

УДК 535.211

Влияние режимов лазерного удаления тонких пленок с поверхности стекла на его оптические характеристики

Б.А.Лапшинов

*Московский институт электроники и математики
Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики", Москва
E-mail: lbaniipmt@mail.ru
Поступила в редакцию 2 апреля 2013 г., окончательный вариант — 27 июня 2013 г.*

Исследовано влияние длительности импульсов лазерного излучения (200 мкс, 100 нс, 12 нс) на удаление тонких пленок с поверхности оптического стекла К8 и изменение его коэффициента пропускания.

Ключевые слова: технологические окна, лазерное излучение, длительность импульса, тонкая пленка, коэффициент пропускания.

Effect of duration of the pulses of laser irradiation (200 ms, 100 ns, 12 ns) on pollutant thin films removal from the surface of optical glass K8 type as well as the changes of transmission coefficient of this glass have been investigated.

Keywords: technological windows, laser radiation, pulse duration, thin film, transmission coefficient.

Введение

В конструкции всех вакуумных установок присутствуют технологические окна, через которые производят визуальное наблюдение и диагностику протекающих в камере процессов и обрабатываемых материалов. С течением времени внутренняя поверхность этих окон покрывается тонкой пленкой композитных материалов и теряет прозрачность. Если установки работают в периодическом режиме, то существует возможность производить очистку внутренних поверхностей окон между циклами работы установки, при этом наиболее часто используемый метод очистки — это демонтаж окон и их химическая обработка.

Более серьезные проблемы возникают в установках, непрерывно работающих длительное время (дни и месяцы) без разгерметизации рабочей камеры.

Это, например, вакуумные камеры установок термоядерного синтеза — токамаков, стеллараторов и др., — в которых требуется постоянная очистка внутренней поверхности окон без разгерметизации камеры. Так, в стеллараторе Л-2М таких технологических окон более 30, и все они используются для диагностики плазмы и сопутствующих процессов.

Альтернативой химическому методу очистки стекол является удаление загрязняющих пленок с помощью лазерной абляции, инициируемой при облучении пленки сквозь окно без вскрытия камеры [1-3]. Задача, таким образом, заключается в быстром и полном удалении с внутренней поверхности окна пленки любой толщины и из любого материала без повреждения поверхности самого окна.

В большинстве работ по лазерному удалению тонких пленок с поверхности технологических окон отсутствуют сведения о влиянии режимов лазерной

обработки на морфологию поверхности подложек и их оптические характеристики. В частности, отсутствуют сведения об изменении коэффициента пропускания подложек в спектральных диапазонах, используемых для зондирования процессов, протекающих в вакуумной камере. Кроме того, нет данных о возможном проникновении материала пленки в поверхностные слои подложки.

Во многих технологических и исследовательских вакуумных установках в качестве материала технологических окон наряду с кварцевым стеклом используется оптическое стекло типа К8. В данной работе исследовано влияние режимов лазерного удаления тонких пленок с поверхности стекла К8 на изменение коэффициента пропускания в видимом и ближнем ИК-диапазонах длин волн.

Методика эксперимента

Для лазерного удаления пленок использовались образцы из стекла К8 толщиной 3-10 мм с нанесенными тонкими пленками сплава Fe-Ni толщиной 40-50 нм и пленками Cr толщиной ~100 нм. Удаление пленок с поверхности стекла производилось на площади 10×10 мм сканированием лазерного луча с плотностью сканирования (линий/мм), обеспечивающей сплошное удаление пленки. Обработка проводилась импульсами микро- и наносекундной длительности при фокусировании лазерного луча на поверхности пленки на тыльной стороне подложки. Все эксперименты по удалению пленок проводились на воздухе при атмосферном давлении.

Удаление пленки лазерными импульсами микросекундной длительности осуществлялось на установке "БетаМарк 2000" (производство ЦЛТ, Санкт-Петербург) излучением Nd-YAG лазера ($\lambda=1,06$ мкм), мощность излучения 16 Вт. Минимальная мощность лазерного излучения, достаточная для удаления пленки, фиксировалась визуально по появлению плазменного факела с тыльной стороны подложки с нанесенной пленкой. Эксперименты проводились при средней мощности излучения 3-4 Вт при частоте следования лазерных импульсов 3000 Гц. Плотность сканирования по площади 10×10 мм составляла 24 лин./мм. Длительность лазерных импульсов была постоянной и, по нашим оценкам, составляла ~200 мкс.

