# К ТЕОРИИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ КОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В НЕЛИНЕЙНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

**Hojiyev Farrux Anvarovich**
IIVning ixtisoslashtirilgan maktab-internati o'qituvchisi
Toshkent shaxar Uchtepa tumani
fhojiyev@list.ru
**Zakirjanova Gulchehra Abdulvahitovna**
ixtisoslashtirilgan maktab-internati o'qituvchisi
Toshkent shaxar Uchtepa tumani
GZakirjanova@inbox.ru
https://doi.org/10.5281/zenodo.7729630

**Абстракт:**Теоретически исследован процесс параметрического усиления коротких (фемтосекундных) лазерных импульсов в кристаллах с регулярной доменной структурой. Основное внимание уделено на формирование сигнального импульса при влияниях дисперсии среды и кубической нелинейности керровского типа. Показано, что незначительное изменение размера доменов от их точного значения, определяющего по когерентной длине, могут значительно увеличить эффективность сигнальной волны. Это объясняется тем, что фазовые сдвиги, вызванные влияниями нелинейности третьего порядка и дисперсии среды (как правило они оба влияют только на обобщенные фазы нелинейного взаимодействия волн), могут частично компенсироваться влиянием «избыточным» волновым числом нелинейной решетки. На основе полученных результатов проанализированы оптимальные значения размера доменов, при которых наблюдается максимальная эффективность генерации сигнальной волны в условиях самовоздействия и нестационарности.

**Ключевые слова: чирп, квази-синхронизм, нелинейный фотонный кристалл, параметрическое усиление**

Неоднократно отмечалось, что в широком смысле к разряду нелинейно-оптических явлений можно отнести все виды явлений, связанных с взаимодействием световых волн со статическими электрическими и магнитными полями, с акустическими волнами и т.п., и в том числе между собой. В этом случае в нелинейную оптику следовало бы включить в качестве составных частей электрооптику, магнитооптику, акустооптику, теорию лазеров и т.д. [1].

В более узком смысле под нелинейной оптикой понимают раздел физической оптики, изучающий явления в пассивных неинвертированных средах, зависящие от напряженности электромагнитного поля (или интенсивности) световой волны. Понимаемая в этом смысле нелинейная оптика, в свою очередь, имеет два аспекта:

- нелинейная оптика как метод изучения нелинейной восприимчивости вещества;

- нелинейная оптика как метод генерации новых оптических частот, т.е. как метод освоения оптического диапазона за счет нелинейно-оптического преобразования оптических частот (полный оптический аналог нелинейной радиотехники).

В настоящем разделе нелинейная оптика будет рассматриваться именно в таком узком смысле.

Начало нелинейном оптики. Годом рождения нелинейной оптики, как раздела физической оптики, принято считать 1926 г., когда СИ. Вавилов и В.Л. Левшин в Берлине в журнале «Zeitschrift fur Physik» опубликовали свою статью по наблюдению просветления среды при резонансном поглощении интенсивного света в веществе [2]. СИ. Вавиловым, по-видимому, впервые было отмечено, что именно резонансные условия позволяют наблюдать нелинейно-оптические эффекты, и именно поэтому он и его сотрудники целеустремленно искали такие эффекты вблизи линий поглощения. Четкую, хотя и качественную картину нелинейно-оптических явлений дал СИ. Вавилов в своей монографии «Микроструктура света» [3], где им был впервые введен термин «нелинейная оптика». Именно в этой книге СИ.Вавилов писал:

«... Физика настолько свыклась с нелинейностью обыденной оптики, что до сих пор нет даже формально строгого математического аппарата для решения реальных «нелинейных» оптических задач».

В этих словах - и констатация факта «линейности» обыденной оптики тех годов и предвидение (за много лет вперед) необходимости разработки специального математического аппарата для нелинейной оптики.

Весьма часто под нелинейной оптикой понимают часть физической оптики, имеющей дело с явлениями, которые описываются нелинейными членами в разложении диэлектрической поляризованности (дипольного момента единицы объема среды) по степеням напряженности электрического поля, т.е. членами со степенью второй и более. При этом, как справедливо указывалось во вступительной статье С.А. Ахманова и Р.В. Хохлова к монографии Н. Бломбергена «Нелинейная оптика» [4], было бы неправильно думать, что экспериментальное наблюдение нелинейно-оптических явлений, связанных с квадратично-нелинейными (и более высоко нелинейными) членами в

