

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

К 25-ЛЕТИЮ СОЗДАНИЯ ЛАЗЕРА

Настоящий выпуск журнала «Успехи физических наук» целиком посвящен проблемам лазеров и их применений. Такая тематическая направленность приурочена к 25-летию юбилею создания первого лазера (1960 г.) — события, сыгравшего огромную роль в развитии современной физики, техники, других областей науки. При отборе статей для этого выпуска редакционная коллегия руководствовалась рекомендациями Бюро Отделения общей физики и астрономии АН СССР. В данный выпуск включены 7 статей из рекомендованных Бюро ООФА, другие статьи будут опубликованы в последующих номерах УФН.

Редакционная коллегия надеется, что публикуемые статьи, посвященные актуальным проблемам лазерной физики и ее применений, привлекут внимание широкого круга физиков и других специалистов.

621.378.325 (09)

К 25-ЛЕТНЕМУ ЮБИЛЕЮ ЛАЗЕРА

А. М. Прохоров

В связи с исполнявшимся в 1985 г. 25-летним юбилеем лазера я хотел бы в этой краткой статье отметить некоторые принципиальные идеи, приведшие к созданию лазеров.

Физические основы квантовой электроники были заложены в работах А. Эйнштейна задолго до ее создания. Я остановлюсь только на двух фундаментальных работах А. Эйнштейна, которые имеют непосредственное отношение к квантовой электронике. Первая работа появилась в 1905 г. и была посвящена квантовой теории света¹. В этой работе он пришел к гипотезе световых квантов и применил ее к анализу фотоэффекта и фотофлуоресценции. Когда был открыт фотоэффект, то оказалось, что существует «красная» граница, после которой при удлинении длины волны света фотоэффект пропадает, и это не зависит от интенсивности света. Квантовый характер света хорошо объясняет «красную» границу, и казалось бы, что такое объяснение могло легко прийти в голову, так как еще Ньютон высказывал гипотезу о корпускулярном характере света. Однако тогда победила волновая гипотеза света. После гигантских успехов волновой теории света, когда многие оптические приборы широко использовали интерференцию и дифракцию света и уравнения Максвелла полностью объясняли все явления распространения света в различных средах, в частности в кристаллах, возврат к квантовой гипотезе света казался невозможным. Однако волновая теория света не смогла объяснить такой фундаментальный факт, как спектральное распределение светового излучения черного тела. Это так называемая ультрафиолетовая

катастрофа, когда, согл сно волновой теории, интенсивность излучения в коротковолновой области не падает, а растет, в полном противоречии с экспериментальными фактами. Планку удалось получить формулу, которая полностью описывает набл даемое на опыте спектральное распределение излучения черного тела. При выводе этой формулы он постулировал, что тела излучают свет квантами. Коэффициент пропорциональности получил название постоянной Планка. Однако Планк считал, что квантовость связана со свойствами самих излучающих тел, а не с полем излучения. Эйнштейн впервые отчетливо понял, что волновая теория света не может объяснить все факты и для их объяснения необходимо ввести также понятие квантов света. По существу, это был первый шаг к признанию того факта, что свет может обладать как волновыми, так и квантовыми свойствами. Вторая работа А. Эйнштейна ², на которой я хочу остановиться, вышла в 1916 г. и посвящена выводу формулы Планка. В этой работе впервые было введено понятие индуцированного излучения возбужденных атомов под влиянием внешнего поля. Это понятие составляет краеугольный камень квантовой электроники. Вероятность индуцированного излучения пропорциональна плотности падающего на атом излучения, а частота излучения атома при таком акте равна частоте падающего на него кванта; пространственные направленности воздействующего и испущенного квантов также совпадают, т. е. эти кванты тождественны.

Из вышесказанного следует, что если на систему возбужденных атомов воздействует излучение, то после прохождения света через эту систему интенсивность света возрастает, т. е. получается усиление света. Для усиления света нет необходимости, чтобы все атомы находились в верхнем состоянии. Достаточно, чтобы их было больше, чем атомов в нижнем состоянии с учетом вырождения.

Предсказанное Эйнштейном индуцированное излучение вызвало большой интерес, и физики стали искать экспериментальной проверки этого явления. В то время была развита только оптическая спектроскопия, но для оптических переходов верхние уровни практически не были заселены, и, следовательно, индуцированное излучение никакой роли не играло. Необходимо было создать такие условия, чтобы населенность верхних уровней была значительной и превышала число атомов в нижнем состоянии. Тогда можно было бы наблюдать усиление света или изменение знака кривой дисперсии показателя преломления, что значительно проще. Именно такая попытка была сделана в газовом разряде. Для того времени это, пожалуй, была единственная возможность осуществления такого рода эксперимента.

Как показало развитие квантовой электроники, такая ситуация действительно может возникнуть в газовом разряде при вполне определенных условиях и для определенных атомных переходов.

Чем объясняется, что в 30-х годах не были сделаны попытки создания лазеров? Опыты, которые ставились в то время, преследовали одну цель — доказать существование индуцированного излучения. Однако никто не высказал идею возможности создания монохроматических генераторов света на основе индуцированного излучения, а это является принципиальным шагом в создании квантовых генераторов света. Она появилась только после того, как были начаты работы по квантовым генераторам радиодиапазона — мазерам. Сами мазеры были созданы в 1954—1955 гг. ^{3,4} на базе работ в области газовой радиоспектроскопии, которая стала бурно развиваться после второй мировой войны, в связи с промышленным выпуском плавно перестраиваемых монохроматических генераторов сверхвысоких частот. Газовая спектроскопия исследовала резонансные переходы в области СВЧ. В отличие от оптической спектроскопии, населенность верхних уровней в этом случае была значительной и поглощение определялось разностью чисел молекул между нижним и верхним уровнями. Эта разность числа молекул составляла лишь

небольшую долю числа молекул на нижнем уровне, и, следовательно, эффект индуцированного излучения обязательно нужно учитывать, чтобы правильно определить величину поглощения. Так как в радиодиапазоне уже существовали генераторы монохроматических колебаний, то теория автоколебательных систем была сильно развита. Если имеется усилительный элемент, обратная связь и резонатор, то такая система способна генерировать монохроматические колебания. Все это способствовало созданию квантового генератора, где в качестве усилительного элемента используется эффект индуцированного излучения.

