

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Проф., доктор физ.-мат. наук В. А. ФАБРИКАНТ

Московский энергетический институт

Свет как одна из форм материи. Еще средневековый схоласт Фома Аквинский (1225—1274) вопрошал: «Свет, есть ли он тело?» и уверенно отвечал: «...свет не есть тело». Слабость корпускулярной теории света Ньютона состояла, наоборот, в приписывании световым корпускулам свойств обычных тел.

Классическая волновая теория рассматривала свет как одну из форм движения материи. Свет в этой трактовке в значительной мере потерял свою телесность. Наконец, в современной физике вопрос Фомы Аквинского получил положительный, но весьма усложненный ответ.

Наиболее общая формулировка этого ответа принадлежит, пожалуй, С. И. Вавилову: «Существующий материальный мир — движущаяся материя — представляется нам в двух основных формах — как вещество и свет». Таким образом, вещество и свет не две разные формы движения материи, а две качественно различные формы самой материи. Обе формы материи обладают и корпускулярными и волновыми свойствами, но для вещества корпускулярные свойства являются классическими и наглядными, а для света, наоборот, классические свойства — волновые. Обе формы материи (вещество и свет) обладают инертной массой, но свет не может существовать даже в относительном покое и его масса покоя равна нулю. Все частицы света — фотоны — движутся с одной и той же скоростью $3 \cdot 10^{10}$ см/сек по отношению к любому телу, так как изменение волновой скорости света в среде (показатель преломления) не изменяет скорости фотонов. Эту скорость может изменить только сильное гравитационное поле.

Энергетические особенности света. В смысле энергетическом также существует огромное различие между веществом и светом. На первый взгляд кажется, что эйнштейновский закон пропорциональности энергии и массы ($E = mc^2$) своей универсальностью стирает грань между двумя формами материи. Это, однако, не так. Энергия света легко превращается полностью в другие виды энергии, тогда как энергия вещества превращается только в незначительной мере. При фотохимических, фотоэлектрических и других действиях света поглощенная световая энергия нацело превращается в другие виды энергии. С другой стороны, даже при ядерных реакциях превращается примерно тысячная до-

ля энергии вещества. Исключение составляют так называемые процессы аннигиляции, при которых вещество нацело превращается в свет, но эти процессы вряд ли скоро получат практическое применение. Легкость превращения световой энергии в другие виды энергии и придает ей особую ценность.

До сих пор мы говорили о свете в широком смысле слова, т. е. об электромагнитном излучении всех длин волн или частот. Область спектра излучений, используемых в светотехнике, называемая оптической, состоит из ультрафиолетового, видимого и инфракрасного участков. Оптическая область спектра лежит между областью радиотехнической и областью жестких излучений (рентгенотехника и, особенно, ядерная техника).

Частота излучения, следовательно энергия фотона, определяет свойства излучения. Так, например, в радиотехнике частоты излучения сравнительно невелики, фотоны мелки, вследствие чего корпускулярные свойства радиоизлучения можно игнорировать, учитывая лишь волновые свойства.

Прямо противоположная ситуация в ядерной технике, где приходится иметь дело со столь большими фотонами, что волновые свойства отходят далеко на задний план.

В светотехнике мы вынуждены считаться с корпускулярными и волновыми свойствами излучения в их диалектическом единстве. Квантовая сущность процессов поглощения и преобразования излучения определяет резкое увеличение вероятности возникновения этих процессов по мере увеличения энергии фотона. Этим можно объяснить существование красной границы фотоэффекта, фотолюминесценции и фотохимических реакций, являющиеся ярким проявлением корпускулярных свойств света. Наряду с этим многие закономерности, управляющие действиями света, носят на себе яркий отпечаток волновых свойств света. Например, влияние поляризации и интерференции света на спектральную чувствительность в практически важном селективном фотоэффекте.

Атом как элементарный излучатель. В проблеме источников света также приходится считаться с двойственной природой света. Облик атома как элементарного излучателя весьма своеобразен. Возбужденный атом, имеющий избыток энергии, скачком переходит в более низкое энергетическое со-

стояние, причем в недрах атома рождается фотон. Излучаемый атомом фотон летит в каком-то одном направлении, т. е. излучение света носит «игольчатый» характер.

