

НЕСКОЛЬКО СЛОВ О НЕЛИНЕЙНОЙ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ НАНООПТИКЕ

С.В. Сазонов

Российский научный центр «Курчатовский институт», Москва

e-mail: sazonov.sergey@gmail.com

Развитие нанотехнологий предполагает, в числе прочего, создание сред с наперед заданными свойствами. В частности, представляют интерес и являются весьма актуальными исследования оптических свойств таких сред. Современные нанотехнологии позволяют создавать полупроводниковые гетероструктуры с уникальными нелинейно-оптическими свойствами при воздействии на них резонансных лазерных импульсов [1]. С другой стороны, среды, состоящие из упорядоченно расположенных нанотрубок, обладают сильной нерезонансной нелинейностью [2]. Здесь уместно напомнить, что частица «нано» обозначает характерный размер исследуемых объектов, составляющий несколько нанометров (1 нанометр = 10^{-9} метра), т.е. несколько миллиардных долей метра. Это порядка десятка атомных размеров.

Изменение физических свойств объектов при уменьшении их размеров до нанометров можно понять из следующих рассуждений. Отношение поверхностной энергии к объемной пропорционально отношению площади поверхности S объекта к его объему V . Пусть характерный размер объекта равен R . Тогда $S \sim R^2$, а $V \sim R^3$. Следовательно, $S / V \sim R^{-1}$. Т.е. с уменьшением размера исследуемого объекта возрастает роль поверхностных эффектов в сравнении с объемными. При размерах порядка нескольких нанометров поверхностные эффекты становятся доминирующими. Этим и определяется радикальное отличие физических свойств нанобъектов от объектов больших размеров, где доминируют объемные эффекты. Здесь, пожалуй, уместна аналогия с водой, пролитой на несмачиваемую поверхность. Большой объем пролитой воды образует своеобразную лужицу, глубина которой значительно меньше размера залитой поверхности. Однако можно уменьшить объем пролитой воды настолько, что она соберется на поверхности в капельку практически сферической формы. Понятно, что, например, оптические свойства (в смысле преломления и рассеяния света) лужицы и капли различны.

Параллельно нанотехнологиям сегодня бурно развивается лазерная оптика все более коротких световых импульсов. В настоящее время можно смело говорить об успешной генерации лазерных импульсов длительностью t_p в несколько фемтосекунд (1

фемтосекунда = 10^{-15} секунд), т.е. импульсов, длительность которых в тысячу триллионов раз короче одной секунды [3].

На стыке этих двух направлений способна получить развитие фемтосекундная нанооптика. Такая оптика предполагает исследование воздействий фемтосекундных лазерных импульсов на среды, образованные коллективами нанообъектов (гетеропереходов в полупроводниках, квантовых ям, квантовых нитей, квантовых точек, нанотрубок и т.д.).

Говоря о фемтосекундных оптических импульсах, надо отдавать отчет в том, что такие импульсы содержат внутри себя всего несколько периодов электромагнитных колебаний. В то же время более длинные пико- и наносекундные импульсы содержат соответственно тысячи и миллионы колебаний. Нано- и пикосекундная оптика получили бурное развитие с 60-х до 80-х годов двадцатого столетия. Фемтосекундная оптика – это сегодняшний день.

Отмеченное отличие фемтосекундных импульсов от своих более длинных собратьев коренным образом сказывается на взаимодействии таких импульсов с веществом [3]. Можно говорить о переходе количества в качество. Дело здесь в том, «длинные» (нано- и пикосекундные импульсы) больше похожи на синусоиды, чем фемтосекундные сигналы, т.к. содержат достаточно много колебаний (рис. 1). Поэтому «длинные» импульсы характеризуются одной частотой, которая называется несущей. Данное обстоятельство является определяющим в том, что «длинные» импульсы взаимодействуют с какой-либо одной структурной характеристикой (модой) вещества, частота которой близка к несущей частоте «длинного» импульса. Выделить же несущую частоту у фемтосекундных импульсов невозможно, т.к. они мало похожи на синусоиду и напоминают, скорее, ее обрубок (рис. 2). Такой обрубок можно создать с помощью большого набора синусоид различных частот. Внутри импульса эти синусоиды в своих колебаниях близки по фазе, поэтому при сложении усиливают друг друга. За пределами же импульса они быстро расфигурируются из-за различия их частот. Как результат, происходит их взаимное гашение. Таким образом, можно сказать, что фемтосекундный импульс содержит не одну несущую частоту, а обладает большим непрерывным набором частот. Чем короче импульс, тем шире данный набор. По этой причине импульсы, содержащие всего несколько колебаний (вплоть до одного) называют также широкополосными. Данное свойство таких импульсов позволяет вовлекать во взаимодействие с ними сразу несколько структурных единиц (мод) вещества. Это принципиально отличает фемтосекундные импульсы от нано- и пикосекундных. Заметим попутно, что пространственная длительность L фемтосекундных импульсов составляет ~

