

03

О природе свечения сахара, возбуждаемого первой гармоникой Nd-лазера

© В.И. Олешко, В.П. Ципилев, А.Н. Яковлев,
Г.В. Мурастов, Н.А. Алексеев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия

e-mail: oleshko@tpu.ru

Поступила в редакцию 26.01.2018 г.

Представлены результаты исследований физической природы свечений, возникающих в прессованных образцах сахара при возбуждении первой гармоникой неодимового лазера (1064 nm, 12 ns). Измерены спектрально-кинетические, пространственные и амплитудные характеристики свечений в режиме одно- и многоимпульсного облучения в диапазоне плотностей энергии 0.012–3.2 J/cm². Обнаружено, что при возбуждении образца первым импульсом наблюдаются два вида свечения — излучение второй гармоники Nd-лазера (532 nm) и свечение плотной низкотемпературной плазмы, образующейся в результате развития низкогопорогового оптического пробоя на поглощающих неоднородностях. Многоимпульсное возбуждение приводит к отжигу поглощающих неоднородностей и увеличению порога оптического пробоя.

DOI: 10.21883/OS.2018.06.46084.20-18

Введение

В настоящее время проводятся интенсивные исследования в области взаимодействия мощных лазерных и электронных пучков с конденсированными средами. Актуальность таких исследований связана с многочисленными научными и прикладными задачами [1–11]. Особый интерес представляют исследования нелинейных эффектов, возникающих в энергонасыщенных и инертных материалах при достижении критической плотности мощности лазерных и электронных импульсов [4–11].

Цель настоящей работы — выяснить физическую природу свечений, возникающих в прессованных микрорекристаллах сахара, при возбуждении первой гармоникой Nd-лазера в режиме одноимпульсного и многоимпульсного возбуждения в диапазоне плотностей энергии 0.012–3.2 J/cm².

Одна из причин выбора материала для исследований состоит в том, что сахар (химическая формула C₁₂H₂₂O₁₁) является инертным веществом, физические свойства которого близки свойствам тетрагидропиритрифта (ТЭН) — бризантного взрывчатого вещества. Сравнение спектральных, кинетических и пространственных характеристик свечения этих объектов, возникающего при лазерном возбуждении с варьируемой в широком диапазоне плотностью энергии импульса, представляет интерес для выяснения механизма лазерного инициирования ТЭН. Кроме того, спектры свечения сахара (например, спектры комбинационного рассеяния), возбуждаемого первой и второй гармониками Nd-лазера, представляют интерес для быстрой диагностики сахара, содержащегося в биообъектах [12].

Экспериментальная аппаратура и методика

В качестве основного метода исследований применялся метод импульсной оптической спектрометрии. Образцы сахара представляли собой прессованные таблетки толщиной 1–2 mm, диаметром 6 mm и плотностью 1.3 g/cm³. Образцы получали из белого кристаллического порошка сахара (ГОСТ 5833–75) с размером микрорекристаллов ~ 0.2–0.7 mm, которые измельчали в фарфоровой ступке до ~ 10 μm и прессовали в стальной пресс-форме при давлении $P = 1.2 \cdot 10^8$ Pa.

В качестве источника возбуждения использовался YAG:Nd³⁺-лазер, работающий в режиме модуляции добротности на основной частоте ($\lambda = 1.064 \mu\text{m}$) с длительностью импульса на полувывсоте ~ 12 ns. Часть лазерного излучения отводилась стеклянными пластинами на калиброванный калориметр ИКТ-1Н и фотоприемник ФЭК для измерения энергии, длительности и формы лазерного импульса. Плотность энергии импульса (H) на поверхности образца измерялась пирозлектрическим измерителем энергии QE25LP-S-MB и варьировалась с помощью калиброванных стеклянных фильтров. Лазерный пучок формировался с помощью проекционной схемы (фокусное расстояние объектива 300 mm) в пятно диаметром 2 mm и воздействовал под углом ~ 70° к плоскости открытой поверхности образца, расположенной в предметной плоскости микроскопа. Эксперименты проводились в атмосферном воздухе при температуре 300 K. Кинетика свечения образцов регистрировалась фотомодулем H5773-04 фирмы Hamamatsu (спектральный диапазон измерений 300–850 nm) и осциллографом DPO 3034. Спектры свечения измерялись с помощью оптоволоконного спектрометра AvaSpec-DUAL в диапазоне 480–900 nm. Пространственное распределение