В этой картине казалось бы нет места для классических черт. Однако теория в согласии с опытом приводит к выводу, что у излучающего атома много черт классического осциллятора. Вероятность испускания фотона пропорциональна квадрату электрического дипольного момента атомного осциллятора. Более того, индикатрисса излучения атома по различным направлениям совершенно аналогочна индикатриссе линейной радиоантенны. В частности, атомный осциллятор ничего не излучает в направлении своей оси. С. И. Вавилов доказал это непосредственными и очень изящными интерференционными опытами. Индикатрисса дает относительную вероятность вылета фотона из атома по различным направлениям. Сказанное справедливо не только для излучающего атома, но и для любого центра свечения атомных масштабов.

Макроскопические источники света. Всякий практический источник света представляет огромный коллектив элементарных излучателей. Теория источников света — это теория свойств таких больших коллективов. Наибольший интерес представляет свечение газообразных и твердых тел. За последние годы особенно много внимания уделялось люминесценции твердых тел, но отсутствие обоснованной теории реальных твердых тел крайне затрудняет ясное и однозначное истолкование экспериментальных данных. Для газов и паров дело обстоит благополучнее, так как здесь имеется довольно ясная связь между свойствами отдельного элементарного излучателя и свойствами источника света в целом. Последнее особенно справедливо при низких давлениях излучающего газа. При этом газообразные излучатели дают возможность моделировать ряд свойств, общих для излучателей всех типов.

Ниже излагаются некоторые результаты, полученные в области физики источников света исследовательской группой, работающей в МЭИ и во ВНИСИ.

Теория источников света, естественно, занимается двумя группами явлений:

- 1) рождение и гибель возбужденных атомов, являющихся элементарными излучателями;
- 2) рождение и гибель фотонов, испущенных возбужденными атомами.

Как известно, существуют два способа возбуждения атомов: «горячий» и «холодный». При «горячем» способе (солнце, пламя, элек-

трическая дуга Петрова) светящийся газ нагревается до высокой температуры. При «холодном» способе нагрев газа невелик и не является причиной свечения. «Холодный» способ более экономичен и прогрессивен, чему могут служить примером люминесцентные лампы.

В настоящее время наиболее распространенным способом «холодного» получения света является излучение электрического разряда в газах.

В люминесцентных лампах первый этап преобразования энергии происходит, как известно, в газовом разряде, где электрическая энергия преобразуется в энергию коротковолнового ультрафиолетового излучения. В дальнейшем энергия этого излучения преобразуется в энергию видимого света на стенках лампы при помощи слоя люминофора.

Механизм возбуждения атомов в разряде. Процесс преобразования электрической энергии в энергию возбужденных атомов довольно прост. Электроны, ускоренные в электрическом поле газового разряда, при неупругих соударениях отдают свою энергию атомам. Неупругие соударения между электронами и атомами носят четко квантовый характер и имеют резкий порог — потенциал возбуждения. Вероятность неупругого соударения сильно зависит от скорости электронов (функция возбуждения), причем здесь сказываются волновые свойства электронов и наличие у них собственного магнитного момента. К сожалению, для функций возбуждения нет теоретически обоснованных аналитических выражений. Поэтому приходится использовать эмпирические соотношения с константами, взятыми из опыта (В. А. Фабрикант, 1937 г.).

Квантовая механика дает возможность численного расчета функций возбуждения по точкам (Пенни, 1932 г., Б. М. Яворский, канд. диссертация, МЭИ, 1941 г. и докторская диссертация, МЭИ, 1947 г.). Результаты этих расчетов находятся в неплохом согласии с экспериментом.

Благодаря наличию потенциала возбуждения в процессе возбуждения участвуют только достаточно быстрые электроны. Несмотря на то, что в люминесцентных лампах электронная температура достигает $12\,000^{\circ}\text{K}$ (Ф. А. Бутаева, 1946 г., К. Кенти, 1951 г.), только несколько процентов электронов обладают энергией, превышающей потенциал возбуждения. Отсюда, однако, не следует делать вывода об обязательной практической выгодности повышения электронной температуры. В частности, аргон, присутствующий в люминесцентных

лампах наряду с парами ртути, снижает электронную температуру раза в полтора, но при этом повышает выход излучения более чем в 2 раза. Этот парадокс объясняется ролью вторичных процессов, о которых речь будет ниже.

