

УДК 343.982.4:544.537

А. В. Водолазов

E-mail: vodolazart@gmail.com

Н. А. Вашкевич

E-mail: ya.vashkevich@yandex.by

НПЦ Государственного комитета судебных экспертиз Республики Беларусь
г. Минск, Беларусь

ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ И СФЕРЫ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ

В статье приводится описание явления лазерной абляции. Разъяснено происхождение термина «лазерная абляция». Приводится ретроспективное описание этапов возникновения и распространения метода лазерной абляции в различных сферах деятельности: технике, реставрации культурно-исторических объектов, исследовании веществ и материалов, повторного использования офисной бумаги для электрофотографических печатающих устройств.

Ключевые слова: бумага, лазерная абляция, реставрация, электрофотографические печатающие устройства.

Термин «абляция» (от лат. «*ablatio*» – отнятие, устранение) является междисциплинарным. В физике им обозначают совокупность сложных физико-химических процессов, результатом которых является удаление вещества с поверхности раздела фаз. В геологии в содержание этого термина вкладывают процесс уменьшения массы ледника или снега в результате таяния и испарения, выветривания или раскалывания (обламывания) айсбергов. В медицине абляция – это направленное разрушение ткани без ее физического удаления. В технике абляция – это унос массы с поверхности твердого тела потоком горячих газов, обтекающим эту поверхность, например, удаления вещества при воздействии на образец металла электрического разряда, потоком горячего газа, плазмы. Таким образом, абляция может протекать в виде эрозии, расплавления, сублимации вещества.

Под термином «лазерная абляция» понимают процесс взаимодействия лазерного излучения с веществом, при котором вещество плавится и испаряется, иногда сублимирует, с образованием паров и низкотемпературной плазмы. Лазерные импульсы продолжительностью в наносекунды или короче, вначале разогревают поверхность материала до точки его плавления, а затем до температуры парообразования. При воздействии же импульсами продолжительностью в пико- и фемтосекунды материал из твердого состояния сразу переходит в газообразное (испаряется), минуя фазу плавления. Причина этого заключается в том, что такая продолжительность импульсов меньше характерного времени релаксационных процессов в материале [1]. Максимально упрощенное описание процесса лазерной абляции можно представить в следующем виде: электроны вещества, возбуждаемые лазером, приобретают энергию, достаточную для их испарения (десятки электрон-вольт), и при этом не успевают передать возбуждение по электронной решетке другим электронам, сохраняя относительно низкую общую (не электронную) температуру вещества.

В 1972 г. американский физик Джон Асмус создал новый способ очистки памятников из мрамора от глубоко въевшихся загрязнений. Традиционные способы реставрации (ме-

ханические, химические, электролитические) могли частично разрушать камень, тогда как твердотельный лазер, использовавшийся Асмусом в эксперименте, не повреждал мраморную статую, подвергавшуюся очистке [2; 3]. Результаты эксперимента были настолько удачны, что Джон Асмус основал профессиональное сообщество LACONA (от – LAsers for the CONservation of Artworks).

Основные преимущества данного метода реставрации заключаются в возможности селективной обработки изделия (в силу различий в характере взаимодействия между излучением, с одной стороны, материалом реставрируемого объекта и поверхностными загрязнениями, с другой), отсутствии механического контакта инструмента с обрабатываемым объектом, высокой скорости обработки, возможности мгновенного прекращения процесса очистки и отсутствии негативного воздействия на окружающую среду. В настоящее время указанный метод используется и для очистки металлических памятников, экспонатов с рисунками, глубоким рельефом, отделками, инкрустацией, декоративными покрытиями, изделий из кожи.

Одними из наиболее сложных объектов для реставрации являются старинные документы и книги, на которых от частого использования остаются многочисленные следы рук, пятна сажи, воска и т. п. Методы механической очистки бумаги (основанные на использовании ластика, резиновой крошки, абразивной шкурки с мелким зерном), если они вообще могут быть применены к объекту реставрации исходя из его физического состояния, негативно влияют на целостность (прочность) бумаги, уменьшая ее толщину, и вызывают образование новых загрязнений в виде пыли [4].

