ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 2020, том 58, № 6, с. 951–954

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 538.971

ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ ПИКОКУЛОННОГО УРОВНЯ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ИГЛЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ТИТАН-САПФИРОВОГО ЛАЗЕРА

© 2020 г. Н. А. Абрамовский[1, 2], С. Б. Бодров[1, 2], А. М. Киселев[1], А. А. Мурзанев[1], А. В. Ромашкин[1], А. Н. Степанов[1, *]

[1] ФГБНУ "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук" (ИПФ РАН), г. Нижний Новгород, Россия

[2] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, (ННГУ), г. Нижний Новгород, Россия

*E-mail: step@ufp.appl.sci-nnov.ru

Поступило в редакцию 19.06.2020 г.
После доработки 21.08.2020 г.
Принято к публикации 14.10.2020 г.

Использование излучения титан-сапфирового лазера с низкой частотой повторения импульсов позволило обеспечить работу с металлической иглой (без ее разрушения) в качестве эмиттера электронов при повышенной интенсивности лазерного излучения на игле. В результате с металлической иглы с характерным радиусом кривизны ~1 мкм получена эмиссия электронов с зарядом в диапазоне десятков пикокулон за лазерный импульс.

DOI: 10.31857/S0040364420060010

ВВЕДЕНИЕ

Создание новых короткоимпульсных источников электронной эмиссии представляется важным в силу их возможного применения при исследованиях фундаментальных процессов, требующих высокого временнóго разрешения. Электронные сгустки, получаемые в процессе лазерной фотоэмиссии, обеспечивают работу фотокатодов в ускорителях и лазерах на свободных электронах [1]. Пикосекундная и фемтосекундная длительности импульсов электронных источников, обеспечиваемые при лазерном облучении катодов, находят применение в сверхбыстрой дифрактометрии твердого тела [2], а также при исследовании динамики химических процессов [3].

Отдельным направлением является использование в качестве эмитирующих катодов металлических микро- и наноострий. Малый размер источника повышает пространственную когерентность при проведении исследований быстрых структурных изменений с использованием дифракционных методик [4, 5]. В выполненных к настоящему времени исследованиях с применением металлических игл в качестве эмиттеров в основном использовался режим генерации, при котором за один лазерный импульс эмитируется не более одного электрона, а острия облучаются при высокой (мегагерцовой) частоте повторения лазерных импульсов. Большое внимание уделено выяснению механизмов фотоэмиссии [6–8] в одноэлектронном режиме излучения. Обсуждаются многофотонная и туннельная эмиссии и условия перехода между ними. Снижение частоты повторения лазерных импульсов до килогерцового диапазона позволило повысить интенсивность лазерного излучения, воздействующего на иглу без ее разрушения, и перейти к режиму многоэлектронной эмиссии [9]. В работе [10] продемонстрирован сильно нелинейный режим фотоэмиссии с возможностью получения до 10^3 электрон/импульс при частоте повторения лазерных импульсов 1 кГц.

В настоящей работе приведены результаты исследований, в которых при дальнейшем понижении частоты повторения лазерных импульсов (фактически до одиночных, разовых) удалось повысить интенсивность лазерного излучения на игле без ее разрушения настолько, что стало возможно получать за один лазерный импульс электронный сгусток с зарядом в несколько пикокулон. Такой импульсный точечный источник электронов с эмитируемым зарядом в пикокулонном диапазоне, несмотря на очевидное временнóе растяжение электронного сгустка за счет поля пространственного заряда, представляет интерес в исследованиях, требующих высокой пространственной когерентности и больших электронных потоков.

