

# ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРАМИ: СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА

С. Джакшик, доктор, ULT AG, С. Блей, ILK,  
Дрезден

В передовых технологиях производства тугоплавкого стекла, структурирования тонких пленок для фотovoltaики и электродов для литий-ионных батарей используется лазерная обработка ультракороткими импульсами. Понимание природы возникающих при лазерной обработке испарений – важный фактор в прогнозировании качества продукции, безопасности персонала и срока службы промышленного оборудования.

**В** современном производстве высокотехнологичных продуктов все чаще стали вести обработку материалов с помощью лазеров с ультракороткими импульсами благодаря возможности добиться требуемого качества обработки материала, не доводя его до расплавления. Более глубокое понимание процесса испарения материала при лазерной обработке играет важную роль в вопросах экологии, безопасности и здоровья персонала. Производство тугоплавкого стекла, структурирование тонких пленок для фотovoltaики и электродов для литий-ионных батарей – в этих, да и практически во всех других передовых технологиях используется лазерная обработка ультракороткими импульсами [1-6].

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Представленное здесь исследование было выполнено с использованием фемтосекундного лазера с длиной волны 1064 нм [3]. Изучалась корреляция между типом удаляемого материала, расположением частиц по размерам, а также их концентрацией. В частности, была оценена разница между размерами испаряемых частиц

# LASER FUMES IN FEMTOSECOND LASER PROCESSES – PRODUCT, PROCESS AND ENVIRONMENT CONSIDERATIONS



Dr. S. Jakschik, ULT AG, S. Blei, ILK Dresden

The laser processing ultrashort pulses are used for advanced technologies of making of high-melting glasses, structuring of thin films for photovoltaic and electrodes for lithium-ion batteries. The understanding the nature of the arising laser fumes is major factor in predicting of product quality, safety of personnel and industrial equipment life.

## INTRODUCTION

Advanced laser processes find increased utilisation in production processes. The latter fosters an in depth understanding of laser fumes, which are a major factor of product quality, machine life and environmental/safety and health considerations. Short pulse laser processes are focused on non-melting preparations. On this basis, exciting new applications arise. Starting from hard-glass manufacturing, over thin film photovoltaic patterning to Lithium Ion Battery electrode structuring virtually every advanced technology relies on ultra-short pulse laser processes [1-6].

## EXPERIMENT

The presented study was performed on a femto second laser with a wavelength of 1064 nm [3]. Correlations between type of ablated material, particle size distribution as well as particle concentration have been investigated. Especially, the difference in particle size between steel and plastic has been evaluated.

The aerosol resulting from laser material processing was captured close to the source and sucked towards a filter system. Particle size distribution was determined continuously using an Engine Exhaust Particle Size (EEPS) which



**Рис.1.** Система вытяжки и фильтрации LAS-260 для процессов лазерной обработки ультракороткими импульсами  
**Fig.1.** Extraction and filtration system LAS-260 for ultra-fast laser processes

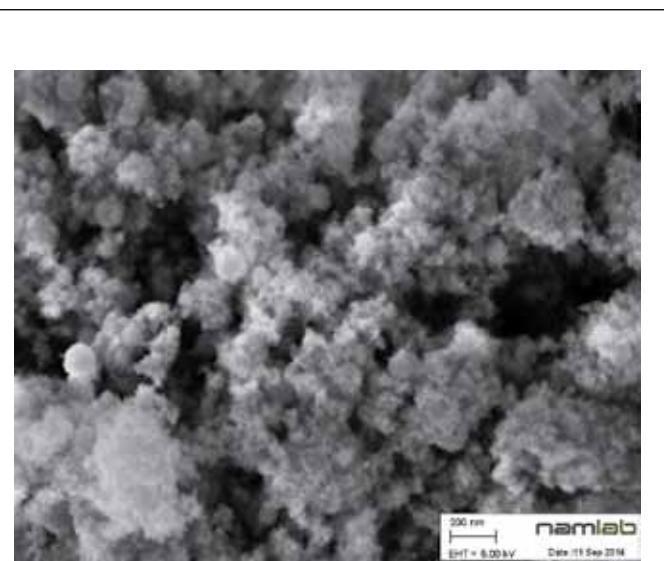
стали и пластика. Взвесь, образованная в результате лазерной обработки, захватывалась вблизи источника и перемещалась к системе фильтров. Распределение частиц по размерам определялось непрерывно с использованием системы измерения размеров взвешенных частиц (Engine Exhaust Particle Size – EEPS) – в диапазоне от 5,6 до 560 нм. Положительно заряженные частицы двигались в электрическом поле в направлении электрометров, которые регистрировали их заряд. Было принято, что заряд частицы пропорционален площади ее поверхности. В соответствии с подвижностью частиц в электрическом поле они достигали различных электрометров. Исходя из величины электротоков, рассчитывалось распределение частиц по размерам. Кроме того, с помощью метода вторичной электронной микроскопии (SEM) исследовались формы образцов частиц, взятых с поверхности фильтров.

