

## ЛАЗЕРНАЯ ФОТОЭМИССИЯ

**Поверхностная локализация лазерной фотоэлектронной эмиссии с помощью структуры из тонких пленок  $\text{Cu}_2\text{O}$  и Ag**

С.В.Андреев, П.А.Данилов, С.И.Кудряшов, Е.А.Рябов

*На основе тонких пленок Ag и  $\text{Cu}_2\text{O}$ , последовательно нанесенных магнетронным напылением на подложку из стекла, создан локализованный на поверхности фотокатода лазерный источник электронов. Фотоэмиссия электронов под действием четвертой гармоники (263 нм) фемтосекундного волоконного лазера осуществлялась с поверхности пленки Ag, нанесенной на поверхность подложки. Локализация источника фотоэлектронов на поверхности фотокатода обеспечивалась напылением на его поверхность пленки из оксида меди  $\text{Cu}_2\text{O}$ , значительно (примерно в 50 раз) уменьшающей эффективность фотоэмиссии, и последующим удалением слоя оксида меди в пятне фотоэмиссии диаметром  $\sim 15$  мкм с помощью сфокусированного лазерного излучения второй гармоники фемтосекундного волоконного лазера. При проведении исследований на поверхности фотокатода создавалась сетка из пятен фотоэмиссии, которая позволяла значительно облегчить совмещение лазерного пучка с пятном фотоэмиссии. Экспериментально продемонстрировано уменьшение шумов ультрабыстрого просвечивающего электронного микроскопа, связанных с пространственными флуктуациями лазерного пучка, осуществляющего импульсную фотоэлектронную эмиссию с фотокатода микроскопа, при использовании локализованного источника электронов на основе структуры из тонких пленок  $\text{Cu}_2\text{O}$  и Ag.*

**Ключевые слова:** лазерная фотоэлектронная эмиссия, локализованный источник фотоэлектронов, ультрабыстрый электронный микроскоп.

**1. Введение**

Процесс эмиссии электронов под действием излучения является одним из наиболее широко исследуемых явлений в физике. На основе этих исследований созданы различные фотокатоды для технических применений. В качестве основных критериев для оценки качества фотокатодов обычно рассматриваются эффективность электронной эмиссии фотокатода, его стойкость под действием излучения, а также пространственная стабильность фотоэмиссии. Последний фактор приобретает особо важное значение в случаях, когда процесс фотоэмиссии используется для формирования электронных пучков, используемых для исследования физических процессов, проявляющих себя в отклонении пучков. В этих исследованиях пространственные флуктуации электронного пучка могут привести к появлению больших шумов в измерениях. Такая ситуация возникает, например, при замене термического катода на фотокатод в сверхбыстром электронном микроскопе или электронном дифрактометре для осуществления их работы в динамическом режиме [1–4]. В этих приборах пространственные флуктуации формируемого в результате фотоэмиссии электронного пучка могут приводить к флуктуациям получаемого с помощью такого пучка изображения либо дифракционной картины (в случае электронного дифрактометра), что, в свою

очередь, приводит к появлению дополнительных шумов при измерениях.

При использовании традиционных поверхностных фотокатодов с фотоэмиссионным слоем, нанесенным на плоскую поверхность, площадь которой значительно превышает площадь пятна лазерного излучения, осуществляющего эмиссию электронов, большой вклад в пространственную нестабильность электронного пучка могут вносить пространственные флуктуации лазерного пучка. Влияние этих флуктуаций становится особенно заметным, когда источник лазерного излучения и прибор, использующий его для осуществления фотоэмиссии с катода, находятся на значительном расстоянии друг от друга и могут быть подвержены несинхронным механическим колебаниям.

В настоящее время широко используется другой тип фотокатодов – так называемые острийные фотокатоды [5–8]. При их использовании фотоэмиссия электронов под действием лазерного излучения осуществляется с поверхности острия, размеры которого могут быть порядка нескольких десятков нанометров. Это позволяет создать точечный локализованный источник фотоэлектронов и сформировать электронный пучок с высокими пространственными характеристиками.

Наряду с высокими характеристиками острийные фотокатоды обладают существенными недостатками, такими как сложность изготовления и низкая эффективность использования лазерного излучения, что связано с их малой фотоэмиссионной поверхностью по сравнению с диаметром лазерного пучка. Кроме того, они уступают традиционным «поверхностным» фотокатодам по таким важным параметрам, как универсальность использования и механическая стабильность.

В связи с этим представляет интерес разработка методов, позволяющих улучшить характеристики «поверх-

С.В.Андреев, Е.А.Рябов. Институт спектроскопии РАН, Россия, 108840 Москва, Троицк, ул. Физическая, 5

П.А.Данилов, С.И.Кудряшов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: Pavel-Danilov2009@yandex.ru

Поступила в редакцию 19 июня 2018 г., после доработки – 31 июля 2018 г.

