торцов кристалла рубина. Н.С.Хрущёв обнаружил нашу неудачу и сказал:

– По-моему, оба круга одинаково бледные.

Повторный «выстрел» был удачным: оба каскада сработали нормально, и на соответствующем экране появился яркий усиленный круг. Н.С.Хрущёв нас похвалил:

– Вот теперь всё отлично, картинка яркая. Молодцы, ребята!

Экзамен «на высшем уровне» удалось благополучно сдать, хотя и со второго захода.

Работы по усилителям продолжались с использованием неодимового стекла как активной среды. Оно было оптически однороднее, чем кристаллы рубина. Поэтому опыты по измерению чувствительности и усилению изображения со стеклом были более успешными [17].

## 8. Новая тема. От усилителей – к когерентным сумматорам

Работа наша по лазерным усилителям закончилась так же внезапно, как и началась. Однажды вечером весной 1964 года НГ пришел в двухэтажный корпус, где мы в то время работали (так называемый павильон КРФ), и сказал мне «таковы слова»:

– Нужно ускорить работу по созданию полупроводниковых лазеров с оптическим возбуждением. Сейчас

этой тематикой занимается Лев Лисицын и его сотрудники. Их всех надо включить в Вашу группу, а Вам немедленно переключиться на эту тематику. Ваши результаты по лазерным усилителям доложены и опубликованы. Надо срочно оформить их в виде диссертации. Времени мало. Двух недель Вам хватит?

НГ явно судил о моей производительности труда по себе. Я взмолился:

– НГ, дайте хотя бы месяц!

НГ немного подумал и смягчил своё поручение:

– Хорошо, три недели, но больше никак не получается: нет времени.

Пришлось срочно погрузиться в результаты по усилителям и заняться чуть ли не круглосуточным оформлением диссертации. Хорошо, что дома была пишущая машинка, которую довелось освоить ещё несколько лет назад.

Через три недели черновой вариант под названием «Регенеративные квантовые усилители» был готов для передачи его на суд НГ. Но тут произошел любопытный эпизод. Один из ближайших сотрудников А.М.Прохорова Н.В.Карлов при случайной встрече спросил:

– Аркадий, я слышал, Вы диссертацию готовите по лазерным усилителям. Можете дать мне её посмотреть?

– Конечно, Николай Васильевич, с удовольствием!

Н.В.Карлов вернул мне рукопись очень быстро, дня через два, со следующей «нестандартной» характеристикой:

– Результаты вполне добротные, диссертационные, их можно защищать. Но написано всё так скверно, что попадись мне такая диссертация как официальному оппоненту, я бы из диссертанта котлету сделал!

Видимо, на моём лице отразилась глубокая скорбь, которую Николай Васильевич заметил. Он улыбнулся и добавил:

– Разумеется, если бы этот диссертант не был моим хорошим знакомым.

После этого ободряющего дополнения Н.В.Карлов изложил перечень критических замечаний. Они очень помогли мне при доработке текста, улучшенный вариант которого и был представлен НГ как научному руководителю.

НГ организовал защиту диссертации так, словно предвидел все последующие осложнения, которые обратились в мою же пользу. Официальными оппонентами были приглашены А.Л.Микаэлян и А.А.Маненков. Но случилось так, что оба они, представив в Учёный совет ФИАН положительные отзывы, недели за три до защиты уехали в заграничные командировки и к защите вернуться не могли. Проводить защиту при отсутствии хотя бы одного оппонента в то время было запрещено. Поэтому Учёный совет назначил ещё двух (дополнительных) оппонентов. Ими стали М.Д.Галанин (ФИАН) и Л.С.Корниенко (МГУ). Защита (в октябре 1964 г.) прошла успешно. В своём выступлении М.Д.Галанин сказал, что идеи, развитые в работе (идеи Н.Г.Басова!) значительно опережают своё время. В то время результаты защит всех диссертаций, в том числе и кандидатских, утверждались в ВАКе. Обычно этот процесс занимал несколько месяцев. Моя же диссертация поступила в ВАК с четырьмя положительными отзывами официальных оппонентов (вместо обычных двух). Видимо, поэтому она была утверждена в рекордно короткий срок: через месяц с небольшим.

## 9. Когерентное суммирование

### 9.1. Основополагающая идея

Идею когерентного суммирования лазерных пучков Н.Г.Басов выдвинул в самом начале 1960-х годов. Сущность этой идеи заключалась в следующем. В результате частотного преобразования в активной среде нескольких лазерных пучков (источников накачки) создаётся так называемый лазер второго каскада – когерентный сумматор (КС). В таком сумматоре значительная часть энергии лазера (лазеров) накачки должна быть сосредоточена в одном пространственно когерентном пучке, расходимость которого должна быть много меньше расходимости лазеров накачки. При этом также многократно повышается интенсивность излучения и плотность его энергии. Таким образом, яркость излучения КС во много раз превышает суммарную яркость пучков накачки.