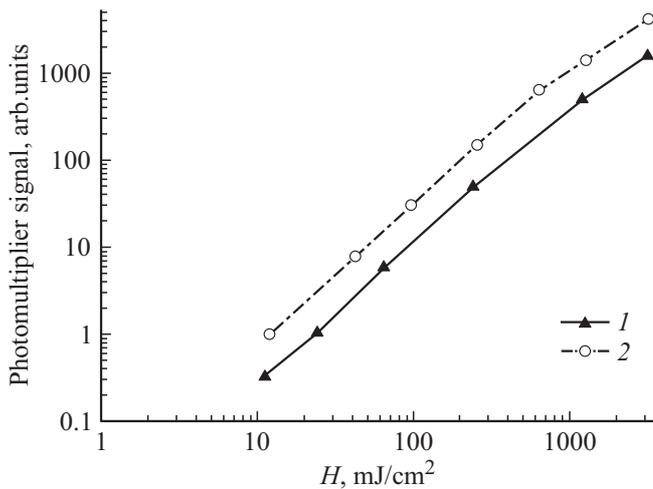


Рис. 1. Зависимость интенсивности зеленого (1) и суммарного (2) свечения сахара от плотности энергии лазерного излучения.

свечения по поверхности образцов фотографировалось зеркальной цифровой фотокамерой Canon EOS 600 D за один импульс возбуждения через микроскоп МБС-10. Одновременно второй фотокамерой Sony DSLR-A500 регистрировалось свечение продуктов абляции, образующихся над поверхностью возбуждаемых образцов при достижении H порогового значения. Морфологию остаточных разрушений регистрировали после каждого импульса возбуждения. Синхронизация двух каналов ФЭУ и ФЭК осуществлялась с помощью импульса двухфотонной люминесценции кристалла CdSe, возбуждаемой первой гармоникой Nd-лазера. Временное разрешение измерительной системы составляло ~ 10 ns, пространственное ~ 10 μm .

Результаты и обсуждение

Визуальные наблюдения показали, что возбуждение образцов сахара лазерными импульсами с плотностью энергии $0.16 \leq H \leq 1.5 \text{ J/cm}^2$ сопровождается зеленым свечением, интенсивность которого увеличивается с ростом H . Плотность энергии лазерного импульса $H \sim 0.16 \text{ J/cm}^2$ является пороговой для визуальной и фотографической регистрации зеленого свечения. Увеличение H в диапазоне плотностей энергии $\sim 1.5\text{--}3.2 \text{ J/cm}^2$ приводит к постепенному преобразованию зеленого свечения в белое. При $H \sim 2.5\text{--}3.2 \text{ J/cm}^2$ регистрируется оптический пробой, сопровождающийся звуковым сигналом (щелчком) и разрушением поверхности образца.

При фотографической регистрации свечения поверхности образцов (с пространственным разрешением) в первом импульсе возбуждения при $H \geq 0.16$ на фоне однородного зеленого свечения регистрируются отдельные белые светящиеся точки (локальные микрозоны свечения), диаметр которых составляет $\sim 20\text{--}40 \mu\text{m}$. Количество, размеры, пространственное положение и

интенсивность свечения локальных микрозон свечения изменяются от образца к образцу и зависят от H . Обнаружено, что повторное возбуждение ранее облученной поверхности образца приводит к уменьшению количества микрозон свечения, а многоимпульсное облучение — к их исчезновению (отжигу).

