

найближчому майбутньому їх можна успішно застосовувати в доповнення або на заміну райдужним голограмам.

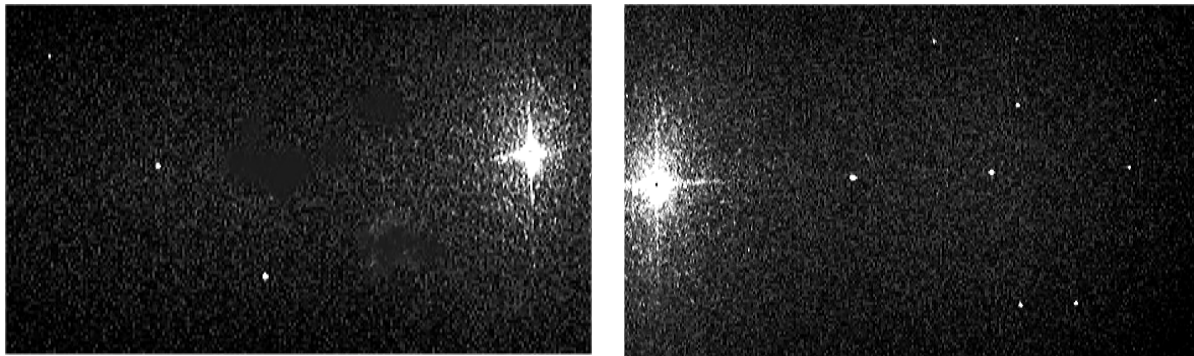


Рисунок 4 – Картина, отримана в результаті фур'є-перетворення відбитого лазерного променя від оптичних міток на основі халькогенідного скла

Література: 1. Javidi B., Horner J. L. *Optical pattern recognition for validation and security verification* // *Opt. Eng.* – 1994. – Vol. 33, № 6. – P. 1752–1756. 2. Патент США № 5,485,312 1/1996 *Optical pattern recognition system and method for verifying the authenticity of a person, product or thing* / Horner et al., G 02B 27/46. 3. L. I. Muravsky, V. M. Fitio, M. V. Shovgenyuk and P. A. Hlushak, “Separation of random phase mask in optical correlator for security verification,” *SPIE Proc.* 3466, pp. 267–277, 1998. 4. L. I. Muravsky, T. I. Voronyak, V. M. Fitio and M. V. Shovgenyuk, “Transformed phase mask and photoanisotropic material in optical correlators applied for security verification,” *Opt. Eng.* 38(1), pp. 25–32, 1999. 5. L. I. Muravsky, Ya. P. Kulynych, T. I. Voronyak, V. M. Fityo and S. A. Kostyukevych, “Transformed phase mask in a hybrid joint transform correlator for security verification”, *SPIE Proc.* 3804, pp. 233–240, 1999. 6. L. I. Muravsky, Y. P. Kulynych, O. P. Maksymenko, T. I. Voronyak, I. Y. Pogan', F. L. Vladimirov and S. A. Kostyukevych, “Comparative analysis of optical and hybrid joint transform correlators for security applications,” *SPIE Proc.* 4113, pp. 194–204, 2000. 7. Коломиец Б. Т., Любин В. М., Шило В. П. Фотостимулированные изменения растворимости ХСП // *Физ. и хим. стекла.* – 1978. – т. 4, № 3. – с. 351–357. 8. Indutnyi I. Z., Stronski A. V., Kostioukevitch S. A., Romanenko P. F., Shepeliavyi P. E., Robur I. I. *Holographic optical elements fabrication using chalcogenide layers* // *Opt. Eng.* – 1995. – v. 34, № 4. – p. 1030-1039. 9. Poleshchuk A. G., Churin E. G., Yurlov Yu. J., Mednikarov B. *Application of an evaporated photoresist (As₂S₃) in the production of kinoform optical elements* // *J. Imag. Science.* – v. 30, № 3. – p. 132–135. 10. Indutnyi I. Z., Kostioukevitch S. A., Shepeliavyi P. E., Stronski A. V., Gladtschenko L. M. “Formation of optical disk direction paths and optical master disks with the help of inorganic resists” *SPIE Proc.* 1983, p.p. 464–465, 1993. 11. Пат. 2008285 Российской Федерации, МКИ⁶ С 03 С 15/00, 23/00. Раствор для негативного травления халькогенидных стекол /Индутный И. З., Костюкевич С. А., Шепелявый П. Е. // *Открытия, изобр.* 1994. – № 4. 12. Пат. № 2165902 Российской Федерации, МКИ⁷ С 03С 15/00, С 03С 23/00. Способ приготовления негативного селективного травителя для резистных слоев халькогенидного стекла As₂S₃ / Венгер Е. Ф., Костюкевич С. А., Шепелявый П. Е., Гольцов Ю. Г., Бородин Ю. О., Крючин А. А., Петров В. В. // *Бюл. Изобр. Российской Федерации.* – 2001. – № 12.