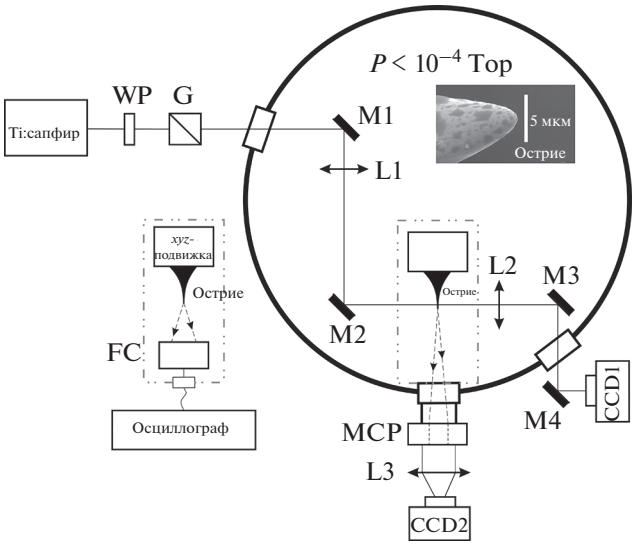

Рис. 1. Схема экспериментальной установки; на вставке – кончик иглы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальная схема для исследования генерации электронных сгустков из металлической иглы под действием фемтосекундного лазерного излучения представлена на рис. 1. Источником излучения служил фемтосекундный лазерный комплекс на кристаллах сапфира, допированного ионами титана, или титан-сапфира, генерирующий фемтосекундные лазерные импульсы длительностью 70 фс, энергией 10 мДж с частотой повторения 10 Гц [11].

Для проведения данных экспериментов использовалась часть лазерного излучения с энергией в импульсе менее 10 мкДж. Энергия импульса изменялась с помощью поляризационного аттенюатора, состоящего из полуволновой пластинки WP и призмы Глана G. Затем лазерное излучение вводилось в вакуумную камеру, остаточное давление в которой составляло $P = 10^{-4}$–10^{-5} Тор. В камере лазерное излучение фокусировалось в область, где находился кончик металлической иглы, с помощью линзы L1 с фокусным расстоянием $f1 = 40$ см. Диаметр лазерного пучка в фокусе линзы по уровню $1/e^2$ составлял ~100 мкм. Оптическая схема, состоящая из линзы L2 ($f2 = 5$ см) и зеркал M3, M4, позволяла контролировать взаимное положение лазерного пучка и иглы с помощью камеры CCD1 (Спецтелетехника, SDU-415), а также состояние иглы, подвергшейся импульсному облучению. Игла располагалась в вакуумной камере на прецизионной трехкоординатной *xyz*-подвижке. Поляризация излучения выбрана таким образом, чтобы направление вектора электрического поля лазерного излучения совпадало с осью иглы, направленной на детектор заряженных частиц. На иглу подавалось отрицательное напряжение в диапазоне $U = 0$–100 В от отдельного источника.

В качестве эмиттера электронов использовались металлические иглы из вольфрама, изготовленные методом электрохимического травления. Для изготовления игл вольфрамовая проволока толщиной 100 мкм подвергалась электрохимическому травлению [12, 13]. Травление проходило в растворе гидроксида калия (KOH) в течение нескольких десятков секунд. Таким образом, воспроизводимо получались иглы с характерным размером острия порядка 1 мкм. Характерное изображение кончика иглы, полученное с помощью электронного микроскопа, представлено на вставке на рис. 1.

Диагностика эмиссии электронов с иглы осуществлялось двумя способами. Во-первых, для диагностики использовалась микроканальная пластина МКП 25-10Т (МКП) с люминесцентным экраном на выходе. Микроканальная пластинка с диаметром рабочей части 26 мм размещалась на оси иглы на фланце вакуумной камеры на расстоянии $L = 10$ см от кончика иглы. Питание микроканальной пластинки осуществлялось от импульсного высоковольтного источника. Длительность высоковольтного импульса амплитудой $U = 6.3$ кВ составляла 20 нс и определяла временно́е разрешение данной системы диагностики. МКП нечувствительна к оптическому излучению на длине волны титан-сапфирового лазера: рассеянного от иглы лазерного излучения не наблюдалось. Изображение люминесцентного экрана МКП при помощи линзы L3 переносилось на матрицу камеры CCD2 (Спецтелетехника, SDU-205). Данная диагностика позволяла проводить относительные измерения временно́й зависимости эмитированных из иглы электронов от задержки между лазерным импульсом и высоковольтным импульсом, подаваемым на МКП, а также зависимость эмиссии электронов от энергии лазерного импульса. Для количественной диагностики заряда электронных сгустков, эмитированных из иглы, была использована другая диагностика – цилиндр Фарадея (FC), который представлял собой полый цилиндрический стакан из латуни внутренним диаметром 15 мм и длиной 60 мм. Цилиндр Фарадея располагался в вакуумной камере на оси иглы на расстоянии 15 мм от нее. Эмитированные из иглы электроны попадали внутрь цилиндра Фарадея и заряжали его. Напряжение с цилиндра регистрировалось на осциллографе, что позволяло измерить заряд электронных сгустков.

