

УДК 621.373.826

ЛАЗЕРНЫЙ ПРОЕКЦИОННЫЙ МИКРОСКОП С ПОКАДРОВОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЯГ.С. Евтушенко¹, М.В. Тригуб^{1,2}, Ф.А. Губарев^{1,2}, С.Н. Торгаев^{1,2}¹Томский политехнический университет²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

E-mail: trigub@tpu.ru

Продemonстрирована возможность регистрации изображения, получаемого с помощью лазерного проекционного микроскопа и формируемого одиночным импульсом оптического усилителя. Описана схема синхронизации для реализации данного метода. Представлены результаты визуализации процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, сопровождающегося мощной фоновой засветкой, в режиме реального времени с использованием разработанной системы синхронизации.

Ключевые слова:

Лазер на парах металлов, активная оптическая система, высокоскоростной лазерный монитор, покадровая регистрация.

Key words:

Metal-vapor lasers, active optical system, high-speed resolution laser monitor, frame-by-frame registration.

Введение

Визуализация быстропротекающих процессов, в т. ч., экранированных от наблюдателя мощной фоновой засветкой, является актуальной задачей. Такие процессы протекают в зонах взаимодействия мощных потоков энергии с веществом — лазерная обработка материалов, самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), процессы в биотканях при их облучении и т. д. Для наблюдения подобных процессов целесообразно использовать скоростные активные оптические системы с усилителями яркости на основе высокочастотных лазеров на парах металлов, в частности CuVg-лазеров [1], для которых достигнута максимальная на сегодня частота следования импульсов (ЧСИ) 400 кГц [2]. Использование данных лазеров и современных скоростных регистраторов (CCD камеры) [3] дает практическую возможность высокоскоростной съемки (более 10⁵ кадров/с) указанных выше процессов при времени экспозиции единицы-десятки нс.

Лазер на парах бромида меди имеет узкие спектральные линии генерации в зеленой и желтой областях спектра (510,6 и 578,2 нм), что обеспечивает высокое усиление в узких спектральных диапазонах [4]. Это делает возможным наблюдение процессов, скрытых от наблюдателя собственной (либо внешней) широкополосной фоновой засветкой, при которой в узкой («рабочей») области сосредоточена лишь незначительная часть лучистой энергии. Авторами работы [5] было предложено устройство, названное «лазерным монитором», в качестве оптического усилителя в котором используется лазер на парах меди, работающий с частотой 10 кГц. Принцип действия лазерного монитора аналогичен работе лазерного проекционного микроскопа [4]: наблюдаемый объект подсвечивается собственным сверхизлучением усилителя яркости, отраженный сигнал усиливается и проецируется на экран, либо непосредственно на CCD-матрицу. Отличительной особенностью данного устройства от классического проекционного усилителя яркости является возможность наблюдения

(мониторирования) процессов в режиме реального времени. Типовая схема лазерного монитора приведена на рис. 1.

Вместе с тем, в работе [5] регистрирующая аппаратура (высокоскоростная камера) и оптический усилитель работали асинхронно. Асинхронная работа данных устройств приводит к снижению временного разрешения системы (т. к. скорость съемки, как правило, ниже ЧСИ усилителя) и искажению получаемого изображения за счет того, что изображение каждого кадра формируется несколькими импульсами сверхсветимости, попадающими в экспозицию. В работе [6] приведены результаты покадровой регистрации изображений, получаемых с помощью лазерного проекционного микроскопа и скоростной фотографической установки ВФУ-1. Обработка изображений, получаемых на фотопленке, требует определенного времени и подобная система не может рассматриваться как монитор, позволяющий не только наблюдать процесс в режиме реального времени, но и, при необходимости, «вмешиваться в него».

Для создания такого устройства (скоростного лазерного монитора), необходима разработка системы синхронизации лазерного усилителя и CCD камеры.

Система синхронизации

В работе [1] представлены результаты наблюдения процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза посредством лазерного монитора при использовании камеры с неуправляемым затвором Casio EX-FH20. Скорость съемки составляла 420 кадров/с. Полученные в работе [1] результаты позволяют проводить количественные оценки процесса, например, скорость распространения теплового фронта. Однако, погрешность при этом достаточно высокая, т. к. каждый кадр формируется несколькими импульсами сверхсветимости усилителя.

