

Когерентность и лазеры

А.Н.Ораевский

Приводятся воспоминания об отношении Н.Г.Басова к проблеме когерентности индуцированных переходов в самом начале работ по созданию мазеров и лазеров. Показано, что проблема когерентности индуцированных переходов решается в системе большого числа частиц. Обсуждается роль индуцированных переходов в различных процессах, происходящих в природе. Кратко описан вклад Н.Г.Басова и его школы в развитие квантовой электроники и лазерной физики.

Ключевые слова: лазеры, когерентность индуцированных переходов.

Индуцированные переходы в активной среде, лежащие в основе лазеров, обладают свойством когерентности. Это означает, что характеристики излучаемых в результате этих переходов электромагнитных волн полностью подобны характеристикам индуцирующего поля. Если использовать модный ныне термин, то можно сказать, что индуцированные переходы *клонировуют* волну, действующую на активную среду. Сейчас это хорошо известный факт. Но в 1949–1950 гг., когда Н.Г.Басов начал размышлять над проблемой генерации электромагнитных волн с помощью квантовых систем, это было далеко не очевидно.

В своих рассуждениях Н.Г.Басов опирался на тот факт, что, согласно теории Дирака [1, 2], частота, направление распространения и поляризация фотона, рожденного за счет индуцированного перехода, должны быть одинаковыми с аналогичными характеристиками индуцирующих фотонов, однако, согласно соотношению неопределенности

$$\tau_{\text{ind}}\Delta\omega \geq 1, \quad (1)$$

конечность времени (вероятности) перехода τ_{ind} должна обусловить конечность ширины $\Delta\omega$ испускаемого спектра. Казалось бы, условие (1) отрицает возможность испускания атомом (и лазером в целом) узкой спектральной линии. Именно на этой позиции стояли многие физики, с которыми Н.Г.Басову пришлось вести дискуссии в 1949–1950 гг. Басов же интуитивно чувствовал, что мазерное (лазерное) излучение, генерируемое в *непрерывном режиме*, должно быть *монохроматично*. В этом убеждении его поддерживал опыт работы с когерентными источниками микроволнового диапазона, применявшимися в радиоспектроскопии. Поэтому он совместно с А.М.Прохоровым неуклонно шел к созданию первого мазера.

Н.Г.Басов считал проблему когерентности процесса индуцированного испускания принципиально важной. Он возвращался к ней не раз даже после того, как мазеры

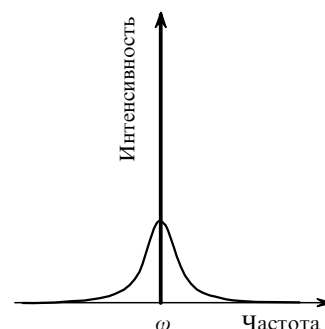


Рис.1. Рождение монохроматического излучения в ансамбле атомов, каждый из которых взаимодействует с полем в течение конечного времени.

были созданы, и вовлекал в обсуждение этой проблемы своих сотрудников.

Интуиция Н.Г.Басова подсказывала ему, что проблема монохроматичности (когерентности) может быть решена в рамках системы многих частиц. Проследим, в какой степени он оказался прав.

Согласно соотношению (1), каждая частица (атом, молекула и т.п.) действительно излучает спектр конечной ширины, поскольку процесс ее испускания ограничен во времени. Однако дипольный момент атома в момент его появления в возбужденном состоянии фазирован полем в резонаторе, так что начальная фаза дипольного момента каждого вновь появившегося в возбужденном состоянии атома изменяется в такт с изменением фазы поля. В результате фазировки когерентными оказываются только те спектральные компоненты испускаемого атомами излучения, частота которых в точности совпадает с частотой воздействующего поля. Эти компоненты складываются по амплитуде и обуславливают когерентный отклик активной среды на воздействие внешнего поля (рис.1). Компоненты, соответствующие другим частотам, некогерентны и обуславливают шум в полосе частот порядка τ_{ind}^{-1} . Подтвердим сказанное формальным расчетом [3, 4].

Для определенности будем считать, что атомы взаимодействуют с полем, пролетая через резонатор, как это имеет место в мазере на основе атомного (молекулярного) пучка. В таком случае поляризация двухуровневого атома p , приобретаемая под действием поля $Ee^{-i\omega t}$, опи-

сывается уравнением [4]

$$\frac{d^2 p}{dt^2} + \omega_a^2 p = -2\omega_a \frac{\mu^2}{\hbar} N E e^{-i\omega t}, \quad (2)$$

где ω_a – резонансная частота, а μ – матричный элемент дипольного момента атомарного перехода; N – разность населенностей верхнего и нижнего атомных уровней. Будем считать поле слабым и пренебрежем изменением разности населенностей. В момент t_j , когда атом входит в резонатор, поляризация и ее производная равны нулю. Решение уравнения (2), соответствующее этим начальным значениям, дается формулой

$$p(t, t_j) \approx \chi E (e^{-i\omega t} - e^{i(\omega_a - \omega)t_j} e^{-i\omega_a t}), \quad \chi = \frac{\mu^2}{\hbar(\omega - \omega_a)} N. \quad (3)$$