После отжига микрозон свечения становятся возможными измерения амплитудных, спектральных и кинетических характеристик зеленого свечения. Зависимости интенсивности зеленого и суммарного свечения сахара от H приведены соответственно на рис. 1 (кривые 1 и 2). Кинетика и спектр зеленого свечения при $H = 1.5 \text{ J/cm}^2$ представлены соответственно на рис. 2, *a* и *b* (кривые 1). Кривые 2 соответствуют суммарному излучению, кривая 3 на рис. 2, *a* — импульс генерации Nd-лазера. Видно, что зеленое свечение безынерционно относительно лазерного импульса, а его длительность на полувысоте составляет ~ 12 ns. Максимум зеленого свечения расположен в области ≈ 532 nm, соответствует спектру второй гармоники Nd-лазера, а измеренная полуширина

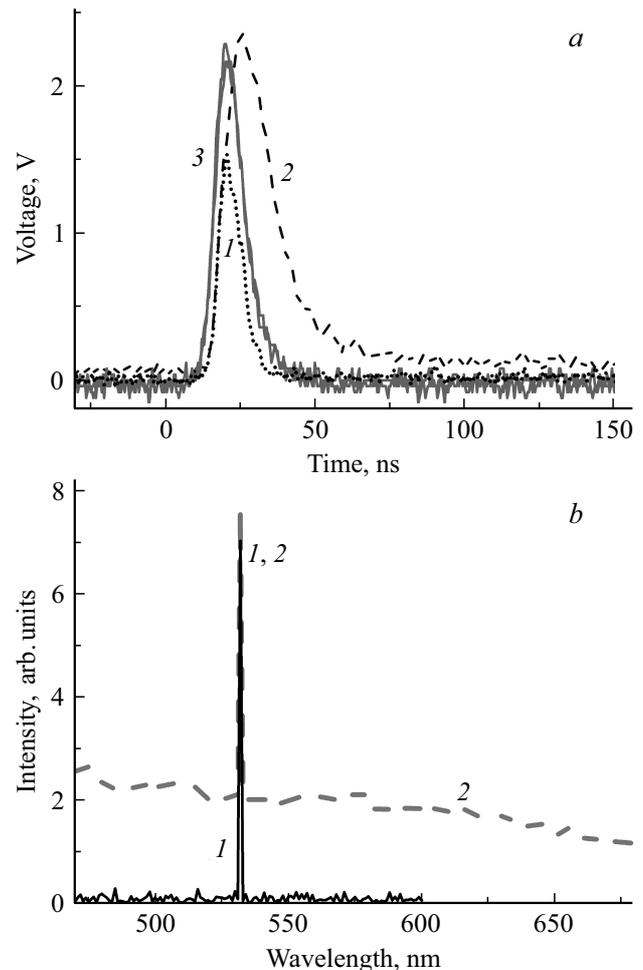


Рис. 2. Кинетические (*a*) и спектральные (*b*) характеристики зеленого (1) и суммарного (2) свечения сахара; 3 — кинетика излучения Nd-лазера. Суммарное свечение регистрируется до отжига горячих точек, зеленое — после.