$c \cdot t_p \sim 100 - 1000$ нанометров, где c – скорость света. Т.е. в десять – сто раз превосходит размеры нанобъектов.

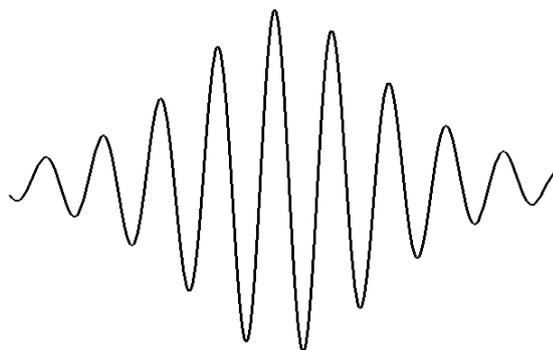


Рис. 1. Схематический вид нано- и пикосекундного импульсов.

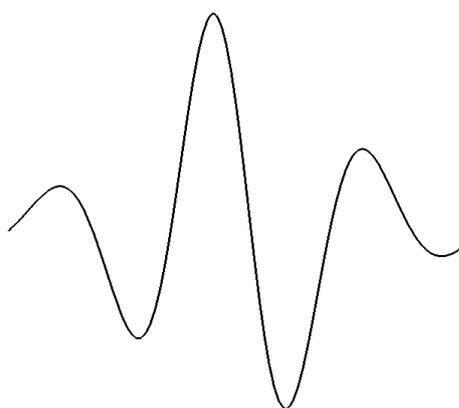


Рис. 2. Фемтосекундный импульс.

К настоящему времени хорошо освоены технологии создания полупроводниковых гетероструктур типа несимметричных квантовых ям (рис. 3).

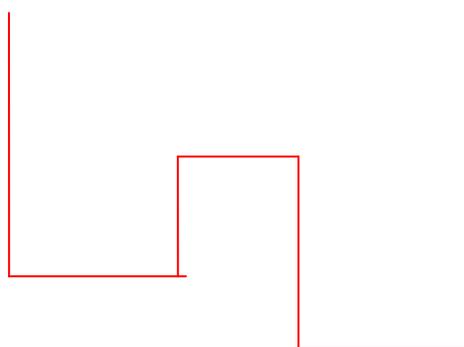


Рис. 3. Несимметричная квантовая яма.

Большинство валентных электронов стремятся занять положение в ее более глубокой части (на рис. 3 - справа). Такая асимметрия в результате создает постоянный дипольный момент (ПДМ), наличие которого радикальным образом сказывается на оптических свойствах среды. Благодаря ПДМ воздействие фемтосекундного лазерного импульса на квантовую яму сводится не только к возбуждению валентных электронов (переводу их на более высокие энергетические уровни), но еще и к динамическому смещению энергетических уровней друг относительно друга [4]. Ситуация здесь аналогична раскачиваемому маятнику, длина которого периодически меняется во времени. Роль раскачивающей силы играет поле фемтосекундного импульса, а длина изменяется благодаря ПДМ. Хорошо известно, что в таких ситуациях возможен параметрический резонанс – резкая раскачка колебаний, если частота изменения длины маятника кратна собственной частоте его колебаний или составляет половину этой частоты. Данная аналогия позволяет понять резонансный механизм генерации высших гармоник (частот, кратных частоте f входного импульса: $f_2 = 2f$, $f_3 = 3f$ и т.д.) и субгармоник ($f_{1/2} = f/2$ и т.д.) лазерного импульса, проходящего сквозь среду несимметричных квантовых ям [4]. Если частота входного импульса лежит в инфракрасном диапазоне, то гармоники могут попасть в видимый диапазон и тогда их можно наблюдать визуально. Субгармоники генерируются в виде широкополосных импульсов терагерцового диапазона частот (1 терагерц = 10^{12} Герц). Длины волн терагерцового излучения лежат в диапазоне от 0.01 мм до 1 мм. Терагерцовое излучение в настоящее время используется в системах безопасности и формирования изображений [5]. При этом оно совершенно безвредно для человека. В настоящее время данный диапазон частот только проходит стадии освоения и можно не сомневаться, что области его приложений в дальнейшем будут расширяться.