### 9.2. Первые реализации: полупроводниковые лазеры с оптической (лазерной) накачкой, «излучающие зеркала» (дисковые лазеры)

Полупроводниковые лазеры с оптической (лазерной) накачкой были начальным этапом успешного осуществления идеи Н.Г.Басова по когерентному суммированию лазерных пучков.

Решающую роль в запуске первого такого лазера [18] в 1964 г. сыграл В.А.Катулин. Это был физик-экспериментатор от Бога, к тому же ещё и замечательный организатор науки, человек, наделённый многими талантами, много сделавший в науке и технике. Не случайно именно В.А.Катулина Н.Г.Басов назначил директором Самарского филиала ФИАН, который был создан по инициативе и в результате неустанных настойчивых трудов Н.Г. В.А.Катулин возглавлял Самарский филиал ФИАН с момента его создания в 1979 г., а также основанную им на Физическом факультете Самарского государственного университета Кафедру оптики и спектроскопии, вплоть до своей безвременной скоропостижной кончины в сентябре 1998 г. Самарский филиал ФИАНа создавался при самом активном творческом и решающем участии В.А.Катулина. Он был из тех людей, кто всегда впереди, на переднем крае, кто всегда готов принять удар на себя, чтобы защитить других людей. «За ним, как за каменной стеной», – говорили его сотрудники.

Активной средой первого полупроводникового лазера с оптической накачкой, который можно назвать лазером Басова–Катулина, служил кристалл арсенида галлия (GaAs), охлаждаемый жидким азотом в стеклянном сосуде Дьюара. Источником накачки был рубиновый лазер с модулированной добротностью. Вскоре был создан и первый полупроводниковый лазер на GaAs с двухфотонным оптическим возбуждением излучением лазера на неодимовом стекле с модулированной добротностью [19, 20] а также аналогичные лазеры на других рабочих кристаллах [21, 22].

Однажды после запуска первого лазера мы с В.А.Катулиным из любопытства сфокусировали излучение рубинового лазера – источника накачки – в стеклянный сосуд Дьюара с жидким азотом, предварительно удалив из него кристалл GaAs. Опыт дал неожиданный результат: красный пучок на входе в сосуд Дьюара на его выходе стал белым! Дело было поздним вечером, почти

никого в лаборатории уже не было, а очень хотелось поделиться столь необычным результатом с эрудированным человеком и получить соответствующие объяснения. В этот момент мимо нас по безлюдному коридору проходил аспирант-теоретик В.С.Летохов, который уже тогда слыл авторитетным специалистом. Мы пригласили его и показали белый лазерный пучок. Его объяснение было кратким и поучительным:

– Это вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), а белый цвет – из-за наличия в пучке разноцветных антистоксовых компонент видимого диапазона. Терхьюн в США такое наблюдал в сжатом водороде ещё три месяца назад. Литературу читать надо!

В.А.Катулин тут же определил длины волн стоксовых и антистоксовых компонент ВКР рубинового лазера в жидком азоте. Выяснилось, что первая стоксова компонента (длина волны  $\lambda_{s1} = 0.83$  мкм) – оптимальная накачка для GaAs, т. к. энергия фотона близка к ширине его запрещённой зоны и лишь немногим превышает её. Это создавало принципиальную возможность возбуждения больших объёмов GaAs и тем самым многократного повышения мощности, энергии в импульсе и КПД лазера на GaAs.

Однако для этого необходимо было создать достаточно мощный источник накачки на длине волны первой стоксовой компоненты ВКР рубинового лазера в жидком азоте, т. е. добиться эффективного преобразования в эту компоненту излучения рубинового лазера. Стеклянные сосуды Дьюара для этого не годились.

В.Г.Смирнов и В.Ф.Ефимков с присущей им изобретательностью очень быстро разработали металлическую оптическую криогенную кювету с рабочей длиной 20 см и диаметром 2 см (рис.4). Такая кювета позволяла получать эффективное преобразование излучения рубинового лазера в стоксовы компоненты ВКР в жидком азоте. В результате удалось многократно повысить энергию в импульсе, мощность (импульсную и среднюю), а также КПД лазера на GaAs при накачке его первой стоксовой компонентой ВКР [23, 24].

