

к веществу процессом накачки. Значение мощности накачки, при к-ром возникает квантовое усиление, наз. порогом усиления.

Для возбуждения генерации необходимо поместить инвертированное вещество в устройство, обеспечивающее обратную связь. Простейшим устройством, реализующим обратную связь в радиодиапазоне, является *объёмный резонатор*, в оптич. диапазоне — *открытый резонатор*, в частности резонатор Фабри — Перо. Эл.-магн. поле, возникающее внутри такого резонатора, многократно отражается от образующих его отражающих поверхностей (зеркал), каждый раз проходя сквозь активную среду и усиливаясь при этом в результате вынужденного испускания. Генерация возникает, если усиление излучения при двукратном отражении от зеркал и двукратном прохождении через инвертированное вещество превосходит потери излучения во время такого прохода. Для достижения генерации резонатор должен быть настроен в резонанс с частотой перехода между инвертированными уровнями вещества. Состояние, при к-ром энергия, выделяемая в резонаторе за счёт вынужденного испускания, равна полным потерям энергии в резонаторе, наз. *порогом генерации*. При превышении порога генерации часть генерируемой эл.-магн. энергии выходит за пределы резонатора через полупрозрачное зеркало (коэф. отражения < 1).

Вынужденное испускание было предсказано А. Эйнштейном (А. Einstein, 1917). Предложение об использовании вынужденного испускания для усиления света было сделано В. А. Фабрикантом в 1940, однако оно не было своевременно оценено и не получило развития. Непосредственными предпосылками возникновения К. э. являются *радиоспектроскопия*, бурное развитие к-рой началось в 1946, в частности резонансный метод спектроскопии *молекулярных и атомных пучков* [И. Раби (I. Rabi), 1937], а также открытие и исследования *электронного парамагнитного резонанса* (Е. К. Завойский, 1944).

Датой рождения К. э. является 1954, когда был создан Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым (СССР) и независимо Дж. Гордоном (J. Gordon), Х. Цейгером (H. Zeiger) и Ч. Таунсом (Ch. H. Townes) квантовый генератор на молекулах NH_3 . Необходимая инверсия населённостей достигалась методом эл.-статич. пространств. разделения молекул NH_3 по энергетич. состояниям. Обратная связь осуществлялась объёмным резонатором (см. *Молекулярный генератор*). След. шагом к формированию К. э. как самостоятельной области физики стал метод достижения инверсии населённостей при помощи эл.-магн. накачки, предложенный Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым в 1955. На этой основе были созданы квантовые парамагн. усилители [Г. Э. Д. Сквилл (H. E. D. Scovil, США, 1957) и др., 1958], лазер на кристалле рубина [Т. Мейман (Th. Maiman), США, 1960; см. *Твердотельный лазер*]. Вскоре был создан газовый лазер на смеси $\text{He} + \text{Ne}$ [А. Джаван (A. Javan), 1960], в к-ром инверсия населённостей атомов Ne достигалась передачей им энергии от атомов He , возбуждаемых ударами электронов в газовом разряде (см. *Газоразрядные лазеры*). Затем был предложен *полупроводниковый лазер* (Н. Г. Басов и др., 1961). Первый полупроводниковый *инжекционный лазер* был создан Р. Холлом (R. N. Hall), а также У. Думке (W. L. Dumke) и др. (США, 1962).

К. э. возникла в диапазоне радиоволн (длина волны генератора на молекулах NH_3 $\lambda = 1,24$ см). Однако дальнейшее развитие К. э. происходило в оптич. диапазоне. Первоначально целью К. э. была генерация, а затем и усиление когерентного излучения. В дальнейшем изучение взаимодействия интенсивного лазерного излучения с веществом привело к развитию новых направлений. Одним из них является изучение нелинейных процессов, сопровождающих распространение излучения в среде, показатель преломления к-рой

изменяется под действием излучения. В К. э. нелинейные процессы применяются для генерации оптич. гармоник. Напр., распространение мощных импульсов ИК-излучения неодимового лазера ($\lambda = 1,06$ мкм) в нелинейной среде приводит к генерации 2-й гармоники ($\lambda = 0,53$ мкм), лежащей в зелёной части спектра, и 3-й гармоники ($\lambda = 0,35$ мкм), лежащей в УФ-области спектра (см. *Нелинейная оптика*).

Нелинейные явления наблюдаются и при рассеянии мощных лазерных импульсов. При этом в среде возникает мощное когерентное излучение, сдвинутое по частоте по отношению к первичным импульсам (см. *Вынужденное рассеяние света*). Результатом нелинейных взаимодействий лазерного излучения с веществом являются *самофокусировка света*, лазерная искра и др.

Параметрич. процессы в оптич. диапазоне — основа перестраиваемых параметрич. лазеров и лазеров на свободных электронах. Воздействие лазерного излучения, частота к-рого совпадает с узкими спектральными линиями поглощения атомов разреженного газа, приводит к насыщению этих линий. Этот процесс применяют для стабилизации частоты лазеров.

Важным направлением К. э. является метрология — создание *квантовых стандартов частоты*, эталонов частоты (времени), *квантовых магнитометров*, лазерных теодолитов и дальномеров, лазерных систем хим. (в т. ч. дистанционного) спектрального анализа.

Высокая когерентность лазерного излучения позволила реализовать идею *голографии* и создать целый набор голографич. приборов.

Высокая когерентность и направленность излучения лазеров позволили достичь рекордно больших плотностей энергии с помощью фокусировки лазерных импульсов в объёмах порядка длины волны лазерного излучения. Этот метод применён для получения и исследования высокотемпературной плазмы, что стало одним из путей создания управляемых термоядерных реакций.

Высокая монохроматичность и большая мощность излучения лазеров привели к появлению *лазерной химии* и лазерных методов разделения изотопов. При этом используется возможность резонансного воздействия на атомы избранного изотопа как свободные, так и входящие в состав изотопных молекул, а также на колебательные состояния таких молекул, к-рые не затрагивают др. атомы и молекулы. Таким путём управляют ходом хим. реакции и получают продукты реакции и изотопные атомы и молекулы, что нелазерными способами затруднительно (см. *Изотопное разделение*).

Принципы и методы К. э. используют при создании источников и приёмников излучения для световодных систем связи (см. *Волоконная оптика, Оптоэлектроника*).

Важными областями применения К. э., помимо указанных выше, являются лазерная технология, медицина, *оптическая обработка информации, оптическая локация, лазерная спектроскопия, лазерная диагностика плазмы* и др.

Лит.: Я р и в А., Квантовая электроника, пер. с англ., 2 изд., М., 1980; Справочник по лазерам, пер. с англ., под ред. А. М. Прохорова, т. 1—2, М., 1978. М. Е. Жаботинский.

КВАНТОВОЕ СЛОЖЕНИЕ МОМЕНТОВ — сложение моментов (орбитальных, спиновых, полных) независимых частиц (или систем — атомов, молекул и т. д.) по законам *квантовой механики*. Применяется также назв. *векторное сложение моментов*. В случае двух частиц задача состоит в определении спектра возможных собств. значений оператора квадрата суммарного момента $\hat{j}^2 = (\hat{j}_1 + \hat{j}_2)^2$ и его проекции \hat{j}_z на фиксированную ось и соответствующих собств. ф-ций (\hat{j}_1, \hat{j}_2 — операторы моментов частиц 1, 2). Спектр имеет вид

$$j^2 = \hbar^2 j(j+1), \quad j_z = \hbar m, \quad (1)$$