Решение (3) записано в приближении $(\omega_a - \omega)/\omega \ll 1$. Так как атом находится в резонаторе в течение времени τ , то спектр его поляризации определяется соотношением

$$\bar{p}(\Omega, \tau, t_j) = \int_{t_j}^{t_j + \tau} p(t, t_j) e^{i\Omega t} dt. \quad (4)$$

Ясно, что спектр поляризации отдельного атома, определяемый интегралом по интервалу τ , имеет ширину порядка τ^{-1} . Суммарный спектр поляризации всех атомов получим при сложении спектров отдельных атомов, появившихся в разные моменты времени:

$$P(\Omega, \tau) = \sum_j p(\Omega, \tau, t_j) = \frac{\chi E}{i} \sum_j e^{i(\Omega - \omega)t_j} \left(\frac{1 - e^{i(\Omega - \omega)\tau}}{\omega - \Omega} - \frac{1 - e^{i(\Omega - \omega_a)\tau}}{\omega_a - \Omega} \right). \quad (5)$$

В пределе большого числа частиц, когда суммирование можно заменить интегрированием по t_j , убеждаемся, что

$$P(\Omega, \tau) \rightarrow \delta(\Omega - \omega). \quad (6)$$

Таким образом, спектр поляризации очень большого числа частиц становится монохроматическим, несмотря на то что поляризация каждой отдельной частицы имеет широкий спектр.

Заметим попутно, что в формировании монохроматического излучения в лазере (мазере) важную роль играет эффект насыщения. Однако эта проблема не является предметом анализа настоящей статьи.

Вышеприведенное обоснование совпадения частоты индуцированно испускаемого излучения с частотой возмущающего поля основано на том обстоятельстве, что поле и поляризация имеют определенное значение фазы. Между тем, в квантовом состоянии поля фаза и число фотонов не могут быть определены точно, т. к. как флуктуации числа фотонов Δn и фазы $\Delta \varphi$ связаны следующим соотношением неопределенности:

$$\Delta n \Delta \varphi \geq 1. \quad (7)$$

Классическое монохроматическое поле имеет строго определенную амплитуду и фазу. Значит, строго определена и энергия волны (число фотонов). Согласно же соотношению (7), в квантовой механике этого быть не может. Рассмотрим, как решается данная проблема.

В квантовой теории лазера, как и в квантовой электродинамике, поле рассматривается в виде совокупности осцилляторов. В случае лазера-генератора поле $E(\mathbf{r}, t)$

естественно представлять в виде разложения по собственным модам резонатора $U_k(\mathbf{r})$:

$$E(\mathbf{r}, t) = i \sum_k \left(4\pi \frac{\hbar \omega_k}{V} \right)^{1/2} \left[\hat{a}_k^+(t) U_k^*(\mathbf{r}) - \hat{a}_k(t) U_k(\mathbf{r}) \right], \quad (8)$$

где ω_k – собственные частоты моды $U_k(\mathbf{r})$. Коэффициенты разложения \hat{a}_k^+, \hat{a}_k следует рассматривать как операторы рождения и уничтожения фотона в соответствующей моде резонатора. Перестановочные соотношения между этими операторами соответствуют таковым для механического осциллятора,

$$\hat{a}_k \hat{a}_k^+ - \hat{a}_k^+ \hat{a}_k = 1, \quad (9)$$

а $\hat{n}_k = \hat{a}_k^+ \hat{a}_k$ является оператором числа фотонов в данной моде резонатора. Однако при описании когерентного поля возникает проблема. Когерентное поле имеет отличное от нуля среднее значение, но усреднение поля (8) по состоянию с заданным числом фотонов приводит к нулевому результату. Выход из этой ситуации был найден введением когерентных состояний поля $|E_k\rangle$ – суть собственных состояний оператора уничтожения фотона

$$\hat{a}_k |E_k\rangle = E_k |E_k\rangle. \quad (10)$$

Квантовое когерентное состояние рассматривалось еще Шредингером [5]. Его теория применительно к проблемам когерентной оптики была развита в работах Глаубера [6], Сударшана [7] и ряда других авторов.

Поле (8), усредненное по функциям (10), отлично от нуля,

$$\langle E(\mathbf{r}, t) \rangle = i \sum_k \left(4\pi \frac{\hbar \omega_k}{V} \right)^{1/2} \left[E_k^*(t) U_k^*(\mathbf{r}) - E_k(t) U_k(\mathbf{r}) \right], \quad (11)$$

и является, как будет показано ниже, квантовым соответствием классическому когерентному полю.

Когерентное состояние $|E_k\rangle$ может быть представлено в виде бесконечной суммы состояний $|n_k\rangle$ с определенным числом фотонов:

$$|E_k\rangle = \sum_n \exp\left(-\frac{|E_k|^2}{2}\right) \frac{E_k^n}{\sqrt{n!}} |n_k\rangle. \quad (12)$$

Формула (12) показывает, что в когерентном состоянии число фотонов не является определенным, а вероятность зарегистрировать в состоянии $|E_k\rangle$ число фотонов, равное $|n_k\rangle$, есть

$$w(n_k, E_k) = \exp(-|E_k|^2) \frac{|E_k|^{2n_k}}{n_k!}. \quad (13)$$

Формула (13), как известно, носит название пуассоновского распределения. Изучение статистики фотонов гелий-неонового лазера, проведенное Ф.Т.Ареки [8], продемонстрировало очень хорошее согласие формулы (13) с экспериментальными результатами.

