

## NONLINEAR INTERFERENCE

E. A. MANYKIN

*When the matter interacts with the light of great intensity, nonlinear interference takes place. This process is partly analogous to the well known ordinary (linear) interference. The main properties of nonlinear interference are described.*

**При большой интенсивности света, взаимодействия с веществом в резонансных условиях, проявляется явление нелинейной интерференции. Этот процесс частично аналогичен хорошо известной обычной (линейной) интерференции. Рассмотрены основные свойства нелинейной интерференции.**

## НЕЛИНЕЙНАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

Э. А. МАНЫКИН

Московский инженерно-физический институт  
(технический университет)

### ВВЕДЕНИЕ

Явление интерференции в оптике хорошо известно, детально изучено и широко применяется в научных исследованиях и современных технологиях. Достаточно упомянуть интерферометр Майкельсона, который сыграл решающую роль еще при создании специальной теории относительности, или интерферометр Фабри–Перо, который имеет огромное значение в современной лазерной физике и оптике, в частности в интерферометрии и голографии.

Впервые явление интерференции в оптике было обнаружено при возникновении окраски тонких пленок еще в XVII веке Р. Бойлем и Р. Гуком, а И. Ньютон подробно ее изучил в отраженном свете от длиннофокусной линзы на плоском стекле (знаменитые кольца Ньютона).

Интерференция — неотъемлемое свойство не только света, но и любых волновых процессов. Она состоит в следующем: если пучок лучей света от некоторого монохроматического источника разделить на два пучка, а затем направить их друг на друга так, чтобы они пересеклись в некоторой области пространства, то в области их перекрытия интенсивность света в одних точках пространства будет превышать их суммарную интенсивность, а в других — уменьшаться вплоть до нуля. В этом случае говорят, что имеет место своеобразная интерференционная картина, то есть чередование ярких и темных полос.

Интерференция возникает для монохроматического света и прямым образом влияет на поглощение света в веществе. Поглощение максимально там, где интенсивность света имеет максимальную величину, то есть в так называемых пучностях интерференционной картины. К тому же поглощение света становится минимальным или вовсе исчезает в тех местах, где интенсивность очень мала или равна нулю, то есть в узлах интерференционной картины. Эту интерференцию принято называть *линейной интерференцией*. Линейная интерференция реализуется в полной мере, если разность фаз световых волн сохраняется постоянной в течение всего процесса взаимодействия света с веществом.

В реальных условиях фазы волн испытывают те или иные изменения (флуктуации), так что если за время взаимодействия или регистрации света эти флуктуации нарушают постоянную разность фаз волн, находящихся в условиях суперпозиции (то есть при перекрытии волн в пространстве и во времени), то линейная интерференция сильно ослабляется вплоть до полного исчезновения. Общая

интенсивность сводится к сумме интенсивностей от каждой световой волны. Кроме того, если частоты колебаний световых волн сильно различаются, скажем в два-три раза, то их суперпозиция не обладает постоянной разностью фаз ни при каких условиях. Общая интенсивность колеблется с чрезвычайно большой частотой, так что реально существующие фотодетекторы не в состоянии зарегистрировать эти изменения во времени. В этом случае общая интенсивность также будет равна сумме интенсивностей отдельных световых волн. В этом смысле будет отсутствовать интерференция волн существенно разных частот, например красный и синий свет не интерферируют.

Такое положение вещей сохранялось до начала 60-х годов этого столетия, когда был изобретен первый квантовый генератор оптического диапазона — лазер на рубине, который стал первым источником импульсов монохроматических световых волн с длиной волны  $\lambda = 694$  нм. Лазер на рубине испускал мощный световой пучок лучей красного цвета с предельно малой угловой расходимостью. Уже в 1961 году было обнаружено, что при прохождении красного света рубинового лазера через пластинку кварца возникает пучок узкопараллельных лучей синего цвета длиной волны  $\lambda = 347$  нм, то есть ровно в два раза меньшей длины, чем для падающих на кварцевую пластинку световых волн красного цвета. Таким образом, происходила, как теперь говорят, генерация второй гармоники. Действительно, поскольку произведение длины волны  $\lambda$  и частоты  $\nu$  колебаний электромагнитных волн (а световые волны есть электромагнитные волны) равно скорости света в соответствии с известной формулой  $\lambda\nu = c$ , то частота колебаний синего света будет в два раза больше, чем частота колебаний красного света. Это было моментом рождения нелинейной оптики в отличие от прежней линейной оптики, которая существовала в долазерную эпоху [1].