Был проведен четырехкратный цикл нанесения-удаления пленки сплава Fe-Ni с одного и того же места подложки. Пленки толщиной 40-50 нм наносились методом вакуумного термического испарения. После каждого удаления пленки производилось измерение коэффициента пропускания подложки в видимом

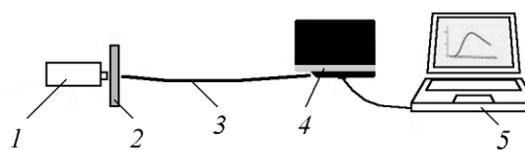


Рис.1. Схема измерения коэффициента пропускания стекла: 1 — источник излучения, 2 — образец, 3 — оптоволокно, 4 — спектрометр, 5 — компьютер.

диапазоне длин волн. Схема измерения показана на рис.1.

Источником излучения служила эталонная вольфрамовая лампа LS-1-CAL со спектром излучения 300-1000 нм, а приемником — малогабаритный дифракционный спектрометр HR 2000+ с кремниевой ПЗС-линейкой фотоприемников, чувствительных в области длин волн 300-800 нм (все приборы фирмы Ocean Optics, США). Излучение источника, прошедшее через образец (стекло К8), доставлялось в спектрометр через оптическое волокно и далее подвергалось компьютерной обработке.

Структура поверхности стекла после удаления пленки исследовалась на растровом электронном микроскопе типа EVO 40 фирмы Zeiss, оснащенном SDD кремниевым дрейфовым детектором X Flash 1106.

Удаление пленок лазерными импульсами наносекундной длительности производилось на установке ARGENT-M10 (ЦЛТ, Санкт-Петербург) на базе иттербиевого волоконного лазера мощностью 10 Вт ($\lambda=1,06$ мкм, $\tau=100$ нс) и установке RMI серии UG Green (модель U-5G, США) с мощностью излучения 5 Вт на базе твердотельного лазера с диодной накачкой ($\lambda=532$ нм, $\tau=12$ нс).

На этих установках производилось однократное удаление пленок Cr с поверхности образца из оптического стекла К8. Удаление производилось так же сканированием луча на площади 10×10 мм, после чего проводились измерения коэффициента пропускания стекла в видимой области спектра (400-800 нм) и в ближней ИК-области (1000-2400 нм). Для измерений в ИК-области использовался источник эталонного излучения HL-2000-CAL со спектром излучения в области 350-2400 нм. Приемником излучения служил спектрометр NIRQUEST с InGaAs детектором (ПЗС-линейка фотоприемников), чувствительным в области длин волн 900-2500 нм (Ocean Optics, США).

Результаты и обсуждение

На рис.2 представлены результаты измерения коэффициента пропускания стекла К8 после четырех-

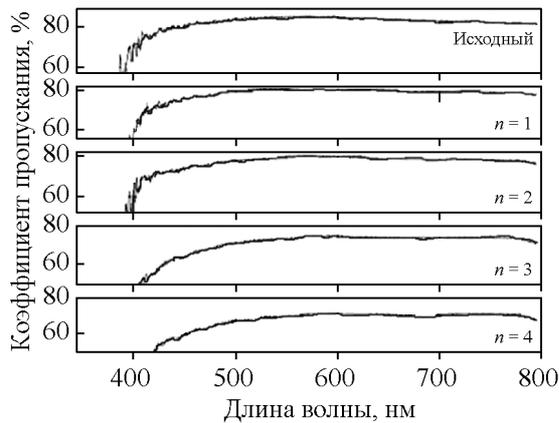


Рис.2. Спектральные зависимости коэффициента пропускания стекла К8 с напыленной Fe-Ni пленкой в исходном состоянии и после лазерного удаления пленки импульсами длительностью 200 мкс. *n* — число циклов лазерного облучения.

кратного удаления Fe-Ni пленок лазерными импульсами длительностью 200 мкс. Следует отметить, что на результаты измерения оказывали влияние воздушные зазоры между источником излучения и образцом и входным отверстием оптического волокна, но их величина была одинаковой при всех измерениях.

Полученные спектры свидетельствуют о монотонном и равномерном уменьшении коэффициента пропускания подложки после каждого цикла удаления пленки. Суммарное уменьшение коэффициента пропускания стекла К8 после четырех циклов лазерного удаления пленки составило ~12-14%.

На рис.3 показана структура поверхности стекла после первого и четвертого цикла удаления пленки. Было установлено, что после первого цикла удаления пленки шероховатость поверхности стекла составляла

$R_z \approx 180$ нм, после второго она увеличилась до ~240 нм, а затем уменьшилась до ~210 нм после третьего и до ~180 нм — после четвертого цикла удаления. Таким образом, при увеличении количества циклов лазерного удаления пленки происходит сглаживание поверхности и уменьшение ее шероховатости (лазерная полировка).