Следующим этапом являлось увеличение временного разрешения — применение высокоскорост-

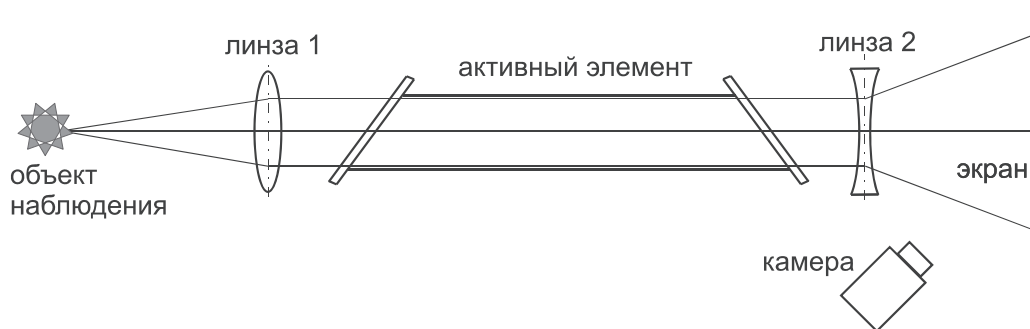


Рис. 1. Схема лазерного монитора

ной камеры MotionPro X3, способной производить съемку со скоростью до 40 тыс. кадров/с. Использовался малогабаритный усилитель яркости на основе CuBr-лазера с полупроводниковым источником накачки, с апертурой газоразрядной трубки 1,5 см, при длине активной области 40 см. ЧСИ составляла 28,8 кГц, длительность импульса сверхсветимости 40 нс, энергия импульса 2,7 мкДж. При увеличении скорости съемки уменьшается время экспозиции камеры (до 1 мкс при максимальной скорости съемки), соответственно, полученный видеофайл включает в себя не только полезную информацию, но и «пустые» кадры. Это объясняется рассогласованием импульсов генерации усилителя и моментов срабатывания затвора камеры. Для устранения данной проблемы необходимо синхронизировать работу усилителя яркости и регистратора (CCD камеры). Структурная схема системы синхронизации представлена на рис. 2, а. На рис. 2, б, приведена схема лазерного монитора с возможностью покадровой съемки.

Управление осуществляется от лазера – входным сигналом схемы синхронизации является импульс, поступающий со схемы управления полупроводниковым источником накачки CuBr-лазера. Гальваническая развязка системы питания лазера и схемы формирования синхроимпульса для CCD камеры обеспечивается применением оптоволоконна. Формирователь импульса (рис. 2, а) обеспечивает требуемый уровень сигнала для оптоволоконного передатчика. При таком схемном решении лазер остается автономным, т. е. может использоваться также для других целей. Кроме того, расположение схемы формирования синхроимпульса непосредственно в блоке управления полупроводниковым формирователем высоковольтных импульсов возбуждения может привести к появлению дополнительных источников помех, что, в конечном счете, отразится на надежности работы лазера (усилителя яркости) в целом.

Формирователь синхроимпульса позволяет регулировать момент появления синхроимпульса для