При измерениях эмиссионных свойства катодов, имеющих форму металлической иглы, с помощью МКП получены следующие результаты. Иглы облучались фемтосекундными лазерными

импульсами с энергией $W \leq 5$ мкДж. Максимальная интенсивность лазерного излучения в месте расположения иглы достигала величины ~10^{12} Вт/см^2. Основная часть экспериментов выполнена в разовом режиме: игла облучалась лазерным импульсом примерно 1 раз в 30 с. Низкая частота повторения импульсного воздействия на иглу позволила проводить эксперименты при таких высоких интенсивностях лазерного излучения. Визуальный контроль состояния иглы в фокусе лазерного пучка показал, что даже при максимальной интенсивности лазерного излучения форма острия иглы не менялась при воздействии до нескольких сот импульсов. При более длительном воздействии при максимальных интенсивностях наблюдалось изменение формы иглы, ее кончик становился более тупым. Применение в настоящих экспериментах режима разового облучения позволило провести эксперименты при значениях интенсивности, превосходящих величины, использованные в ранее выполненных работах [7, 9]. Зависимость количества электронов, пришедших на микроканальную пластину, от времени задержки между лазерным импульсом и высоковольтным импульсом питания МКП представлена на рис. 2 для напряжения на игле $U = -30$ В. Явно виден быстро нарастающий временно́й фронт, связанный с приходом быстрых электронов, и медленно спадающая часть зависимости, определяемая медленными электронами.

В экспериментах люминесцентный экран МКП засвечивался однородно. Это позволяет оценить ширину диаграммы разлета электронов из иглы как превышающую телесный угол 0.07 ср.

Функция распределения электронов по энергиям, восстановленная по временно́й зависимости сигнала МКП, изображена на рис. 3. Энергетический спектр регистрируемых электронов определялся временно́й эволюцией электронного сгустка, эмитированного за время фемтосекундного лазерного импульса, в процессе распространения от катода до места регистрации в поле смещения, подаваемого на иглу. Максимум в энергетическом спектре электронов, эмитированных из иглы, примерно соответствовал приложенному к игле отрицательному напряжению. При увеличении этого напряжения максимум в энергетическом спектре смещался в сторону электронов с большей энергией. Присутствие в спектре электронов с энергией, превышающей напряжение, приложенное к игле, на величину ~10 эВ, по-видимому, отражает энергетический спектр электронов, непосредственно эмитированных из иглы лазерным полем. Аналогичный результат наблюдался ранее в [8]. Наличие большого количества медленных электронов в энергетическом спектре связано с влиянием поля пространственного заряда эмитированного электронного сгустка в процессе распространения от катода до места регистрации.

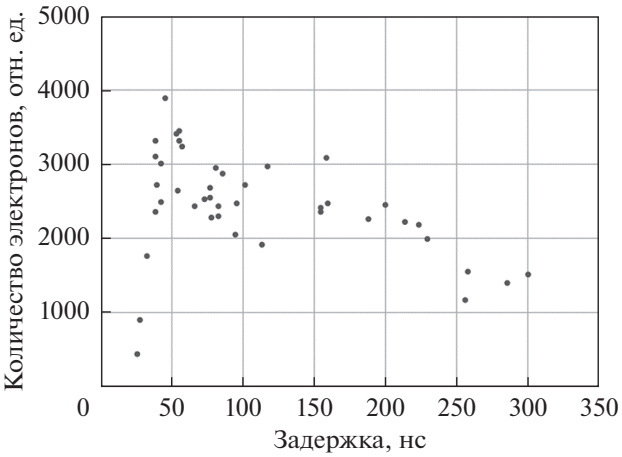

Рис. 2. Зависимость количества электронов, эмитированных из иглы, от времени задержки при $W = 5$ мкДж и $U = -30$ В.

