

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

621.375.9

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА *)

А. М. Прохоров

Можно считать, что квантовая электроника начала свое существование с конца 1954 г.—начала 1955 г. Именно в этот период были даны теоретические основы квантовой электроники, а также создан первый прибор — молекулярный генератор. Фундаментом всей квантовой электроники является явление индуцированного излучения, предсказанного А. Эйнштейном в 1917 г. Как мы отметили, квантовая электроника возникла значительно позже.

Какие причины препятствовали созданию квантовых приборов значительно раньше, например в период 1930—1940 гг.? Для того чтобы выяснить это, коротко напомним те принципы, на которых основывается квантовая электроника. Как было уже упомянуто, явление индуцированного излучения было предсказано Эйнштейном. Известно, что атом, находящийся в возбужденном состоянии, может отдать свою энергию в виде излучения (кванта) двумя путями. Первый путь — это спонтанное излучение, когда атом самопроизвольно излучает энергию. До создания квантовой механики явление спонтанного излучения описывалось классически, а именно: атом рассматривался как осциллятор с трением (лучистым), амплитуда которого убывала со временем. Все обычные источники света (лампы накаливания, газоразрядные лампы и т. д.) дают свет благодаря спонтанному излучению. Это означает, что явление спонтанного излучения уже давно было хорошо знакомо ученым, работающим в области оптической спектроскопии.

Второй путь, по которому атом может отдать свою энергию, — это индуцированное излучение. На это явление было указано Эйнштейном для того, чтобы описать термодинамическое равновесие между полем и атомами. Явление индуцированного излучения атома заключается в том, что возбужденный атом излучает, когда он взаимодействует с внешним квантом поля. Тогда получаются два кванта: один внешний, а другой — испущенный самим атомом. Эти два кванта неразличимы, их частота и направление совпадают. Это очень важное свойство индуцированного излучения, на которое, видимо, впервые было указано Дираком в 1927 г., и позволило создать квантовые приборы.

Для того чтобы наблюдать индуцированное излучение, нужно, во-первых, иметь возбужденные атомы, а, во-вторых, необходимо, чтобы вероятность индуцированного излучения была больше вероятности спонтанного излучения. Если атомы находятся в тепловом равновесии, оптические уровни не заселены и при возбуждении атомов в обычных

*) Лекция, прочитанная при вручении Нобелевской премии 11 декабря 1964 г.

условиях они переходят на нижний уровень благодаря спонтанному излучению. Вероятность индуцированного излучения при обычных плотностях энергии света мала. Поэтому в области спектроскопии не нужно было учитывать индуцированного излучения, и некоторые, вероятно, рассматривали это явление как «Kunststück» теоретика, нужный только для построения теории.

Совершенно ясно, что если иметь все атомы в возбужденном состоянии, такая система атомов будет усиливать излучение. Нет сомнения в том, что некоторые ученые понимали это еще до 1940 г., однако никто не указал, что можно создать генераторы света. Это может показаться удивительным, потому что уже до 1940 г. оптические квантовые генераторы в принципе могли быть созданы. Однако нужны были определенные предпосылки. Они появились после окончания второй мировой войны, когда начала бурно развиваться радиоспектроскопия. Именно ученые, работавшие в области радиоспектроскопии, заложили основы квантовой электроники^{1, 2}. Чем это объяснить? Здесь имелся ряд благоприятных обстоятельств, которых не было у ученых, работавших в области оптической спектроскопии.

Прежде всего, ввиду того, что для систем, находящихся в тепловом равновесии, возбужденные уровни имели большую заселенность в радиодиапазоне, нужно было принимать во внимание индуцированное излучение. Действительно, если число частиц на нижнем уровне равно n_1 , а на возбужденном — n_2 , то коэффициент поглощения можно записать в виде

$$\alpha = \frac{1}{v} h\nu (n_1 B_{12} - n_2 B_{21}), \quad (1)$$

где величина B_{12} характеризует вероятность поглощения, а B_{21} — характеризует вероятность индуцированного испускания. Если уровни невырождены, то $B_{12} = B_{21}$, и тогда (1) запишется в виде

$$\alpha = \frac{1}{v} h\nu (n_1 - n_2) B_{12}. \quad (2)$$

Для оптического диапазона в обычных условиях при тепловом равновесии n_2 с большой точностью можно положить равным нулю, и тогда коэффициент поглощения станет равным

$$\alpha = \frac{1}{v} h\nu n_1 B_{12}. \quad (3)$$

Следовательно, для оптического диапазона коэффициент поглощения зависит только от населенности нижнего уровня.