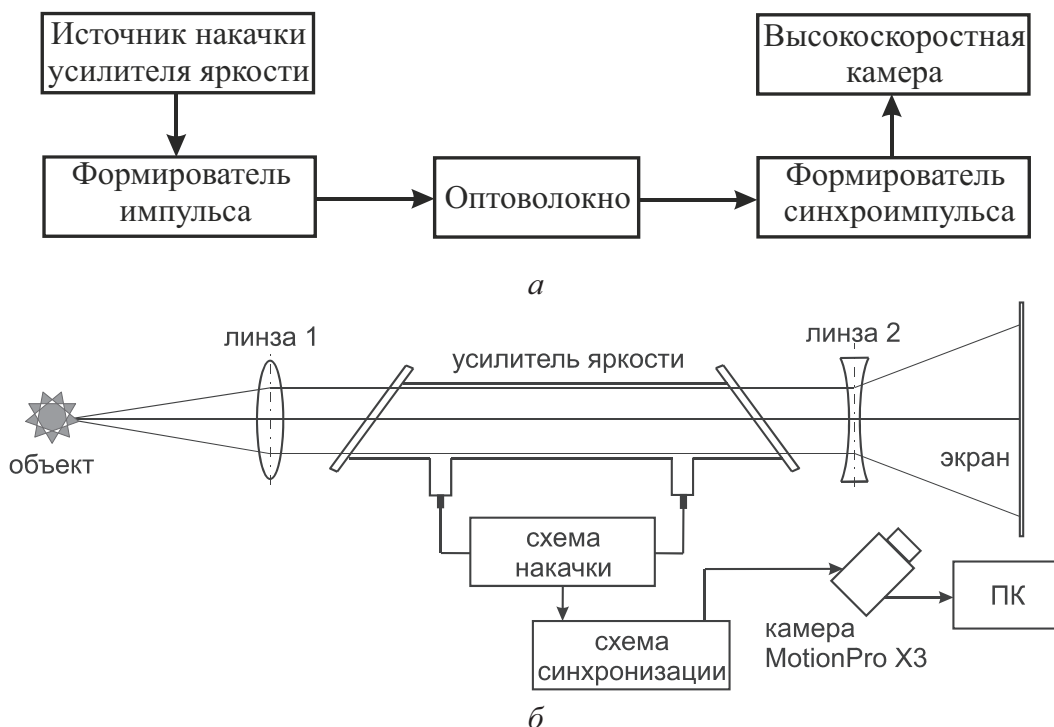


Рис. 2. Структурная схема системы синхронизации (а) и лазерного монитора с покадровой регистрацией (б)

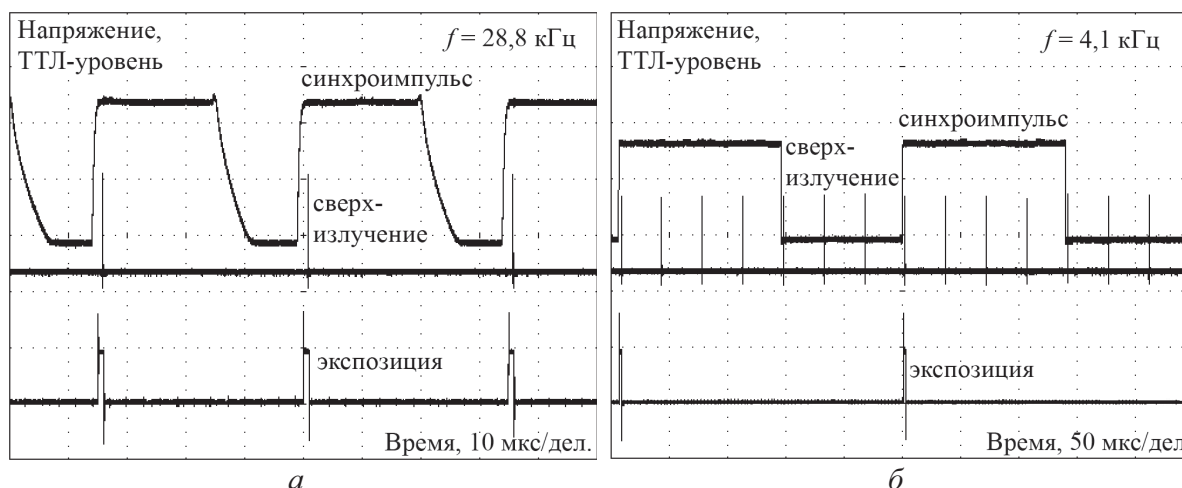


Рис. 3. Осциллограммы работы лазерного монитора с системой синхронизации при частоте съемки: а) 28,8 и б) 4,1 кГц

камеры, а также варьировать скорость съемки путем деления ЧСИ оптического усилителя. На рис. 3 представлены осциллограммы работы схемы при различной скорости съемки: регистрируется изображение от каждого импульса (рис. 3, а) и каждого восьмого импульса сверхсветимости (рис. 3, б).