Неочищенный газ был отфильтрован с помощью системы LAS-260 (рис.1), оснащенной гофрированным фильтром грубой очистки серии F9. Данный гофрированный фильтр имеет

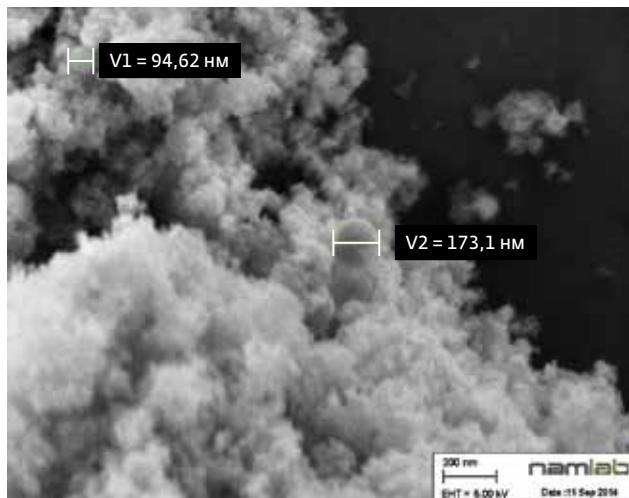
измерения частиц в диапазоне от 5,6 до 560 нм. Для этого образец был проанализирован с помощью прибора. Частицы в образце были положительно заряжены и двигались в электрическом поле к электрометрам, где их заряд был определен. По величине электротока определялось распределение частиц по размерам. Далее образец был исследован с помощью вторичной электронной микроскопии (SEM) для анализа формы частиц, взятых с поверхности фильтров.

Система LAS-260 была использована для очистки газа от частиц, образованных в результате лазерной обработки. Для этого газ был прошел через фильтр F9, состоящий из гофрированного фильтра грубой очистки. Гофрированный фильтр имеет измерения частиц в диапазоне от 5,6 до 560 нм. Для этого образец был проанализирован с помощью прибора. Частицы в образце были положительно заряжены и двигались в электрическом поле к электрометрам, где их заряд был определен. По величине электротока определялось распределение частиц по размерам. Далее образец был исследован с помощью вторичной электронной микроскопии (SEM) для анализа формы частиц, взятых с поверхности фильтров.

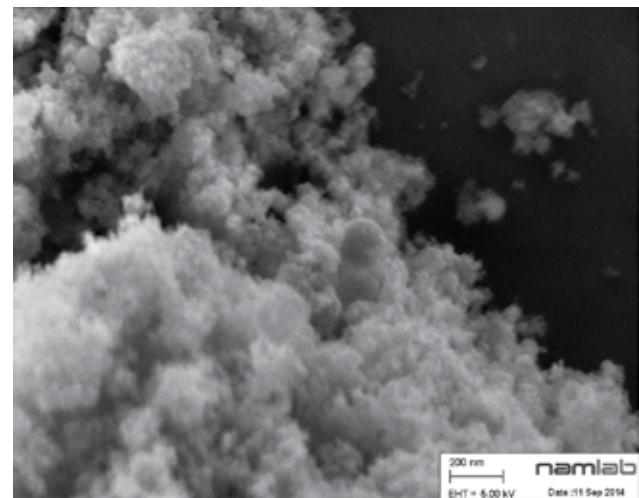
Дополнительно, производительность фильтра LAS-260 была определена. Для этого лазер был установлен в стационарных условиях и концентрация частиц в сыром газе и очищенном газе измерялась с помощью метода EEPS.