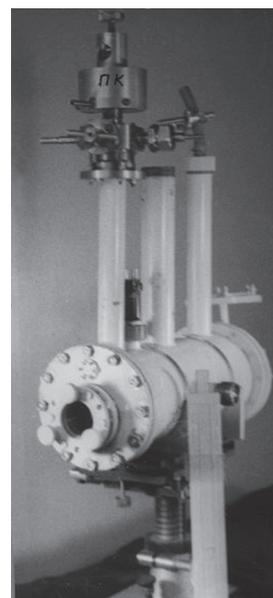


Рис.4. Первая кювета для криогенных жидкостей (жидкий азот, жидкий кислород). Рабочая апертура (активный диаметр) 2 см, рабочая длина (длина активной среды) 20 см.

В сентябре 1965 г. наш действующий полупроводниковый лазер на GaAs Н.Г.Басов показал Ч.Таунсу во время его визита в ФИАН (рис.5). В то время у нас ещё не было криостата (он находился в процессе изготовления). Кристалл же арсенида галлия необходимо было держать при температуре жидкого азота, да ещё и так, чтобы все его грани (кроме опорной) были доступны для облучения и наблюдения. Чтобы выполнить эти требования, мы применили специальную «капельницу» – пенопластовый сосуд, в дно которого была вставлена стеклянная трубка с узким наконечником. Капли жидкого азота, залитого в сосуд, через трубку падали на кристалл, установленный на пенопластовой подставке, и охлаждали его до азотной температуры. При этом все грани кристалла, кроме нижней, были на виду. Этот наш «криостат» очень понравился Таунсу.

Приобретённый опыт эффективного преобразования лазерного излучения методом ВКР очень пригодился нам в дальнейшем, когда начались совместные работы с ВНИИЭФ по созданию мощных высокоэнергетических комбинационных (ВКР) лазеров – когерентных сумматоров на жидком азоте и жидком кислороде.

Следует заметить, что к середине 60-х годов когерентные сумматоры в их вполне современном виде уже фактически были созданы. Это были так называемые излучающие зеркала [25], предложенные Н.Г.Басовым ещё в 1962 г. и созданные в 1964 г. Принципиальное преимущество излучающего зеркала перед другими типами лазеров с лазерной накачкой, например лазеров на красителях, – в его конструкции (рис.6). Активная среда имеет форму диска, расположенного на плоском зеркале, которое по совместительству является хладопроводом. Такая конструкция,

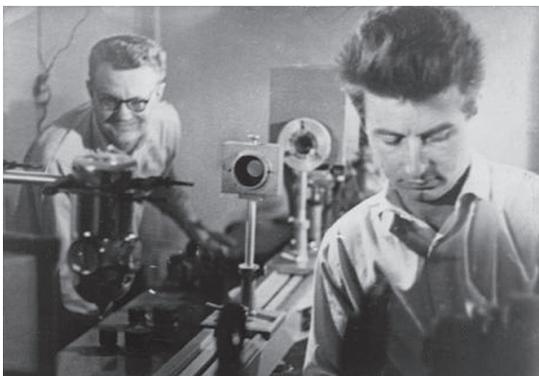
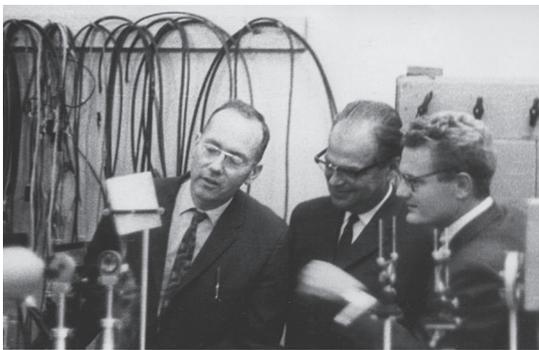


Рис.5. Вверху: Н.Г.Басов показывает Ч.Таунсу действующий полупроводниковый лазер с оптической (лазерной) накачкой (сентябрь 1965 г.). Внизу: В.А.Катулин (на переднем плане) изучает первый полупроводниковый лазер с лазерной накачкой – лазер Басова – Катулина (1964 г.).

во-первых, позволяет эффективно выводить тепло из активной среды, а во-вторых, повышает качество преобразованного лазерного пучка (уменьшает его расходимость). Происходит это потому, что температурный градиент в активной среде (а значит, и градиент показателя преломления) направлены вдоль направления распространения преобразованного лазерного пучка. Градиент же показателя преломления в направлении нормали к оси этого пучка незначителен, а именно этот градиент увеличивает расходимость лазерного пучка, уменьшая его яркость.