Высокая электронная температура отнюдь не означает, что в люминесцентных лампах используется «горячий» способ возбуждения излучения, так как температура излучающего газа при этом равна всего лишь 40° С. Эта температура поддерживается упругими соударениями электронов с атомами. К. Кенти (1951 г.) теоретически подсчитал количество тепла, передаваемое атомам при таких соударениях, и получил хорошее совпадение с результатами своих измерений. Однако позднее (студентка МЭИ З. Куткина, 1952 г.) было показано, что учет реальной индикаторы рассеяния электронов при соударениях с атомами сильно ухудшает согласие теории и эксперимента в этом вопросе. Во всяком случае большой перепад температур от электронного к обычному газу объясняется малой массой электрона.

Большая роль вторичных процессов в люминесцентных лампах связана с наличием у атомов ртути своеобразных возбужденных состояний, называемых метастабильными. В метастабильном состоянии атом как бы «кнем», он не может испустить фотон. Свою энергию метастабильные атомы отдают практически только при соударениях с другими частицами. Очень важным является то, что при таких соударениях метастабильные атомы могут быть переведены в излучающее состояние. Особенно эффективны в этом смысле соударения с медленными электронами.

Была высказана гипотеза (В. А. Фабрикант, 1945 г., Ф. А. Бутаева и В. А. Фабрикант, 1945 г.) о том, что в условиях люминесцентной лампы примерно две трети возбужденных атомов, излучающих ультрафиолетовую линию 2537 Å, возникают в результате превращений метастабильных атомов. Эта гипотеза была подтверждена дальнейшими экспериментами. Была установлена очень малая продолжительность жизни метастабилей в разряде, свидетельствующая об их интенсивном разрушении (К. И. Паневкин, канд. диссертация, МЭИ, 1947 г.). Затем были обнаружены значительные нелинейности в зависимости интенсивности излучения от силы тока, являющиеся результатом вторичных процессов с участием метастабилей (Ф. А. Бутаева и В. А. Фабрикант, 1948 г.).

Поскольку атомы кадмия сходны по своей структуре с атомами ртути, следует ожидать

аналогичных эффектов в кадмievом разряде. Соответствующие эксперименты показали, что в кадмievом разряде механизм возбуждения атомов также осложнен вторичными процессами (Ю. В. Жаркова, канд. диссертация, МЭИ; Ю. В. Жаркова и Г. Н. Рохлин, 1951 г.).

Сейчас уже можно считать достаточно обоснованной картину двухступенчатого возбуждения большей части излучающих атомов в люминесцентной лампе. Сначала электроны возбуждают атомы ртути до метастабильных состояний, а затем при последующих соударениях метастабили переходят в излучающее состояние. С этой точки зрения своеобразна роль различных молекулярных загрязнений. Эти загрязнения обычно разрушают метастабили, но если это разрушение сопровождается переводом в излучающее состояние, оно не влечет за собой снижения светоотдачи.

Присутствие аргона безусловно положительно сказывается на превращении метастабилей в излучающие атомы. Аргон затрудняет попадание метастабилей на стенки лампы, где их ожидает бесполезная гибель. Аргон увеличивает концентрацию электронов в разряде, что повышает число соударений, переводящих метастабили в излучающее состояние. Таким образом, аргон играет в люминесцентных лампах далеко не пассивную роль, несмотря на то, что он сам не светится.

Разряд как объемный излучатель. Между актом возбуждения атома и актом излучения имеется интервал времени порядка 10^{-7} — 10^{-9} сек. (продолжительность жизни возбужденного состояния). Существование темновой паузы в отдельном акте излучения представляет типично квантовый эффект. Несмотря на малость этого интервала, его конечность весьма существенна. За это короткое время может произойти катастрофа — возбужденный атом испытает какое-либо соударение с другой частицей и отдаст ей свою избыточную энергию. Эта энергия будет потеряна для излучения, произойдет тушение излучения.

Наличие актов тушения делает весьма существенными условия выхода фотонов из глубины излучающего газа. Фотон, испущенный атомом где-то в глубине газа, может быть перехвачен другим атомом того же газа. Атом, поглотивший фотон, перейдет в возбужденное состояние, затем опять испустит фотон, с которым может повториться все описанное выше. Вот эти захваты фотонов атомами далеко не всегда безвредны. Пока фотон летит от одного атома до другого, он неуязвим, но фотон «связанный» в атоме может быть «потушен». Поэтому чрезвычайно важны законы диффузии фотонов в объеме излучателя. Следует

отметить, что это один из основных вопросов для теории любого излучателя, так как всякий реальный излучатель объемен. Конечные потоки излучения могут возникать только в конечных объемах вещества. В газовых излучателях объемные свойства проявляются особенно резко. Проблема объемных излучателей давно привлекает внимание астрофизиков в связи с теорией звезд.