ностных» фотокатодов, в частности повысить пространственную стабильность формируемых с их помощью электронных пучков при пространственных флуктуациях лазерного излучения, осуществляющего фотоэмиссию.

Одним из возможных способов уменьшения пространственных флуктуаций эмитируемых с поверхности фотокатода электронных пучков является ограничение области эмиссии электронов и создание на его поверхности локализованных областей – пятен или точек фотоэмиссии. Локализация фотоэмиссии позволяет уменьшить пространственные флуктуации эмитируемого с поверхности фотокатода электронного пучка при флуктуациях лазерного излучения.

Следует отметить, что влияние ограничения области фотоэмиссии на стабильность фотоэлектронного пучка отмечалась в работе [9] при использовании «штырькового» катода из  $\text{LaB}_6$  диаметром 50–100 мкм, окруженного защитным графитовым кольцом.

В настоящей работе предложен метод локализации фотоэмиссии на поверхности обычного тонкопленочного металлического фотокатода путем нанесения на его поверхность тонкой пленки оксида меди  $\text{Cu}_2\text{O}$ , обладающей низкой эффективностью фотоэмиссии, с последующим удалением этой пленки в пятне фотоэмиссии. Удаление пленки  $\text{Cu}_2\text{O}$  в пятне осуществлялось сфокусированным излучением фемтосекундного волоконного лазера.

## 2. Эксперимент

Структура образца, используемого в эксперименте в качестве фотокатода, показана на рис.1. Образец представлял собой тонкую подложку из стекла толщиной 160 мкм размером  $\sim 8 \times 8$  мм, вырезанную из стандартной покровной пластины, используемой в оптическом микроскопе. На подложку методом магнетронного напыления последовательно наносились сначала пленка Ag толщиной  $\sim 100$  нм, которая служила в качестве фотоэмиссионного материала, а затем пленка  $\text{Cu}_2\text{O}$ , обладающая ввиду высокой работы выхода электронов (примерно 4.84 эВ) [10] низкой эффективностью фотоэмиссии под действием квантов используемого в эксперименте излучения (4.72 эВ). Пленка  $\text{Cu}_2\text{O}$  образовывалась за счет окисления меди при распылении медной мишени в атмосфере Ag, содержащего примесь кислорода. Методика напыления пленок  $\text{Cu}_2\text{O}$  и их характеристики подробно представлены в работе [11].

Нанесение достаточно толстой пленки оксида меди, препятствующей эмиссии электронов из образца, значи-

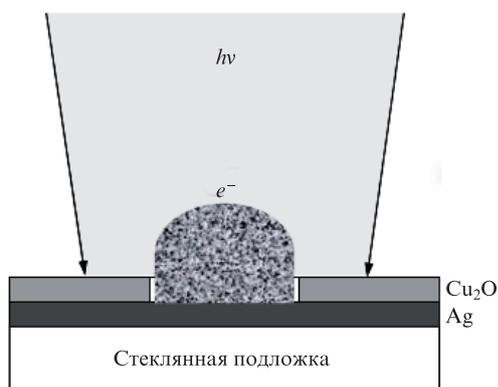


Рис.1. Структура образца, используемого в качестве фотокатода.

тельно (примерно в 50 раз) уменьшало эффективность фотоэмиссии из структуры  $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Ag}$  по сравнению с пленкой Ag. Толщина пленки  $\text{Cu}_2\text{O}$  была подобрана экспериментально и составляла  $\sim 150$  нм.

Для осуществления фотоэмиссии в заданном месте на поверхности структуры  $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Ag}$  удалялся слой оксида меди – вплоть до уровня фотоэмиссионного слоя Ag (см. рис.1). Удаление слоя  $\text{Cu}_2\text{O}$  в пятне фотоэмиссии осуществлялось на экспериментальном стенде для микро- и наноструктурирования [12] с использованием излучения второй гармоники фемтосекундного волоконного лазера Satsuma (Amplitude Systemes; длина волны второй гармоники равна 515 нм, длительность импульса на полувысоте – 200 фс, максимальная энергия в импульсе – 4 мкДж в ТЕМ<sub>00</sub>-моде, частота следования импульсов  $f = 0-2$  МГц). Лазерное излучение фокусировалось в воздухе на поверхность образца через объектив оптического микроскопа с числовой апертурой  $NA = 0.1$ . Минимальный радиус лазерного пятна в фокусе  $R_{1/e} = 4.4 \pm 0.2$  мкм. Для получения необходимого диаметра пятна фотоэмиссии, диаметр лазерного пятна на поверхности образца увеличивался путем смещения положения фокуса объектива на 300 мкм от поверхности образца. Энергия в импульсе лазерного излучения подбиралась таким образом, чтобы удаление слоя оксида меди осуществлялось за один импульс и при этом фотоэмиссионный слой Ag затрагивался в минимально возможной степени (типичное значение энергии в эксперименте составляло около 1.2 мкДж). Перемещение образца относительно лазерного пучка осуществлялось от импульса к импульсу с помощью трехкоординатной моторизированной платформы с минимальным шагом 150 нм.