В нелинейной оптике хорошо известный ранее принцип суперпозиции световых волн, строго говоря, становится несправедливым. Именно в этих новых условиях может осуществляться новое по сравнению с прежней оптикой явление — *нелинейная интерференция*, для которой справедливы законы нелинейной оптики. Нелинейная интерференция означает, что при определенных условиях в принципе возможна интерференция световых волн существенно разных частот, например упомянутого выше красного света рубинового лазера и синего света его второй гармоники.

Рассказать об этом более подробно и привести примеры применений этого необычного нового направления в интерферометрии — цель данной статьи.

## НЕЛИНЕЙНАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ В ИНФРАКРАСНОМ СВЕТЕ

Нелинейная интерференция оптических волн и ее проявление в различных процессах, особенно в поглощении, наглядно объясняются на классической модели ангармонического осциллятора. Такая модель часто применяется при описании взаимодействия волн инфракрасного диапазона с ионными кристаллами, где не требуется привлекать принципы квантовой механики. Обычно в этих случаях считают, что ионы в кристалле под действием электрического поля инфракрасных волн совершают вынужденные гармонические колебания вблизи некоторых положений равновесия — узлов кристаллической решетки. С увеличением амплитуды инфракрасной волны возрастает и амплитуда колебаний ионов и постепенно гармонические колебания становятся ангармоническими, иначе говоря, несимметричными. Дело в том, что в ангармоническом осцилляторе помимо квазиупругой силы, которая равна  $f_1 = -k_1x$ , то есть линейно зависит от отклонения (координаты осциллятора  $x$ ), появляются дополнительные нелинейные силы, пропорциональные второй, третьей степени и т.д. по отклонению, то есть вида  $f_i = k_ix^i$ , где  $i = 1, 2, 3$  и т.д.

Хорошо известен эффект резонансного возбуждения гармонического осциллятора. Когда частота периодических колебаний вынуждающей силы совпадает с собственной частотой колебаний осциллятора, то его амплитуда колебаний неограниченно возрастает, если затухание осциллятора отсутствует. Это идеальный случай. Практически всегда имеется некоторое затухание. Поэтому при резонансе амплитуда осциллятора достигает конечного, но максимального значения по сравнению с нерезонансным случаем. Это так называемый одночастотный резонанс.

Для ангармонического осциллятора известно, что его можно раскачать с помощью вынуждающей силы, частота которой в два-три и т.д. раза меньше собственной частоты осциллятора. Это следует из приведенного выше свойства ангармонических колебаний, совершаемых под действием дополнительных нелинейных сил. Более того, ангармонический осциллятор будет испытывать резонансное возбуждение под действием нескольких внешних вынуждающих сил, если только сумма (разность) частот колебаний внешних периодических сил совпадет с собственной частотой осциллятора. Например, если ангармонический осциллятор подвергается воздействию двух внешних периодических сил с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , так что ни одна из них не находится в резонансе с собственной частотой осциллятора  $\omega_0$ , тем не менее при условии, что сумма или разность этих частот  $\omega_1 \pm \omega_2 = \omega_0$ , возникает сильная резонансная раскачка осциллятора. Это двухчастотный резонанс. При наличии трех внешних периодических сил с частотами  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и  $\omega_3$ , таких, что

выполняется условие  $\omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_3 = \omega_0$ , реализуется трехчастотный резонанс. В общем случае ангармонический осциллятор допускает возможность осуществления многочастотного резонанса. Двух- и трехчастотный резонансы суть частные случаи многочастотного резонанса.