Газовый разряд представляет очень удобный объект для изучения свойств объемных излучателей. В объем газа могут быть введены люминесцирующие зонды, позволяющие определять все основные характеристики поля излучения в каждой точке газа (В. А. Фабрикант, 1939—1947 гг.). Люминесцирующий зонд дает возможность заглянуть вглубь газа благодаря преобразованию частоты излучения, падающего на зонд. Зонд покрыт люминофором, возбуждаемым излучением газа. Свечение люминофора уже не перехватывается атомами газа и выходит без помех наружу. Измерения яркости зонда дают возможность определить объемную плотность фотонов, величину и направление вектора Умова-Пойнтинга, наконец, дивергенцию этого вектора в любой точке объема излучающего газа.

Измерения при помощи люминесцентных зондов обнаружили ряд специфических особенностей процесса рождения и диффузии фотонов (Ф. А. Бутаева, канд. диссертация, ВЭИ, 1946, 1955 гг.).

Особенно интересными являются данные о дивергенции вектора плотности потока излучения, так как эта дивергенция равна мощности источников излучения в данной точке газа. Для более точного определения этой важной величины был применен метод вибрирующего люминесцирующего зонда (В. П. Титушина, канд. диссертация, МЭИ, 1953 г.). При методе вибрирующего зонда используется схемное дифференцирование, что повышает точность результатов.

Теория диффузии фотонов в газе. Между диффузией фотонов и обычной диффузией атомов имеется известная аналогия (К. Комpton, 1922 г.). Пользуясь этой аналогией, можно ввести понятие средней длины свободного пробега фотона в газе и ввести коэффициент диффузии фотонов. Для получения потока излучения коэффициент диффузии фотонов приходится умножать на градиент концентрации излучающих атомов (В. А. Фабрикант, 1938, 1947 гг.).

Средняя длина свободного пробега определяет число захватов, испытываемых фотоном, прежде чем он вылетит из объема газа наружу. Эффективная продолжительность жизни

фотона в связанном виде равна, очевидно, произведению продолжительности жизни отдельного возбужденного атома на число захватов фотона. Эта наглядная картина, к сожалению, далеко не строга. Между диффузией фотонов и атомов больше черт различия, чем сходства. Если при диффузии атомов существенны только градиенты концентраций, то при диффузии фотонов уже играют большую роль производные высших порядков (Л. М. Биберман, дипломная работа, МЭИ, 1940 г.). Физическая причина этого заключается в том, что поток фотонов при прохождении слоя газа ослабляется не по экспоненциальному закону, а гораздо медленнее. Объясняется это немонохроматичностью излучения, соответствующего даже одной спектральной линии. Основной причиной, вызывающей немонохроматичность спектральных линий в разряде низкого давления, является изменение частот вследствие эффекта Допплера, связанного с движением излучающих атомов. Этот эффект нарушает точность резонанса между излучающими и поглощающими атомами. Центр спектральной линии поглощается очень сильно, тогда как края линии благодаря слабому резонансу могут путешествовать в газе очень далеко без заметного ослабления. Оптическое сечение атома ртути для центра линии 253,7 мкм в 1000 раз, а для центра линии 184,9 мкм в 100 тыс. раз превышает газокинетическое сечение. Для краев тех же линий, отстоящих на сотые доли миллимикрон от центра, оптические сечения на порядки величин меньше газокинетического сечения атомов. Для практических целей важно поведение линии в целом, а для линий в целом газ представляет очень избирательный и, кроме того, флуоресцирующий светофильтр.

По степени сложности задача в известной мере аналогична проблеме диффузии нейтронов в ядерных котлах. Строгая теория приводит к сложному интегральному уравнению, которое может быть решено только приближенными методами (Л. М. Биберман, канд. диссертация, МЭИ, 1946 г.; Б. Векленко, дипломная работа, МЭИ, 1955 г.).