Визуализация рельефа поверхности структуры после облучения проводилась посредством сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JEOL7001F. СЭМ-изображение полученного пятна фотоэмиссии показано на рис.2,а.

На рис.3,а представлено изображение области структуры  $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Ag}$ , полученное с помощью оптического микроскопа в том месте, где оксид меди удален для формирования фотоэмиссионного пятна; на рис.3,б для сравнения приведен фрагмент изображения аналогичного образца с фотоэмиссионным слоем Ag, но без напыленной сверху пленки  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Эти изображения получены при подсветке образцов «на просвет» при одинаковой яркости подсветки и одинаковом увеличении микроскопа. Сравнение обоих изображений наглядно показывает, что в центральной части пятна на площади диаметром  $\sim 15$  мкм пленка  $\text{Cu}_2\text{O}$  отсутствует, и в этой части наблюдаются только отдельные фрагменты пленки  $\text{Cu}_2\text{O}$  (темные пятна на рис.3,а), которые, по-видимому, попали туда по окончании воздействия лазерного импульса.

Образованное указанным выше способом углубление на поверхности структуры  $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Ag}$  служило источником фотоэмиссии, что позволяло локализовать эмиссию электронов на поверхности фотокатода. Эмиссия электронов из такого локализованного пятна фотоэмиссии осуществлялась путем наложения на него пятна сфокусированного лазерного излучения. Для облегчения настройки лазерного излучения на пятно фотоэмиссии на поверхности фотокатода формировалась квадратная сетка из пятен фотоэмиссии с шагом по осям 120 мкм и общим размером  $\sim 2 \times 2$  мм (рис.2,б).

Для исследования свойств изготовленного фотокатода использовался ультрабыстрый просвечивающий электр-

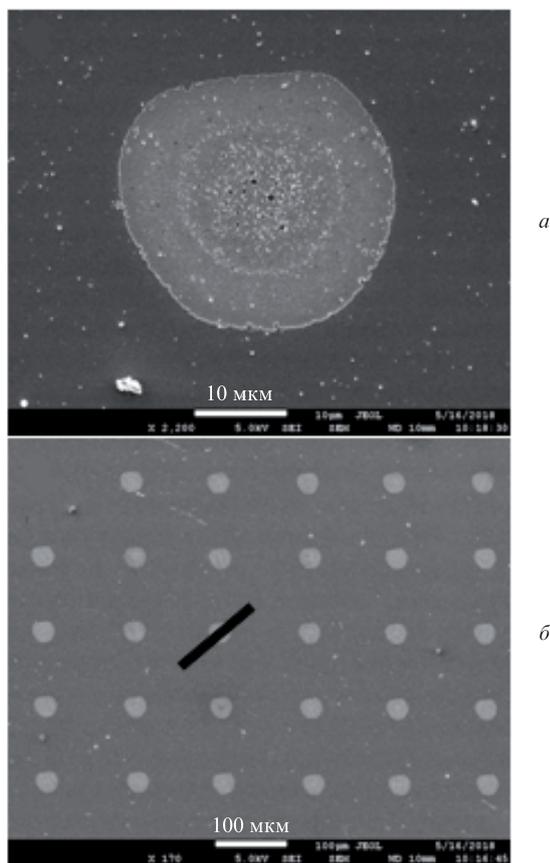


Рис.2. СЭМ-изображения полученного пятна фотоэмиссии (внутреннее пятно – это пятно фотоэмиссии, внешнее пятно – лазерное пятно) (а) и сетки фотоэмиссионных пятен на поверхности структуры (б). Темная полоса на сетке пятен показывает диапазон сканирования лазерного пучка (см. текст).

ронный микроскоп, подробное описание которого приведено в работе [13]. Он представляет собой модифицированный коммерческий электронный микроскоп Н-300 (Hitachi) с ускоряющим напряжением 75 кВ, в котором термический катод заменен на фотокатод и введен узел облучения образца внутри микроскопа лазерным излучением. Использование для эмиссии электронов с фотокатода и для возбуждения исследуемого образца излучения одного и того же фемтосекундного лазера с разделением пучка на две части, между которыми введена регулируемая оптическая задержка, позволяло исследовать в стробоскопическом режиме динамику возбуждения и релаксации исследуемого образца на шкале времен примерно до 1 нс с временным разрешением порядка нескольких пикосекунд.

Исследуемый фотокатод размещался на внешней поверхности цилиндра Венельта катодного узла микроскопа (рис.4) и крепился к поверхности с помощью прижимного кольца диаметром 8 мм, выполненного из свежеполитованного медного провода диаметром 500 мкм. Для осуществления электрического контакта между катодным узлом и эмитирующим электроны серебряным слоем исследуемой структуры Cu<sub>2</sub>O–Ag с ее поверхности механическим путем аккуратно счищался верхний изолирующий слой оксида меди в том месте, где образец прижимало медное кольцо, которое, в свою очередь, имело электрический контакт с поверхностью цилиндра Венельта катодного узла.

