

Моделирование генерации терагерцового излучения в нанокомпозитах с полупроводниковыми квантовыми точками

О. Федотова¹, А. Гусаков², Г. Русецкий¹, О. Хасанов¹,
А. Федотов³, Т. Смирнова⁴, У. Сапаев⁵, И. Бабушкин^{6,7,2}

¹Научно-практический центр материаловедения НАН Беларуси,
ул. П. Бровки, 19, Минск, Беларусь.

²Институт Макса Борна, ул. Макса Борна, 2а, 12489 Берлин, Германия

³Белорусский государственный университет, проспект Независимости 4, 220030 Минск, Беларусь

⁴Международный экологический институт им. Сахарова БГУ, ул. 23, Минск, Беларусь

⁵Ташкентский Государственный Технический Университет,
ул. Университетская 2, Олмазарский район, 100095 Ташкент, Узбекистан

⁶Институт квантовой оптики Ганноверского университета имени Лейбница,
Welfengarten 1, 30167, Ганновер, Германия.

⁷Cluster of Excellence PhoenixD, Welfengarten 1, 30167, Ганновер, Германия
cowynknight@gmail.com

Импульсное излучение терагерцового (ТГц) диапазона имеет высокий потенциал для изучения колебательных и вращательных переходов, динамики свободных носителей и фоновых резонансов, а также в прикладных установках для лазерной генерации, систем безопасности, спектроскопии, биологии, медицины, сверхбыстрого переключения, управления магнитными доменами, генерации аттосекундных импульсов, ускорения частиц и др [1]. Актуальный вызов состоит в создании компактного источника интенсивного импульсного ТГц излучения, для которого важна разработка схем и устройств, обеспечивающих высокую эффективность преобразования частоты. На данный момент она может достигать нескольких процентов в различных схемах, таких, например, как оптическое выпрямление, двухцветная газо-плазменная схема и другие [2]. Перспективными средами для этих целей являются нанокомпозиты (НК) из-за их высокой нелинейности, открывающей широкий набор возможностей. В наноструктурах, в частности, полупроводниковых квантовых точках (КТ) ZnO, ZnS, CdSe, обнаружены значения собственного дипольного момента (СДМ) $\sim 10^2 - 10^3$ Дебай, что сопоставимо со значениями дипольных моментов перехода между экситонными состояниями. Кроме того, дополнительные переходы между состояниями экситона, разрешенные из-за СДМ, могут играть важную роль в отклике наночастиц, в частности, для генерации новых частот в ТГц диапазоне.

Мы изучаем преобразование частоты лазерного излучения в ТГц диапазон при распространении в НК, состоящих из включений КТ (ZnO) в прозрачной диэлектрической матрице (SiO₂). Предполагается, что несущая частота импульса накачки находится в резонансе с переходом между нижними экситонными уровнями. Разработана теоретическая модель, позволяющая изучать связанные резонансные и нерезонансные механизмы ап-конверсии лазерной частоты в нанокомпозите. Моделирование распространения импульсов проводилось на основе самосогласованной системы для уравнений матрицы плотности (Блоха), описывающей многоуровневые экситонные переходы, и уравнения однонаправленного распространения с учетом

хроматической дисперсии, оптических нелинейностей второго и третьего порядка как основной матрицы, так и нановключений, фотоионизации включений, динамики плазмы свободных электронов и ее влияние на диэлектрическую проницаемость включений. Численное моделирование проводилось с использованием программы SOLPIC, разработанной в рамках проекта RISE-ATLANTIC. Как показывает анализ, для случая меньшего СДМ и входной интенсивности $0,055 \text{ ТВт/см}^2$ выходная эффективность ТГц может достигать $0,23\%$ при распространении на расстояние 50 мкм двух импульсов длительностью 15 фс на центральных частотах $2,26$ и $2,40 \text{ фс}^{-1}$, что можно объяснить значительным вкладом экситонного резонанса. На рис.1 (а, б) показаны результаты для 15 фс -импульса с входной интенсивностью 1 ТВт/см^2 и центральной частотой $\omega_0 = 2,26 \text{ фс}^{-1}$ (FWHM), распространяющегося на расстояния 10 и 50 мкм в НК с СДМ 100 Дебай. Установлено, что терагерцовая часть спектра нарастает с увеличением длины распространения. Для сравнения, модельный случай без наличия СДМ, но с такими же остальными параметрами, представлен на рисунке 1 (с), из которого можно сделать вывод, что эффективность ТГц при той же длине распространения на 2 - 3 порядка выше для случая с наличием СДМ.

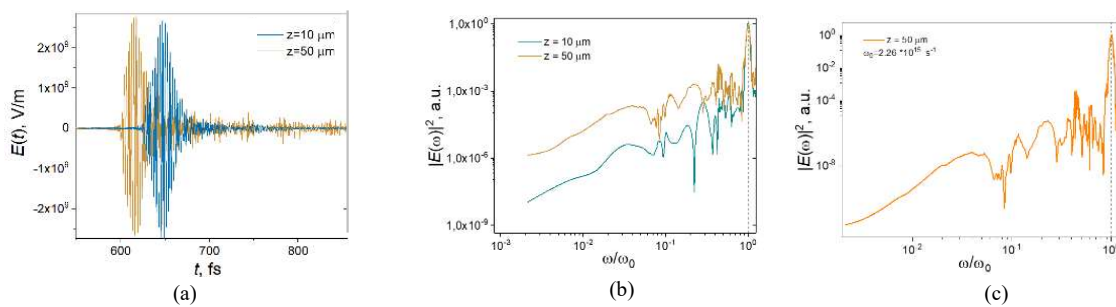


Рис. 1. Временной профиль (а) и спектр (б, с) лазерного импульса, распространяющегося в нанокомпозите на расстояниях 10 и 50 мкм для параметров, приведенных в тексте, с СДМ $d = 100$ Дебай (б) и без СДМ (с).

Работа поддержана проектом H2020-MSCA-RISE- ATLANTIC-823897.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.D. Koulouklidis, et al. // Nat Commun 2020 V. 11, P. 292.
2. S. B. Bodrov, A. N. Stepanov, and M. I. Bakunov // Opt. Express 2019 V. 27, P. 2396.