УДК 638.325.231

ЛАЗЕРНАЯ ГРАВИРОВКА БУМАГИ – ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ЗАЩИТЫ

Борис Павлик

МЦ "Институт прикладной оптики" НАН Украины

Аннотация: Методами численного моделирования и аналитическими методами исследована возможность использования лазерной гравировки бумаги в качестве эффективного оптического метода защиты информации. Обсуждены основные процессы формирования многоуровневых защитных изображений. Показано, чем определяются основные характеристики защиты: ее гибкость, универсальность, оперативность нанесения и высокая степень защиты от подделки. Проведено сравнение расчетных характеристик с результатами натурального эксперимента.

Summary: New effective optical method for protection of security information by laser engraving is developed. Using numeral modeling and analytic methods the basic processes of multilevel image information is considered. Shown that the main advantages of proposed technique are the flexibility, universality, high-speed operation and high degree of protection from falsification. The main estimates for image obtained by laser engraving are in the good accordance with the real experiment and results of crystallographic analysis.

Ключевые слова: Лазерная обработка композиционных материалов, лазерная гравировка бумаги, информационная безопасность.

I Введение

Для защиты документов особой учетности (ДОУ) и секретного пользования (ДСП) в настоящее время успешно используется целый ряд технологических приемов, таких как цветная полиграфия, горячее и "золотое" тиснение, компьютерная графика и т. п. В настоящем сообщении рассматриваются физические основы новой перспективной, на наш взгляд, защитной технологии, основанной на особенностях взаимодействия интенсивного лазерного излучения с характерным композиционным материалом, которым является бумага. Работа является продолжением предыдущих исследований автора по лазерной обработке композиционных материалов, в которых он являлся научным руководителем и где, в частности, теоретически и экспериментально изучались процессы фазовых превращений в поле лазерного излучения (отчеты по хоздоговору № 91054/07-23-95 от 1 октября 1995 г. с Минпромполитики Украины и Миннауки НАНУ и проекту № Ф4/1726-97/6/30-97 от 27 сентября 1997 г. Государственного Фонда Фундаментальных исследований Миннауки Украины), которые он выполнял в НИТЦ "Сонар" (впоследствии – Институт прикладных проблем физики и биофизики НАНУ) в отделе квантовой электроники.

Достаточно полной картины взаимодействия лазерного излучения с различными композиционными материалами до сих пор не существует, так как она по крайней мере на порядок сложнее случая взаимодействия с однородными материалами (металлами, диэлектриками) [1–4]. Сложность задачи обусловлена как тем, что композиционный материал состоит из нескольких компонент, обладающих, как правило, (и что наиболее важно для данной задачи) различными теплофизическими (теплопроводность, теплота плавления и испарения) и другими свойствами, так и тем, что структура композита неоднородна по объему. Серьезным препятствием на пути применения лазерной гравировки для защиты информации, нанесенной на бумагу, являются процессы горения или, в общем случае, процессы взаимодействия с атмосферой окружающих газов и образующегося вблизи области воздействия лазерного излучения облака плазмы, сопровождающиеся различными физико-химическими процессами. С другой стороны, детальное изучение последних и возможность их стабильного воспроизведения дает в руки весьма тонкий инструмент дополнительного уровня защиты, которая практически не поддается подделке.