Для радиодиапазона, как правило, $h\nu \ll kT$. В этом случае

$$n_2 = n_1 e^{-\frac{h\nu}{kT}} \approx n_1 \left(1 - \frac{h\nu}{kT} \right).$$

Тогда величина α будет равна

$$\alpha = \frac{1}{v} h\nu n_1 B_{12} \frac{h\nu}{kT}. \quad (4)$$

Из формулы (4) видно, что из-за индуцированного излучения величина коэффициента поглощения становится в $kT/h\nu$ раз меньшей, чем это было бы без учета индуцированного излучения. Следовательно, всем работающим в области радиоспектроскопии с необходимостью следовало учитывать индуцированное излучение. Более того, чтобы увеличить коэффициент поглощения, приходилось понижать температуру, чтобы уменьшить населенность верхнего уровня и тем самым уменьшить влия-

ние индуцированного излучения. Из формулы (2) следует, что для систем, не находящихся в тепловом равновесии, и при $n_2 > n_1$ величина коэффициента поглощения становится отрицательной, т. е. такая система может усиливать излучение. Именно для радиодиапазона такие системы, по существу, давно были известны физикам.

Если пропустить молекулярные (атомные) пучки через неоднородное магнитное или электрическое поле, то происходит сортировка молекул по различным состояниям. В частности, можно получать пучки молекул, находящихся только в верхнем состоянии. С другой стороны, физики, работавшие в области микроволновой радиоспектроскопии, стали думать о применении молекулярных пучков для увеличения разрешающей силы радиоспектроскопов. Для увеличения интенсивности спектральных линий в пучках нужно было иметь молекулы либо в нижнем, либо в верхнем состоянии, другими словами, применять сортировку. Если молекулы после сортировки будут находиться в верхнем состоянии, то такая система будет усиливать.

Из радиотехники хорошо известно, что всякая система, способная усиливать колебания, может их генерировать. Для этого нужна обратная связь. Теория обычных генераторов радиодиапазона хорошо разработана. Для описания таких генераторов вводится понятие отрицательного сопротивления или проводимости, т. е. вводится элемент, имеющий отрицательные потери. В случае квантового генератора таким «элементом» является среда с отрицательным коэффициентом поглощения. Поэтому условие самовозбуждения квантового генератора должно записываться аналогично условию для обычного «классического» генератора. По аналогии с обычными генераторами в радиодиапазоне волн следовало ожидать, что и для квантового генератора колебания будут близки к гармоническим. Это и имеет место на самом деле.

Наконец, важным элементом квантового генератора, как и всякого другого генератора синусоидальных колебаний, является резонаторная система. Однако для радиодиапазона резонаторные системы были хорошо разработаны и для мазеров были использованы резонаторы, применяющиеся в радиодиапазоне. Таким образом, очень важный элемент — объемный резонатор — также был хорошо известен работающим в области радиоспектроскопии.

Следовательно, для лиц, работавших в области радиоспектроскопии, уже были «готовы» отдельные элементы мазеров и нужно было только их синтезировать, чтобы получить мазер. Первые две статьи^{1, 2} (одна из которых была опубликована в СССР, а другая в США) появились независимо, и обе они были непосредственно связаны с созданием радиоспектроскопов высокой разрешающей силы с использованием молекулярных пучков. Из всего сказанного выше это не должно показаться удивительным, а наоборот, вполне закономерным.

Эти первые работы явились началом развития квантовой электроники; ее первые успехи стимулировали дальнейшее ее продвижение. Уже в 1955 г. был предложен новый метод — метод накачки для получения отрицательного поглощения³. Этот метод получил дальнейшее развитие и применение для создания квантовых приборов новых типов. В частности, метод накачки был развит и применен для создания квантовых усилителей в радиодиапазоне на основе явления электронного парамагнитного резонанса^{4, 5}.