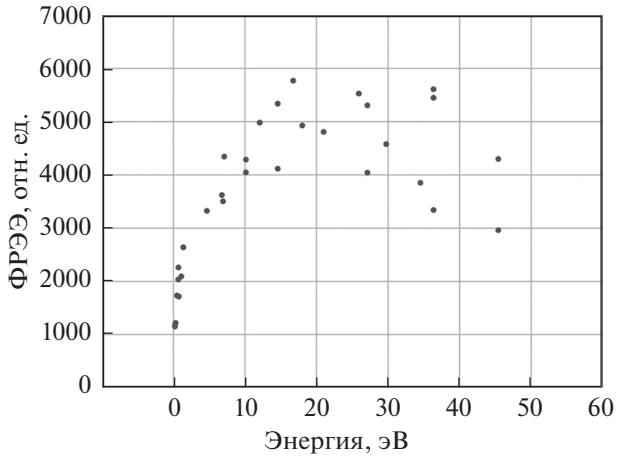

Рис. 3. Функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) при $W = 5$ мкДж и $U = -30$ В.

Зависимость абсолютной величины эмитированного из иглы заряда электронного сгустка от энергии импульса оптического излучения (рис. 4, напряжение на игле $U = -30$ В) получена с помощью цилиндра Фарадея. Эмитированный из катода заряд быстро нарастал при увеличении энергии оптического импульса, а затем наступало насыщение при энергии лазерных импульсов ~3–4 мкДж. Быстро растущая часть зависимости могла быть аппроксимирована степенной функцией с показателем степени, равном четырем, что, по всей вероятности, свидетельствует о многофотонном механизме электронной эмиссии [7]. Гораздо более медленная зависимость при больших энергиях лазерного импульса, предположительно, связана с экранирующим влиянием поля пространственного заряда, создаваемого эмитиро-

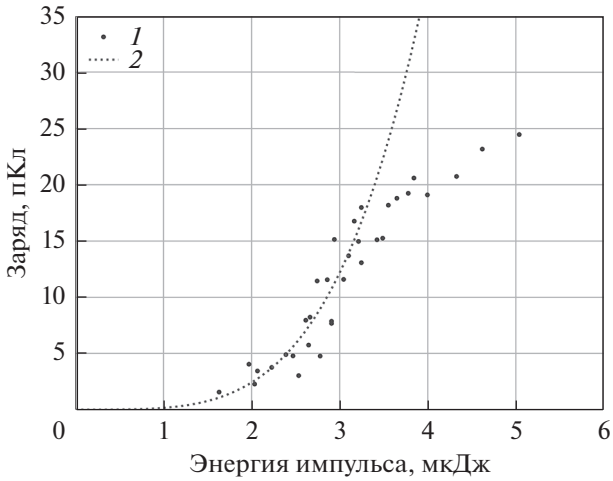

Рис. 4. Зависимость заряда электронного сгустка, измеренного цилиндром Фарадея, от энергии лазерных импульсов: *1* – эксперимент, *2* – аппроксимация $\sim W^4$.

ванными электронами около иглы. Максимальное значение заряда эмитированных из иглы электронов достигало 20 пКл. Отметим, что похожая зависимость эмитированного из иглы заряда электронов от энергии лазерных импульсов с быстрым ростом и последующим насыщением наблюдалась и в измерениях с микроканальной пластиной. Данные экспериментов с микроканальной пластиной также показали, что изменение напряжения на игле с $U = -30$ В до $U = -90$ В приводило к смещению области насыщения в сторону бóльших энергий импульсов оптического излучения и росту заряда электронного сгустка в несколько раз.