II Постановка задачи. Исходные предпосылки. Компьютерное моделирование

С теоретической точки зрения сложная реальная задача с помощью общих предпосылок была сведена к модельной задаче, которая затем решалась методами численного моделирования, что и позволило установить ряд универсальных зависимостей основных характеристик процесса лазерной гравировки. А именно, для того, чтобы рассчитать распределение тепла в области лазерного воздействия, было предложено неоднородную многокомпонентную среду заменить средой с эффективной (средней) теплопроводностью и коэффициентом диффузии. Последние характеристики получаются путем применения известных статистических методов для усреднения по известным пространственным распределениям для каждой компоненты. Это позволяет упростить исходные уравнения диффузии тепла в образце (а именно, свести их к однородным) и построить поле температур как многопараметрическую функцию безразмерных параметров. Последними являются длительность и скважность лазерного импульса, выраженные в единицах характерного времени, необходимого для распространения тепла на длину диффузии, а также энергия сфокусированного лазерного излучения (которая равна произведению средней мощности импульса на его длительность), отнесенная к эффективной теплоте плавления или испарения материала (в зависимости от режима, в котором происходит удаление вещества из образца). Более точно энергия импульса определяется в общем случае как интеграл от мощности по времени с учетом формы импульса. Количество управляющих параметров задачи зависит от постановки задачи. А именно, если во главу угла ставится точность обработки, тогда может использоваться такой режим, который не является оптимальным по эффективности использования энергии лазера, что, например, возникает, когда удаление идет через сублимирование вещества, но условия взаимодействия излучения и композита, например, из-за недостаточной области перестройки параметров лазера, не являются наилучшими. С другой стороны, если образец обладает большими размерами (например, тара, упаковка товара и т. д.), то важным может оказаться быстрота и эффективность удаления вещества и высокий к. п. д. использования лазерного излучения. В этом случае

толщина зоны воздействия лазерного излучения может не являться приоритетным параметром, а наиболее важна масса удаленного вещества, приходящаяся на единицу вкладываемой мощности. Методами численного моделирования имитировалось и исследовалось также влияние различных форм поддува и прокачки воздуха и инертных газов на скорость плавления и испарения. Эти же приемы использовались как средство избавления от продуктов распада композита, ухудшающих подвод лазерной энергии в зону воздействия. Проводилась оптимизация процесса по важнейшим (перечисленным выше) управляющим параметрам задачи. В частности, определялась область оптимальных значений концентраций и скоростей поддува газа. Важным элементом исследования явилось также исследование зависимости толщины зоны влияния лазерного излучения на характеристики композиционного материала. Здесь необходимо было понять, насколько изменяются как механические (прочность, хрупкость), так и другие физико-химические свойства образца. В частности, важным моментом является выяснение вопроса, чем определяется окрас бумаги, если еще не достигнут порог возгорания бумаги. С этой целью проводился рентгеноструктурный и кристаллографический анализ, который определил спектр (набор) соединений, возникающий при различных режимах обработки бумаги. Появление нестабильных (хрупких) соединений являлось признаком не оптимального режима обработки, хотя, в принципе, были предложены методики, как от них можно было избавиться с помощью, например, несложной последующей механической обработки. Однако при обработке появляются более прочные чем исходный материал окислы и соединения. Это означает, что наблюдается весьма полезное явление – лазерное упрочнение материала, которое мы собираемся исследовать в дальнейшем более детально, а именно, как оно зависит не только от свойств лазерного излучения и режимов его работы, но и от состава бумаги.

Сам процесс лазерной обработки бумаги может быть также чрезвычайно полезен с точки зрения определения свойств и качества бумаги. Однако это вопрос отдельный, пока еще не до конца нами изученный. С другой стороны, несомненно, он будет предметом наших дальнейших исследований, так как является неотъемлемой частью разрабатываемой нами технологии. К тому же эти знания очень полезны для понимания процессов взаимодействия красящегося вещества в лазерном струйном принтере с бумагой и качества печати.

Наиболее сложным оказалась оценка области значений параметров задачи, в которой происходит возгорание бумаги, поскольку сам этот процесс оказался многопараметрическим, неоднозначно зависящим от условий эксперимента. Однако, после детального анализа процесса горения, режимы полученные в результате модельного эксперимента позволяли в реальном эксперименте получать надежно воспроизводимые, повторяемые от случая к случаю результаты, что является необходимой гарантией для создания на основе этих исследований технологий, которые включают в себя как составную часть (причем именно наиболее трудно поддающуюся фальсификации!) регулируемые процессы "подгара", которые сами являются наиболее тонкими (так как требуют очень искусного знания и владения течением процесса лазерной гравировки) элементами защиты.