Казалось бы, что после создания мазеров в радиодиапазоне вскоре будут созданы квантовые генераторы и в оптическом диапазоне. Однако этого не случилось. Они были созданы только через 5—6 лет. Чем это объясняется? Здесь были две трудности. Первая трудность заключалась

в том, что тогда не были предложены резонаторы для оптического диапазона волн, и вторая — не были предложены конкретные системы и методы получения инверсной заселенности в оптическом диапазоне волн.

Остановимся прежде на вопросе о резонаторах. Известно, что радиотехника начала свое развитие с освоения длинных волн, где использовались резонаторы в виде катушек самоиндукции и сосредоточенных емкостей. В этом случае размеры резонаторов были много меньше длины волны. При продвижении в сторону коротких волн стали применяться объемные резонаторы, т. е. замкнутые полости. Размеры этих резонаторов сравнимы с длиной волны. Ясно, что с помощью таких резонаторов нельзя продвинуться в область очень коротких волн, в частности в область оптического диапазона.

В 1958 г. был предложен так называемый открытый тип резонаторов для создания квантовых генераторов в области коротких волн ⁶. Более подробный анализ таких резонаторов для оптических квантовых генераторов дан в работе ⁷. По существу, это есть эталон Фабри — Перо, однако «радиотехнический» подход позволил предложить эту систему в качестве резонаторов. Впоследствии наряду с плоскими зеркалами стали использоваться также сферические зеркала. В настоящее время открытые резонаторы широко используются для лазеров. Размеры таких резонаторов много больше длины волны. Были также предложены системы для получения отрицательного поглощения в субмиллиметровом (далеком инфракрасном) диапазоне волн ⁶, в инфракрасном и оптическом диапазонах волн ⁷⁻¹⁰. Эти работы стимулировали работу по дальнейшему продвижению в область более коротких волн и, в частности, оптического диапазона. Однако только в 1960 г. был создан первый квантовый оптический генератор ¹¹. В качестве активного материала использовался рубин, накачиваемый лампой-вспышкой.

После освоения оптического диапазона стали думать об освоении рентгеновского диапазона. Здесь возникают те же трудности, что были и для оптического диапазона волн. Нужно предложить новые типы резонаторов, а также указать на системы, с помощью которых можно получить отрицательное поглощение. Как известно, рентгеновские квантовые генераторы пока не созданы. Мы тоже пытались подойти к этой задаче, но здесь встретились большие трудности. Действительно, в рентгеновской области время жизни на возбужденных уровнях мало, и можно считать, что ширина линии определяется только временем жизни. Тогда коэффициент поглощения может быть записан в очень простом виде:

$$\alpha = \frac{\lambda^2}{4\pi} (n_1 - n_2), \quad (5)$$

где λ — длина волны, а n_1 и n_2 — плотность числа частиц на нижнем и верхнем уровнях соответственно. Из этой формулы видно, что коэффициент поглощения быстро падает с уменьшением длины волны. Это крайне неприятное обстоятельство. Действительно, для работы генератора величина α должна быть порядка одного обратного сантиметра. Если $\lambda = 1 \text{ \AA}$, то плотность числа частиц на верхнем уровне должна быть не менее 10^{17} см^{-3} . Время жизни на верхнем уровне 10^{-16} сек . Следовательно, мы должны забрасывать за одну секунду $10^{33} \text{ частиц/см}^3$. Для такой задачи имеются значительные экспериментальные трудности. Однако и без создания квантовых генераторов в рентгеновской области успехи квантовой электроники огромны.