К сожалению, в те годы (середина шестидесятых) еще не были разработаны достаточно мощные, эффективные и сравнительно дешевые лазеры – 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 названием «дисковые лазеры». В настоящее время они работают как на активированных стёклах, так и на полупроводниках (полупроводниковые дисковые лазеры) [26] и нашли широкое практическое применение.

Дисковый лазер с накачкой от набора диодных лазеров – это и есть классический когерентный сумматор Н.Г.Басова типа «излучающее зеркало». Действительно, в результате преобразования излучения накачки в дискообразной активной среде осуществляется когерентное суммирование энергий многих пучков накачки (диодные лазеры) в одном пространственно когерентном пучке.

Новое – хорошо забытое старое!

В 1960-х годах лазерным сообществом была дана в основном положительная оценка наших работ по созданию и исследованию полупроводниковых лазеров с оптическим возбуждением. Например, Б.М.Вул в своём выступлении на Учёном совете ФИАНа в 1966 г. высоко оценил наши работы и даже сказал, что они – мирового уровня. В научной литературе цитируемость этих работ был весьма высокой.

Тем не менее имела место недооценка практической значимости наших результатов как со стороны сторонних наблюдателей, так и с моей. Например, на конкурсе научных работ ФИАНа в 1966 г. наш цикл работ, несмотря на их приоритетность, занял лишь второе место – во многом из-за моего неудачного доклада. В нём в числе прочих недостатков мне не удалось донести до конкурсной комис-

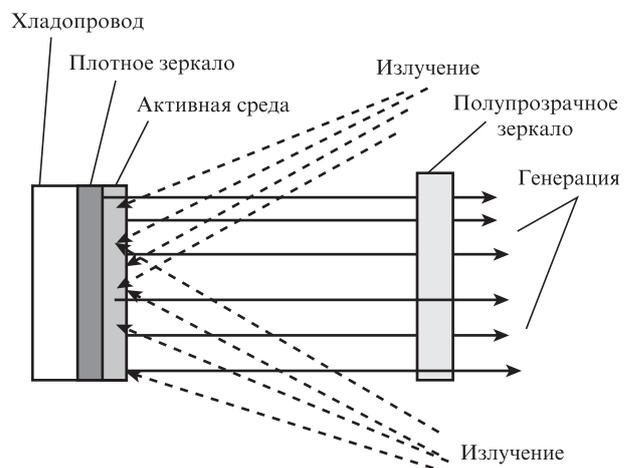


Рис.6. Излучающее зеркало Басова (дисковый лазер).

сии идею Н.Г.Басова о когерентных сумматорах, её практическую значимость и главное – показать, что наши лазеры являются первым примером практического воплощения этой идеи. Возможно, именно по этой причине в дискуссии по докладу заведующий одной из лабораторий ФИАНа, отвечая кому-то из выступавших, заявил:

– Можете не беспокоиться, никакого практического значения эти лазеры не имеют!

Скептики в то время не замечали, что сами полупроводниковые лазеры с оптической накачкой по своей физической сущности и есть когерентные сумматоры, практическая значимость которых очевидна. Всё дело лишь в оптимизации схемы сумматора, в наличии подходящих лазеров – источников накачки, и в способах ее доставки к активной среде когерентного сумматора.

### 9.3. Когерентные сумматоры на основе ВКР

Как видно из предыдущего повествования, где описаны полупроводниковые лазеры с лазерной накачкой (первые КС), приоритетные и основополагающие работы по КС (теоретические и экспериментальные), проводились в Лаборатории квантовой радиофизики ФИАНа с первой половины шестидесятых годов. Они были направлены на создание и исследование вышеупомянутых систем когерентного суммирования лазерных пучков. Необходимость в КС стала особенно острой во второй половине шестидесятых годов, когда были созданы первые мощные высокоэнергетичные иодные взрывные фотодиссоционные лазеры (ВФДЛ) на  $C_3F_7J$  [27].

И тогда Н.Г.Басовым и И.И.Собельманом были предложены КС на основе ВКР для когерентного суммирования излучения ВФДЛ. Созданные нами в лабораторных условиях схемы и конструкции масштабировались в совместных экспериментальных работах Лаборатории КРФ и ВНИИЭФ, проводившихся с 1967 по 1976 г.

В результате этих работ были созданы первые мощные ВКР-лазеры – когерентные сумматоры на жидком азоте и жидком кислороде при накачке излучением мощных иодных ВФДЛ [28].

## 10. Заключение

Мне посчастливилось участвовать в осуществлении лишь нескольких идей Н.Г.Басова – но это были блестящие идеи.