Одним из важных свойств квантового когерентного состояния является то, что ему отвечает минимальное значение неопределенности в числе фотонов и фазы:

$$\Delta n_k \Delta \varphi_k = 1. \quad (14)$$

В когерентном состоянии $|E_k\rangle$ среднее число фотонов

$$\langle n_k \rangle = |E_k|^2, \quad \Delta n_k = \left\langle \left(\langle n_k \rangle - n_k \right)^2 \right\rangle^{1/2} = \langle n_k \rangle^{1/2}, \quad (15)$$

поэтому

$$\Delta \varphi_k = \langle n_k \rangle^{-1/2}. \quad (16)$$

Таким образом, неопределенность в фазе уменьшается с ростом среднего числа фотонов в электромагнитной волне. В классическом пределе, когда $\langle n_k \rangle \rightarrow \infty$, неопределенность в фазе $\Delta \varphi_k \rightarrow 0$. Чтобы дать этому обстоятельству наглядную интерпретацию, введем операторы так называемых квадратурных компонент

$$\hat{X}_k = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{a}_k + \hat{a}_k^\dagger), \quad \hat{Y}_k = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{a}_k^\dagger - \hat{a}_k). \quad (17)$$

В общем случае соотношение неопределенностей для компонент \hat{X}, \hat{Y} имеет вид

$$\Delta \hat{X}_k \Delta \hat{Y}_k \geq 1. \quad (18)$$

В состоянии вакуума электромагнитного поля, а также в когерентном состоянии

$$\Delta \hat{X}_k = \Delta \hat{Y}_k = 1. \quad (19)$$

Изобразим на фазовой плоскости \hat{X}_k, \hat{Y}_k вакуумное состояние в виде окружности с единичным радиусом (рис.2). Тогда когерентное состояние можно представить в виде такой же окружности, но сдвинутой от центра на расстояние $\langle n_k \rangle^{1/2}$ и вращающейся вокруг центра с частотой ω_k . Угол $\Delta \varphi_k$ есть неопределенность фазы в когерентном состоянии, которая уменьшается с ростом $\langle n_k \rangle$.

Выясним вопрос о соотношении фаз индуцирующего и испускаемого полей. Так как фаза испускаемого поля определяется фазой поляризации активного вещества, мы построим функцию состояния активного вещества по аналогии с когерентным состоянием поля. Можно ввести операторы рождения (\hat{A}^\dagger) и уничтожения (\hat{A}) активных частиц в возбужденном состоянии и построить функцию когерентного состояния вещества $|P\rangle$, такую, что

$$\hat{A}|P\rangle = P|P\rangle. \quad (20)$$

Параметр P по своему физическому смыслу есть средняя поляризация активной среды, отнесенная к дипольному моменту отдельного двухуровневого атома. Как и для когерентного состояния поля,

$$|P\rangle = \exp\left(-\frac{1}{2}|P|^2\right) \sum_N \frac{P^N}{\sqrt{N!}} |N\rangle, \quad (21)$$

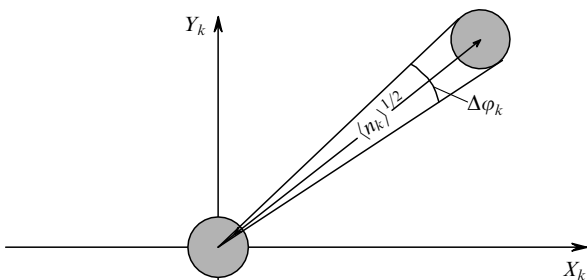


Рис.2. Диаграмма квантового когерентного состояния.

где $|N\rangle$ – собственная функция, соответствующая определенному числу активных частиц.

Из соотношения (21) следует, что число частиц, вносящих вклад в поляризацию, неопределенно, а распределение (21) обеспечивает минимальную неопределенность числа частиц и фазы поляризации активной среды. Как и в случае электромагнитной волны, неопределенность фазы поляризации исчезает при $N \rightarrow \infty$: действующая и излучаемая волны оказываются синфазными или имеющими постоянный сдвиг фаз. Поэтому использование постоянного сдвига фазы между полем и поляризацией при выводе формулы (6) для системы многих частиц оправдано.

Таким образом, проблема когерентности и монохроматичности, связанная с процессом индуцированного испускания, действительно решается в рамках системы многих частиц, как это и предполагал Н.Г.Басов.