**Рис.2.** Изображение частиц стали, полученное в результате процесса абляции с использованием фемтосекундного лазера (первая область)  
**Fig.2.** Particles of steel from an fs ablation process (first location)



**Рис.3.** Изображение частиц стали, полученное в результате процесса абляции с использованием фемтосекундного лазера (вторая область)  
**Fig.3.** Particles of steel from an fs ablation



**Рис.4.** Изображение частиц пластика, полученное в результате процесса абляции с использованием фемтосекундного лазера (первая область)  
**Fig.4.** Particles of plastic from an fs ablation process (first location)

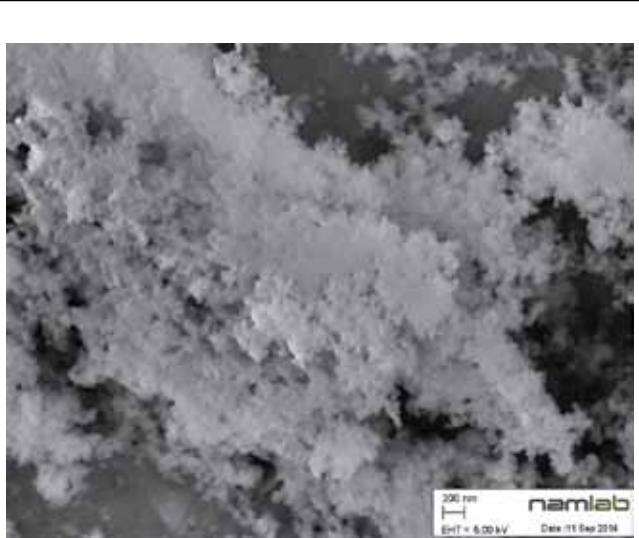
большую площадь поверхности для обеспечения длительного срока службы. Фильтр второй ступени класса HEPA H14 пропускал только 0,005% частиц от общего потока. Далее поток пропускался через фильтр на основе активированного угля для удаления вредных газов, образовавшихся в результате процесса лазерной обработки. Дополнительно была определена производительность системы LAS-260. Для этой цели лазер был переведен в стационарный режим работы. Производились измерения неочищенного и очищенного газов с помощью EEPS.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

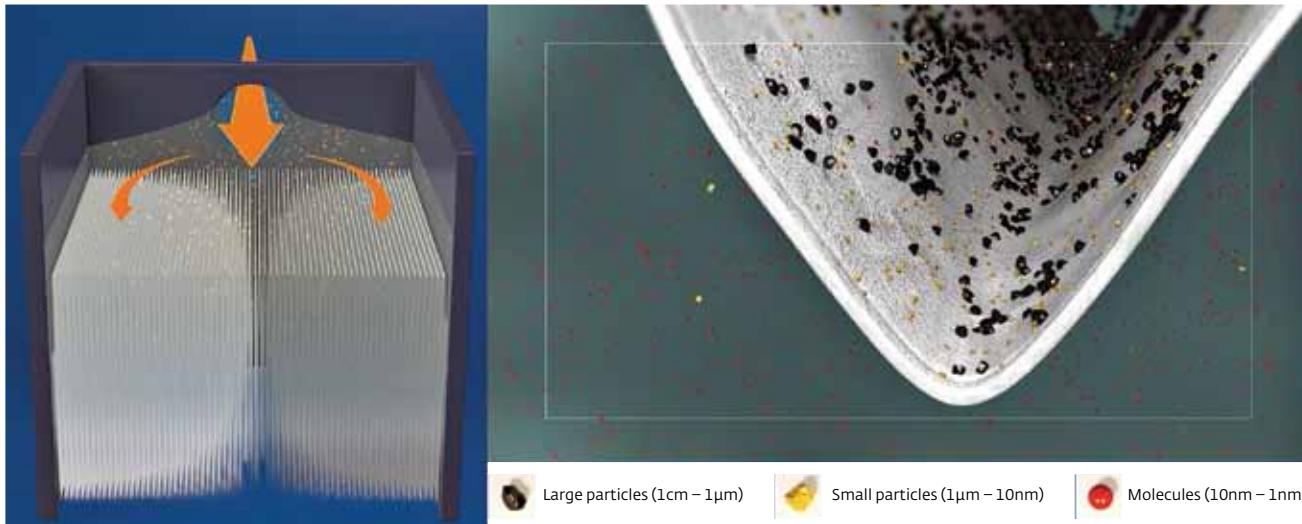
На рис.2-5 показаны изображения, полученные методом SEM, где определяется форма исследуемых частиц. Как и предполагалось, большинство этих частиц не были расплавлены. Однако некоторые частицы оказались полусферическими, что является признаком достаточности тепловой энергии для плавления этого материала. Размеры частиц имеют малую величину, порядка 100-200 нм. В сравнении с металлическими частицами пластиковые примеси выглядят меньше. Они образуют небольшие агломерированные пластины на фильтре. Частицы имеют кубическую форму. Процесс формирования пластин может быть вызван тепловой энергией на стадии агломерации на фильтре.

