

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

621.378:535.14

**КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ЭЙНШТЕЙНОВСКАЯ
ТЕОРИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ***Н. В. Карлов, А. М. Прохоров*

Основу квантовой электроники составляют три фундаментальных положения. Первое — энергия электромагнитного излучения состоит из дискретных порций энергии, называемых световыми квантами или фотонами. Эта дискретность проявляется при взаимодействии излучения с веществом. Второе — излучение фотонов происходит как спонтанно, так и индуцированно. При достаточно высокой интенсивности внешнего поля индуцированное излучение преобладает. При этом кванты индуцирующего и индуцированного излучений тождественны. Третье — кванты электромагнитного излучения подчиняются статистике Бозе — Эйнштейна. Поэтому число квантов, которые могут приходиться на один осциллятор поля, неограниченно. При заполнении одного осциллятора поля большим числом неразличимых квантов формируется классическая когерентная электромагнитная волна.

Альбертом Эйнштейном были выполнены исследования, заложившие физическую основу квантовой электроники. Действительно, в 1905 г. была опубликована первая работа Эйнштейна по квантовой теории¹. В этой работе на основе статистического анализа флуктуаций энергии равновесного излучения и гипотезы световых квантов Эйнштейн пришел к выводу о дискретном характере взаимодействия излучения с веществом, что и было им тут же применено к анализу фотоэффекта и фотофлуоресценции. Объяснение красной границы фотоэффекта и стоковского сдвига частоты в спектре флуоресценции сразу же наглядно показало плодотворность этого подхода.

Сейчас, т. е. практически через 75 лет, нет никакой необходимости доказывать правильность рассмотрения светового излучения как потока фотонов. Целесообразно, однако, напомнить, что квантовая природа взаимодействия электромагнитного излучения с веществом была установлена Эйнштейном за 50 лет до создания квантовой электроники.

Далее, в 1916 г. Эйнштейн опубликовал работы², посвященные выводу формулы Планка в соответствии с хорошо известными к тому времени постулатами Бора. Эти работы сыграли тогда важную роль в понимании природы равновесного излучения квантовых, т. е. обладающих дискретными уровнями энергии, систем. Для нас эти работы замечательны прежде всего тем, что в них введено понятие индуцированного излучения, постулировано его существование и из весьма общих термодинамических соображений определены его свойства. Вкратце выводы Эйнштейна могут быть сформулированы следующим образом.

Индуцированное излучение постулируется как эффект, вероятность осуществления единичного акта которого пропорциональна плотности

энергии излучения, воздействующего на возбужденную частицу. При этом частота испущенного частицей излучения в точности равна частоте воздействующего на нее излучения, а пространственная направленность индуцированного излучения совпадает с направленностью индуцирующего излучения. Процессы индуцированного испускания и индуцированного поглощения излучения с точностью до кратности вырождения соответствующих уровней энергии равновероятны.

Несколько позднее в работе ³, опубликованной совместно с П. Эренфестом, А. Эйнштейн привлек к рассмотрению поляризацию излучения и, опять-таки из термодинамических соображений, очень близко подошел к формулировке положения о полной тождественности квантов индуцированного (вынужденного) и индуцирующего (вынуждающего) излучений.

Таким образом, установив квантовую природу взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, А. Эйнштейн показал также существование процесса, принципиально необходимого для генерации тождественных друг другу квантов излучения.

Вместе с тем в теории излучения оставалось нераскрытым противоречие между корпускулярными и волновыми представлениями.

В 1924 г. Эйнштейн, развивая предложенный Бозе метод вывода формулы Планка, основанный на последовательном применении гипотезы световых квантов, разработал теорию вырожденного одноатомного идеального газа ⁴ и показал наличие далеко идущей аналогии между излучением и газом. Так было создано обобщенное термодинамическое описание системы частиц с симметричными собственными функциями, т. е. статистика Бозе — Эйнштейна. Фундаментальное свойство одинаковых частиц, подчиняющихся статистике Бозе — Эйнштейна, заключается в их неразличимости. Этой статистике подчиняются кванты электромагнитного излучения. Кванты индуцированного излучения, соответствующие излучениям с одинаковыми частотами, поляризациями, направлениями распространения и фазами, нельзя отличить друг от друга. Состояние всего поля излучения определяется числом квантов, приходящихся на один осциллятор поля. Это число может быть неограниченно большим. Именно это позволяет переходить при описании поля излучения в квантовой электронике от корпускулярного представления к волновому, для которого характерен принцип суперпозиции колебаний, в том числе когерентных.