При многочастотном резонансе ангармонический осциллятор будет сильно резонансно раскачиваться в соответствии с фазами внешних вынуждающих сил. В отличие от одночастотного резонанса многочастотные резонансы можно создать различными способами. Рассмотрим случай, когда ангармонический осциллятор находится под воздействием трех сил  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$  с частотами  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и  $\omega_3$  соответственно. Пусть сила  $f_1$  создает одночастотный резонанс. Тогда ее частота колебаний равна собственной частоте осциллятора, то есть  $\omega_1 = \omega_0$ . Две другие силы пусть создают двухчастотный резонанс. В этом случае сумма их частот должна быть равна частоте осциллятора, то есть  $\omega_2 + \omega_3 = \omega_0$ . При совместном действии всех трех сил возможны две экстремальные ситуации: 1) одно- и двухчастотный резонансы совершаются синхронно, синфазно; 2) эти же резонансы совершаются в противофазе, асинхронно. Очевидно, что в первом случае эффект раскачки осциллятора будет максимальным, во втором случае — минимальным. Подбирая амплитуды сил  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$  можно осуществить такое положение, при котором во втором случае действие первой силы полностью компенсируется действием второй и третьей сил. Другими словами, одночастотный резонанс будет компенсирован двухчастотным резонансом и ангармонический осциллятор останется в покое. Поглощение инфракрасных волн будет отсутствовать. В первом случае, при синхронизации резонансов, раскачка осциллятора будет происходить вдвое быстрее, чем при реализации одного из двух резонансов. На практике при взаимодействии трех таких когерентных волн инфракрасного диапазона с оптическими ветвями колебаний твердых тел или молекулярными колебаниями в жидкостях и газах осуществляется нелинейная интерференция трех волн с частотами  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и  $\omega_3$ . В случае, когда  $\omega_2 = \omega_3$ , происходит нелинейная интерференция инфракрасной волны определенной частоты и ее второй гармоники, о чем шла речь во введении.

Приведенное выше описание, основанное на принципах классической механики, справедливо также для объяснения нелинейной интерференции электромагнитных волн, взаимодействующих с плазмой, то есть со свободными заряженными частицами — электронами и ионами. В этом случае роль нелинейных добавочных сил играет сила Лоренца, пропорциональная векторному произведению скорости электрона на вектор магнитного поля. Эта сила значительно меньше прямого действия вектора электрического поля волны на заряд электрона. Простой расчет на основе уравнений Ньютона с силой Лоренца в электромагнитных полях для

одного электрона показывает, что амплитуды и фазы волн можно подобрать так, что их общее действие подавляет движение электрона в определенном направлении.

## ПРИНЦИПЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Переходя к рассмотрению оптического диапазона, нужно заметить, что объяснение нелинейной интерференции, изложенное в предыдущем разделе с использованием классических моделей, может служить лишь грубым качественным приближением для взаимодействия электронов со светом. Дело в том, что в рассматриваемой области адекватной теорией является квантовая электродинамика. Тем не менее можно описать суть нелинейной интерференции пользуясь только программой физики в объеме средней школы и некоторыми положениями квантовой теории, излагаемой на первом и втором курсах технических университетов. Ограничимся рассмотрением нелинейной интерференции, которая влияет на процессы поглощения света и фотоионизацию в веществе.

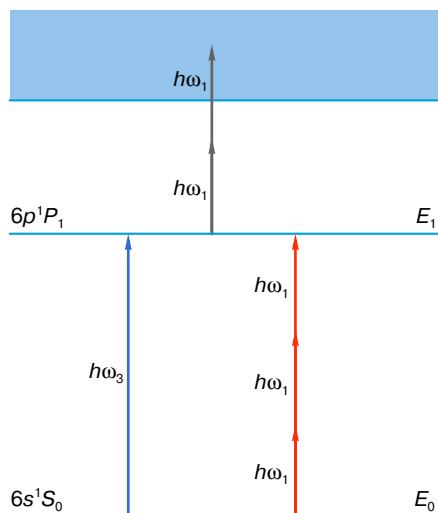
Для ее осуществления необходимо подобрать подходящую среду, в которой происходят поглощение или ионизация света. Это может быть атомарный или молекулярный газ, примесные ионы в жидкостях или твердых телах или даже кристаллы полупроводников и диэлектриков. Во всех этих веществах поглощение света осуществляется за счет перевода электронов с низких энергетических уровней на более высокие уровни энергии (в твердых телах и кристаллах такой переход электронов происходит между энергетическими зонами).

