

## Формирование нанолокализованных фотоионных пакетов вольфрама с помощью фемтосекундных лазерных импульсов

С. А. Асеев<sup>1)</sup>, Б. Н. Миронов, С. В. Чекалин, В. С. Летохов

Институт спектроскопии РАН, 142190 Троицк, Московская обл., Россия

Поступила в редакцию 5 марта 2008 г.

Нанолокализованные ионные пакеты созданы за счет пропускания сквозь кварцевый нанокапилляр фотоионов, образованных при облучении тугоплавкого металлического эмиттера фемтосекундным лазерным излучением с большой частотой повторения. С помощью такого импульсного нанопучка удалось реализовать миниатюрный ионный микроскоп и получить изображение фрагмента диэлектрической нанонапертуры.

PACS: 06.60.Jn, 68.37.-d, 79.60.Jv

В настоящее время наблюдается значительный интерес к исследованиям, связанным с пропусканием ионов [1] и электронов [2] сквозь нанотверстия в диэлектрических материалах. Это связано как с практическим использованием перспективных элементов ионной оптики для управления ионными пучками [3], так и с изучением физических процессов, происходящих внутри диэлектрических наноканалов при распространении ионов (электронов) сквозь такие материалы и позволяющим осуществить исследование самого непроводящего канала [1]. В экспериментах [1, 2] используются трековые каналы в полимерных пленках и непрерывные ионные (электронные) пучки. Важно отметить, что поверхности таких пленок для предотвращения зарядки непроводящего материала при облучении заряженными частицами покрываются тонким слоем металла (слоем золота 30 нм [1]), что сопровождается неизбежным проникновением металла внутрь наноканалов. В результате ионы распространяются вблизи поверхности, обладающей на различных участках как свойствами металла, так и свойствами диэлектрика. Поэтому изучение пропускания ионов (электронов) сквозь диэлектрический наноканал, образованный исключительно непроводящим материалом, приобретает особую ценность. В качестве изолированного наноканала можно использовать коммерчески-доступный кварцевый нанокапилляр, широко применяемый в биофизических исследованиях. Помимо чисто академического интереса, связанного с распространением пучка заряженных частиц (электронов или ионов) внутри такого объекта, появляются достаточно впечатляющие перспективы для нанотехнологических приложений, включающие в себя создание миниатюрного элек-

тронного микроскопа и ионного нанолитографа. Ранее нами были осуществлены эксперименты по пропусканию ультракоротких фотоэлектронных пучков, приготовленных с помощью фемтосекундных лазерных импульсов, сквозь кварцевый нанокапилляр и созданию на их основе источника направленного нанолокализованного импульсного электронного пучка [4, 5].

В данной работе получены экспериментальные данные по пропусканию фотоионных пакетов сквозь изолированный диэлектрический наноканал. При этом нанокапилляр не подвергался предварительной обработке, что позволило полностью сохранить его диэлектрические свойства. Источник ионов представлял собой металлический фотоэмиттер, вставленный внутрь капилляра и облучаемый фемтосекундными лазерными импульсами сквозь прозрачные стенки наноканала.

Неоспоримым достоинством фемтосекундной лазерной техники является возможность получать импульсные ионные пучки за счет многофотонных процессов, реализуемых вблизи поверхности эмиттера при достаточно умеренных плотностях энергии лазерных импульсов. Такой подход позволяет создавать ионы практически любого химического элемента (в том числе многократно заряженные ионы, изотопы) и не требует специально подготовленной поверхности облучаемого материала.

Экспериментальная установка (рис.1) представляет собой вакуумную камеру, откачиваемую турбомолекулярным насосом до вакуума на уровне  $10^{-7}$  мм рт.ст. и укомплектованную позиционно-чувствительным детектором и вторичным электронным умножителем (ВЭУ) (не показан на рис.1). ВЭУ входит в состав масс-спектрометра с время-

<sup>1)</sup>e-mail: isanfemto@yandex.ru

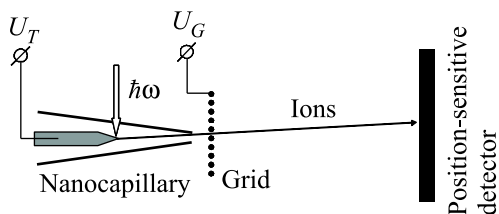


Рис.1. Принципиальная схема эксперимента. Вольфрамовая игла, облучаемая фемтосекундными лазерными импульсами, установлена внутри кварцевого нанокapилляра на его оси. Диэлектрический нанокapилляр, металлическая сетка и позиционно-чувствительный детектор помещены в безмасляный вакуум около  $10^{-7}$  мм рт.ст. Часть детектора, обращенная к нанокapилляру, находится под нулевым электрическим потенциалом