Н.Г.Басов и А.М.Прохоров всегда подчеркивали, что квантовый генератор (общее название мазеров и лазеров) является автоколебательной системой со всеми ее атрибутами. Так, в тексте выступления Н.Г.Басова и А.М.Прохорова на сессии общества им. А.С.Попова в 1954 г. читаем: «Молекулярными генераторами мы называем автоколебательную систему, использующую энергию, связанную с переходами между различными уровнями молекул. Контуром молекулярного генератора является объемный резонатор. Через объемный резонатор пропускается молекулярный пучок с положительным числом активных молекул. Обратная связь в генераторе осуществляется через электромагнитное поле резонатора, которое, воздействуя на дипольные электрические моменты молекул, вызывает индуцированное излучение молекул пучка.» [9]. Таким образом, лазер является комплексной системой, в работе которой важную роль играют все ее компоненты. Общая же теория лазера должна включать в себя и свойства резонатора. Будучи автоколебательной системой, лазер с неизбежностью является системой нелинейной. Резонатор и нелинейность играют важную роль в формировании режимов генерации лазера. Поэтому нелишнее подчеркнуть, что все вышесказанное относится только к описанию свойств индуцированных переходов – независимо от того, происходят они в резонаторе или в свободном пространстве.

Обратим внимание на одно обстоятельство из общей теории лазера, тесно соприкасающееся с проблемой когерентности индуцированных переходов. В квантовом когерентном состоянии флуктуации фазы и числа фотонов представляют собой стационарные случайные процессы. Однако в реальном лазере квантовые флуктуации электромагнитного вакуума и дипольного момента активных атомов обуславливают диффузию фазы генерируемого поля, делая ее нестационарной. Ее среднее значение изменяется согласно закону [10]:

$$\langle \Delta \varphi^2 \rangle = Dt, \quad D = \frac{\Delta \omega_c}{\langle n \rangle} \frac{N_{up}}{N_{up} - N_{la}}, \quad (22)$$

где $\Delta \omega_c$ – полуширина линии резонатора; $\langle n \rangle$ – среднее число фотонов в резонаторе лазера; N_{up} – число частиц (атомов) на верхнем рабочем уровне энергии; N_{la} – число атомов на нижнем рабочем уровне энергии. Спектральная ширина линии $\Delta \omega$ генерируемого лазером излучения определяется коэффициентом диффузии фазы D :

$$\Delta \omega = D. \quad (23)$$

В теории лазеров формулу (21) обычно связывают с именами Ч.Таунса и А. Шавлова [10]. Она является аналогом формулы, полученной Бернштейном для автогенератора радиодиапазона [11]. Формула (22) показывает, что с ростом среднего числа фотонов в резонаторе диффузия фазы замедляется. И в этом случае проявляется закономерность, связанная с увеличением когерентности при возрастании числа фотонов в резонаторе и числа возбужденных частиц, принимающих участие в генерации.

Небезынтересно обратить внимание на следующее обстоятельство. Сечение индуцированного резонансного перехода атома с одного энергетического уровня на другой, вычисленное в дипольном приближении, есть

$$\sigma_{\text{ind}} = \frac{8\pi^2 |\mu|^2}{\lambda \hbar \gamma}. \quad (24)$$

Если ширина линии обусловлена только спонтанными радиационными переходами, то

$$\sigma_{\text{ind}} = \lambda^2 / 2\pi. \quad (25)$$

В оптическом диапазоне длин волн (и в более длинноволновых диапазонах) сечение (24) намного превышает эффективное геометрическое сечение атома. На первый взгляд, это выглядит парадоксально, однако последовательный расчет разрешает этот парадокс. В работе [12] рассчитана структура поля, взаимодействующего с атомом. Поле предполагается классическим, имеющим вдали от атома вид плоской волны. Как показал расчет, вблизи атома поле искажается. На рис.3 представлены линии равных потоков энергии волны вблизи атома. Видно, что атом «собирает» энергию с площади, значительно превышающей его геометрическое сечение.

Когерентная электромагнитная волна – не единственный объект когерентного состояния материи. Существуют когерентные состояния разной природы, такие как бозе-эйнштейновский конденсат атомов в ловушках, сверхпроводящий конденсат куперовских пар. Когерентное (упорядоченное) расположение атомов имеет место в кристаллах и т.п. Опыт лазерной физики подводит нас к выводу о том, что в формировании когерентного состоя-

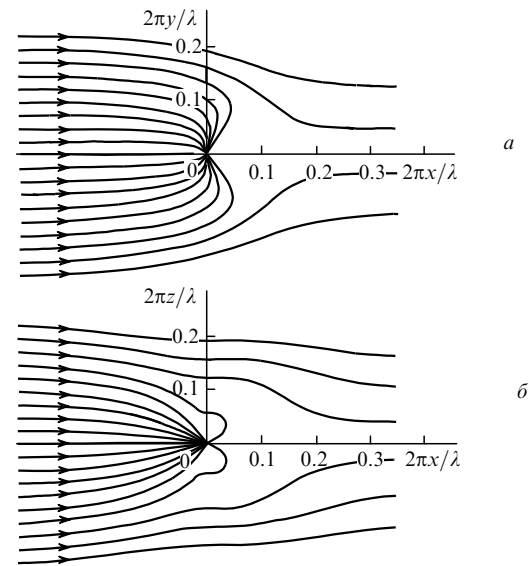


Рис.3. Диаграммы поглощения света атомным диполем – проекция потока энергии в плоскости xy (а) и проекция потока энергии в плоскости xz при осцилляции диполя вдоль оси z (б). По всем осям отложено расстояние, нормированное на длину волны λ .