Формирующаяся после лазерного воздействия структура поверхности стекла приводит к значительному рассеянию проходящего лазерного излучения. Следовательно, удаление пленок с поверхности технологических окон вакуумных установок при данных режимах лазерного облучения имеет смысл только в случае их использования для визуального наблюдения за внутренним объемом камеры, в то время как лазерное зондирование находящихся в камере объектов через очищенные таким образом окна может приводить к получению недостоверных результатов.

Результаты рентгеноструктурного анализа системы “пленка-стекло” до и после лазерного удаления пленки представлены на рис.4. Целью таких исследований было определение возможного проникновения материала пленки в поверхностные слои стеклянной подложки, что представляется вполне вероятным, учитывая достаточно высокую температуру в зоне взаимодействия лазерного излучения с пленкой. Как видно из представленных данных, даже после 4 цикла лазерного удаления пленки в поверхностном слое стекла К8 отсутствуют следы Fe и Ni. Присутствие пика Al на рентгенограммах объясняется его нанесением на поверхность образца до проведения электронно-микроскопических исследований.

Результаты изменений коэффициента пропускания стекла К8 после удаления с его поверхности пленки Cr наносекундными лазерными импульсами

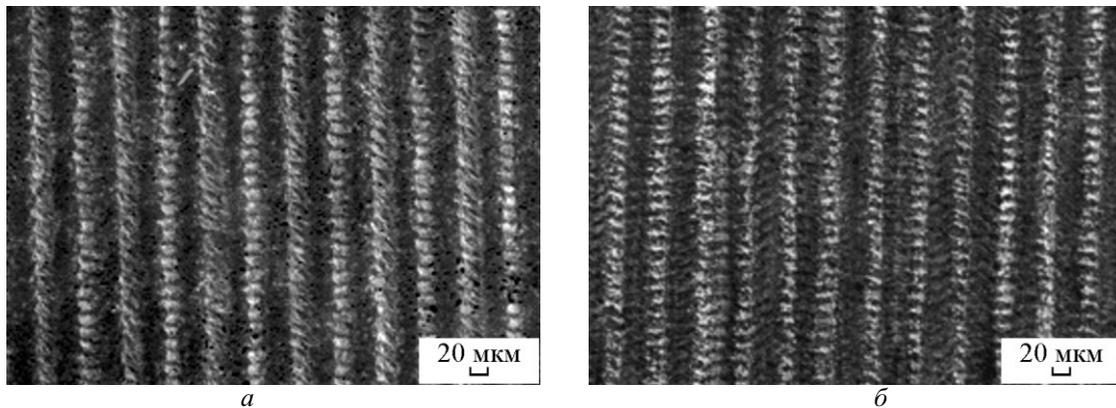


Рис.3. РЭМ изображение поверхность стекла К8 после лазерного удаления пленки Fe-Ni импульсами длительностью 200 мкс: *a* — после первого цикла облучения; *б* — после четвертого цикла облучения.

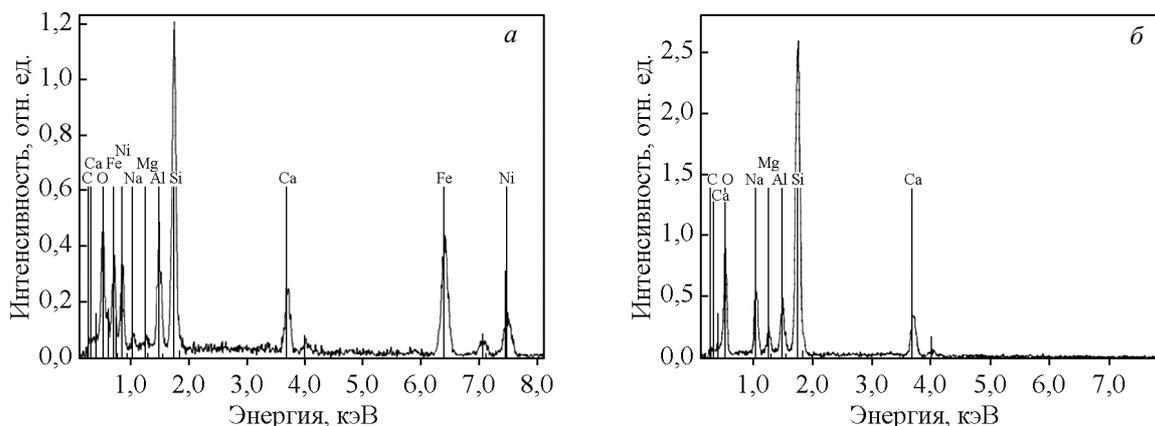


Рис.4. Результаты рентгеноструктурного анализа системы “пленка Fe-Ni–стеклянная подложка” в исходном состоянии (а) и после четвертого цикла лазерного удаления пленки импульсами длительностью 200 мкс (б).