Сначала опишем прямой эксперимент, в котором была убедительно продемонстрирована нелинейная интерференция между видимым и ультрафиолетовым светом [2]. В общем виде он заключался в использовании лазерного света видимого диапазона с длиной волны  $\lambda_1 = 554$  нм и ультрафиолетовой волны с  $\lambda_3 = 185$  нм. Ультрафиолетовая волна имела частоту  $\omega_3$  точно в три раза больше, чем частота  $\omega_1$  видимого света:  $\omega_3 = 3\omega_1$ . Оба пучка света направлялись в камеру, содержащую пары атомов ртути. Частоты волн были подобраны так, чтобы ультрафиолетовая волна осуществляла одночастотный резонанс, а видимый свет — трехчастотный резонанс с некоторой частотой атомного перехода  $\omega_0$ . Одночастотный резонанс в квантовой теории называют однофотонным. Иначе говоря, одночастотный резонанс, когда  $\omega_3 = \omega_0$ , соответствует элементарному процессу взаимодействия с атомом ртути, при котором поглощается один фотон (квант оптической волны) с энергией  $h\omega_3$  и атом переходит из основного состояния с энергией  $E_0$  в некоторое возбужденное состояние с энергией  $E_1$ , при этом разность  $E_1 - E_0 = h\omega_0$  ( $h$  — постоянная Планка). Трехчастотный резонанс, когда  $3\omega_1 = \omega_0$ , будет соответствовать

элементарному процессу, при котором поглощаются сразу три фотона и атом возбуждается из состояния с энергией  $E_0$  в возбужденное состояние  $E_1$ . Этот процесс называют трехфотонным.

На рис. 1 показана энергетическая схема одно- и трехфотонного поглощения (переход атома ртути с состояния, обозначаемого особым символом-термом  $6s^1S_0$  и обладающего наинизшей энергией  $E_0$ , к более высокому по энергии, возбужденному состоянию  $E_1$ , обозначаемому символом-термом  $6p^1P_1$ ). Такие же свойства элементарных процессов присущи многофотонному резонансу, когда происходят элементарные процессы с одновременным поглощением или испусканием многих фотонов (см., например, [3]).

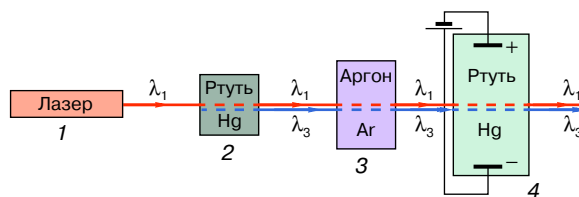
Конкретная процедура эксперимента заключалась в следующем. Пучок лазерных лучей с длиной волны  $\lambda_1$  пропускаться через камеру с относительно плотными парами ртути, где происходило частичное преобразование световой волны с длиной  $\lambda_1$  в волну третьей гармоники: возникала волна ультрафиолетового диапазона с длиной  $\lambda_3 = \lambda_1/3$ . Далее обе волны направлялись в камеру с газом атомов аргона. Меняя плотность аргона можно было изменять в широких пределах разность хода проходящих через камеру световых волн видимого диапазона и ультрафиолета, то есть изменять разность фаз между ними. Затем оба пучка света проходили через камеру с относительно низким давлением ртути, где, собственно, и осуществлялась нелинейная интерференция волн с длинами  $\lambda_1$  и  $\lambda_3$  за счет конкуренции одно- и трехфотонного поглощения



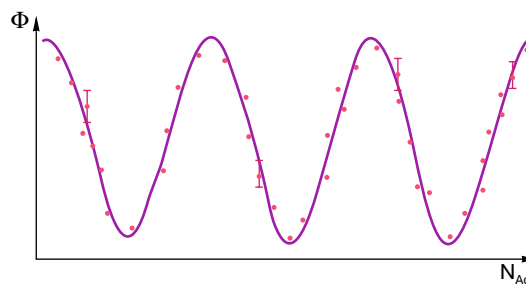
**Рис. 1.** Энергетическая диаграмма однофотонного ( $h\omega_3 = E_1 - E_0$ ) и трехфотонного ( $3h\omega_1 = E_1 - E_0$ ) поглощения в атоме ртути между основным состоянием и возбужденным. Дополнительно в эксперименте производилась двухфотонная ионизация возбужденного состояния (переход в непрерывный спектр энергии)

(рис. 2). Концентрация атомов ртути, находящихся в возбужденном состоянии с энергией  $E_1$ , регистрировалась посредством двухфотонной ионизации этого состояния излучением видимого света. Меняя разность фаз между волнами наблюдали фототок, как это показано на рис. 3. Величина фототока изменялась между максимальным и минимальным значениями по синусоидальному закону, что является характерной чертой интерференции. Таким образом, в этом эксперименте была продемонстрирована нелинейная интерференция света существенно разных частот. Она явилась следствием конкуренции атомных переходов при поглощении фотонов разных частот.