1. «Продвижение» молекулярного генератора в Космос. «Космические» стандарты частоты открыли новые возможности для фундаментальной и прикладной науки.

2. Лазерные усилители: предельно чувствительные, регенеративные, усилители изображений.

3. Полупроводниковые лазеры с оптической (лазерной) накачкой. Это был не только новый тип лазеров, но и осуществление идеи когерентного суммирования, которая потом особенно ярко воплотилась в мощных высокоэнергетичных лазерах – когерентных сумматорах на основе ВКР.

Вышеизложенное отражает лишь малую часть тех идей, которые выдвинул и осуществил Н.Г.Басов в период моей работы у него. Другие его ученики могут рассказать свои истории – и все вместе они безусловно подтвердят тезис, ставший эпиграфом к этой статье.

1. Басов Н.Г., Прохоров А.М. *УФН*, **57** (3), 485 (1955).
2. Басов Н.Г. *Докт. дис.* (ФИАН, 1956).
3. Ораевский А.Н. *Молекулярные генераторы* (М.: Наука, 1964).
4. Халдре Х.Ю., Хохлов Р.В. *Изв. вузов. Сер. Радиофизика*, **1**, 60 (1958).
5. Гуртовник А.Г. *Изв. вузов. Сер. Радиофизика*, **1**, 83 (1958).
6. Grasiuk A.Z., Oraevsky A.N. *Proc. 4-th Intern. Congress Microwave Tubes* (Shveningen, Holland, 1962, pp.446-450).
7. Грасюк А.З., Ораевский А.Н. *Радиотехника и электроника*, **9** (3), 524 (1964).
8. Грасюк А.З. «*Взаимодействие излучения с веществом*» (*Курс лекций по лазерной физике*) (М.: изд-во ФИАНа, 2004).
9. Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю., Орлов Е.П. *Квантовая электроника*, **30** (9), 833 (2000).
10. Басов Н.Г., Грасюк А.З., Зубарев И.Г. *Радиотехника и электроника*, **9** (9), 1680 (1964).
11. Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю., Орлов Е.П. *Квантовая электроника*, **31** (5), 419 (2001).
12. Грасюк А.З., Ефимков В.Ф., Зубарев И.Г. *ПТЭ*, №1, 156 (1966).
13. Басов Н.Г., Грасюк А.З., Зубарев И.Г. *ДАН СССР*, **157** (5), 1084 (1964).
14. Басов Н.Г., Грасюк А.З., Зубарев И.Г., Тевелев Л.В. *Труды ФИАН*, **31**, 74 (1965).
15. Крюков П.Г. *Лазеры ультракоротких импульсов и их применения* (М.: ИНТЕЛЛЕКТ, 2012, гл. 11).
16. *Регенеративный усилитель на титан-сапфире. Инф. листок компании «Авеста-Проект»*, 2010.
17. Басов Н.Г., Грасюк А.З., Зубарев И.Г. *ЖПС*, **3** (1), 26 (1965).
18. Басов Н.Г., Грасюк А.З., Катулин В.А. *ДАН СССР*, **161**, 1306 (1965).
19. Басов Н.Г., Грасюк А.З., Зубарев И.Г., Катулин В.А. *Письма в ЖЭТФ*, **1** (4), 2993 (1965).
20. Басов Н.Г., Грасюк А.З., Зубарев И.Г., Катулин В.А., Крохин О.Н. *ЖЭТФ*, **50**, 551 (1965).
21. Басов Н.Г., Грасюк А.З., Зубарев И.Г., Катулин В.А. *ФТТ*, **7** (12), 3639 (1965).
22. Грасюк А.З., Ефимков В.Ф., Зубарев И.Г., Катулин В.А., Менцер А.Н. *ФТТ*, **8** (6), 1953 (1966).
23. Басов Н.Г., Грасюк А.З., Ефимков В.Ф., Катулин В.А. *ФТТ*, **9** (1), 88 (1967).
24. Грасюк А.З., Логунов О.А., Смирнов В.Г. *ФТП*, **1** (10), 1502 (1967).
25. Basov N.G., Bogdankevich O.V., Grasiuk A.Z. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-2** (9), 594 (1966).
26. Охотников О.Г. *Квантовая электроника*, **38** (12), 1083 (2008).
27. Зуев В.С., Катулин В.А. *Квантовая электроника*, **24** (12), 1105 (1997).
28. Грасюк А.З., Зубарев И.Г., Ефимков В.Ф., Смирнов В.Г. *Квантовая электроника*, **42** (12), 1064 (2012).