ния любой природы решающую роль должны играть индуцированные переходы. Мы считаем, что они являются универсальным механизмом, приводящим к спонтанному нарушению симметрии в природе [13]. Для этого нужна такая ситуация, при которой индуцированный процесс создания какого-либо объекта с характерным признаком превосходит бы процесс его распада. Это условие эквивалентно условию возбуждения лазера. Повидимому, индуцированные процессы сыграли решающую роль при формировании нашей Вселенной, когда симметрия материи была нарушена в пользу электронов и протонов. Аналогичное предположение можно высказать и в отношении возникновения живых организмов, белковые молекулы которых имеют левую хиральность.

Вернемся снова к личности Н.Г.Басова. Его научная деятельность сыграла решающую роль в постановке и многих проблем, связанных с развитием квантовой элек-



Рис.4. Н.Г.Басов и первые молекулярные генераторы (середина 50-х годов).

троники (рис.4). Все, кому доводилось вести с Н.Г.Басовым беседы на научные темы, отмечают его необычайную физическую интуицию, умение разглядеть будущее проблемы сквозь туман сегодняшнего дня. Один из примеров – глубокое проникновение в проблему когерентности индуцированных переходов – обсуждался выше. Другой пример – полупроводниковые лазеры.

Примерно в 1957 г., когда эйфория, связанная с успешным созданием мазеров и парамагнитных усилителей, сменилась регулярной работой по развитию этих приборов, появилась возможность поразмыслить и о дальнейшем развитии квантовой электроники. Именно в это время научные интересы Н.Г.Басова повернулись в сторону оптического диапазона длин волн.

Одной из важнейших проблем, которые предстояло

решить, стал выбор рабочего вещества для лазера и его способа накачки. Считалось, что для создания лазера лучше всего подходят материалы, имеющие узкие спектральные линии люминесценции. Поэтому рабочее вещество искали среди газовых сред или так называемых люминесцентных кристаллов. Н.Г.Басов же стал думать над использованием полупроводников в качестве лазерных рабочих сред. Никто не мог отрицать возможность создания такого лазера. Но то, что полупроводник с его широкими полосами люминесценции вряд ли является удачным лазерным материалом, «понимали» все. Все, кроме Н.Г.Басова... Он интуитивно угадал большую перспективность полупроводников для создания лазеров [14] и развернул широкий научный поиск в данном направлении. В рамках этих исследований были предло-

Проблема	Вклад Н.Г.Басова и его школы	Примечание
1. Предложение мазеров: генераторов и малошумящих усилителей	Предложение и создание первых мазеров [17]. Предложение малошумящих квантовых усилителей [18] и электромагнитной накачки в трехуровневой схеме [19]	Ленинская (1959 г.) и Нобелевская (1964 г.) премии
2. Предложение и исследование лазеров на первой стадии их развития	Авторское свидетельство на полупроводниковые лазеры [14]. Тема «Фотон» [16]	
3. Полупроводниковые лазеры	Предложение инжекционного лазера и его модификации в виде структуры с разной шириной запрещенной зоны [14]	Ленинская премия (1964 г.)
	Предложение и осуществление лазера с электронным [20] и оптическим возбуждением [21] Первое осуществление гетеролазера на основе InGaAsP/InP и других четверных гетероструктур (лазеры для связи) [22]	Государственная премия (1990 г.)
4. Стандарты частоты	Цикл работ по стандартам частоты СВЧ (мазеры) и оптического диапазона [22 – 24]	Премия Ленинского комсомола (1972), Государственные премии (1983 г., 1988 г.)
5. Динамика лазеров	Сформулирована модель для описания динамики мазеров и лазеров, учитывающая поле, поляризацию активного вещества и населенность рабочих уровней в качестве динамических переменных [25]. В литературе модель получила название модели Максвелла – Блоха Численное обнаружение режима нерегулярных (непериодических) пульсаций в одномодовом лазере, впоследствии получившего название динамического хаоса [26, 27]. Экспериментальное наблюдение периодических пульсаций в полупроводниковом лазере при гелиевой температуре [28]	
6. Газодинамические и химические лазеры	Предложение молекулярных лазеров с тепловой накачкой [29] и создание их теории [30]	
	Предложение [31] и экспериментальная реализация химических лазеров на цепных реакциях [32]. Предложение чисто химического лазера непрерывного действия [33] Предложение нового типа химического лазера, основанного на фотонном разветвлении химической реакции [34 – 36]. Создание высокоэффективных генераторов синглетного кислорода и мощного кислородно-иодного лазера на их основе [37]	Ленинская премия (1984 г.)
7. Эксимерные лазеры	Создание первого в мире эксимерного лазера на ксеноне [38, 39, 40]	Государственная премия (1978 г.)
8. Газовые лазеры высокого давления	Предложение и экспериментальная реализация электроионизационного метода накачки, позволившего создать молекулярные газовые лазеры высокого давления [41]	
9. Газовые лазеры с оптической накачкой и источники мощного УФ излучения для их накачки	Предложение лазеров на основе фотодиссоциации молекул [42]. Разработка и создание лазеров со взрывной накачкой [43]. Разработка мощных источников излучения. Предложение и создание газовых лазеров с оптической накачкой [44]	Государственная премия (1980 г.)