Методам использования лазера при реставрации документов посвящен целый ряд работ [5–9]. В качестве примера успешного использования лазера при реставрации документов можно сослаться на результаты экспериментов, описанных в работе [4]. В ходе эксперимента образцы тряпичной бумаги (изготовленной в XIX в.), различающиеся между собой по композиционному составу (волокнистая составляющая, вид и количество наполнителя и проклейки), обрабатывались с двух сторон листа импульсным твердотельным волоконным иттербиевым лазером. В эксперименте определялись следующие показатели бумаги: сопротивление излому, величина рН водной вытяжки и белизна (коэффициент отражения). Для оценки влияния лазерной обработки на долговечность бумаги было проведено ускоренное термическое старение исследуемых образцов (воздействие температурой 105 °С в течение 72 часов). С целью получения более объективных данных эксперименты по лазерной обработке и оценке ее влияния на бумагу многократно повторялись, а их результаты усреднялись. Исследования показали, что обработка бумаги с использованием импульсно-периодического лазера является эффективным и безопасным способом очистки бумаги, который может быть использован при реставрации книг и документов [4].

Чтобы определить дату изготовления книг и документов, реставратор должен иметь максимально полную информацию о составе бумаги (тип целлюлозы, наполнители, проклейки, красители и т. п.). В настоящее время для исследования молекулярного состава веществ широко применяются методы инфракрасной спектроскопии. Для анализа композиционного состава бумаги в основном используется ИК-спектроскопия. Для определения содержания дополнительных компонентов в бумаге И. А. Балахнина, Н. Н. Брандт, Н. Л. Ребрикова, А. Ю. Чикишев предложили использовать метод лазерной абляции с последующим анализом образца методом КР-микроспектроскопии (конфокально-рамановской). Результаты показали, что метод КР-микроспектроскопии эффективен для исследования состава бумаги, определения типа целлюлозы (хлопковая/древесная). Метод позволяет, не повреждая волокна бумаги, определять различные компоненты бумаги, входящие в ее состав в малых количествах: казеин, кальцит, доломит, лазурит, оксиды титана и т. д. [10].

Методы исследования элементного состава веществ, включающие в себя применение лазерной абляции, активно внедряются и в криминалистику, в том числе в судебное техническое

исследование документов [11]. Для определения элементного состава веществ и материалов используется масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) в сочетании с лазерной абляцией. Данный метод применим для исследования стекла, волокон, наркотиков, драгоценных камней, фарфора, кирпича, золота, серебра, красок, чернил, бумаги [12–14].

Изучение возможностей лазерной абляции проходило также и в контексте очистки бумаги от текста, нанесенного на нее электрофотографическим способом. Данные исследования являются составной частью работ по снижению нагрузки антропогенного воздействия на экологию планеты. Около 1–2% от всех выбросов углерода составляют отходы, возникающие при производстве и переработке бумаги [15; 16]. Прогнозируемый рост потребления офисной бумаги только в Европе составляет 5% в год [17]. Закономерным будет предположение, что в таких развивающихся странах, как Китай и Индия этот показатель будет выше в несколько раз. Политика Европейского союза направлена на сокращение к 2050 г. вредных выбросов при производстве и переработке бумаги на 60–80% от уровня 1990 г. [18].

Принципиальная схема печати на электрофотографическом устройстве включает в себя:

- нанесение на бумагу электрического заряда, соответствующего распечатываемому изображению (тексту);
- нанесение на бумагу твердых частиц тонера (10–1000 млн. сферических частичек диаметром 0,005–0,025 мм общей массой от 50 до 100 мг), удерживаемых на листе электростатическим зарядом;
- плавление частиц тонера внутри устройства при температуре 100–200 °С.

Принципиальное описание возможностей удаления распечатанного текста с бумаги, а также описание проводившихся в этом направлении экспериментов можно обнаружить в зарубежных научных статьях [19–21]. Наряду с механическими и химическими способами для этих целей предлагается использовать лазер.

Успешное удаление лазером краски с поверхности бумаги, без повреждения последней было впервые осуществлено Артуром Шавловым в 1965 г.