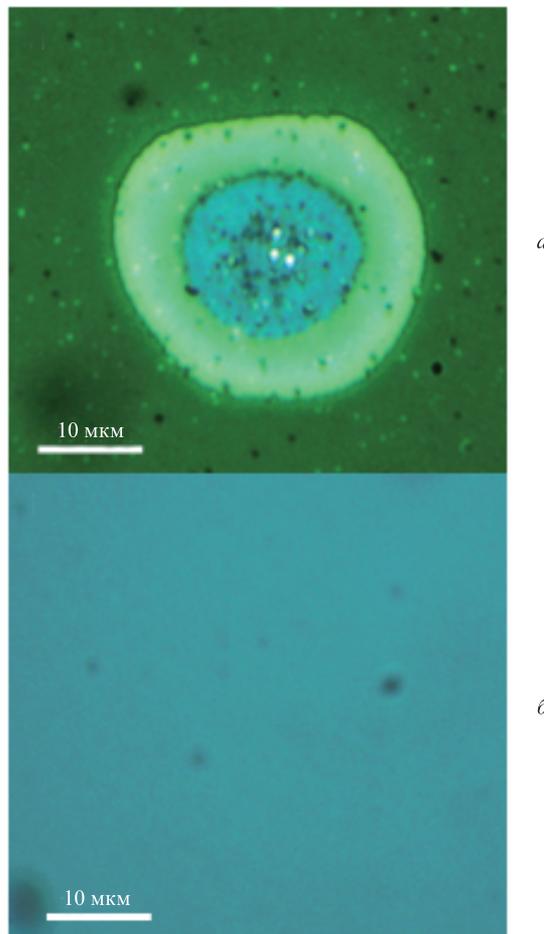


Рис.3. Изображение области структуры Cu<sub>2</sub>O–Ag, полученное с помощью оптического микроскопа в том месте, где оксид меди удален для формирования фотоэмиссионного пятна (а), и фрагмент изображения аналогичного образца с фотоэмиссионным слоем Ag, но без напыленной сверху пленки Cu<sub>2</sub>O (б). Цветной вариант рис.3 помещен на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

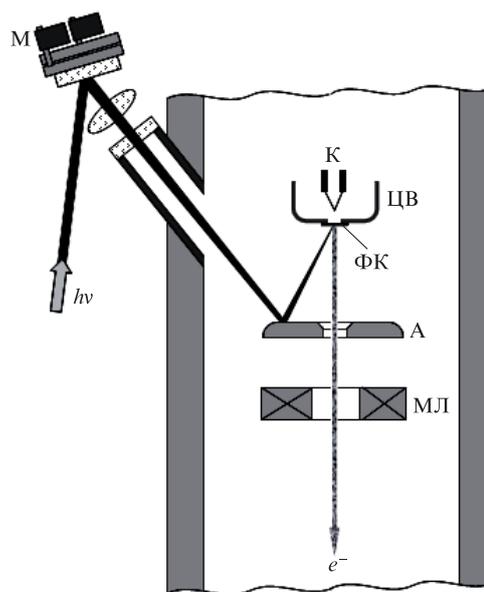


Рис.4. Схема эксперимента: К – катодный узел; ЦВ – цилиндр Венельта; ФК – фотокатод на базе исследуемой структуры Cu<sub>2</sub>O–Ag; А – анод; МЛ – магнитная линза микроскопа; М – моторизованная прецизионная оправа поворотного зеркала.

Электроны, эмитированные с фотокатода, ускорялись до энергии 75 кэВ и через отверстие в аноде поступали в колонну электронного микроскопа для формирования электронного пучка с помощью магнитных фокусирующих систем. В проводимом эксперименте микроскоп переключался в режим «дифракции». В этом режиме увеличение микроскопа отключается и сформированный электронный пучок, прошедший через область размещения образца, фокусируется в минимальное пятно на поверхности вакуумно-плотной волоконно-оптической пластины, на которую нанесен слой люминофора. Слой люминофора покрывался тонким защитным слоем алюминия, прозрачным для электронов с энергией 75 кэВ. Изображение электронного пучка, сформированное за счет свечения люминофора под действием падающего электронного пучка, регистрировалось в режиме счета фотонов с помощью цифровой видеокамеры C11440-22C (Hamamatsu), оснащенной объективом Nikkor 24 (Nikon). Эффективное число пикселей детектирующей матрицы видеокамеры составляло  $2048 \times 2048$ , размер пикселя –  $6.5 \times 6.5$  мкм. Величина пикселя системы регистрации позволяла наблюдать эволюцию электронного пучка в различных частях его изображения. При этом смещение пятна фотоэмиссии, вызванное небольшим смещением лазерного пучка на поверхности металлического фотокатода микроскопа, приводило примерно к таким же по величине смещениям изображения электронного пучка на регистрирующей матрице видеокамеры.