Проблема	Вклад Н.Г.Басова и его школы	Примечание
10. Рентгеновские лазеры и рентгеновская оптика	Предложены и проанализированы различные схемы возбуждения рентгеновских лазеров [45, 47]. Предложен метод создания зеркал мягкого рентгеновского диапазона [48, 49]	Государственная премия (работы по рентгеновской оптике, 1991 г.)
11. Лазерный термоядерный синтез	Выдвижение идеи лазерного термоядерного синтеза [50]. Первое обнаружение термоядерных нейтронов под действием лазерного облучения [51]. Пионерские работы по конструированию и сжатию мишеней [52]	
12. Лазерно-химические реакции	Первые эксперименты по инициированию химических реакций ИК лазерным излучением [34] и предложение механизма лазерно-химического действия на основе ферми-резонансов в молекуле [53]. Обнаружение селективной по колебательной моде деструкции молекул путем одновременного воздействия ИК и УФ излучений [54]. Биохимические реакции [55, 56]	
13. Лазерное разделение изотопов	Открытие изотопической селективности процесса бесстолкновительной диссоциации молекул [57]. Цикл работ по разделению изотопов [58]	
14. Обращение волнового фронта	Открытие самообращения волнового фронта мощного лазерного излучения на основе мандельштам-бриллюэновского рассеяния [59]	Государственная премия (1983 г.)
15. Лазерная спектроскопия	Внутридоплеровская лазерная спектроскопия [60] Предложение и разработка высокочувствительного метода внутривибрационной лазерной спектроскопии [61, 62]	Ленинская премия (1978 г.) Премия им. Д.С.Рожественского (1983 г.)
16. Мощные усилители света	Открытие сверхсветового распространения импульса света в усиливающих средах [63]	
17. Проекционное телевидение	Предложение и исследование проекционного телевизионного устройства на основе полупроводникового лазера, возбуждаемого электронным пучком [64]	
18. Лазерная плазма и лазерная технология	Предложение и реализация различных вариантов применения лазеров в технологических процессах [65]	Государственная премия (1982 г.)
19. Лазерная локация	Создана установка, проведены эксперименты по определению расстояния от Земли до Луны с большой степенью точности [66, 67]	
20. Оптическая передача информации	Проанализирована предельная емкость оптического канала передачи информации [68]	
21. Электроионизационная химия	Синтезированы уникальные азотосодержащие соединения в плазме электроионизационного разряда [69]	Государственная премия (1989 г.)
22. Винтовые структуры оптических пучков	Предсказание, обнаружение и исследование винтовых структур оптических пучков [70, 71]	
23. Лазерное охлаждение атомов	Теоретически разработано и экспериментально осуществлено лазерное охлаждение и пленение атомов [72]	Премия им. Д.С.Рожественского (2001 г.)

жены и инжекционные лазеры, и их модификации в виде структуры с разновеликими зонами [15], впоследствии получившей название гетероструктуры. Результат известен: сейчас инжекционные полупроводниковые лазеры – самый широко применяемый тип лазера.

Следует отметить постановку Н.Г.Басовым в 1959 г. обширной исследовательской программы по созданию лазеров, которая получила название «Фотон». Н.Г.Басов был научным руководителем этой темы. В ее рамках кроме Лаборатории (ныне Отделения) квантовой радиофизики работали все оптические лаборатории ФИАНа, составляющие в настоящее время Отделение оптики. Работа была завершена созданием многих типов лазеров, ряд из которых был осуществлен впервые в мире [16].

Основная особенность научного творчества Н.Г.Басова – нацеленность на новую идею. Видимо, поэтому им

самим и его учениками выполнено необычно большое количество работ, которые принято называть пионерскими. Ниже приведен краткий перечень основных научных достижений Н.Г.Басова и его школы.

Н.Г. Басов – личность мирового масштаба. В небольшой статье трудно отразить его многогранную научную, научно-организационную, просветительскую и педагогическую деятельность, поэтому мы отсылаем читателя к другим статьям и книгам, посвященным Н.Г.Басову [9, 73–77].

В большом научном коллективе, возвращенном и руководимом Н.Г.Басовым, более шестидесяти человек удостоены таких престижных премий, как Ленинская, Государственная, премия Ленинского комсомола, именны премии Академии Наук.