Следует отметить, что при вводе в одну из популярных поисковых интернет-систем запроса: «как удалить распечатанный текст с бумаги», в строке результатов указано примерно 14 300 совпадений, что свидетельствует об относительно высоком интересе пользователей, по крайней мере, русскоязычного сегмента сети, к данному вопросу.

Одной из первых обратила внимание на проблему криминалистического исследования документов, подвергшихся лазерной абляции, А. В. Досова. В своей диссертации она ссылается на осуществленные ею эксперименты по определению возможности использования метода лазерной абляции для внесения изменений в содержание документов. Полученные ею данные свидетельствуют об образовании на месте ранее расположенных штрихов текста следов повреждения поверхностного слоя бумаги, которые можно обнаружить при микроскопическом исследовании [22, с. 49–50].

В Государственном учреждении «Научно-практический центр Государственного комитета судебных экспертиз Республики Беларусь» совместно с Институтом физики НАН Беларуси в 2017 г. проводится работа по изучению признаков лазерной абляции в документах, изготовленных электрофотографическим способом. Суть работы заключается в проведении экспериментов с использованием различных документов (видов бумаги и печатающих тонеров) и различных источников лазерного излучения (длина волны, мощность, частота и продолжительность импульсов). Предварительные эксперименты подтвердили фактическую возможность удаления текста с поверхности документа методом лазерной абляции. Это позволило перейти к этапу проведения основных экспериментов, для чего, совместно с сотрудниками отдела экспертиз документов и денежных знаков управления экспертиз документов, денежных знаков и почерка главного управления криминалистических экспертиз центрального аппарата Государственного комитета судебных экспертиз Республики Беларусь, были разработаны специальные мишени (рисунок).

Ивентарный № устр. Тонер:	Устройство:	Дата:	Бумага:
[Black box]	[Black box]	1234567890 <i>КЕНФВАП</i>	1234567890 КЕНФВАП
		1234567890 КЕНФВАП	<i>1234567890</i> <i>КЕНФВАП</i>
[Grey box]	[Grey box]	1234567890 КЕНФВАП	<i>1234567890</i> <i>КЕНФВАП</i>
		1234567890 КЕНФВАП	<i>1234567890</i> <i>КЕНФВАП</i>

№ эксперимента	Длина волны	Мощность импульса	Частота импульса	Продолжительность импульса	Отметки

Рисунок – Мишень для проведения экспериментов

Проведение экспериментов будет включать в себя не только определение оптимальных, с точки зрения эффективности удаления тонера, параметров лазера, но и прогнозирование возможных способов маскировки следов лазерного воздействия, а также выявление и систематизацию криминалистически значимых признаков удаления текстов при помощи лазера.

Список использованных источников

1. О механизме поглощения фемтосекундных лазерных импульсов при плавлении и абляции / М. Б. Агранат [и др.] // Письма в ЖЭТФ. – Т. 83, вып. 11. – С. 592–595.
2. Asmus, J. F. The development of a laser statue cleaner / J. F. Asmus // Lithoclastia 76/2 (1976). – P. 131–141.
3. Asmus, J. F. Light cleaning : laser technology for sur-face preparation in the arts / J. F. Asmus // Technol. Conserv. 3/78 (1978). – P. 14–18.
4. Исследования в консервации культурного наследия [Электронный ресурс] / А. А. Галушкин [и др.] // Лазерные технологии в очистке документов на бумажной основе : теоретические и методические аспекты. Вып. 3. – Режим доступа : <https://culture.wikireading.ru/75465>. – Дата доступа : 10.01.2017.
5. Парфенов, В. А. Лазерная очистка бумаги и пергамена / В. А. Парфенов // Основы реставрации западно-европейского переплета и сохранности фотодокументов. – М., 2008. – С. 37–43.
6. Removal of fungi and stains from paper substrates using laser ceaning Strategies / W. Kautek (eds.) // Lasers in the conservation of artworks (LACONA I), Restauratorenblatter (special Issue), Mayer & Comp. – Vienna, 1997. – P. 79–82.
7. Ochocinska, K. Experimental investigations of stained paper documents cleaned by the Nd:YAG laser pulses / K. Ochocinska, A. Kaminska, G. Sliwinski // Journal of Cultural Heritage 4 (2003). – P. 188–193.
8. Anti-fungal treatment of paper: a model Study with a laser wavelength of 532 nm / E. Pilch [at el] // Laser in the conservation of artworks (LACONA V), Springer-Verlag, Berlin; Heidelberg, 2005. – P. 18–27.
9. An investigation into the effect of wavelength in the laser cleaning of parchment / S. Sportun [at el] // Journal of cultural heritage. – Vol. 1 (2000). – P. 225–232.
10. КР-микроспектроскопия в исследованиях старинных бумажных материалов [Электронный ресурс] / И. А. Балахнина [и др.] // Пятый «Сибирский семинар по спектроскопии комбинационного рассеяния света» / Ин-т автоматизации и электротехники. – Новосибирск, 2015. – Режим доступа : <https://istina.msu.ru/publications/article/11098086/>. – Дата доступа : 10.01.2017.