пролетной базой около 150 мм и позволяет проводить масс-спектрометрические измерения фотоионов, образованных при облучении металлического эмиттера лазерным излучением. Лазерные импульсы 70 фс с длиной волны  $\lambda = 400$  нм, энергией в импульсе  $\varepsilon \approx 10$  мкДж/имп. и частотой следования  $f = 1$  кГц фокусируются линзой с фокусным расстоянием  $F \cong 150$  мм на поверхность фотоэмиттера, что обеспечивает интенсивность на уровне  $I \approx 5 \cdot 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>. В качестве эмиттера взята вольфрамовая игла с радиусом острия около 1 мкм. Для проведения измерений к игле подводится положительный электрический потенциал  $U_T$ . Сигнал с ВЭУ через усилитель передается на запоминающий осциллограф. В качестве материала для эмиттера фотоионов выбран вольфрам, являющийся рекордно тугоплавким материалом.

Для исследования профиля импульсного фотоионного пучка, пропускаемого сквозь кварцевый нанокapилляр, использован позиционно-чувствительный детектор. Он состоит из пары микроканальных пластин с диаметром активной зоны 28 мм и люминофорного экрана. Сигнал с люминофора с помощью видеосистемы передается на компьютер и обрабатывается с использованием специальной программы. В качестве нанокapиллятора взят кварцевый капилляр ( $\mu$ TIP<sup>TM</sup>, WPI), который имеет форму вытянутого конуса с выходной наноапертурой диаметром  $\varnothing \approx 70$  нм на кончике. Для удобства юстировки W-эмиттер, находящийся под электрическим потенциалом  $U_T$ , вставлен внутрь капилляра (рис.1), так что расстояние от острия эмиттера до кончика капилляра составляет 4 мм. Расстояние от наноапертуры капилляра до позиционно чувствительного детектора равняется 100 мм. В вакуумной камере капилляр с вольфрамовым острием прикреплен к манипулято-

ру, позволяющему изменять направление фотоионного пучка относительно детектора в необходимых пределах. Передняя грань позиционно-чувствительного детектора находится под нулевым электрическим потенциалом.

Фотоионы, образованные в результате облучения фотоэмиттера фемтосекундными лазерными импульсами, исследовались с помощью масс-спектрометра, калибровка которого выполнена с использованием трех различных эмиттеров, приготовленных из вольфрама, меди и алюминия соответственно. На основе сделанных измерений можно сформулировать следующий механизм образования фотоионов вольфрама. Под действием повторяющихся с частотой 1 кГц сфокусированных импульсов происходит разогрев металла, приводящий к образованию нейтральных атомов вольфрама вблизи поверхности. Далее атомы вольфрама ионизируются лазерным импульсом. При этом процесс может осуществляться по следующему каналу:  $W \rightarrow W^+ + e^-$ .

В этом канале реализуется многофотонная ионизация с образованием свободных иона и электрона (потенциал ионизации вольфрама  $I_W \approx 7.9$  эВ приблизительно в 2.6 раз превышает энергию кванта  $\hbar\omega \approx 3.1$  эВ). В наших условиях эффект нагрева острия проверялся путем уменьшения частоты следования лазерных импульсов до 50 Гц, что сопровождалось фактически исчезновением фотоионного сигнала. Отсюда следует, что разогрев вольфрамового «кончика» и высвобождение нейтральных атомов W объясняется средней мощностью, а многофотонная ионизация определяется пиковой мощностью фемтосекундных импульсов. Экспериментально наблюдаемый выход фотоионов (рис.2) описывается степенной зависимостью от интенсивности лазерного излучения  $W^+ \sim I^n$  с показателем степени  $n \approx 2.51$ . Отметим, что образование фотоионов осуществляется на фемтосекундной временной шкале.