Сущность нелинейной интерференции и способы ее осуществления в оптике более корректно описываются в рамках современной квантовой физики. Пусть в некоторой среде распространяются несколько оптических монохроматических волн существенно разных частот. В нелинейной оптике важны трех- и четырехволновые процессы взаимодействия. В первом случае три волны  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и  $\omega_3$  связаны соотношениями типа  $\omega_3 = \omega_2 \pm \omega_1$ . К ним относятся процессы генерации второй гармоники, когда



**Рис. 2.** Схема эксперимента по наблюдению нелинейной интерференции: 1 – источник видимого света с длиной волны  $\lambda_1 = 554$  нм, 2 – преобразователь в третью гармонику (в ультрафиолетовую волну с длиной волны  $\lambda_3 = 185$  нм), 3 – аргонная камера для изменения разности фаз между волнами с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_3$ , 4 – камера с парами ртути для реализации одно- и трехфотонного поглощения



**Рис. 3.** График зависимости ионизационного фототока  $\Phi$ , возникающего в камере 4 (см. рис. 2), от концентрации аргона  $N_{Ar}$ . Сплошная линия – синусоида, описывающая типичную картину нелинейной интерференции видимого и ультрафиолетового света



$\omega_2 = \omega_1$  и, следовательно,  $\omega_3 = 2\omega_1$ . Во втором случае четыре волны с частотами  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  и  $\omega_4$  связаны соотношениями типа  $\omega_4 + \omega_3 = \omega_2 + \omega_1$ . К ним относятся такие процессы, как, например, процесс генерации третьей гармоники, когда  $\omega_1 = \omega_2 = -\omega_3$  и, следовательно,  $\omega_4 = 3\omega_1$ .

Во всех перечисленных выше случаях возможны разнообразные многофотонные резонансы как в модели ангармонического осциллятора, так и в реальных атомных системах (атомах, молекулах, кристаллах), однофотонный резонанс осуществляется единственным способом: частота волны должна быть равна частоте атомного перехода. В то же время многофотонный резонанс можно реализовать разными способами, так как в этом случае суммы или разности многих частот вместе должны равняться частоте атомного перехода. Поэтому при многофотонном резонансе возникает множество различных путей оптических переходов в атомной системе, каждый из которых характеризуется своей амплитудой вероятности в соответствии с постулатами квантовой теории. А для амплитуд вероятностей по различным путям, но между одними и теми же начальным и конечным состояниями квантовой системы характерна квантовая интерференция. Например, в рассмотренном эксперименте атом ртути переходит из основного состояния в возбужденное или в результате поглощения одного фотона ультрафиолетового излучения, или в результате поглощения одновременно трех фотонов видимого света. Согласно принципам квантовой теории, вероятность оптического перехода в этом случае будет определяться суммой амплитуд  $a_{10}^{(1)}$  и  $a_{10}^{(3)}$  соответственно одно- и трехфотонного перехода по известной формуле

$$w_{10} = |a_{10}^{(1)} + a_{10}^{(3)}|^2. \quad (1)$$

Если раскрыть модуль и возвести в квадрат последнее выражение, то получим, что

$$w_{10} = w_{10}^{(1)} + w_{10}^{(3)} + \text{интерференц. чл.} \quad (2)$$

Здесь мы видим, что полная вероятность равна не просто сумме вероятностей перехода по каждому пути, а имеются интерференционные члены. Это и есть квантовая интерференция оптических переходов, которая лежит в основе нелинейной интерференции, являясь ее причиной. При однофотонном резонансе обе амплитуды в формуле (1) пропорциональны первой степени напряженности электрического поля световой волны. Это свойство обычной, линейной интерференции, например двух пучков света с разными направлениями распространения. При нелинейной интерференции резкость интерференционной картины нелинейно зависит от напряженности электрического поля световой волны, осуществляющей многофотонный (в данном случае трехфотонный резонанс). Подбирая фазы и амплитуды световых волн изменяют знак и величину ам-

плитуд различных многофотонных переходов в атомной системе. В результате этого добиваются, что один тип поглощения частично или полностью ослабляет другой. В последнем случае атомная система остается в своем первоначальном, невозбужденном состоянии. В этом случае среда становится прозрачной для проходящего через нее света. Говорят, что происходит просветление среды. Это просветление имеет совершенно не такую природу, как хорошо известный ранее эффект насыщения. Более подробно эти закономерности изложены в работе [4], где, собственно, впервые было предсказано явление нелинейной интерференции.