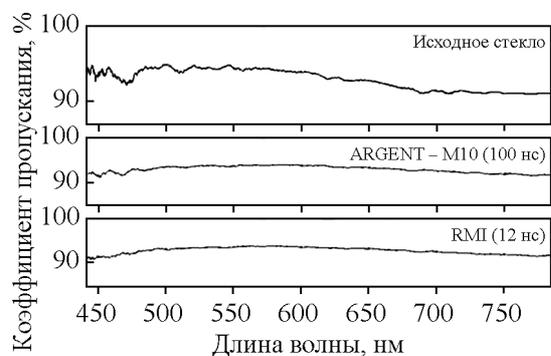


Рис.5. Спектральные зависимости коэффициента пропускания стекла К8 с напыленной пленкой Cr в исходном состоянии и после лазерного удаления пленки импульсами длительностью 100 и 12 нс. Видимая область спектра.

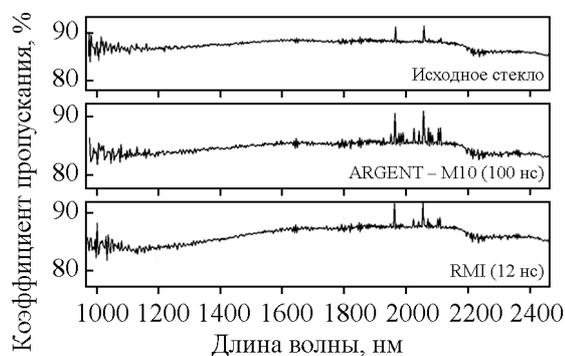


Рис.6. Спектральные зависимости коэффициента пропускания стекла К8 с напыленной пленкой Cr в исходном состоянии и после лазерного удаления пленки импульсами длительностью 100 и 12 нс. ИК-область спектра.

представлены на рис.5 (видимая область спектра) и рис.6 (ИК-область спектра). Установлено, что в видимой области спектра наибольшее изменение коэффициента пропускания происходит в диапазоне длин волн 450-650 нм, и заметные различия между результатами удаления пленки лазерными импульсами длительностью 100 и 12 нс отсутствуют.

В ИК-области спектра происходит практически равномерное уменьшение коэффициента пропускания стекла К8 после удаления пленки, но при длительности лазерных импульсов 100 нс это уменьшение более значительное, чем при облучении импульсами длительностью 12 нс.

Выводы

Экспериментально показано, что коэффициент пропускания стекла К8 зависит от длительности

лазерных импульсов, используемых для удаления тонких металлических пленок с поверхности стекла. При облучении наносекундными лазерными импульсами значение коэффициента пропускания стекла меняется незначительно, тогда как после четырехкратного удаления пленок лазерными импульсами длительностью 200 мкс величина коэффициента пропускания стекла уменьшается на 12-14%.

При длительностях импульсов 200 мкс лазерное облучение стекла с напыленной Fe-Ni пленкой не приводит к проникновению материала удаляемой пленки в поверхностные слои стеклянной подложки.

Для удаления пленок с поверхности оптически прозрачных подложек без изменения их оптических характеристик требуется использовать лазерные установки с более короткими (нано- или пикосекундными) импульсами.

Работа выполнена в ФГБНУ “НИИ Перспективных материалов и технологий”, Москва.

Литература

1. Narihara K., Hirokura S. Cleaning of Thomson scattering window by a laser blow-off method. Rev.Sci.Instrum., 1992, v.63, No.6, p.3527-3528.
2. Brown B.W., Gowers C.W., Nielsen P., Schunke B. Window transmission monitoring and cleaning schemes used with the light detection and ranging Thomson scattering diagnostic on the JET tokamak. Rev.Sci.Instrum., 1995, v.66, No.4, p.3077-3078.
3. Горбунов А.В., Классен Н.В., Вуколов К.Ю., Орлинский Д.В. Исследование воздействия импульсного лазерного излучения на кварцевое стекло с CD-пленками на поверхности в вакууме. Вопросы атомной науки и техники, сер.: Термоядерный синтез, 2005, вып.2, с.30-38.