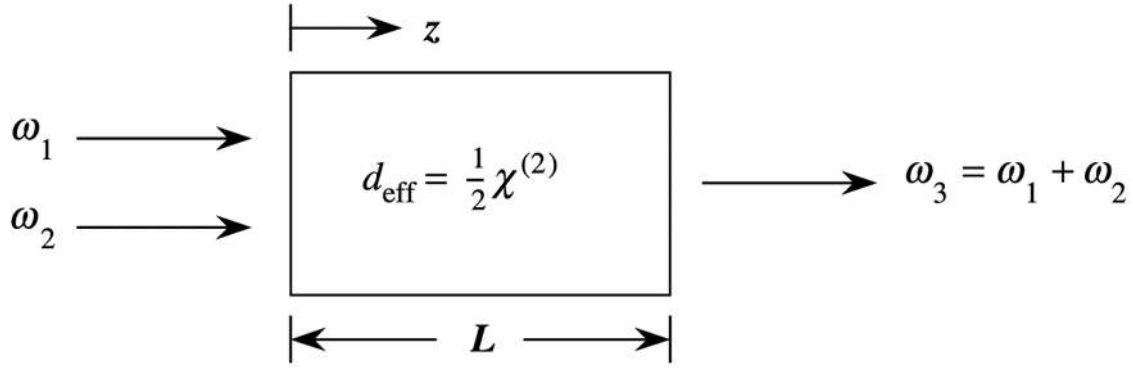
разложении поляризованности по степеням поля, стало возможным лишь в последние годы (с появлением лазеров). Напротив, часть этих эффектов исследовалась еще в позапрошлом веке, например, эффекты Поккельса, Фарадея, рассеяние Мандельштама-Бриллюэна, комбинационное и рэлеевское рассеяние и т.п.

В некотором смысле эти эффекты XIX века можно было бы и не относить к нелинейной оптике, поскольку их протекание в широких пределах не зависит от интенсивности падающего света и может происходить и в весьма малых световых полях (это и обусловило возможность их наблюдения задолго до появления лазеров). С.А. Ахманов и Р.В. Хохлов в предисловии к монографии Н. Бломбергена [4] причислили эти эффекты к так называемой «параметрической оптике», т.е. оптике, изучающей распространение световых волн в средах, параметры которых заданным образом меняются под действием внешних сил. Вместе с тем, если в низкочастотной радиотехникеосуществить такое чисто параметрическое воздействие сравнительно легко (достаточно вспомнить знаменитую «параметрическую машину» Л.И. Мандельштама и Н.Д. Папалекси, см. ссылку [33] в гл. V), то уже в высокочастотной радиотехнике и тем более в СВЧ- и оптическом диапазонах модуляция параметра среды (например, диэлектрической проницаемости) принципиально возможна только с помощью нелинейности среды (например, с использованием зависимости емкости диода от приложенного напряжения или диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля). Таким образом, нелинейно-оптические явления и эффекты «параметрической оптики» здесь смыкаются, по крайней мере, в методическом смысле и при их теоретическом рассмотрении. Поэтому часто предлагается включать параметрические оптические явления в нелинейную оптику, понимаемую тем самым в несколько более общем смысле. По крайней мере, в литературе такая трактовка встречается достаточно часто, и, действительно, исключение из «нелинейной оптики» блестящих работ Л.И. Мандельштама по колебательной трактовке явления комбинационного рассеяния, классических трудов по дифракции света на ультразвуке (их обзор можно найти, например, в книге М. Борна и Е. Вольфа «Основы оптики» [5]), работ СМ. Рытова, Л. Бриллюэна по распространению электромагнитных волн в средах с переменными параметрами и других в определенной мере является заметной потерей.

Развитие нелинейной оптики в «узком» смысле слова (т.е. с исключением «параметрической» оптики) сильно сдерживалось отсутствием достаточно мощных источников света и бурно стимулировалось появлением лазеров. С другой стороны, многие теоретические аспекты, взгляды и точки зрения, получившие затем признание в нелинейной оптике, были сформулированы еще

в долазерную эпоху, в нелинейной радиофизике и, в особенности — в нелинейной теории колебаний и волн. Особую роль сыграли в нелинейной оптике идеи и методы исследования нелинейных волновых процессов в распределенных радиотехнических системах (нелинейных линиях передачи, нелинейных волноводах, электроннвхх пучках в ЛБВ и ЛОВ и т.п.), см., например, [6].