## RESULTS AND DISCUSSION

The figures 2-5 illustrate the particle shape, as seen in SEM investigations. As expected the majority of these particles is none melted. Though, a small amount of the metal debris proved to be hemispherical, which is a sign for



**Рис.5.** Изображение частиц пластика, полученное в результате процесса абляции с использованием фемтосекундного лазера (вторая область)  
**Fig.5.** Particles of plastic from an fs ablation process (second location)



**Рис.6.** Принцип удерживания частиц фильтром F9 в системе LAS-260  
**Fig.6.** Filter principle of F9 pre-filtration in LAS-260

Основываясь на этих данных, технология фильтрации должна быть пересмотрена. В процессе вытяжки требуется принять во внимание высокую кинетическую энергию частиц. В особенности это касается частиц с небольшими размерами, которые имеют высокое ускорение. Основное правило состоит в том, чтобы переместить точку вытяжки выше для захвата мелких частиц нанометрового диапазона. В связи с тем, что размер этих частиц составляет порядка нескольких нанометров, они могут проходить через аэрогематический барьер, что способно

sufficient thermal energy to melt this material. In any case the size of these particles is very small, in the range of  $d=100\ldots200$  nm.

In contrast to the metal process the plastic debris seemed to be initially smaller, though it formed small agglomerated plates on the filter. The particle shape is mostly cubic. Forming plates can be caused by thermal energy during the agglomeration phase on the filter.

Based on these findings filter technology has to be revised. Starting from extraction; the high kinetic energy of these particles has

нанести вред здоровью человека. Поэтому стандартные технологии фильтрации во многих случаях не подходят для очистки воздуха. На рис.6 показан принцип фильтрации частиц, который реализован в установке LAS-260; большинство частиц удерживается в фильтре грубой очистки (F9), что обеспечивает низкие эксплуатационные затраты для пользователя.

На рис.7 показаны результаты, полученные системой EEPS в ходе абляции пластика. Статистический максимум образуют частицы с размером около 90 нм, имеющие концентрацию порядка  $3\ldots4 \cdot 10^5$  частиц на кубический сантиметр. Это значение превосходит допустимые концентрации для обеспечения высокого качества продукции и сохранения здоровья персонала. Использование системы фильтров в установке LAS-260 показало, что концентрация частиц в очищенном газе находится на том же уровне, что и референсный сигнал, то есть  $<<10^2$  частиц на кубический сантиметр. Таким образом, стало возможным добиться высококачественной очистки воздуха при лазерной обработке материалов.

## ВЫВОДЫ

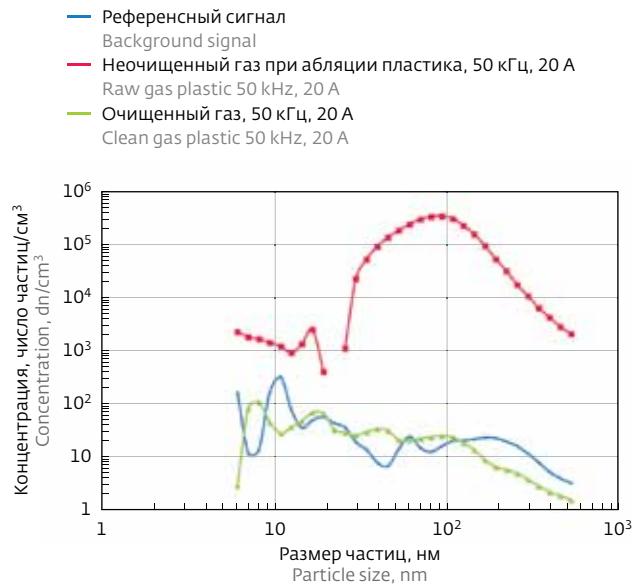
В работе были проведены исследования распределения частиц по размерам в ходе обработки материала сверхбыстрым лазером, работающим в фемтосекундном диапазоне. В ходе измерений были зарегистрированы частицы с характерными размерами 50–200 нм, их концентрация составляла до  $10^6$  частиц/см<sup>3</sup>. С использованием новой установки LAS-260, содержащей гофрированный фильтр грубой очистки и НЕРА фильтр тонкой очистки, удалось достичь осаждения более 99% частиц. Стоит отметить, что для снижения энергозатрат в случае обработки нетоксичных и немутагенных материалов очищенный воздух может возвращаться в рабочее пространство.