Для осуществления фотоэмиссии с катода микроскопа в эксперименте использовалось излучение четвертой гармоники (263 нм) фемтосекундного волоконного лазера Antaus (Авеста-Проект) с длительностью импульса  $\sim 300$  фс и максимальной частотой следования импульсов 500 кГц. С помощью оптического затвора на выходе волоконного лазера частота следования импульсов могла изменяться в широких пределах (от 500 кГц до 250 Гц). При проведении измерений частота следования лазерных импульсов и мощность лазерного излучения подбирались таким образом, чтобы за время накопления сигнала на детектирующей матрице видеокамеры сигнал, соответствующий наибольшей яркости изображения электронного пучка, не превышал максимальный диапазон для регистрирующих пикселей матрицы ( $\sim 6.5 \times 10^4$  отсчетов на пиксель) и в то же время был достаточно большим (свыше  $2 \times 10^4$  отсчетов), чтобы можно было пренебречь влиянием дробового шума на результаты измерений. Кроме того, перед измерением проверялась линейность сигнала как в зависимости от частоты следования лазерных импульсов, так и от мощности лазерного излучения. Типичная энергия в импульсе лазерного излучения, осуществляющего фотоэмиссию при измерениях, была в диапазоне 0.1–0.5 нДж.

УФ излучение лазера с помощью кварцевой линзы фокусировалось на поверхность фотокатода в пятно диаметром  $\sim 40$  мкм, которое полностью покрывало одно из пятен фотоэмиссии на поверхности фотокатода. Изготовленная на поверхности фотокатода квадратная сетка из пятен фотоэмиссии с расстоянием между ними  $\sim 120$  мкм (расстояние значительно превышало диаметр лазерного пятна, но было меньше области перестройки положения лазерного пучка на поверхности катода), в пределах которой наблюдалось незначительное уменьшение сигнала за счет приемной апертуры микроскопа ( $\sim 140$  мкм по уровню изменения 0.8), позволяла значи-

тельно облегчить настройку лазерного излучения на пятно фотоэмиссии. Предварительная центровка сетки из пятен фотоэмиссии на фотокатоде относительно центральной части катодного узла микроскопа выполнялась по отверстию в цилиндре Венельта.

Сканирование лазерного пучка по поверхности фотокатода осуществлялось с помощью поворотного зеркала, закрепленного в юстировочной оправе, оснащенной прецизионными моторизованными подвижками по обоим координатам юстировки (см. рис.4).

### 3. Результаты и их обсуждение

Для визуального наблюдения локализации фотоэмиссии электронов на поверхности исследуемого фотокатода в эксперименте записывались изображения электронного пучка на регистрирующей видеокамере электронного микроскопа в двух режимах. В первом режиме лазерное излучение настраивалось на пятно фотоэмиссии на поверхности фотокатода по максимуму яркости изображения электронного пучка на видеокамере, и сигнал, поступающий с детектирующей матрицы видеокамеры, накапливался в течение заданного времени (10 с). Полученное таким образом усредненное за время накопления изображение сохранялось в компьютере. Во втором режиме изображение пучка получалось в тех же условиях и при том же времени накопления, что и в первом режиме, но при одновременном автоматическом сканировании лазерного пучка по поверхности исследуемого фотокатода в направлении (с пересечением) пятна фотоэмиссии. Для этого после настройки лазерного излучения на пятно фотоэмиссии лазерный пучок отводился от пятна примерно на 70 мкм и включалось его автоматическое сканирование по поверхности фотокатода в направлении пятна фотоэмиссии. Скорость сканирования подбиралась таким образом, чтобы за время накопления сигнала на видеокамере лазерный пучок смещался на расстояние  $\sim 140$  мкм. Для уменьшения влияния соседнего пятна фотоэмиссии на наблюдаемую картину сканирование лазерного пучка по поверхности фотокатода осуществлялось по диагонали квадратной сетки из пятен фотоэмиссии (см. рис.2,б). Для сравнения было получено также аналогичное изображение электронного пучка при сканировании в том же диапазоне лазерного излучения по поверхности обычного фотокатода в виде тонкой пленки Ag без слоя оксида меди.

Следует отметить, что эффективность фотоэмиссии электронов при использовании исследуемого образца с пятном фотоэмиссии была примерно на порядок меньше, чем эффективность фотоэмиссии при использовании образца в виде пленки Ag. Это объясняется различием площадей лазерного пучка и пятна фотоэмиссии (примерно в семь раз), а также небольшими потерями, связанными с наличием на поверхности пятна фотоэмиссии фрагментов пленки  $\text{Cu}_2\text{O}$ , которые, по-видимому, попали туда по окончании воздействия лазерного импульса (см. рис.3,а).

