

РЕЗОНАНСНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ВЫСОКИХ ГАРМОНИК ИНТЕНСИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.В. Стрелков, М.А. Хохлова

Теоретический отдел ИОФ РАН

Создание эффективных источников когерентного излучения в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазоне остается актуальной задачей на протяжении нескольких десятилетий. Наиболее коротковолновое когерентное излучение получено на синхротронах. Недостатками синхротронных источников являются большая длительность импульса и его малая интенсивность. В последние годы достигнут серьезный прогресс в освоении ультрафиолетового и рентгеновского диапазона лазерами на свободных электронах. Интенсивность получаемого излучения гораздо выше, чем на синхротронах, а длительность импульса может лежать в фемтосекундном диапазоне. Для этих источников, однако, характерны огромные габариты и дороговизна, а также невысокая степень временной когерентности генерируемых импульсов. Ещё один класс источников когерентного излучения в этом диапазоне основан на явлении генерации гармоник высокого порядка (ГГВП) при взаимодействии интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов с газами или плазмой лазерного факела. Максимальные номера гармоник могут, в зависимости от конкретных условий, составлять от нескольких десятков до тысяч. Источники когерентного коротковолнового излучения, основанные на ГГВП, обладают рядом преимуществ: относительной простотой, высокой пространственной и временной когерентностью, возможностью контроля длительности импульса и др. *Уникальным* преимуществом таких источников является возможность получения аттосекундных ($1 \text{ ас} = 10^{-18} \text{ с}$) импульсов: как было экспериментально показано в начале двухтысячных годов, при определенных условиях фазы гармоник могут быть синхронизованы таким образом, что, складываясь, поля гармоник образуют цуг аттосекундных импульсов. Являясь наиболее короткими полученными на сегодняшний день электромагнитными импульсами, такие импульсы представляют собой уникальный инструмент для прямого измерения процессов аттосекундной длительности, важных для различных областей физики, а также химии, биологии, прикладных наук и др., что определяет актуальность данной тематики.

Основным фактором, ограничивающим широкое применение ГГВП для получения когерентного коротковолнового излучения, является низкая эффективность генерации, составляющая $10^{-5} - 10^{-8}$ в зависимости от номера гармоники и условий эксперимента. Одним из путей её повышения является использование резонансов генерирующей среды; для усиления *высоких* гармоник представляют интерес переходы в автоионизационные состояния (возбужденные квазистационарные состояния с энергией выше энергии ионизации). Нами была построена квантовомеханическая теория резонансной ГГВП (последовательно изложенная в [1], некоторые результаты были опубликованы ранее в [2-7]), показывающая возможность существенного (до двух порядков) повышения эффективности генерации за счет резонанса. Полученные результаты позволяют интерпретировать резонансную ГГВП как процесс, состоящий из следующих этапов: 1) фотоионизация генерирующей частицы лазерным полем; 2) движение свободного электрона под действием лазерного поля; 3) захват свободного электрона в квазистационарное состояние; 4) переход в основное состояние с излучением кванта гармоники. Основная особенность резонансной ГГВП — увеличение эффективности

генерации вблизи резонанса — связана с высокой вероятностью захвата в автоионизационное состояние электрона, возвращающегося к родительскому иону с энергией, близкой к энергии автоионизационного состояния. Показано, что форма линии резонансной гармоник описывается произведением формы линии этой гармоник, генерируемой в отсутствие резонанса, и множителем, близким к фактору Фано [1].

Для тестирования разработанной теории было проведено численное исследование резонансной ГГВП. Это исследование основано на решении трехмерного нестационарного уравнения Шредингера для одиночного модельного атома (иона) во внешнем лазерном поле. При определенном выборе модельного потенциала в нем имеется квазистационарное состояние, моделирующее автоионизационное состояние реального атома (или иона). Результаты численных расчетов резонансной ГГВП показывают хорошую точность предложенной теории [2-4].