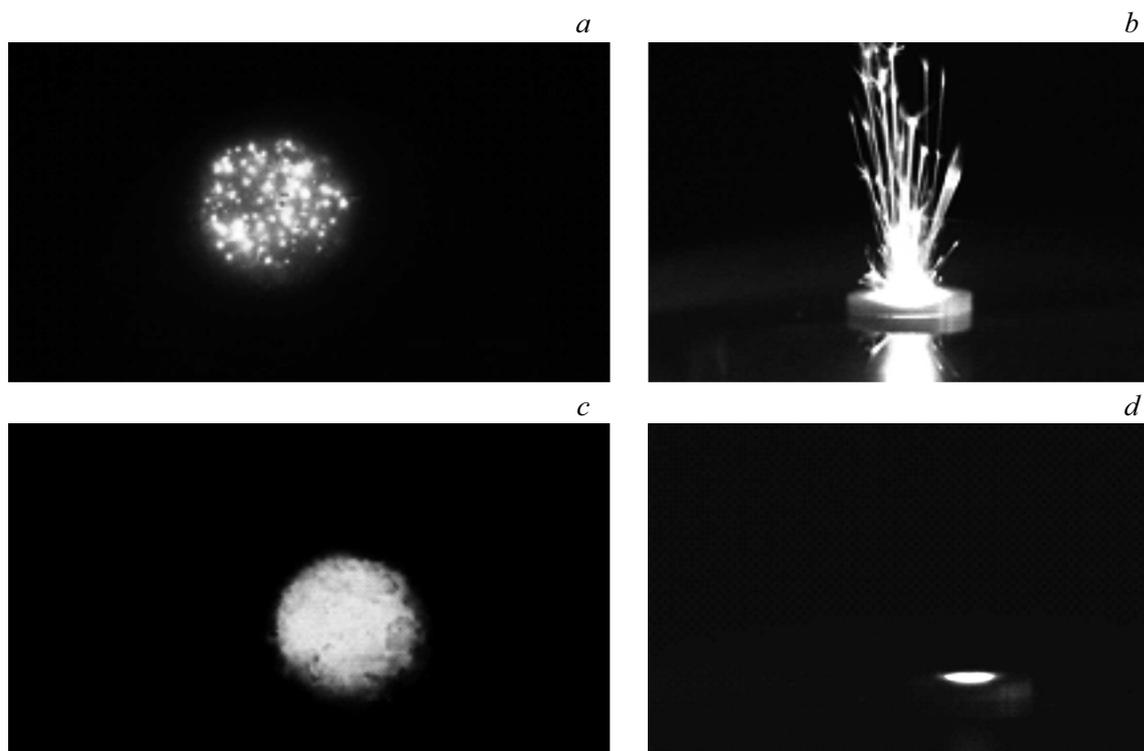


Рис. 3. Фотографии свечения сахара при возбуждении первым (*a, b*) и восьмым (*c, d*) лазерными импульсами: *a, c* — вид со стороны возбуждаемой поверхности; *b, d* — с торца таблетки.

линии излучения на полувысоте составляет 1.5 nm и не превышает спектрального разрешения спектрометра.

При $H \geq 0.3 \text{ J/cm}^2$ в первом импульсе возбуждения над поверхностью образцов регистрируются слабо светящиеся треки. На отдельных фотографиях видно, что источником треков являются наиболее яркие микрозоны белого свечения. Интенсивность свечения, количество и длина треков увеличиваются с ростом H . При $H \sim 2.5\text{--}3.2 \text{ J/cm}^2$ наблюдается слияние белых светящихся точек в макрозоны размерами $> 100 \mu\text{m}$, одновременно регистрируется оптический пробой, сопровождающийся интенсивным свечением продуктов лазерной абляции (рис. 3) и формированием кратеров. Осциллограмма суммарного свечения, регистрируемого ФЭУ в первом импульсе возбуждения (до отжига локальных микрозон свечения) при $H = 3.2 \text{ J/cm}^2$, приведена на рис. 2, *a* (кривая 2). Полуширина импульса суммарного свечения составляет $\sim 25 \text{ ns}$, максимум интенсивности смещен по отношению к максимуму лазерного импульса, а длительность импульса по основанию составила $\sim 80 \text{ ns}$. Установлено, что при $H \sim 2.0\text{--}2.5 \text{ J/cm}^2$ пространственное положение макрозон свечения совпадает с пространственным положением кратеров, фотографии которых регистрировались после каждого импульса возбуждения. При $H \geq 3.2 \text{ J/cm}^2$ образуется один кратер, диаметр которого равен диаметру лазерного пучка.

Совокупность полученных результатов свидетельствует о существовании двух видов свечения прессованных

микросталлов сахара, связанных с нелинейными процессами взаимодействия мощного лазерного излучения с твердым телом. Первый вид свечения (зеленое свечение) связан с нелинейными свойствами кристаллов сахара и преобразованием первой гармоники Nd-лазера ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) во вторую ($\lambda = 532 \text{ nm}$).