На рис.5 представлены изображения электронного пучка при использовании в качестве фотокатода пленки Ag со сканированием лазерного излучения по поверхности фотокатода в течение времени накопления сигнала и структуры  $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Ag}$  с пятном фотоэмиссии при сканировании лазерного излучения и без сканирования. Видно, что в случае фотокатода в виде пленки Ag при сканировании излучения в течение времени накопления сигнала

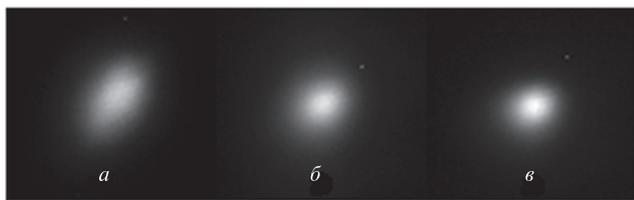


Рис.5. Изображения электронного пучка при использовании в качестве фотокатода пленки Ag со сканированием лазерного излучения по поверхности фотокатода в течение времени накопления сигнала (а) и структуры Cu<sub>2</sub>O–Ag с пятном фотоэмиссии при сканировании (б) и без сканирования лазерного излучения (в).

происходит, как и ожидалось, «размытие» изображения. В то же время «размытие» изображения в случае сканирования лазерного пучка по поверхности фотокатода со структурой Cu<sub>2</sub>O–Ag значительно меньше, оно мало отличается от статического изображения, полученного для той же структуры без сканирования.

Полученные изображения качественно подтверждают, что при использовании исследуемого фотокатода на основе структуры Cu<sub>2</sub>O–Ag происходит «привязка» фотоэлектронной эмиссии к пятну эмиссии на поверхности структуры и ее локализация при смещениях лазерного излучения от пятна.

Для количественной оценки степени влияния поверхностной локализации фотоэлектронной эмиссии в электронном микроскопе на шумы, связанные с пространственными флуктуациями осуществляющего фотоэмиссию лазерного излучения, были исследованы флуктуации яркостного центра тяжести изображения электронного пучка в двух случаях: при использовании в электронном микроскопе обычного фотокатода в виде пленки Ag, а также при использовании фотокатода в виде исследуемой структуры Cu<sub>2</sub>O–Ag с пятном фотоэмиссии. В обоих случаях в течение определенного времени (~10 мин) регистрировалась последовательность из 100 изображений со временем накопления каждого 100 мс. Координаты яркостных центров тяжести C<sub>x</sub> и C<sub>y</sub> полученных изображений вычислялись по стандартным формулам

$$C_x = \frac{\sum_{m,n} S_{m,n}n}{\sum_{m,n} S_{m,n}}, \quad C_y = \frac{\sum_{m,n} S_{m,n}m}{\sum_{m,n} S_{m,n}},$$

где n, m – порядковые номера пикселей по столбцам и строкам детектирующей матрицы видеокамеры, а S<sub>m,n</sub> – величина сигнала в пикселе n, m.

На рис.6 представлены зависимости положения яркостного центра тяжести изображения электронного пучка по одной из координат на детектирующей матрице видеокамеры, полученные для последовательности из 100 изображений при использовании в качестве фотокатода пленки Ag (кривые 1, 2, снятые в разное время) и структуры Cu<sub>2</sub>O–Ag с пятном фотоэмиссии (кривые 3, 4). Аналогичные результаты получены и для другой координаты. Из рисунка следует, что флуктуации центров тяжести изображений электронного пучка в случае использования структуры Cu<sub>2</sub>O–Ag уменьшаются по сравнению с флуктуациями в случае пленки Ag. Численный расчет для каждой из зависимостей на рис.6 приводит к значениям среднеквадратичных отклонений центра тяжести изображений 0.17, 0.19, 0.073 и 0.078 пикселя для кривых 1–4 со-

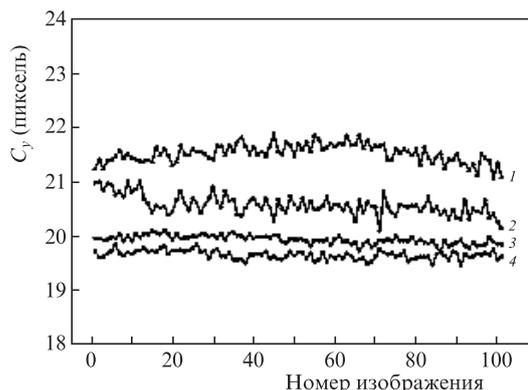


Рис.6. Флуктуации положения яркостного центра тяжести изображения электронного пучка по одной из координат на детектирующей матрице видеокамеры, полученные для последовательности из 100 изображений при использовании в качестве фотокатода пленки Ag (1, 2, сняты в разное время) и структуры Cu<sub>2</sub>O–Ag с пятном фотоэмиссии (3, 4).