\*\*\*

Авторы выражают признательность сотрудникам института Фраунгофера (Дрезден) за предоставление лазера для проведения экспериментов, а также Министерству Образования Германии за финансовое обеспечение части данной работы, входящей в проект MWT.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Leitz K. H., Redlingshöfer B., Reg Y., Otto A., Schmidt M. Metal ablation with short and



**Рис.7.** Данные EEPS о концентрации частиц очищенного и неочищенного газа, выделяющегося при обработке пластика сверхбыстрым лазером (чистый газ был получен с помощью системы фильтрации LAS-260)

**Fig.7.** EEPS data of raw – and clean-gas during preparation of plastics with an ultra-fast laser (Clean gas was filtered by particle filter system LAS-260)

to be taken into account. Small particles are faster due to kinetic impact. The basic rule of extracting the fumes close to the source needs to be extended to another extraction point further up for capturing the small particles in the nm range as well.

As the size of these particles is mainly in the range of nm they can enter the lung-blood barrier, causing high risks on health. Therefore standard filter technique is in many cases not suitable for air cleaning. Figure 6 depicts the basic principle of particle filtration as used in LAS-260. As demonstrated the majority of the particles are kept in the F9 filter, ensuring low maintenance cost for the operator.

Figure 7 depicts the measurement results of EEPS during the plastic process. The statistic maximum of plastic particles was at  $d=90$  nm with a concentration of  $3\ldots4 \cdot 10^5$  particles per cubic centimetre. This value is well above acceptable concentrations for high product quality and operator health. By employing the filter sandwich of LAS-260 the clean gas was

- ultrashort laser pulses. – Physics Procedia, 2011, Bd. 12, S. 230-238.
2. Hänel J., Bleul K., Zolk M., Keiper B., Petsch T., Bonitz J., Kaufmann C. Ultrakurzpuls-Laserbearbeitung von Silizium-Mikrosystemen. – MikroSystemTechnik, 2011.
  3. Kaspar J., Luft A., Nolte S., Will M., Beyer E. Helical drilling of silicon wafers with ns to fs pulses: Scanning electron microscopy and transmission electron microscopy characterization of drilled through-holes. – J. Laser Appl., 2006, v.18, 85; <http://dx.doi.org/10.2351/1.2164480>.
  4. Engelhart P., Hermann S., Neubert T., Plagwitz H., Grischke R., Meyer R., Klug U., Schoonderbeek A., Stute U., Brendel R. Laser ablation of SiO<sub>2</sub> for locally contacted Si solar cells with ultra-short pulses. – Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2007, Bd. 15, № 6, S. 521-527.
  5. Weiler S., Sutter D., Koerber C. Von der Idee zum fertigen Produkt. – Laser Technik Journal, 2008, Bd. 5, № 5, S. 43-46.
  6. Holtkamp: Mikrostrukturieren mit Zukunft. – Laser-Technik-Journal, 2011, Nr.2, p.37-40.

on the same level as the background signal of the lab with  $dN << 10^2$  particle /cm<sup>3</sup>. Hence, a high quality operation in terms of laser fume is possible.

### SUMMARY

Ultra-fast laser processes, especially in the femto second range have been investigated in terms of particle distribution during the operation. Particle size is found to be in the range of  $d=50...200$  nm in significantly high concentrations of up to  $10^6$  particle/cm<sup>3</sup>. By using the new LAS-260 with pleat filtration and HEPA post filtration a fractional deposition is the filter of  $>> 99\%$  was demonstrated. For non-cancerous and mutagenic materials the filtered air can be re-circulated in the working environment for saving energy cost.

\*\*\*

The authors like to thank the Fraunhofer IWS in Dresden for supplying the laser time and the German Ministry of Education and Science for founding part of this work in the project MWT.