Нелинейные преобразователи частоты. Можно условно представить себе две важные группы нелинейных преобразователей частоты. К первой группе можно отнести нелинейно-оптические устройства, осуществляющие преобразование лазерного излучения на фиксированной частоте в когерентное излучение на одной или нескольких фиксированных частотах. Сюда входят генераторы оптических гармоник и суммарных и разностных частот (ГСЧ, ГРЧ), комбинационные лазерные преобразователи с использованием вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). Ко второй группе относятся устройства, преобразующие лазерное излучение на фиксированной частоте (или перестраиваемое излучение лазеров на красителях) в плавно перестраиваемое когерентное излучение. Сюда входят параметрические генераторы света (ПГС), ВКР-генераторы на поляритонах, а также ге- нераторы оптических гармоник, суммарных и разностных частот перестраиваемого излучения лазеров на красителях (при ГСЧ и ГРЧ совместно с лазером на фиксированных частотах). Далее мы исследуем, как уравнение нелинейной оптической волны, которое мы вывели в предыдущем разделе, можно использовать для описания конкретных нелинейно-оптических взаимодействий. В частности, мы рассматриваем генерацию суммарной частоты в нелинейной оптической среде без потерь с участием коллимированных, монохроматических, непрерывных входных пучков. Мы принимаем конфигурацию, показанную на рис. 2.2.1, где приложенные волны падают на нелинейную среду при нормальном падении. Для простоты мы игнорируем эффекты двойного лучепреломления. Приведенное здесь лечение можно прямо обобщить, включив в него ненормальное падение и двойное лучепреломление.



Волновое уравнение в уравнении (2.1.21) должно выполняться для каждой частотной составляющей поля и, в частности, для суммарной частотной составляющей на частоте ω3. В отсутствие нелинейного источника решение этого уравнения для плоской волны с частотой ω3, распространяющейся в направлении +z, имеет вид

$$\tilde{E}_3(z,t) = A_3 e^{i(k_3 z - \omega_3 t)} + k.q.$$

Тогда мы можем отменить множитель с каждой стороны и записать полученное уравнение в виде

$$\frac{d^2 A_3}{dz^2} + 2ik_3 \frac{dA_3}{dz} = \frac{-4d_{eff}\omega_3^2}{c^2} A_1 A_2 e^{i(k_1+k_2-k_3)z}.$$

Обычно допустимо пренебрегать первым членом в левой части этого уравнения на том основании, что он намного меньше второго. Это приближение известно как приближение медленно меняющейся амплитуды и справедливо всякий раз, когда

$$\left|\frac{d^2 A_3}{dz^2}\right| \le \left|k_3 \frac{dA_3}{dz}\right|$$

Это условие требует, чтобы дробное изменение на расстоянии порядка длины волны света должно быть много меньше единицы. Когда это приближение сделано, уравнение.

$$\frac{dA_3}{dz} = \frac{2id_{eff}\omega_3}{n_3 c} A_1 A_2 e^{i\Delta kz}$$

Роль дисперсии. Роль дисперсии можно пояснить на следующем примере (см. также главы I, II данной книги). Допустим, что мы имеем дело с недиспергирующей средой, в которой распространяется интенсивная монохроматическая акустическая волна (в оптике недиспергирующих сред практически нет). Наличие достаточно сильной диссипации может привести к тому, что волна поглотится ранее, чем наступят сколько-нибудь заметные нелинейные искажения; другими словами, недиспергирующая дисеипативная среда может оказаться адекватной линейной, если диссипация превалирует над нелинейностью. Сильная дисперсия среды означает, что фазовые скорости спектральных составляющих (гармоник) будут сильно различаться, вследствие чего эффективный энергообмен окажется неэффективным и форма первоначально синусоидальной волны не подвергнется искажениям. Действительно, наблюдение в оптике ударных волн вряд ли возможно, однако, эффективная генерация гармоник невысокой степени (второй, третьей), т.е. сравнительно небольшие искажения формы исходной волны, сегодня является «классическим» и весьма эффективным нелинейно-оптическим эффектом.

В настоящее время нелинейная оптика является динамично развивающейся областью физики, которая помимо чисто теоретической системы знаний приобрела также существенную практическую составляющую, что позволило решить ряд важных прикладных и инженерных задач. Исследования нелинейных оптических процессов дали много приложений в физике и математике, способствовали развитию лазерной техники, спектроскопии, оптоволоконных линий связи, фотоники и оптоинформатики, а также нашли многочисленные применения в таких отраслях, как экология и медицина.

**Список литературы:**

1. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
2. Бломберген Н. Нелинейная оптика. – М.: Мир, 1966. – 424 с.
3. Шен И. Принципы нелинейной оптики. – М.: Мир, 1989. – 560 с.
4. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. Прикладная нелинейная оптика. – М.: Физматлит, 2004. – 512 с.
5. Цернике Ф., Мидвинтер Д. Прикладная нелинейная оптика. М.: Мир, 1976. – 262 с.
6. Шуберт М., Вильгельми Б. Введение в нелинейную оптику. Ч. 1. – М.: Мир, 1973. – 245 с.; Ч. 2. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
7. Беспалов В.И., Пасманик Г.А. Нелинейная оптика. – М.: Наука, 1980. – 282 с.
8. Чео П. Волоконная оптика. Приборы и системы. – М.: Энергоатомиздат,1988. – 279 с.