Уже в настоящее время диапазон, в котором работают лазеры и мазеры, крайне большой. Если недавно далекий инфракрасный диапазон не был освоен, то сейчас он быстро осваивается. Практически с помощью

мазеров и лазеров можно получать излучение от самых низких радиочастот до ультрафиолета. Работа всех квантовых генераторов основана на том, что в средах с отрицательным поглощением из-за большой плотности поля вероятность индуцированного излучения доминирует над спонтанным или безызлучательным переходами. Более того, в настоящее время, например, можно получать от рубинового генератора такие плотности энергии, при которых вероятность многоквантовых процессов становится сравнимой или превосходит вероятность одноквантовых процессов. Это новый качественный скачок, который приводит к различного рода интересным следствиям. Прежде всего можно оценить ту предельную мощность, которую может дать рубиновый лазер с одного квадратного сантиметра. Эта мощность равна 10^{11} *вт/см²*¹². При этой мощности вероятность одновременного поглощения трех квантов красного света с перебросом электрона в зону проводимости настолько велика, что прекращается дальнейший рост поля. Для трехквантовых процессов потери растут пропорционально кубу плотности энергии, т. е. зависимость от поля очень сильная.

Большие электрические поля, которые имеются в лазерном луче, могут произвести ионизацию и диссоциацию молекул, а также пробой в твердом теле. Многоквантовые процессы не всегда приносят вред (например, ограничивая предельную мощность, даваемую лазером); они могут открывать совершенно новые возможности для дальнейшего развития квантовой электроники. Это интересное и принципиально новое направление связано с созданием квантовых генераторов с использованием двухквантовых переходов. На возможность создания таких генераторов было указано в 1963 г. в СССР¹³ и независимо в США^{14,15}. Идея такого генератора заключается в том, что если имеется инверсная заселенность между двумя уровнями с разностью энергий $h\nu$, то возможна генерация на двух частотах ν_1 и ν_2 таким образом, что

$$\nu_1 + \nu_2 = \nu. \quad (6)$$

В частности, частоты ν_1 и ν_2 могут совпадать, но, вообще говоря, они могут быть любыми, лишь бы выполнялось соотношение (6).

Работа такого генератора, как было уже сказано, связана с двухквантовыми переходами, вероятность которых достаточно велика, если плотность поля значительна. Для самовозбуждения такого генератора нужно создать с помощью другого генератора достаточно большую начальную плотность энергии на частоте ν_1 или ν_2 , и только после самовозбуждения такого генератора внешнее поле можно убрать. И здесь мы можем найти аналогию с обычными ламповыми генераторами радиодиапазона, которые при некоторых условиях могут самовозбуждаться, если на них сначала воздействовать внешней силой определенной величины.

Такой генератор имеет две особенности: он обеспечивает более быстрый рост плотности поля, чем в обычном лазере, и дает возможность получать любую частоту при сохранении соотношения (6).

Создание генератора, работающего на заданной частоте излучения, еще больше расширит область применения лазеров.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Г. Басов, А. М. Прохоров, ЖЭТФ 27, 431 (1954).
2. J. V. Gordon, H. J. Zeiger, C. H. Townes, Phys. Rev. 95, 282 (1954).
3. Н. Г. Басов, А. М. Прохоров, ЖЭТФ 28, 249 (1955).
4. N. Bloembergen, Phys. Rev. 104, 324 (1956).
5. H. E. D. Scovil, G. Feher, H. Seidel, Phys. Rev. 105, 762 (1957).

6. А. М. Прохоров, ЖЭТФ 34 1658 (1958).
 7. A. L. Shallow, C. H. Townes, Phys. Rev. 112, 1940 (1958).
 8. Н. Г. Басов, Б. М. Вул, Ю. М. Попов, ЖЭТФ 37, 587 (1959).
 9. A. Javan, Phys. Rev. Letts. 3, 87 (1959).
 10. Ф. А. Бутаева, В. А. Фабрикант, О среде с отрицательным коэффициентом поглощения, в сб. памяти Г. С. Ландсберга «Исследования по экспериментальной и теоретической физике». М., Изд-во АН СССР, 1959, стр. 62.
 11. Т. Н. Матман, Brit. Comm. and Electr. 1, 674 (1960).
 12. Ф. В. Бункин, А. М. Прохоров, ЖЭТФ, № 4 (1965).
 13. А. М. Прохоров, А. С. Селиваненко, Авторское свидетельство от 24 декабря 1963 г. № 872303.
 14. P. P. Sorokin, N. Braslau, IBM Journ. 8, 177 (1964).
 15. R. L. Garwin, IBM Journ. 8, 338 (1964).
-