Распределение плотности фотоионного пучка, вышедшего из нанокapилляра, в поперечном сечении изучалось с помощью позиционно-чувствительного детектора. Как хорошо известно [6], для эффективной регистрации ионов микроканальными пластинами, входящими в состав детектора, пучок должен обладать кинетической энергией в несколько кэВ. Однако при этом возможно распыление материала капилляра ускоренными ионами [7]. Чтобы избежать разрушения нанокapилляра, в эксперименте на расстоянии около 7 мм от кончика капилляра помещена металлическая сетка, находящаяся под электрическим потенциалом  $U_G$  (рис.1). Таким образом, использование дополнительного электрода в виде сет-

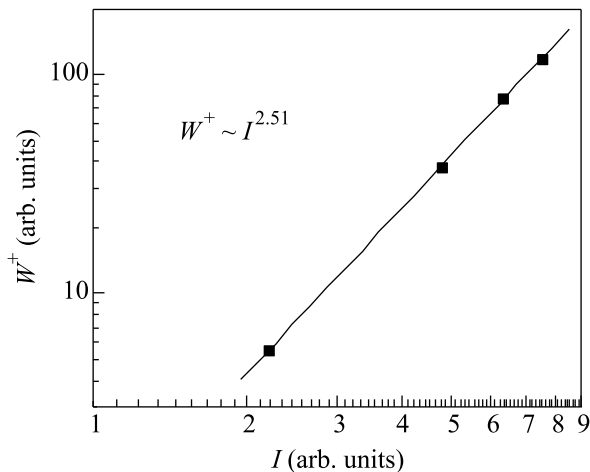


Рис. 2. Зависимость выхода ионов вольфрама от интенсивности фемтосекундных лазерных импульсов, облучающих поверхность металла с частотой повторения 1 кГц

ки позволяет осуществлять наноколлимацию ионов с кинетической энергией, которая определяется разностью электрических потенциалов  $U_T$  и  $U_G$  и может достигать нескольких эВ.

На рис. 3а приведено распределение фотоионной плотности в плоскости детектора, полученное при  $U_T = 1500$  В и  $U_G = 1300$  В. При  $U_T = 1500$  В и  $U_G = 1494$  В, когда кинетическая энергия однократно заряженных ионов внутри капилляра не превышает 6 эВ, фотоионный сигнал имеет ту же форму в виде фрагмента кольца (рис. 3б). Кольцеобразное распределение наблюдаемого сигнала является следствием столкновений пучка ионов со стенками капилляра. Без использования фокусировки доля баллистических (прямолетающих) фотоионов весьма мала и пропорциональна  $\varnothing^2$ . В этой оценке учтено, что изначально фотоионы испускаются в широкий телесный угол порядка 1 страд. Преобладающая часть фотоионов испытывает столкновения со стенками, и основной вклад в детектируемый сигнал вносят ионы, отраженные от внутренней поверхности нанокapилляра. Распределение ионной плотности, передающее форму наноапертуры, в этом случае должно иметь форму кольца или дуги, что и наблюдается в эксперименте.

Таким образом, регистрируемые ионы позволяют получить изображение диэлектрической наноапертуры или ее фрагмента (рис. 3). В этой связи полезно отметить, что попытки визуализации сквозного нанотверстия диэлектрического капилляра с помощью обычного коммерческого электронного микроскопа встречают серьезные трудности.

Источник ионного нанопучка на основе коммерчески доступного нанокapилляра позволяет осуществить несколько важных экспериментов. Во-первых, такой пучок с кинетической энергией менее нескольких кэВ можно применить для ионной *на*оимплантации. Как хорошо известно, в нанотехнологическом аспекте необходимо проведение исследований по взаимодействию с твердым телом ионов, обладающих именно малой кинетической энергией [8]. Принципиальные возможности создания на поверхности наноструктур из различных материалов, включая изотопы, с помощью такого метода определяются минимально достижимым поперечным размером ионного нанопучка, что в свою очередь зависит от диаметра апертуры нанокapилляра, которая может достигать 10 нм [9].

Во-вторых, рассмотренный ионный наноисточник может быть основой чрезвычайно компактного ионного микроскопа. Пучок ионов на выходе из нанокapилляра может быть использован для создания теннеграмм наноструктур (например, нанотрубок), закрепленных вблизи его кончика. Изображение наноапертуры при этом может быть использовано в качестве реперного сигнала, удобного для определения пространственного масштаба. Отдельно может быть рассмотрен вопрос о возможной структурной модификации наблюдаемых наноструктур с помощью ионного нанопучка.