ответственно. Сравнение этих значений показывает, что флуктуации уменьшаются примерно в 2.2–2.6 раза. Это говорит о том, что пространственная стабильность фотоэлектронного пучка увеличивается при локализации эмиссии электронов на катоде с использованием исследуемой структуры Cu<sub>2</sub>O–Ag. Из рис.6 видно также, что существенный вклад в наблюдаемые зависимости дают медленные вариации центра тяжести изображения. Величины, характеризующие эти медленные вариации, подсчитанные как размах изменения средней линии каждой зависимости от минимального значения до максимального, составляют 0.49, 0.56, 0.18, 0.14 пикселя для кривых 1–4 соответственно. Существенное уменьшение этих вариаций (в три-четыре раза) при локализации эмиссии электронов на поверхности фотокатода говорит о том, что вариации связаны, по-видимому, с медленным изменением положения лазерного пучка на поверхности фотокатода, предположительно, в результате относительно медленных локальных температурных колебаний окружающей среды, которые и приводят к пространственной нестабильности лазерного пучка.

Следует отметить, что ошибка измерения координаты центра тяжести изображения, связанная с дискретностью структуры детектирующей матрицы видеокамеры, при диаметре наблюдаемого в эксперименте изображения электронного пучка ~10 пикселей значительно меньше (менее 0.01 пикселя [14]) флуктуаций пучка и не оказывает влияния на результаты измерений.

В свете проведенных исследований представляет интерес использование в качестве фотокатода структуры с пятном фотоэмиссии меньшего диаметра (порядка нескольких микрометров). Это может привести к значительному уменьшению флуктуационных шумов. В самом деле, при смещении лазерного пучка с неоднородным поперечным распределением энергии (например, гауссовым) относительно пятна фотоэмиссии происходит перераспределение эффективности эмиссии электронов в пределах пятна, что приводит к смещению яркостного центра тяжести электронного пучка в его поперечном сечении. Очевидно, что это смещение не может выходить за пределы пятна эмиссии, а значит, при уменьшении диаметра пятна фотоэмиссии флуктуации лазерного пучка будут приводить к меньшим пространственным флуктуациям электронного пучка. Следует отметить, однако, что при

малых диаметрах пятна фотоэмиссии по сравнению с диаметром лазерного пучка существенный вклад в электронную эмиссию может дать остаточная фотоэмиссия из области фотокатода, расположенной вокруг пятна фотоэмиссии. В этом случае смещение электронного пучка при смещении лазерного пучка будет определяться не только эмиссией электронов в пределах пятна, но и электронами, эмитируемыми с поверхности вокруг пятна.

Для оценки вклада этой части фотоэлектронов в пространственное положение центра тяжести суммарного электронного пучка по отношению к вкладу части, эмитируемой из пятна фотоэмиссии, можно считать, что он пропорционален отношению площадей лазерного пятна и пятна фотоэмиссии на катоде и обратно пропорционален коэффициенту подавления  $G$  фотоэмиссии электронов слоем  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Предполагается, что диаметр пятна фотоэмиссии значительно меньше диаметра лазерного пучка на поверхности фотокатода, оно расположено в центре лазерного пучка, и смещения лазерного пучка относительно пятна фотоэмиссии небольшие (значительно меньше диаметра пучка). Так, например, для диаметров лазерного пучка  $D = 40$  мкм и пятна фотоэмиссии  $d = 15$  мкм и коэффициента  $G = 50$  этот вклад  $(D/d)^2/G \approx 0.14$ . Это означает, что положение центра тяжести электронного пучка, эмитируемого с поверхности катода, будет определяться в основном той частью электронов, которые эмитируются из фотоэмиссионного пятна. В то же время при  $D = 40$  мкм,  $d = 5$  мкм и  $G = 50$  этот вклад составляет  $\sim 1.3$ , т.е. в этом случае существенный вклад в формирование электронного пучка уже будет давать поверхность фотокатода, окружающая фотоэмиссионное пятно, а пространственные флуктуации электронного пучка практически повторяют пространственные флуктуации лазерного пучка. Поэтому в случае применения фотокатода с относительно малым диаметром фотоэмиссионного пятна необходимо значительно повышать коэффициент подавления фотоэмиссии  $G$  на поверхности фотокатода вне пятна (до уровня нескольких сотен). Очевидно, что при уменьшении размера фотоэмиссионного пятна будет уменьшаться и доля излучения, попадающая в это пятно, а следовательно, и эффективность использования лазерного излучения. Поэтому при уменьшении диаметра пятна фотоэмиссии до нескольких микрометров целесообразно пропорционально уменьшать диаметр лазерного пучка за счет фокусировки излучения в пятно меньшего диаметра ( $\sim 10$  мкм). Это, очевидно, имеет смысл только в том случае, если пространственные флуктуации лазерного пучка меньше его размера на поверхности фотокатода. Уменьшение диаметра лазерного пучка позволит не только увеличить эффективность использования лазерного излучения, но и ослабить требования к необходимой величине коэффициента подавления фотоэмиссии с катода вне пятна фотоэмиссии.