Эмиссия заряда 10 пКл за время лазерного импульса длительностью порядка 100 фс соответствует величине пикового тока фотоэмиссии ~100 А. Взяв в качестве оценки характерную площадь острия 1 мкм^2, получим для плотности тока эмиссии с иглы чрезвычайно высокую величину $\sim 10^{10}$ А/см^2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве заключения можно отметить, что в выполненных исследованиях показано, что использование в качестве эмиттера металлических игл позволяет получить при их облучении фемтосекундным оптическим излучением с микроджоульной энергией в импульсе на длине волны титан-сапфирового лазера с низкой частотой повторения электронные сгустки, длительность которых определяется динамикой их разлета от эмиттера, а величина заряда сгустка достигает десятков пикокулон. Такой источник электронов, синхронизованный с лазерными импульсами, может оказаться удобной отправной точкой для использования в исследованиях, требующих высокой пространственной когерентности и больших электронных потоков.

Работа была выполнена в рамках гранта РНФ № 19-42-04133, поддержание функционирования лазерной системы частично профинансировано Министерством науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ИПФ РАН, проект № 0035-2019-0012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ayvazyan V. et al.* Generation of GW Radiation Pulses from a VUV Free-electron Laser Operating in the Femtosecond Regime // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88. № 10. 104802.
2. *Dantus M., Kim S.B., Williamson J.C., Zewail A.H.* Ultrafast Electron Diffraction. 5. Experimental Time Resolution and Applications // J. Phys. Chem. 1994. V. 98. № 11. P. 2782.
3. *Ihee H., Lobastov V.A., Gomez U.M., Goodson B.M., Srinivasan R., Ruan C.Y., Zewail A.H.* Direct Imaging of Transient Molecular Structures with Ultrafast Diffraction // Science (New York, N.Y.). 2001. V. 291. № 5503. P. 458.
4. *Tonomura A.* The Quantum World Unveiled by Electron Waves. Singapore: World Scientific, 1998. P. 172.
5. *Williamson J.C., Cao J., Ihee H., Frey H., Zewail A.H.* Clocking Transient Chemical Changes by Ultrafast Electron Diffraction // Nature. 1997. V. 386. № 6621. P. 159.
6. *Hommelhoff P., Sortais Y., Aghajani-Talesh A., Kasevich M.A.* Field Emission Tip as a Nanometer Source of Free Electron Femtosecond Pulses // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. № 7. P. 77401.
7. *Barwick B., Corder C., Strohaber J., Chandler-Smith N., Uiterwaal C., Batelaan H.* Laser-induced Ultrafast Electron Emission from a Field Emission Tip // New J. Phys. 2007. V. 9. № 5. P. 142.
8. *Ropers C., Solli D.R., Schulz C.P., Lienau C., Elsaesser T.* Localized Multiphoton Emission of Femtosecond Electron Pulses from Metal Nanotips // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. № 4. P. 43907.
9. *Hilbert S.A., Neukirch A., Uiterwaal C.J., Batelaan H.* Exploring Temporal and Rate Limits of Laser-induced Electron Emission // New J. Phys. 2009. V. 42. № 14. 141001.
10. *Bormann R., Gulde M., Weismann A., Yalunin S.V., Ropers C.* Tip-enhanced Strong-field Photoemission // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 105. № 14. 147601.
11. *Бабин А.А., Киселев А.М., Сергеев А.М., Степанов А.Н.* Тераваттный фемтосекундный титан-сапфировый лазерный комплекс // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 7. С. 623.
12. *Oliva A.I., A. Romero G., Peña J.L., Anguiano E., Aguilar M.* Electrochemical Preparation of Tungsten Tips for a Scanning Tunneling Microscope // Rev. Sci. Instrum. 1996. V. 67. № 5. P. 1917.
13. *Chang W.T., Hwang I.S., Chang M.T., Lin C.Y., Hsu W.H., Hou J.L.* Method of Electrochemical Etching of Tungsten Tips with Controllable Profiles // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. № 8. P. 83704.