Таким образом, работы А. Эйнштейна по квантовой теории излучения, выполненные в период с 1905 по 1925 г., создали физические предпосылки возникновению квантовой электроники. Здесь следует отметить, что значение бегло рассмотренных выше работ Эйнштейна, несомненно, далеко не исчерпывается их ролью в формировании тех фундаментальных положений, которые лежат в основе квантовой электроники. Трудно переоценить значимость этих работ Эйнштейна для физики в целом. Статья Паули, помещенная в мемориальном выпуске УФН 1965 г. ⁵, убедительно показывает значение вклада Эйнштейна в квантовую теорию.

Последовательная квантовая теория излучения и поглощения света была сформулирована в 1927 г. Дираком ⁶, который обосновал статистические законы излучения Эйнштейна, и, вычислив вероятность испускания излучения, нащел связь между феноменологическими коэффициентами Эйнштейна и характеристиками излучающего атома. Важнейший результат квантовой теории излучения Дирака состоит в строгом обосновании существования индуцированного излучения, постулированного Эйнштейном, и его когерентности, фактически интуитивно угаданной Эйнштейном.

Итак, к 1927 г. было полностью завершено создание фундаментальных физических предпосылок к возникновению квантовой электроники. Однако только в конце 1954 — начале 1955 г. были даны непосредственные теоре-

тические основы квантовой электроники и создан ее первый прибор — молекулярный генератор. Это свидетельствует о том, что физические идеи эйнштейновской теории излучения не смогли быть сразу и непосредственно использованы для создания источников излучения нового типа.

Дело в том, что для наблюдения индуцированного излучения нужно иметь возбужденные атомы и, кроме того, необходимо, чтобы вероятность индуцированного излучения была больше вероятности спонтанного излучения. В экспериментальных условиях классической оптической спектроскопии эти требования не выполнялись. В радиоспектроскопии в силу резкого уменьшения частоты сложилась качественно новая для спектроскопии ситуация, благоприятная для реализации в квантовой электронике физических идей эйнштейновской теории излучения⁷. В радиодиапазоне возбужденные уровни сильно населены при тепловом равновесии, спонтанное излучение значительно ослаблено, индуцированное излучение прямо определяет величину наблюдаемого в эксперименте эффекта, уменьшая значение коэффициента поглощения. Поэтому радиоспектроскопию нельзя считать лишь количественным расширением оптических спектральных исследований в диапазон более низких частот. Следует иметь в виду также наличие в радиодиапазоне источников монохроматического излучения, средств его канализации и приема, объемных резонаторов, а также высокий уровень разработанности теории автоколебательных систем с обратной связью. Все это в целом привело к тому, что радиоспектроскопия стала базой развития квантовой электроники, и именно ученые, работавшие в радиоспектроскопии, создали квантовую электронику.

В молекулярном генераторе на волне 1,25 см впервые в земных условиях в чистом виде непосредственно наблюдалось индуцированное излучение. Этот факт имеет большое принципиальное значение. Как показывает подробный анализ истории становления и развития квантовой электроники⁸⁻¹⁰, ее микроволновое происхождение не является случайным. Фундаментальные физические предпосылки квантовой электроники, созданные А. Эйнштейном при разработке теории излучения, могли быть реализованы только как результат развития теории колебаний, электроники СВЧ и радиоспектроскопии *).

Современная квантовая электроника, определяемая как область физики, изучающая методы усиления и генерации электромагнитных колебаний, основанные на использовании эффекта индуцированного излучения, а также свойства соответствующих усилителей и генераторов и их применения, или, короче говоря, как наука о мазерах, лазерах и их применениях, охватывает колоссальную область. В происходящей сейчас научно-технической революции она занимает значительное место (см., например, наши обзоры^{11, 12}). Возникнув в электронике СВЧ, наиболее революционные преобразования квантовая электроника внесла в оптику.