Результаты наблюдений

Важным параметром оптической системы является ее разрешающая способность. Для определения пространственного разрешения лазерного монитора произведена визуализация дифракционных решеток 600 и 1200 штр./мм, рис. 4.

В качестве линзы — 1 (рис. 1) использовались объективы от микроскопа Биолам 10М с кратностью 7 и 15. Как показали результаты, при использовании данной оптики и описанного выше оптического усилителя, возможно наблюдение объектов с минимальными размерами до 0,5 мкм.

Тестовым объектом для визуализации посредством лазерного монитора с системой синхронизации служила металлическая сетка с размером отверстия 0,75 мм. Полученные изображения при

скорости съемки 4000 кадров/с представлены на рис. 5. Изображение, рис. 5, а, формируется одиноким импульсом сверхсветимости, т. е. в экспозицию камеры попадает один импульс излучения усилителя. На рис. 5, б, изображение формируется двумя импульсами сверхсветимости, при этом экспозиция камеры программно выставлена больше, чем период импульсов излучения. Во втором случае (рис. 5, б) изображение получается более яркое за счет большей энергии, накопленной в CCD матрице регистратора, но при этом оно «размыто» (особенно в наиболее яркой области), т. е. содержит искажения, связанные с вибрацией элементов оптической схемы усилителя и нестабильностью разряда от импульса к импульсу. Поэтому для получения достоверных сведений об исследуемом процессе предпочтительно регистрировать изображение в каждом кадре от одиночного импульса оптического усилителя.

В качестве следующего объекта наблюдения был выбран процесс СВС. Данный процесс дает возможность экономичного получения композиционных материалов, применяемых в качестве огнеупоров, фильтров и т. д. [7].

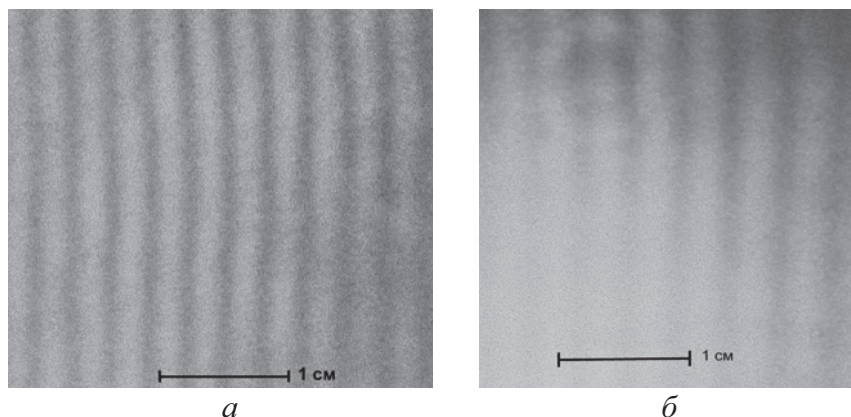


Рис. 4. Изображение дифракционных решеток 600 штр./мм (а) и 1200 штр./мм (б), полученные с помощью используемой оптической системы

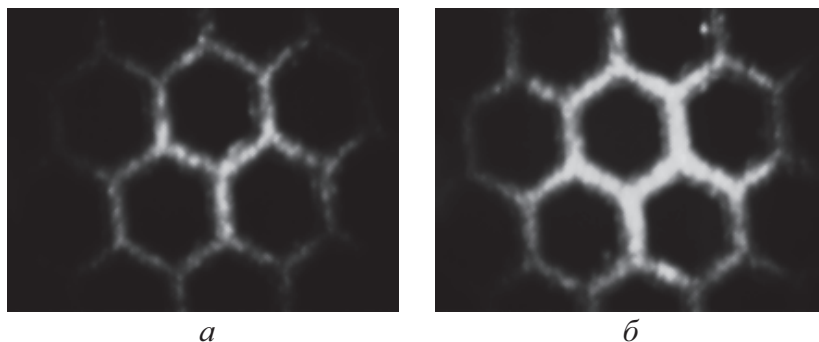


Рис. 5. Изображение тестового объекта при экспозиции камеры 2 мкс (а) и 40 мкс (б)