Переход от интегрального уравнения к дифференциальному уравнению, как это делается в теории диффузии атомов, в данном случае по указанным причинам был бы недостаточно строг. Поэтому практически весьма ценным является новый приближенный метод расчета эффективной продолжительности жизни возбужденных атомов (Л. М. Биберман, 1948 г.). Этот метод основан на вычислении вероятности вылета фотона из любой точки объема газа с учетом немонохроматичности

спектральных линий. Пользуясь эффективной продолжительностью, легко оценить влияние различных тушащих факторов на выход излучения.

Все изложенное показывает, что физика источников света является наглядным примером тесной связи между самыми тонкими физическими явлениями и техническими параметрами.

Без исследования этой связи невозможен прогресс техники источников света. Не следует при этом забывать об ироническом вопросе одного из основателей теории электромагнетизма Хевисайда: «Стану ли я отказываться от своего обеда только потому, что я не полностью понимаю процесс пищеварения?».

ОСВЕЩЕНИЕ ФАСАДОВ ПАВИЛЬОНОВ ВСЕСОЮЗНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ВЫСТАВКИ

Канд. техн. наук М. М. ЕПАНЕШНИКОВ

Московский энергетический институт

Всесоюзная сельскохозяйственная выставка, открывшаяся в августе прошлого года, является демонстрацией наших достижений в области сельского хозяйства. Выставка рассчитана на обслуживание посетителей не только в дневное, но и вечернее время, причем в осенние месяцы наибольшее количество посетителей приходится на темное время суток. Это обстоятельство заставило обратить особое внимание на искусственное освещение выставки.

Решению этой сложной с художественной и технической точек зрения задачи предшествовала разработка ряда принципиальных вопросов, к которым в первую очередь следует отнести: выбор уровня яркости и распределения яркости по фасадам павильонов, выбор типа и определение размещения осветительных приборов, обеспечивающего необходимое распределение яркости и не создающего чрезмерного слепящего действия.

При выборе уровня яркости фасадов павильонов мы исходили из необходимости обеспечить отчетливое различие надписей и деталей архитектурной отделки на фасаде при одновременном условии, чтобы эта яркость не вызывала длительной переадаптации при переводе взгляда с освещенного фасада на окружающий фон.

В соответствии с этим условием нижний предел яркости фасадов был определен по графику зависимости пороговых контрастов от светности поля адаптации (рис. 1).

Принимая условие, что посетитель должен иметь возможность прочитать надпись на фасаде павильона с расстояния 50 м, находим, что угловой размер деталей различия колеблется в пределах от 2' до 5'. При угловом раз-

мере объекта наблюдения $\alpha = 2'$ и контрасте его с фоном $K = 0,25$ (наиболее трудный случай) светность, обеспечивающая пороговое различение, равна 10 рлк (рис. 1).

Исходным для расчета максимального предела яркости фасада было принято условие, при котором посетитель, адаптированный на яркость фасадов, должен за время, не превышающее 1 сек., обнаружить на своем пути скопление воды на асфальте после дождя с расстояния не менее 2 м.

Решение этой задачи было найдено на основе анализа зависимости порогового контраста от времени адаптации. График (рис. 2), характеризующий продолжительность процесса адаптации в зависимости от яркости первоначальной адаптации, построен для трех значений контраста и светности поля последующей адаптации $R_a = 0,4$ рлк, что соответствует фактической светности поверхности асфальта при коэффициенте отражения 0,65 и освещен-

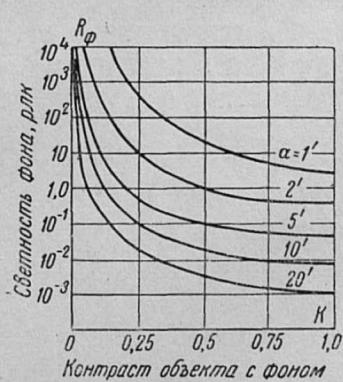


Рис. 1.

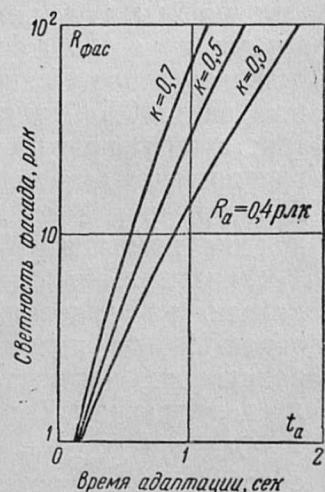


Рис. 2.