#### 4. Заключение

Предложен способ локализации фотоэлектронной эмиссии, основанный на создании на поверхности фотокатода пятен фотоэмиссии путем подавления фотоэмиссии электронов с поверхности фотокатода вне этих пятен. Для создания такого фотокатода использовалась структура из тонких пленок  $\text{Cu}_2\text{O}$  и  $\text{Ag}$ , на которой методом лазерной обработки формировалась сетка из пятен фотоэмиссии диаметром  $\sim 15$  мкм. Проведенные исследования показа-

ли, что использование такого фотокатода в ультрабыстром электронном микроскопе приводит к уменьшению в два-три раза шумов, связанных с пространственными флуктуациями лазерного излучения, осуществляющего фотоэмиссию электронов. С целью дальнейшего уменьшения этих шумов представляет интерес уменьшение фотоэмиссионных пятен до размера в несколько микрон при одновременном увеличении коэффициента подавления фотоэмиссии с поверхности фотокатода вне эмиссионных пятен.

Следует отметить также, что предложенный способ локализации фотоэлектронной эмиссии на поверхности фотокатода может быть использован не только для пленочных, но и для массивных фотокатодов. Кроме того, его можно применять не только при прямом падении лазерного излучения на поверхность фотокатода (со стороны фотоэмиссионного слоя), но и при обратном падении («на просвет»). Эти возможности значительно повышают универсальность использования такого способа локализации фотоэлектронной эмиссии.

Эксперименты по фотоэлектронной эмиссии выполнены с использованием УНУ «Многоцелевой фемтосекундный лазерно-диагностический спектрометрический комплекс» Института спектроскопии РАН. Наноструктура для локализации фотоэлектронной эмиссии была изготовлена в Лаборатории газовых лазеров отделения Квантовой радиофизики ФИАН им. П.Н.Лебедева.

За содействие в проведении экспериментов авторы С.В.А и Е.А.Р благодарят В.О.Компанца, Б.Н.Миронова и С.В.Чекалина, а П.А.Д и С.И.К благодарят А.А.Руденко и А.А.Ионина.

Работа поддержана Минобрнауки РФ (проект № RFMEFI61316X0054).

- Ищенко А.А., Асеев С.А., Баграташвили В.Н., Панченко В.Я., Рябов Е.А. *УФН*, **184**, 681 (2014).
- Зевайль А., Томас Дж. *Трехмерная электронная микроскопия в реальном времени* (Долгопрудный: Интеллект, 2013).
- Baskin J.S., Zewail A.H. *Compt. Rend. Phys.*, **15**, 176 (2014).
- Miller R.J.D. *Ann. Rev. Phys. Chem.*, **65**, 583 (2014).
- Barwick B., Corder C., Strohaber J., Chandler-Smith N., Uiterwaal C., Batelaan H. *New J. Phys.*, **9**, 142 (2007).
- Casandrac A., Kassier G., Zia H., Bückler R., Miller R.J.D. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **33**, 03C101 (2015).
- Storeck G., Vogelgesang S., Sivis M., Schäfer S., Ropers C. *Structural Dynamics*, **4**, 044024 (2017).
- Hoffrogge J., Stein J.P., Krüger M., Förster M., Hammer J., Ehberger D., Baum P., Hommelhoff P. *J. Appl. Phys.*, **115**, 094506 (2014).
- Plemmons D.A., Flannigan D.J. *Chem. Phys. Lett.*, **683**, 186 (2017).
- Meyer B.K., Polity A., Reppin D., Becker M., Hering P., Klar P.J., Sander Th., Reindl C., Benz J., Eickhoff M., Heiliger C., Heinemann M., Bläsing J., Krost A., Shokovets S., Müller C., Ronning C. *Phys. Status Solidi B*, **249**, 1487 (2012).
- Данилов П.А., Заярный Д.А., Ионин А.А., Кудряшов С.И., Литовко Е.П., Мельник Н.Н., Руденко А.А., Сараева И.Н., Уманская С.Ф., Хмельницкий Р.А. *Письма в ЖЭТФ*, **105**, 693 (2017).
- Данилов П.А., Заярный Д.А., Кудряшов С.И., Ионин А.А., Нгуен Ч.Т.Х., Руденко А.А., Сараева И.Н., Кучмижак А.А., Витрик О.Б., Кульчин Ю.Н. *Письма в ЖЭТФ*, **103**, 617 (2016).
- Андреев С.В., Асеев С.А., Баграташвили В.Н., Воробьев Н.С., Ищенко А.А., Компанец В.О., Малиновский А.Л., Миронов Б.Н., Тимофеев А.А., Чекалин С.В., Шашков Е.В., Рябов Е.А. *Квантовая электроника*, **47**, 116 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 116 (2017)].
- Старосотников Н.О., Фёдорцев Р.В. *Наука и техника*, № 5, 71 (2015).