Следуя теоретическим оценкам удельной теплоты плавления и испарения, коэффициентов температуро- и теплопроводности, а также достаточно скудным экспериментальным данным, известным из литературы и справочников для отдельных компонент композита, были найдены аналитические решения задачи для гауссова распределения по интенсивности сфокусированного на образце лазерного поля при действии на модельный образец с однородными эффективными характеристиками ультракороткого импульса излучения с некой средней мощностью. Для учета реальной формы импульса его длительность разбивалась на определенное число интервалов, и задача решалась численно разностными методами (в частности, методом конечных разностей). Решение на каждом последующем шаге "сшивалось" с решением на предыдущем этапе. В результате этих вычислений было найдено поле температур как функция различных сочетаний двух параметров, например, длительности импульса и интервала между импульсами, или длительности импульса и мощности излучения лазера. По этим характерным зависимостям была проведена процедура оптимизации, а именно, найдены условия, при которых количество удаляемого из образца вещества было максимально на единицу затрачиваемой мощности излучения. При этом еще не достигался порог, при котором процесс приобретает взрывной характер.

III Сопоставление результатов расчета с результатами реального эксперимента.

Стратегия достижения высокой повторяемости в среднем и уникальности в деталях

Для реализации предлагаемого метода и проверки расчетов были созданы две экспериментальные установки.

Первая экспериментальная установка, на которой осуществлялась лазерная гравировка бумаги, состояла из непрерывного лазера на углекислом газе (Фрязино; Россия; отпаянный; с водяным охлаждением; мощность 100 Вт без усилителя и 180 Вт с усилителем), механического прерывателя лазерного луча, для

получения импульсно-периодического режима, а также сканера, осуществляющего пространственную развертку лазерного луча для нанесения изображения на бумагу. Управление режимами работы лазера осуществлялось как вручную, так и с помощью автоматики. Изображение, которое необходимо было нанести на бумагу, либо задавалось с компьютера, либо с помощью сканера вводилось в компьютер, обрабатывалось оптическими методами, оцифровывалось и подавалось на входы разверток сканера, управляющего не сфокусированным лучом лазера. Изображение, полученное с помощью лазерной гравировки на композите, также обрабатывалось оптическими методами, вводилось в компьютер и сравнивалось с исходным корреляционными методами. При необходимости, используя сигнал рассогласования, может производиться коррекция или идентификация изображения на композите.

Вторая экспериментальная установка (Болгария; быстропрокачной CO₂ лазер "Искар-500" с мощностью непрерывного излучения до 300 Вт; в качестве механического модулятора используется вращающийся диск с прокачкой рабочего газа и водяным охлаждением) отличалась тем, что с помощью двухкоординатного стола с числовым программным управлением (ЧПУ) перемещался не лазерный луч, а сам образец. Луч лазера фокусировался на образце короткофокусной линзой (для получения больших плотностей мощности) и был фиксирован в пространстве. Для возможности нахождения оптимального режима лазерной гравировки оба лазера были существенно переработаны. В результате в достаточно широких пределах можно было изменять параметры лазеров, а именно, в "Искаре" была модифицирована система газонапуска (например, жиклеры были заменены ротаметрами), система управления была построена на основе аналоговых элементов, а управляющий сигнал был преобразован из непрерывного в импульсный. Это преобразование осуществлялось с помощью генератора прямоугольных импульсов, формирователя длительности импульсов и коммутирующего транзистора.

В качестве образцов использовалась бумага с различным содержанием каолина – второго после целлюлозы главного компонента бумаги. Волокна целлюлозы создают каркас композита, а промежутки заполнены каолином (матрица). Таким образом, бумагу можно отнести к волокнистым композитам. Чем выше плотность бумаги, тем выше концентрация каолина и меньше целлюлозы. Каолин в бумаге представляет собой вещество, находящееся в кристаллическом состоянии, способное в атмосфере раскаленного воздуха (или другого газа) образовывать различные химические соединения в различных фазовых состояниях, что и показали результаты рентгеноструктурного и кристаллографического анализа. Визуально область лазерного воздействия исследовалась также с помощью электронного микроскопа. Интересно, что в определенных областях параметров лазерного взаимодействия с композитом (в основном при небольших дозах облучения) наблюдалось довольно неожиданное явление – разбухание образца, которое пока не нашло у нас адекватного объяснения. В целом картина воздействия лазерного излучения находится в удовлетворительном согласии с основными явлениями, возникающими при неоднородном нагреве вещества образца, гидродинамикой разлета, плазмохимией в области лазерного фокуса и другими процессами, происходящими в активной зоне. Идеальным режимом является сублимация вещества ультракоротким лазерным импульсом и быстрый снос выбрасываемого вещества из зоны лазерного воздействия так, чтобы следующий импульс не терял энергию при поглощении в облаке вещества и плазмы, образованном предыдущим импульсом, а сам процесс сублимации происходил локально, чтобы вкладываемая лазером в образец тепловая энергия как можно меньше распространялась на соседние области. В другом эффективном режиме, когда используются более длинные импульсы, с этим вредным явлением можно бороться иначе, перемещая лазерный луч за время между импульсами в соседнюю зону, где нет облака, но температура материала от предыдущих импульсов еще достаточно высока, с тем, чтобы КПД процесса лазерной гравировки был достаточно высок. Это достигается или быстрым перемещением лазерного луча с помощью сканера или "летающей оптики", либо же при достаточной скважности импульсов смещением самого образца.