Для анализа перспектив использования резонансов для получения интенсивных аттосекундных импульсов необходимо рассчитать не только интенсивности, но и *фазы* резонансных гармоник. Фаза *нерезонансной* гармоник высокого порядка определяется, главным образом, фазой, набранной электронным волновым пакетом на этапе свободного движения. Особенностью резонансной ГГВП является дополнительный фазовый набег, связанный с участием автоионизационного состояния на этапе рекомбинации. Показано, что этот фазовый набег существенно зависит от отстройки от точного резонанса, и, таким образом, от номера гармоник. Эта зависимость, в частности, может компенсировать разность фаз гармоник, связанную с этапом свободного движения электрона (т.н. "атточирп"). Таким образом, наличие широкого резонанса приводит не только к повышению интенсивности, но и к укорочению аттосекундного импульса, который может быть получен из группы резонансно-усиленных гармоник [1]. Такой эффект может иметь место, например, для гармоник, генерируемых в области выше т.н. "гигантского резонанса" в ксеноне в области около 100 эВ.

Полученные результаты нашли подтверждение в экспериментальных исследованиях резонансной ГГВП. В частности, полученное в наших расчетах превышение эффективности генерации резонансной гармоник над эффективностью генерации нерезонансных гармоник согласуется с результатами экспериментов по ГГВП в плазме лазерного факела, получаемой при абляции различных мишеней [1,3,4]. Максимальное превышение (около 200 раз) достигнуто для 13-ой гармоник при генерации в плазме индия. Кроме того, были проведены измерения фаз гармоник, генерируемых в плазме олова [2], в частности, фазы резонансной 17-ой гармоник. Результаты экспериментов хорошо согласуются с нашими численными расчетами, и удовлетворительно — с аналитическими.

Разработанная нами теория резонансной ГГВП используется для качественного и количественного анализа этого процесса в исследованиях, ведущихся несколькими теоретическими и экспериментальными группами в различных направлениях. Среди них — поиск новых сред для резонансной генерации, резонансная генерация в наночастицах, влияние резонансов на фазовый синхронизм, модификация автоионизационных состояний в лазерном поле (появление "одетых" полей автоионизационных состояний), поляризационные характеристики резонансных гармоник, резонансная генерация лазерным импульсом длительностью в несколько оптических периодов (т.е. в условиях, когда длительность лазерного импульса сравнима со временем жизни автоионизационного состояния) и другие вопросы.

Список публикаций

1. V.V. Strelkov, M.A.Khokhlova, N.Yu Shubin, *Phys Rev A* **89**, 053833 (2014)
2. S. Haessler, V. Strelkov, L. B. Elouga Bom, M. Khokhlova, O. Gobert, J.-F. Hergott, F. Lepetit, M. Perdrix, T. Ozaki, and P. Salieres, *New Journ. of Phys*, **15**, 013051 (2013)
3. R. A. Ganeev, V. V. Strelkov, C. Hutchison, A. Zair, D. Kilbane, M. A. Khokhlova, and J. P. Marangos, *Phys. Rev. A*, **85**, 023832 (2012)
4. R. A. Ganeev, T. Witting, C. Hutchison, V. V. Strelkov, F. Frank, M. Castillejo, I. Lopez-Quintas, Z. Abdelrahman, J. W. G. Tisch, and J. P. Marangos, *Phys Rev A* **88**, 033838 (2013)
5. V. V. Strelkov, M. A. Khokhlova, A. A. Gonoskov, I. A. Gonoskov, and M. Yu. Ryabikin, *Phys. Rev. A* **86**, 013404 (2012)
6. V.V. Strelkov, A. A. Gonoskov, I. A. Gonoskov, and M.Yu. Ryabikin, *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 043902 (2011)
7. A. Dubrouil, O. Hort, F. Catoire, D. Descamps, S. Petit, E. Mével, V. V. Strelkov, E. Constant, , *Nature Communications* **5**, 4637 (2014)
8. V V Strelkov, E Mevel and E Constant, *Optics Express* **22**, 6239 (2014)
9. Jing Miao, Zhinan Zeng, Peng Liu, Yinghui Zheng, Ruxin Li, Zhizhan Xu, V. T. Platonenko, and V. V. Strelkov, *Optics Express*, **20**, N5, 5196 (2012)
10. Vasily Strelkov, Ulf Saalman, Andreas Becker, and Jan M. Rost, *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 113901 (2011).