1. Dirac P.A.M. *Proc. Roy. Soc. A*, **114**, 243, 710 (1927); Дирак П.А.М. *Основы квантовой механики* (М.–Л., Физматгиз, 1937).
2. Гайтлер В. *Квантовая теория излучения* (М.: ИЛ, 1956).
3. Басов Н.Г., Ораевский А.Н. *ЖЭТФ*, **42**, № 2, 1529 (1962).
4. Ораевский А.Н. *Молекулярные генераторы* (М.: Наука, 1964, с. 211–217).
5. Schrödinger E. *Naturwissenschaften*, **14**, 644 (1927).
6. Glauber R.J. *Phys.Rev.*, **130**, 2529 (1963).
7. Sudarshan E.C.G. *Phys.Rev.Lett.*, **10**, 277 (1963).
8. Arecchi F.T. *Photocount Distribution and Field Statistics. Lectures at the International School of Phys.* (Varenna, Italy, 1967); Ареки Ф.Т. и др. *Квантовые флуктуации излучения лазера* (М.: Мир, 1974).
9. Стародуб А.Н. *Записки архивариуса* (М.: изд-е ФИАН, 1997, т. II, вып.1).
10. Shawlow A.L., Townes C.H. *Phys. Rev.*, **112**, № 6, 1940 (1958).
11. Бернштейн И.Л. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **14**, № 2, 145 (1932).
12. Paul H., Fischer R. *Light absorption by dipole. Preprint 82-2 ZOS* (Berlin, 1982).
13. Ораевский А.Н. *Квантовая электроника*, **31**, № 12, 1038 (2001).
14. Басов Н.Г., Вул Б.М., Попов Ю.М. *Квантомеханические полупроводниковые генераторы и усилители электромагнитных колебаний*. А. с. № 10453 (1958).
15. Басов Н.Г., Крохин О.Н., Попов Ю.М. *ЖЭТФ*, **40**, № 6, 1879 (1961).
16. Отчет по теме «Применение квантовых систем для генерации, усиления и индикации оптического излучения» (шифр темы «Фотон, руководитель темы Н.Г.Басов» (М.: ФИАН, 1961).
17. Басов Н.Г., Прохоров А.М. *Применение молекулярных пучков в радиоспектроскопии*. Доклад на совещании по магнитным моментам ядер. (М., 22–23 января 1953 г.); *ЖЭТФ*, **27**, № 4, 431 (1954).
18. Басов Н.Г., Прохоров А.М. *ДАН СССР*, **101**, № 1, 47 (1955).
19. Басов Н.Г., Прохоров А.М. *ЖЭТФ*, **28**, № 2, 249 (1955).
20. Басов Н.Г., Богданкевич О.В., Девятков А.Г. *ДАН СССР*, **155**, 78 (1964).
21. Басов Н.Г., Грасюк А.З., Зубарев И.Г., Катулин В.А. *Письма в ЖЭТФ*, **1**, 29 (1965).
22. Басов Н.Г. *Молекулярный генератор*. Докт. дисс. (М., ФИАН, 1956).
23. Ораевский А.Н. *Труды ФИАН*, **21**, 3 (1964).
24. Губин М.А., Проценко Е.Д. *Квантовая электроника*, **24**, 1080 (1997).
25. Ораевский А.Н. *К теории молекулярного генератора*. Доклад на семинаре Лаборатории колебаний ФИАН (М., сентябрь 1956 г.); *Радиотехника и электроника*, **4**, № 4, 718 (1959).
26. Грасюк А.З., Ораевский А.Н. *Радиотехника и электроника*, **9**, № 3, 524 (1964); Grasiuk A.Z., Oraevsky A.N. *Proc. IV Intern. Cong. on Microwave Tubes* (Sheveningen, Holland, 1962, p.446–450).
27. Grasiuk A.Z., Oraevsky A.N. In *Quantum Electronics and Coherent Light*. Ed. by P.A.Miles (New York: Acad. Press, 1964).
28. Литвинов В.Ф., Молочев В.И., Морозов В.Н., Никитин В.В., Семенов А.С. *Письма в ЖЭТФ*, **19**, № 12, 747 (1974).
29. Басов Н.Г., Ораевский А.Н. *ЖЭТФ*, **44**, № 5, 1742 (1963).
30. Басов Н.Г., Ораевский А.Н., Щеглов В.А. *ЖТФ*, **37**, № 2, 339 (1967).
31. Ораевский А.Н. *ЖЭТФ*, **45**, № 3, 177 (1963).
32. Басов Н.Г. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **9**, 613 (1969).
33. Басов Н.Г., Ораевский А.Н. А. с. № 436413 с приоритетом от 24 апреля 1967 г.; *БИ*, № 26 (1974).
34. Басов Н.Г., Маркин Е.П., Ораевский А.Н., Панкратов А.В. *ДАН СССР*, **198**, 1034 (1971).
35. Игошин В.И., Ораевский А.Н. *Квантовая электроника*, **6**, № 12, 2517 (1979).
36. Basov N.G., Bashkin A.S., Igoshin V.I., Oraevsky A.N., Shcheglov V.A. *Chemical Lasers* (Berlin–Heidelberg–New York: Springer-Verlag, 1990).
37. Загидуллин М.В. Докт. дисс. (М., ФИАН, 1999).
38. Басов Н.Г., Данилычев В.А., Попов Ю.М., Ходкевич Д.Д. *ЖЭТФ*, **12**, № 10, 473 (1970).
39. Basov N.G., Danilychev V.A., Popov Yu.M. *Jpn. J. Oya Buchuri*, **40**, № 2, 139 (1971).