Дело в том, что, хотя принцип действия мазеров и лазеров один и тот же, разница между ними существенна. В радиодиапазоне создание мазеров означало появление устройств, принципиально новых по принципу действия, но обладающих обычными для классической электроники свойствами. Несомненно, мазеры резко улучшили параметры радиоустройств. Чувствительность усилителей выросла на два-три порядка, стабильность частоты генераторов возросла на три-четыре порядка. Значение этих достижений квантовой электроники радиодиапазона очень велико, но в принципе — это количественное изменение известных качественных

*) Целесообразно отметить, что к 1940 г. тот факт, что система возбужденных атомов способна усиливать световое излучение, был понят учеными, работавшими в оптике¹⁸. Но при этом не было указано на возможность создания на этой основе генератора когерентных колебаний.

свойств, так как и до появления квантовой электроники существовали когерентные радиоусилители и радиогенераторы монохроматических колебаний.

В оптике, в противоположность обычной электронике, все источники света по своей природе являются квантовыми. Само представление о квантах возникло при анализе свойств оптических излучений. Но до появления квантовой электроники все оптические источники света излучали некогерентные, некогерентные колебания. В оптике отсутствовали когерентные и монохроматические генераторы электромагнитных колебаний. Лазеры, в отличие от обычных источников света, излучают световые волны высокой пространственной направленности, спектральной монохроматичности и временной когерентности.

Появление лазеров дало невиданную ранее в оптике возможность концентрировать энергию излучения в пространстве, во времени и в частотном интервале. Это подняло оптику на качественно новый уровень, для которого характерно развитие применений в областях, традиционно неоптических. Эти новые применения стали возможны только в силу того, что в современной оптике для генерации света непосредственно используется эффект индуцированного испускания излучения. Основное свойство лазеров — предельная концентрация энергии излучения — прямо следует из эйнштейновской теории излучения.

Итак, место, занимаемое квантовой электроникой в современной научно-технической революции, определяется новыми возможностями лазерной оптики, а не пересмотром фундаментальных положений оптики. Более того, квантовая электроника основана на фундаментальных положениях оптики XX века. Ее появление и дальнейшее развитие укрепило эти положения и расширило область их реальной применимости.

К настоящему времени лазеры работают в невероятно широком диапазоне — от волн субмиллиметрового до волн вакуумного ультрафиолетового излучения, в непрерывном и импульсном режимах. Существует огромное разнообразие различных типов лазеров. Сколько-нибудь подробное их описание или даже простое перечисление в рамках этой статьи представляется нецелесообразным. Отметим только два серьезных достижения квантовой электроники последних лет — создание лазеров большой мощности и высокой монохроматичности, перестраиваемых по длине волны излучения, и эксимерных лазеров ультрафиолетового диапазона.

Для квантовой электроники характерно многообразие активных сред лазеров и физических явлений, применяемых для их возбуждения. Но главным и общим для всех лазеров является необходимость затраты энергии на создание такого термодинамического неравновесного состояния, при котором индуцированное излучение преобладает над поглощением. В процессе создания лазерного излучения энергия теряется, к. п. д. большинства лазеров мал, но свойства лазерного излучения, являющиеся прямым следствием свойств индуцированного излучения, обуславливают возможность применений, более чем компенсирующую потери энергии.

Для многих из применений полезный эффект взаимодействия лазерного излучения с веществом определяется прежде всего концентрацией энергии в месте взаимодействия в заданный, как правило, очень короткий отрезок времени. Число возможных применений такого силового воздействия очень велико. К важнейшим из них следует отнести возможность использования лазерного излучения для решения проблемы управляемого термоядерного синтеза (см., например,¹³). К настоящему времени достигнутые в лазерной плазме температуры составляют несколько миллионов градусов, и при воздействии лазерными импульсами на твердые мишени

обнаружено нейтронное излучение. Актуальность и важность исследований по лазерному термоядерному синтезу несомненна, особенно в длительной перспективе. Поэтому сейчас широко обсуждаются вопросы выбора направлений дальнейших исследований и интерпретации уже полученных результатов. Главным свойством лазерного излучения, непосредственно используемым при решении задач этого типа, является его высокая пространственная когерентность и, следовательно, высокая направленность.