Второй вид свечения, локальные микро- и макрозоны белого свечения, образуются, по нашему мнению, в результате низкопорогового оптического пробоя, развивающегося на поглощающих неоднородностях в приповерхностной области образца с формированием локальных очагов плотной низкотемпературной плазмы. Многоимпульсное возбуждение образцов сахара приводит к испарению поглощающих включений — отжигу дефектов и увеличению порога оптического пробоя. Выяснение природы поглощающих неоднородностей, ответственных за инициирование оптического пробоя в образцах сахара, требует проведения дополнительных исследований. По нашему мнению, одной из возможных причин образования поглощающих неоднородностей могут быть загрязнения, вносимые в образцы сахара при его прессовании в металлической пресс-форме. На это указывает отсутствие белого свечения в диапазоне плотностей энергии $0.16 < H < 2.5 \text{ J/cm}^2$ в мелкодисперсных образцах сахара (сахарной пудре), приготовленных в стеклянной кювете и ручной подпрессовке стеклянной пластиной. Отдельные микрозоны белого свечения в этом случае регистрируются только при $H \geq 2.5 \text{ J/cm}^2$.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что возбуждение прессованных образцов сахара первой гармоникой Nd-лазера ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) приводит к формированию двух видов свечения: генерации второй гармоники ($\lambda = 532 \text{ nm}$) и локальных ярко светящихся точек („горячих точек“) со сплошным спектром.

Обнаружен эффект отжига горячих точек при многоимпульсном возбуждении одной и той же области образца и увеличение порога оптического пробоя. Анализ результатов исследования закономерностей образования и отжига горячих точек в образцах сахара позволяет предположить, что горячие точки формируются в результате развития низкопорогового оптического пробоя на поглощающих неоднородностях, роль которых выполняют микрочастицы, вносимые в приповерхностную область образцов в процессе их прессования в металлической пресс-форме. Испарение поглощающих неоднородностей при многоимпульсном возбуждении приводит к увеличению порога оптического пробоя образцов.

Отсутствие зеленого свечения фруктозы и его наличие у образцов сахара различных форм и лекарственных препаратов, содержащих сахар, свидетельствуют о возможности разработки экспрессного способа лазерной диагностики микрокристаллов сахара в пищевой и медицинской промышленности.

Работа выполнена в рамках гранта Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета, номер проекта ВИУ_ИФВТ_73/2017.

Список литературы

- [1] Воробьев В.С. // УФН. 1993. Т. 163. № 12. С. 51–83.
- [2] Вейко В.П., Скворцов А.М., Ту Хуинь Конг, Петров А.А. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 14. С. 79–87.
- [3] Осипов В.В., Соломонов В.И., Платонов В.В. и др. // Квант. электрон. 2005. Т. 35. № 5. С. 467–473.
- [4] Захаров Ю.А., Алукер Э.Д., Адуев Б.П. и др. Предвзрывные явления в азидах тяжелых металлов. М.: ЦЭИ „Химмаш“, 2002. 112 с.
- [5] Таржанов В.И. // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39. № 6. С. 3–11.
- [6] Kuklia M.M., Stefanovich E.V., Kunz A.V. // J. Chem. Phys. 2000. V. 112. N 7. P. 3417–3423.
- [7] Олешко В.И., Лисицын В.М., Скрипин А.С., Ципилев В.П. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 9. С. 37–43.
- [8] Алукер Э.Д., Белокуров Г.М., Кречетов А.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 6. С. 80–85.
- [9] Савенков Г.Г., Морозов В.А., Лукин А.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 6. С. 50–58.
- [10] Адуев Б.П., Белокуров Г.М., Гречин С.С., Лисков И.Ю. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 23. С. 16–21.
- [11] Кригер В.Г., Каленский А.В., Звекон А.А. и др. // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48. № 6. С. 54–58.
- [12] Šugar J., Vouř P. // J. Raman Spectrosc. 2016. Т. 47. С. 1298–1303.