В принципе, конечно, лазерное воздействие на бумагу может приводить не только к удалению *небольшого* количества вещества, как при лазерной гравировке. Оно может сопровождаться и образованием отверстий произвольной формы (лазерное сверление), а также, например, образованием ступенек и плато самых разнообразных форм и конфигураций (лазерное фрезерование). Таким образом, предлагаемая методика дает в руки пользователю широкий арсенал защитных элементов, получаемых при лазерном воздействии на бумагу. Чередую в различных полях (которые можно задать с помощью генератора случайных чисел) различные элементы защиты, можно быть уверенным, что на конкретное изделие (например, с определенным штрих-кодом) будет нанесен с помощью предлагаемой методики уникальный (неповторяющийся при большой выборке случайных чисел) орнамент и что затраты на его подделку никогда не окупятся, так как будут экономически невыгодны, что обычно и требуется доказать в оправдание преимуществ новой технологии.

Вопрос об идентификации наносимого изображения с оригиналом, заложенным в компьютере при его записи, может конечно вставать не всегда, а только тогда, когда объект требует к себе особого внимания, например, ценные бумаги, крупные банкноты и т. д. Методов идентификации может существовать несколько и они, в принципе, также являются дополнительным элементом защитной технологии. Так, например, определенное поле в области защиты наиболее эффективно "прочитывается" только определенным методом, например, корреляционным. Часто же при защите товаров широкого пользования достаточно визуальной схожести с реперным элементом. Заметим, что просто ксерокопированием этого не достигнешь - ведь изображение при лазерной гравировке рельефное! К тому же это изображение для крупных упаковок может иметь заметные размеры и легко идентифицироваться при складировании в несколько ярусов (вспомним проблемы с прочтением штрих-кодов на складах). Ко всему такая защита может носить и чисто художественный (эстетический) характер. Например, красивая композиция, нанесенная на видном месте на изделии из хлопчатобумажной ткани!

IV Выводы

Проведенный в работе физическими и математическими методами анализ возможности использования лазерной гравировки для надежной защиты секретной информации, нанесенной на бумагу, а также хорошее совпадение результатов модельной теории с натурными экспериментами убедительно доказывают перспективность использования этого метода для создания новой высокой защитной оптической технологии. Разрешение метода определяется длиной волны излучения используемого лазера и лежит в области десятков или единиц микрон, что вполне удовлетворяет современным требованиям. В настоящее время более перспективно использовать в качестве источника излучения полупроводниковые лазеры, которые при компактных размерах обладают в непрерывном режиме мощностью в сотни ватт. Учитывая высокую скорость нанесения изображения предлагаемая технология может быть с успехом использована для нанесения защитных элементов на любую упаковку товаров, изготовленную из бумаги и вообще говоря из любого композиционного материала. В последнем случае потребуется узнать лишь только несколько важнейших параметров (температуры плавления и испарения компонент, коэффициентов температуропроводности) и, используя теорию скейлинга, настроить лазерный комплекс на данный материал. При работе с большими сериями образцов стоимость защиты с помощью лазерной гравировки может быть сравнима и даже ниже защиты с помощью голографических защитных элементов. Учитывая невысокую стоимость комплекса для лазерной гравировки, даже не очень богатая фирма может себе позволить позаботиться о защите своих товаров и услуг, не прибегая к третьим лицам.

Литература: 1. Веденов В. А., Гладуш Г. Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов/ – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 208 с. 2. Абильситов А. Г. и др. Технологические лазеры. Справочник в 2-х томах. – М.: Машиностроение 1991, т. 1. – 432 с. 3. Коваленко В. С. Лазерная технология. Учебник. – К.– Выща школа, 1989. – 203 с. 4. Григорьянц С. М. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, – 223 с.