Монохроматичность лазерного излучения открывает совершенно новые возможности сильного резонансного воздействия на вещество. Высокая спектральная интенсивность лазерного излучения приводит к селективному протеканию процессов взаимодействия резонансного излучения с веществом. При больших интенсивностях такого лазерного облучения эти селективные процессы могут быть необратимыми. Это в свою очередь дает возможность лазерного разделения изотопов, лазерной очистки веществ, лазерной фотохимии, лазерной фотобиологии. К настоящему времени некоторые из этих возможностей реализованы по крайней мере в лабораторных условиях. Наиболее убедительные результаты получены при лазерном разделении изотопов (см., например, ¹⁴). Тонкие и вместе с тем сильные селективные эффекты резонансного взаимодействия интенсивного лазерного излучения с веществом становятся все более и более перспективными. По существу при таких взаимодействиях полностью и непосредственно используется вся совокупность свойств лазерного излучения.

Таким образом, и при создании мазеров и лазеров, и при их применении, т. е. во всем объеме квантовой электроники, основным и главным является эффект и свойства индуцированного излучения.

Принципиальным является также то обстоятельство, что прямое и непосредственное использование эффекта индуцированного излучения позволило квантовой электронике охватить единым методом генерации огромный диапазон длин волн — от классического радиодиапазона до вакуумного ультрафиолета. Здесь существенны два момента. Во-первых, еще нерешенной является проблема создания рентгеновских лазеров и γ -лазеров. Эта большая задача стоит на повестке дня современной квантовой электроники. Во-вторых, в радиодиапазоне эффект индуцированного излучения может наблюдаться как при генерации колебаний в системах с инверсией населенностей уровней энергии ЯМР или ЭНР, т. е. в системах существенно квантовых, так и при взаимодействиях электронного потока с периодически неоднородной структурой, т. е. в системах классических.

Вопрос об индуцированном излучении классических, т. е. неквантовых, объектов очень интересен. Когерентное излучение электронов в синхротроне в области сантиметровых волн исследовалось еще в 1948—1950 гг. ¹⁵. Было показано, что синхротрон дает когерентное излучение в этой области, являясь по существу множителем частоты высокочастотного ускоряющего поля. Генерация гармоник была связана с формированием электронных сгустков. Это обстоятельство отвечает современной точке зрения (см., например, ¹⁶) о необходимости фазировки частиц для обеспечения эффекта индуцированного излучения в системах с непрерывным спектром. В ясной форме эта мысль была высказана вскоре после возникновения квантовой электроники ¹⁷. Фазовая и пространственная группировка возбужденных осцилляторов под действием поля, в том числе флуктуационного поля, приводит к появлению отличной от нуля добавки к поляризованному току и, следовательно, к дополнительному когерентному излучению, т. е. к индуцированному испусканию. Излучательная неустойчивость системы возбужденных осцилляторов не связана с принципиально квантовыми моментами и вполне объяснима и с классической точки зрения. Необходимым требованием является нелинейность (ангармо-

ничность) осцилляторов. Примером ангармонического осциллятора является релятивистский электрон в магнитном поле. Именно на этом пути были созданы классические СВЧ мазеры на циклотронном резонансе.

В последние годы системы с непрерывным спектром (свободные электроны) нашли применение для генерации оптического излучения. Обращает на себя внимание тот факт, что в системах с непрерывным спектром индуцированное излучение было использовано для генерации электромагнитного излучения сначала в СВЧ диапазоне, а затем в оптике. Точно так же обстояло дело в системах с дискретным спектром. Это еще раз свидетельствует о том, что радиодиапазон объективно является спектральной областью, удобной для реализации в генерации свойств индуцированного излучения. Добавим также, что практически все нелинейные и когерентные эффекты в квантовой электронике, кроме непосредственно связанных с распространением излучения в свободном пространстве, наблюдались сначала в радиодиапазоне. А нелинейные эффекты, возникающие при распространении интенсивного монохроматического электромагнитного излучения в плазме свободного пространства, также наблюдались сначала в радиодиапазоне (люксембург-горьковский эффект).

В этой связи встает интересный вопрос, не является ли умножение частоты или вообще нелинейное преобразование частоты, рассматриваемое с самых общих позиций, индуцированным процессом? Действительно, следует иметь в виду, что при генерации гармоник фазовые соотношения сохраняются, а излучательная способность макроскопических нелинейных осцилляторов определяется интенсивностью исходного излучения.