После создания мазера радиоастрономы обнаружили космические источники монохроматического излучения, т. е. в некоторых областях космического пространства создаются условия для мазерного действия. Могло конечно случиться, что сперва были бы обнаружены монохроматические источники в космосе, а затем мазеры были бы созданы в лабораторных условиях. Но этого не произошло. После создания мазеров стали вестись работы по созданию лазеров, т. е. оптических генераторов света. Это было чрезвычайно важно, так как в оптическом диапазоне не существовало монохроматических источников света, в то время как в радиодиапазоне существовали радиогенераторы задолго до рождения квантовой электроники.

Для создания лазеров нужно было преодолеть ряд трудностей. Одна из существенных трудностей состояла в том, что тогда не была решена проблема резонатора. Эта проблема существовала и для классических генераторов радиодиапазона. Чтобы понять сложность этой проблемы, нужно вернуться к истории развития генераторов радиодиапазона. В начале был освоен длинноволновый радиодиапазон, где в качестве резонансных систем использовались колебательные контуры, состоящие из индуктивности и емкости. Постепенно осваивались все более короткие волны. При переходе к сверхвысоким частотам размеры колебательных контуров становились сравнимы с длиной волны и понятие чистой индуктивности и емкости теряло смысл. Тогда для этого диапазона стали использовать объемные резонаторы, размеры которых были сравнимы с длиной волны. При продвижении в стороны миллиметровых и субмиллиметровых волн размеры резонатора становились настолько малыми, что они уже теряли смысл. Если же делать объемные резонаторы много больше длины волны, то они теряют селективность, так как такой резонатор обладает большим числом собственных колебаний, которые перекрываются между собой. Казалось бы, что выхода нет. Только после того, как в 1958 г. были предложены открытые резонаторы^{5,6}, размеры которых много больше, чем длина волны, фундаментальный вопрос о резонаторах был решен, и они в настоящее время широко используются для лазеров.

Другой важной проблемой является получение инверсной населенности. В 1955 г.⁷ был предложен метод получения инверсной населенности в трехуровневой схеме под воздействием внешнего источника накачки. Существенный вклад в развитие этого метода был сделан в⁸. Эта идея позволила создать в 1957—1958 гг. квантовые усилители СВЧ на парамагнитных кристаллах, обладающие предельно малыми шумами^{9,10}. Эта же идея внесла важный вклад в создание лазеров. Первый лазер, созданный в 1960 г.¹¹, работал по трехуровневой схеме. При его создании были использованы открытые резонаторы, а в качестве накачки использовались лампы вспышки.

После создания первого лазера началось бурное развитие лазерной техники. Были разработаны другие методы получения инверсной населенности, а открытые резонаторы получили дальнейшее развитие.

В настоящее время лазеры работают в широком диапазоне длин волн, причем сильное развитие получили плавно перестраиваемые лазеры на красителях, а в последнее время и на твердом теле. Сейчас можно получать очень короткие импульсы света (фемтосекундные), где содержится небольшое число оптических колебаний. Мощное лазерное излучение позволяет наблю-

дать различного рода нелинейные явления. Поэтому нелинейная оптика получила широкое развитие. Что касается практических применений лазеров, то они широко используются во многих областях науки, техники и медицины. В настоящее время происходит дальнейшее развитие лазеров и их применений. Можно уверенно говорить, что мы находимся на линейном участке развития лазеров и пока нет признаков эффекта насыщения.

Институт общей физики
АН СССР

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Einstein A.— Ann. d. Phys., 1905, Bd. 17, S. 132; перевод: Эйнштейн А. Собрание научных трудов.— М.: Наука, 1966, т. III, с. 92.— Развитие идей этой статьи см.: Einstein A.— Ibidem, 1906, Bd. 20, S. 199; перевод: Эйнштейн А. Собрание научных трудов.— М.: Наука, 1966 т. III, с. 128.
2. Einstein A.— Verhandl. Dtsch. Phys. Ges., 1916, Bd. 18, S. 318; перевод: Эйнштейн А. Собрание научных трудов.— М.: Наука, 1966, т. VII, с. 386.
3. Басов Н. Г., Прохоров А. М.— ЖЭТФ, а) 1954, т. 27, с. 431; б) 1955, т. 28, с. 249.
4. Gordon J. P., Zeiger H. T., Townes C. H.— Phys. Rev., 1954, v. 95, p. 282.
5. Прохоров А. М.— ЖЭТФ, 1958, т. 34, с. 1658.
6. Schawlow A. L., Townes C. H.— Phys. Rev., 1958, v. 112, p. 1940.
7. Басов Н. Г., Прохоров А. М.— См. 3а.
8. Bloembergen N.— Phys. Rev., 1956, v. 104, p. 324.
9. Scovil H. E. D., Feher G., Seidel H.— Ibidem, 1957, v. 105, p. 762.
10. Зверев Г. М., Корниенко Л. С., Маненков А. А., Прохоров А. М.— ЖЭТФ, 1958, т. 34; с. 1660.
11. Maiman H. T.— Brit. Commun. and Electr., 1960, v. 1, p. 674; Nature, 1960, v. 187, No. 4736, p. 4937.