40. Молчанов А.Г. *Квантовая электроника*, **33** № 1 (2003).
41. Басов Н.Г., Беленов Э.М., Данилычев В.А., Сучков А.Ф. *Письма в ЖЭТФ*, **14**, № 7, 421 (1971).
42. Раутиан С.Г., Собельман И.И. *ЖЭТФ*, **41**, 2018 (1961).
43. Зуев В.С., Катулин В.А. *Квантовая электроника*, **24**, № 12, 1105 (1997).
44. Борович Б.Л., Зуев В.С., Катулин В.А., Михеев Л.Д., Николаев Ф.А., Носач О.Ю., Розанов В.Б. *Сильноточные излучающие разряды и газовые лазеры с оптической накачкой* (Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника. М.: ВИНТИ, 1978, т.15).
45. Молчанов А.Г. *УФН*, **106**, 165 (1972).
46. Виноградов А.В., Собельман И.И., Юков Е.А. *Квантовая электроника*, **4**, 63 (1977).
47. Виноградов А.В., Рокка Дж. Дж. *Квантовая электроника*, **33**, № 1 (2003).
48. Виноградов А.В., Зельдович Б.Я. *Препринт ФИАН № 185* (М., 1976); *Appl. Opt.*, **16**, 89 (1977).
49. Виноградов А.В. *Квантовая электроника*, **32**, 1113 (2002).
50. Басов Н.Г., Крохин О.Н. Доклад на заседании Президиума АН СССР (1962); *ЖЭТФ*, **46**, 171 (1964).
51. Басов Н.Г., Захаров С.Д., Крюков П.Г., Сенатский Ю.В., Чекалин С.В. *Письма в ЖЭТФ*, **8**, 26 (1968).
52. Басов Н.Г., Захаренков Ю.А., Зорев Н.Н., Склизков Г.В., Рупасов А.А., Шиканов А.С. *Нагрев и сжатие термоядерных мишеней, облучаемых лазером* (Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника, М.: ВИНТИ, 1982, т.26, ч.1).
53. Амелькин С.В., Ораевский А.Н. *Изв. АН СССР*, **45**, № 6, 1009 (1981).
54. Конященко А.А., Ораевский А.Н., Стародубцев Н.Ф. *Хим. физика*, **5**, 709 (1983).
55. Басов Н.Г., Громов В.В., Маркин Е.П., Ораевский А.Н., Плешанов П.Г., Рутберг Р.А. *Квантовая электроника*, **1**, № 9, 2098 (1974).
56. Ораевский А.Н., Плешанов П.Г. *Квантовая электроника*, **5**, № 10, 2243 (1978).
57. Амбарцумян Р.В., Горохов Ю.А., Летохов В.С., Макаров Г.Н. *Письма в ЖЭТФ*, **21**, № 6, 375 (1975).
58. Басов Н.Г., Беленов Э.М., Исаков В.А., Маркин Е.П., Ораевский А.Н., Романенко В.И. *УФН*, **121**, № 3, 427 (1977).
59. Зельдович Я.Б., Поповичев В.И., Рагульский В.В., Файзуллоев Ф.С. *Письма в ЖЭТФ*, **15**, 160 (1972).
60. Летохов В.С., Чеботаев В.П. *Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения* (М.: Наука, 1990).
61. Пахомычева А.Н., Свириденков Э.А., Сучков А.Ф., Титова А.В., Чурилов С.С. *Письма в ЖЭТФ*, **12**, 60 (1970).
62. Баев В.М., Беликова Т.П., Свириденков Э.А., Сучков А.Ф. *ЖЭТФ*, **74**, 43 (1978).
63. Амбарцумян Р.В., Басов Н.Г., Зуев В.С., Крюков П.Г. *ЖЭТФ*, **50**, 23 (1965).
64. Басов Н.Г., Богданкевич О.В., Насибов А.С. А. с. № 270100 с приоритетом от 20 февраля 1967 г.; *БИ*, № 16 (1970).
65. *Труды ФИАН*, **217** (1992).
66. Басов Н.Г., Кокурин Ю.Л. *Лазерная локация Луны*. Статья в газете «Правда» от 26 ноября 1970 г.
67. Басов Н.Г., Кокурин Ю.Л. *Международный ежегодник «Наука и человечество»* (М.: Знание, 1986, с. 263–277).
68. Басов Н.Г., Грасюк А.З., Ораевский А.Н. *Радиотехника и электроника*, **9**, № 9, 1680 (1964).
69. Басов Н.Г. и др. *ДАН СССР*, **233**, № 5, 839 (1977).
70. Баранова Н.Б., Зельдович Б.Я. *ЖЭТФ*, **80**, 1789 (1981); Баранова Н.Б., Зельдович Б.Я., Пимаев А.В. *Письма в ЖЭТФ*, **33**, 206 (1981).
71. Abramochkin E., Volostnikov V. *Opt. Commun.*, **125**, 302 (1996).
72. Миногин В.Г., Летохов В.С. *Давление лазерного света на атомы* (М., Наука, 1996).
73. *Квантовая электроника*, **24**, № 12 (1997) (выпуск, посвященный 75-летию Н.Г.Басова).
74. *Международный ежегодник «Наука и человечество» 1995–1997 гг.* (М.: Знание, 1997, с. 92–109).
75. Бебих И.Г., Гончарова Н.Я., Жукова Л.М. *Николай Геннадиевич Басов* (М.: Наука, 1993).
76. Басов Н.Г. *О квантовой электронике* (М.: Наука, 1987).
77. Басов Н.Г. *Статьи и выступления* (М.: Знание, 1982).