В-третьих, использование направленного и нанолокализованного фотоионного пакета, созданного с помощью фемтосекундных лазерных импульсов, позволяет осуществить эксперимент по наблюдению процесса ионной имплантации, в котором одновременно присутствует как нанометровое пространственное, так и ультракороткое временное разрешение. Идея такого эксперимента заключается в том, чтобы модифицировать физико-химическую структуру элемента поверхности вблизи кончика нанокapилляра ультракоротким ионным пакетом, а затем наблюдать взаимодействие фемтосекундного лазерного импульса с различными участками твердого тела.

Изменение задержки между световым фемтосекундным импульсом и импульсным фотоионным нанопучком позволит определить временные характеристики процесса. Для сканирования пучка в пространстве могут быть использованы пьезоэлектрические трансляторы, разработанные для зондовой микроскопии.

Измерение длительности фотоионных пакетов, приготовленных с помощью фемтосекундных лазерных импульсов, будет предметом отдельных исследований.

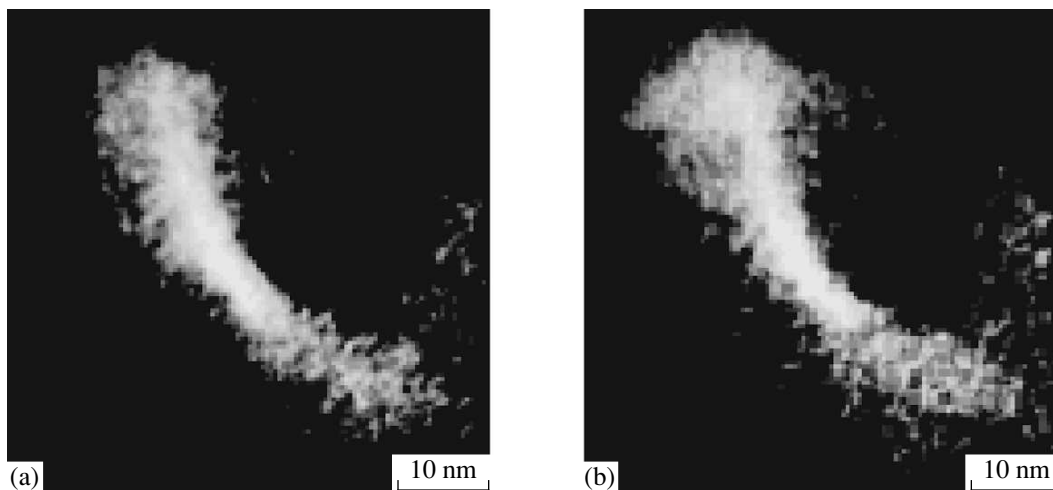


Рис.3. Распределение ионной плотности в пучке, полученном при пропускании фотоионов сквозь нанокapилляр, при: (a)  $U_T = 1500$  В и  $U_G = 1300$  В; (b)  $U_T = 1500$  В и  $U_G = 1494$  В

Авторы работы считают своим приятным долгом поблагодарить А.П. Черкуна за изготовление вольфрамового эмиттера методом химического травления и С.К. Секацкого за помощь в получении кварцевых нанокapилляров. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 08-02-00655).

1. N. Stolterfoht, J.-H. Bremer, V. Hoffmann et al., *Phys. Rev. Lett.* **88**, 133201 (2002).
2. S. Das, B. S. Dassanayake, M. Winkworth et al., *Phys. Rev. A* **76**, 042716 (2007).
3. S. Matefi-Tempfli, M. Matefi-Tempfli, L. Piraux et al.,

*Nanotechnology* **17**, 3915 (2006).

4. Б. Н. Миронов, С. А. Асеев, С. В. Чекалин, В. С. Летохов, *ЖЭТФ* **128**, 732 (2005).
5. S. A. Aseyev, B. N. Mironov, S. V. Chekalin, and V. S. Letokhov, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 112513 (2006).
6. J. L. Wiza, *Nucl. Instrum. Meth.* **162**, 587 (1979).
7. К. Оура, В. Г. Лифшиц, А. А. Саранин и др., *Введение в физику поверхности*, М.: Наука, 2006.
8. Д. И. Тетельбаум, *Предисловие к сборнику материалов V Всероссийского семинара по физическим и физико-химическим основам ионной имплантации*, Н. Новгород, 2000.
9. M. P. Grams, A. M. Cook, J. H. Turner, and R. B. Doak, *J. Phys D: Appl. Phys.* **39** 930 (2006).