Таким образом, одно из основных положений эйнштейновской теории излучения — положение об индуцированном излучении и его когерентности — выходит за рамки квантовой теории. Применимость этого положения к классическим системам подчеркивает его высокую общезначимую физическую значимость.

Далее. Выше мы отметили, что индуцированное излучение квантовой системы в земных условиях впервые непосредственно наблюдалось при запуске молекулярного генератора. Вместе с тем в космическом пространстве нередко создаются условия инверсии населенностей в значительных по протяженности областях сильно разреженного межзвездного газа того или иного химического состава. Результатом этого является мазерное, а иногда и лазерное космическое излучение. Астрономические (радиоастрономические) исследования таких излучений, сама мысль о существовании которых стала возможной после возникновения квантовой электроники, существенны для современной астрофизики. Этот пример свидетельствует о плодотворности применения понятий квантовой электроники в направлениях, далеких от областей ее традиционной применимости.

Таким образом, проникновение идеи индуцированного излучения, с одной стороны, в классическую область, а с другой стороны, непосредственно в область наблюдательного излучения явлений природы космического масштаба говорит о высокой степени универсальности этой идеи. Вместе с тем очевидно, что в целом главной областью развития и применения идеи индуцированных когерентных процессов является квантовая область, а в ней — лазеры и взаимодействие лазерного излучения с веществом, исследованию которых посвящена современная квантовая электроника.

Изложенное выше, на наш взгляд, убедительно свидетельствует о том, что эйнштейновская теория излучения составляет краеугольный камень квантовой электроники в целом.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Einstein A.— Ann. Phys. (Lpz.), 1905, Bd. 17(4), S. 132.
2. Einstein A.— Verhandl. deutsch. phys. Ges., 1916, Nr.13/14, S. 348.— Перевод: Эйнштейн А. Собрание научных трудов, М.: Наука, 1966.— Т. 3, с. 386; Mitt. phys. Ges. (Zürich), 1916, Nr. 18, S. 47 — Перепечатка: Phys. Zs., 1917, Bd. 18, Nr. 6, S. 121.— Перевод: Собрание научных трудов.— М.: Наука, 1966.— Т. 3, с. 393; см. также УФН, 1965, т. 86, с. 371.
3. Einstein A., Ehrenfest P.— Zs. Phys., 1923, Bd. 19, S. 301.
4. Einstein A.— Sitzungber. Preuss. Akad. Wiss., 1924, Bd. 22, S. 261; 1925, Bd. 23, S. 3, 18.— Перевод: УФН: 1965, т. 86, с. 381, 397.
5. Паули В.— УФН, 1965, т. 85, с. 413.
6. Дирак П. А. М.— Proc. Roy Soc., Ser. A, 1927, v. 114, p. 243; см. также в кн.: Дирак П. А. М. Принципы квантовой механики.— М.: Физматгиз, 1960.— С. 330.
7. Прохоров А. М.— УФН, 1965, т. 85, с. 599.
8. Карлов Н. В., Прохоров А. М.— В междунар. ежегоднике «Наука и человечество».— М.: Знание, 1968.— С. 138.
9. Карлов Н. В., Прохоров А. М.— Вопросы философии, 1972, № 9, с. 96.
10. Прохоров А. М., Карлов Н. В.— Вестн. АН СССР, 1974, № 3, с. 3.
11. Карлов Н. В., Прохоров А. М.— В междунар. ежегоднике «Будущее науки».— М.: Знание, 1971, Вып. 4, с. 20; Ibid., 1977, вып. 10, с. 79.
12. Прохоров А. М., Карлов Н. В.— В кн. Октябрь и наука/Под ред. А. П. Александрова и др.— М.: Наука, 1977.— С. 262.
13. Анисимов С. И., Пашинин П. П., Прохоров А. М.— УФН, 1976, т. 119, с. 3.
14. Карлов Н. В., Прохоров А. М.— Ibid., т. 118, с. 583.
15. Прохоров А. М.— Радиотехн. и электрон., 1956, т. 1, с. 71.
16. Коломенский А. А., Лебедев А. Н.— Квант. электрон., 1978, т. 5, С. 1543.
17. Гапонов А. В.— ЖЭТФ, 1960, т. 39, с. 326.
18. Фабрикант В. А.— Труды ВЭИ, 1940, вып. 41, с. 236.