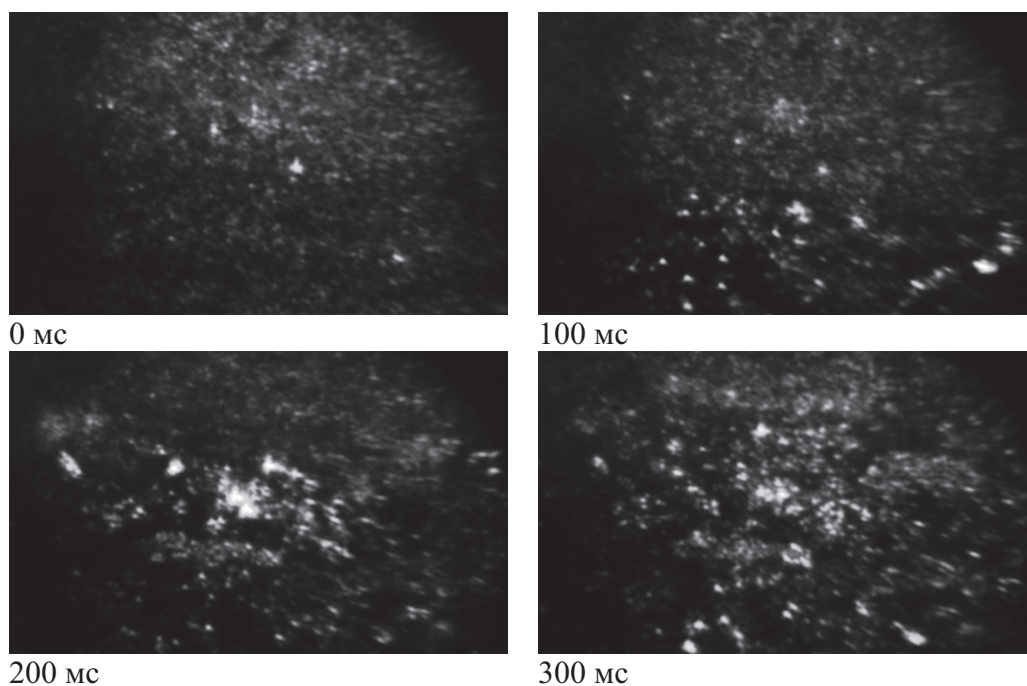


Рис. 6. Процесс горения структуры при СВЧ

В работе [7] проводились оценки скорости распространения теплового фронта горения порошковых систем на минеральной основе в зависимости от состава и давления газовой смеси экспериментальным и расчетным путем. Экспериментально скорость определялась методом цветовой пирометрии и базисным методом с точностью не менее 5 % по сигналам светодиода [7].

В данной работе проводилась визуализация процесса горения структуры $51,28\% \text{ FeTiO}_2 + 22,82\% \text{ Al} + 11,26\% \text{ SiO}_2 + 11,16\% \text{ Si} + 3,48\% \text{ C}$ при атмосферном давлении. Температура горения смеси составляет $\sim 2080 \text{ K}$. На рис. 6 приведены кадры скоростной съемки, соответствующие различным моментам времени при распространении фронта горения. Поле зрения лазерного монитора при использовании линзы – 1 (рис. 2, б) с фокусным расстоянием 100 мм составляет 3 мм. При скорости съемки в эксперименте 2000 кадров/с, камера дает возможность регистрировать область диаметром $\sim 0,7 \text{ мм}$ с разрешением 488×296 пиксе-

лей. По количеству кадров от начала до окончания процесса горения можно определить время, за которое тепловой фронт пройдет наблюдаемую область, и соответственно, скорость процесса. По данным скоростной съемки, скорость распространения теплового фронта горения структуры составила $\sim 2,23 \text{ мм/с}$, что не противоречит результатам, представленным в работе [7] $\sim 2,3 \text{ мм/с}$.

Выводы

1. Представлена система синхронизации для покадровой регистрации изображений посредством лазерного монитора на основе CuVg-лазера с полупроводниковым источником накачки с пространственным разрешением оптической системы $0,5 \text{ мкм}$.
2. Разработанная система позволяет получать изображение от одиночного импульса сверхсветимости усилителя, что уменьшает искажения, связанные с нестабильностью разряда от импульса к импульсу и вибрацией элементов схемы.