Таким образом, в системе несимметричных квантовых ям может быть реализован резонансный механизм генерации высших оптических гармоник, а также излучения терагерцового диапазона.

Совсем недавно [2] эксперименты показали, что в системе упорядоченно выстроенных нанотрубок хризотил асбеста ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$) успешно реализуется нерезонансный механизм генерации второй гармоники входящего светового излучения. В этом случае входная частота не совпадает ни с одной из частот собственных мод нанотрубок. При этом эффективность генерации второй гармоники на порядок превышает таковую в отсутствие нанотрубок.

Нерезонансный механизм генерации второй гармоники или суммарной частоты ничем не отличается от нерезонансного механизма генерации разностной частоты [6]. Как было сказано выше, фемтосекундный импульс содержит в себе широкую полосу частот.

Следовательно, при определенных условиях в среде из нанотрубок хризотил асбеста может эффективно генерироваться излучение на разностных частотах, содержащихся в спектре фемтосекундного импульса. Пусть на среду из нанотрубок в направлении, перпендикулярном их выстраиванию, подается фемтосекундный импульс. Тогда при определенных условиях синхронизма, как показывают наши исследования [7], генерируется широкополосное излучение терагерцового диапазона. Это и есть излучение разностных частот из широкого спектра входного фемтосекундного импульса. Заметим, что при этом спектр входного фемтосекундного импульса непрерывно, пропорционально импульсной интенсивности, смещается в область более низких частот [7, 8]. Данное смещение было совсем недавно обнаружено экспериментально [9].

Таким образом, в системе выстроенных нанотрубок эффективно реализуется нерезонансный механизм генерации высших гармоник и разностных частот из спектров фемтосекундных оптических импульсов в виде терагерцового излучения.

В настоящей работе отмечены лишь некоторые эффекты фемтосекундной нанооптики, которые могут найти приложения в системах эффективной генерации высших гармоник, терагерцового излучения, а также непрерывного преобразования импульсных спектров. Есть все основания надеяться, что возможности данной научной ветви, находящейся на стыке развития нанотехнологий и современной лазерной физики, будут только расширяться.

Литература

1. S. Kočinac, Z. Ikonić and V. Milanović. *Optics Communications*, Vol. 140, p. 89 – 92 (1997).
2. В.И. Белотицкий, Ю.А. Кумзеров, А.В. Фокин. *Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики*, Т. 87, стр. 465 – 469 (2008).
3. T. Brabec and F. Krausz. *Reviews of Modern Physics*, Vol. 72, p. 545 – 591 (2000).
4. С.В. Сазонов, Н.В. Устинов. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, Т. 130, стр. 646 – 660 (2006).
5. P.Y. Han and X. –C. Zhang. *Measurements of Science Technologies*, Vol. 12, p. 1747 – 1765 (2001).
6. D.H. Auston, K.P. Cheung, J.A. Valdmanis and D.A. Kleinman. *Physical Review Letters*, Vol. 53, p. 1555 – 1558 (1984).
7. А.Н. Бугай, С.В. Сазонов. *Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики*, Т. 87, стр. 470 – 476 (2008).

8. С.В. Сазонов, А.Ф. Соболевский. Квантовая электроника, Т. 35, стр. 1019 – 1026 (2005).
9. А.Г. Степанов, А.А. Мельников, В.О. Компанец, С.В. Чекалин. Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики, Т. 85, стр. 279 – 283 (2007).