11. Roger W. Jones, Ph.D.; Robert B. Cody, Ph.D.; and John F. McClelland, Ph.D.J / Differentiating Writing Inks Using Direct Analysis in Real Time Mass Spectrometry // Forensic Sci, July 2006. – Vol. 51. – No. 4. – P. 915–918.
12. Rachel, L. Green. Trace Element Fingerprinting of Australian Ocher Using Laser Ablation Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) for the Provenance Establishment and Authentication of Indigenous Art / L. Rachel, B.Sc. Watling, R. John Watling // Ph.D.J Forensic Sci, July 2007. – Vol. 52. – No. 4. – P. 851–859.
13. Laser ablation coupled with DAPNe-NSI-MS applied to redacted documents / Huynh Vivian [at el] // Science and Justice. – 2016.
14. Нехорошев, С. В. Разработка методов и средств контроля веществ, материалов и изделий в криминалистике : дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.13 / С. В. Нехорошев. – Томск, 2015. – 393 л.
15. Baumert, K. A. Navigating the Numbers : Greenhouse Gas Data and International Climate Policy / K. A. Baumert, T. Herzog, J. Pershing // World Resources Institute, Washington, DC, USA.
16. ПЕД. (1996) Towards a Sustainable Paper Cycle. International Institute for Environment and Development, London, UK.
17. Hekkert M. P., van den Reek J., Worrell E., Turkenburg W.C. (2002) The Impact of Material Efficient End-use Technologies on Paper Use and Carbon Emissions, Resources. Conservation and Recycling 36:241–266.
18. EU. (2005) The Council of the European Union, Press Release 6693/0. The Council of the European Union, Brussels, Belgium.
19. Leal-Ayala, D. R., Paper un-printing: using lasers to remove toner-print in order to reuse office paper / D. R. Leal-Ayala, J. M. Allwood, T. A. M. Counsell // Appl Phys A (2011) 105:801–818.
20. Study of the Conditions of Irradiating Laser for Removal of Toner from Used Paper / Ihori Haruo [at el] // Electrical Engineering in Japan. – Vol. 179. – No. 1. – 2012.
21. Counsell, T. A. M. Desktop paper recycling : A survey of novel technologies that might recycle office paper within the office / T. A. M. Counsell, Julian M. Allwood // Journal of Materials Processing Technology 173 (2006) 111–123.
22. Досова, А. В. Теоретические и практические особенности комплексного криминалистического исследования документов с измененными реквизитами : дис. ... канд. юрид. наук : 12.00.12 / А. В. Досова. – Волгоград, 2014. – 233 л.

Дата поступления: 06.04.2017

A. V. Vodolazov

N. A. Vashkevich

SPC of the State Forensic Examination Committee of the Republic of Belarus
Minsk, Belarus

LASER ABLATION AND ITS SCOPES OF APPLICATION

The description of the phenomenon of laser ablation is given in the article. The origin of the term «laser ablation» is expounded. Retrospective description of the stages of the emergence and spread of the method of laser ablation in different spheres of activities is provided: technics, objects of cultural and historical heritage restoration, examination of substances and materials, recycling of office paper for electrophotographic printing devices.

Keywords: paper, laser ablation, restoration, electrophotographic printing devices.