3. Использование лазерного монитора позволяет визуализировать процесс горения и определить скорость распространения теплового фронта, что является актуальной задачей при синтезе пористых композиционных материалов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки, проект: РНП.2.1.2/13145.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Отдела макрокинетики ТНЦ СО РАН, г. Томск, А.И. Кирдяшкину, В.Г. Саламатову, Р.А. Юсупову и В.Д. Китлеру за предоставленную возможность протестировать созданное устройство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тригуб М.В., Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Торгаев С.Н. Скоростная визуализация микрообъектов посредством активных сред лазеров на парах // Известия Томского политехнического университета. — 2009. — Т. 315. — № 4. — С. 141–146.
2. Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Заикин С.С. Лазер на парах бромида меди с частотой следования импульсов 400 кГц // Известия Томского политехнического университета. — 2008. — Т. 312. — № 12. — С. 106–107.
3. Седатэк. 2011. URL: <http://sedatec.ru/ru/products/hsi/625972/> (дата обращения 27.01.2011).
4. Пасманик Г.А., Земсков К.И., Казарян М.А. и др. Оптические системы с усилителями яркости. — Горький: ИПН АФ СССР, 1988. — 173 с.

5. Абрамов Д.В., Аракелян С.М., Галкин А.Ф., Климовский И.И., Кучерик А.О., Прокошев В.Г. О возможности исследования временной эволюции рельефа поверхностей, подвергающихся воздействию мощных потоков энергии, непосредственно во время воздействия // Квантовая электроника. — 2006. — Т. 36. — № 6. — С. 569–571.
6. Морозова Е.А., Прохоров А.М., Савранский В.В., Шафеев Г.А. Скоростная покадровая регистрация изображений биологических объектов с использованием лазерного проекционного микроскопа // Доклады АН СССР. — 1981. — Т. 261. — № 6. — С. 1460–1462.
7. Юсупов Р.А., Максимов Ю.М., Китлер В.Д. Закономерности технологического горения порошковых систем на минеральной основе при получении пористых композиционных материалов // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38. — № 5. — С. 85–89.

Поступила: 27.01.2011 г.

УДК 66.069.8327:66.084.08

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РАСПЫЛИТЕЛЕЙ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Д.В. Генне, А.В. Шалунова, Р.Н. Голых

Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»
E-mail: vnh@bti.secna.ru

Статья посвящена созданию новых типов мелкодисперсных распылителей, действие которых основано на реализации многократного поверхностного или высокочастотного ультразвукового воздействия на вязкие и дисперсные жидкости. Предложены и разработаны новые конструкции ультразвуковых колебательных систем, позволяющих уменьшить диаметр формируемых капель, повысить производительность распыления, увеличить эксплуатационную надежность распылителей и обеспечить возможность распыления вязких жидкостей с заданной производительностью.

Ключевые слова:

Ультразвук, распыление, аэрозоль, пьезоэлектрическая колебательная система.

Key words:

Ultrasonic, atomization, aerosol, piezoelectric oscillation system.

Распыление жидкостей и напыление различных покрытий является основой значительного количества технологических процессов в производствах, относящихся, в первую очередь, к высокотехнологичным секторам экономики. Это технологические процессы распыления рабочих жидкостей для контроля износа двигателей в установках спектрального анализа в авиационном двигателестроении, нанесение фоторезистов при производстве модулей памяти, микросхем и процессоров, химико-механическое полирование полупроводниковых пластин — заготовок для производства полупроводниковых компонентов в микроэлектронной промышленности, нанесение полирую-

щих жидкостей и покрытий в оптико-электронном приборостроении, нанесение покрытий на сердечные клапаны и стенты коронарных сосудов в медицинской промышленности [1], нанесение дезинфицирующих покрытий при производстве медицинской техники и имплантов, дезинфекции помещений, получение наночастиц и нанесение нанопокровов в производстве функциональных наноматериалов, распыление нейтральных или специальных материалов для коагуляции взрыво-, пожаро- и химически опасных аэрозолей, распыление жидких удобрений, стимуляторов роста и гербицидов при выращивании сельскохозяйственной и садовоогородной продукции, рас-