Подчеркнем, что при осуществлении нелинейной интерференции обычная, линейная интерференция не реализуется из-за существенного различия частот световых волн.

В настоящее время известно большое число сред и процессов, где имеет место нелинейная интерференция. Особенно интересно было ее проявление при исследовании ионизации инертных газов (ксенона, криптона и аргона) [5]. Оказалось, что по мере увеличения плотности газа степень ионизации вопреки ожиданию не увеличивалась, а постепенно уменьшалась вплоть до исчезновения. Позже стало ясно, что это уменьшение происходит из-за того, что в газе образовывалась волна утроенной частоты по отношению к частоте основной световой волны, причем соответствующий однофотонный резонансный переход был в антифазе с трехфотонным переходом. Последний подавлялся первым в соответствии с изложенным выше физическим механизмом.

У нас в стране великолепные эксперименты по нелинейной интерференции были выполнены в Московском университете в середине 80-х годов [6]. В результате был обнаружен эффект подавления двухфотонного поглощения в парах натрия. При этом применялся нелинейно-оптический процесс четырехволнового взаимодействия. Через пары натрия проходили пучки лучей света трех различных длин волн:  $\lambda_1 = 1064$  нм,  $\lambda_2 = 612$  нм,  $\lambda_3 = 2220$  нм. В результате в парах натрия возникала четвертая волна, частота которой равнялась сумме частот трех указанных волн. Причем волновой вектор четвертой волны оказался равным алгебраической сумме волновых векторов трех других волн, то есть выполнялось так называемое условие пространственного синхронизма. Это значительно просветляет среду в больших объемах за счет нелинейной интерференции. Двухфотонные резонансы в натрии создавались попарно. Частоты первых двух волн в сумме были равны частоте атомного перехода, а для третьей и четвертой волн это условие выполнялось для разности их частот. Пространственный синхронизм позволял осуществить оба двухчастотных (двухфотонных) резонанса таким образом, что они действовали в антифазе друг относительно друга. Этим способом удалось в сто раз уменьшить первоначальное

двухфотонное поглощение и достичь полного просветления паров натрия.

Эксперимент, выполненный авторами работы [6], убедительно подтверждал теоретически предсказанное явление просветления среды за счет многофотонного резонанса [4], а в дальнейшем, как уже было отмечено в начале статьи, эти факты были еще раз тщательно проверены в прямом эксперименте [2], где изменялись фазы взаимодействующих волн при одно- и трехфотонном резонансе.

Нелинейная интерференция представляет большой интерес как основа принципиально нового метода интерферометрии. Она может служить основой для создания новых нелинейных интерферометров света, высокоскоростных модуляторов света, при оптической обработке информации, в голографии и при управлении фотохимическими реакциями в веществе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Делоне Н.Б. Нелинейная оптика // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 3. С. 94–99.
2. *Ce Chen, Yi-Yan Yin, Elliott D.S.* // Phys. Rev. Lett. 1990. Vol. 64, № 5. P. 507.
3. Делоне Н.Б. Многофотонные процессы // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 3. С. 75–81.

4. Маныкин Э.А., Афанасьев А.М. // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1967. Т. 52, № 5. С. 1246.

5. *Aron K., Johnson P.M.* // J. Chem. Phys. 1977. Vol. 67. P. 5099.

6. Красников В.В., Пшеничников М.С., Соломатин В.С. // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1987. Т. 92. С. 1578.

\* \* \*

Эдуард Анатольевич Маныкин, доктор физико-математических наук, профессор Московского инженерно-физического института, зав. отделом Института сверхпроводимости и физики твердого тела Российского научного центра “Курчатовский институт”, зам. главного редактора “Журнала экспериментальной и теоретической физики”. Область научных интересов: физика полупроводников и диэлектриков, теория сверхпроводимости, лазерная физика, нелинейная оптика и оптоэлектроника. Автор и соавтор свыше 150 научных работ, в том числе шести монографий и учебных пособий, десяти патентов и изобретений, нескольких обзоров и популярных статей.