

УДК 538.971

## ЭМИССИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ИГЛЫ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРОМ ИК-ДИАПАЗОНА НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1240 НМ

© 2021 г. А. В. Овчинников<sup>1</sup>, О. В. Чефонов<sup>1</sup>, М. Б. Агранат<sup>1</sup>, А. Н. Степанов<sup>2</sup>, \*

<sup>1</sup>ФГБУН “Объединенный институт высоких температур РАН” (ОИВТ РАН), Москва, Россия

<sup>2</sup>ФГБНУ “Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН” (ИПФ РАН),  
г. Нижний Новгород, Россия

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

Поступила в редакцию 26.04.2021 г.

После доработки 17.05.2021 г.

Принята к публикации 19.05.2021 г.

Исследована фотоэмиссия электронов из металлической иглы при воздействии излучения фемтосекундного лазера ИК-диапазона с длиной волны 1240 нм. Диагностика электронных сгустков с помощью цилиндра Фарадея и времяпролетного метода показала возможность получения электронных импульсов с зарядом в 40 пКл при энергии в импульсе лазера 45 мкДж. Зависимость заряда электронного импульса, пропорционального шестой степени энергии лазерного импульса, свидетельствует о многофотонном механизме эмиссии электронов.

DOI: 10.31857/S0040364421040177

### ВВЕДЕНИЕ

Генерация коротких сгустков электронов является необходимым атрибутом для проведения многих фундаментальных исследований. Электронные сгустки, которые генерируются из фотокатодов, облучаемых лазерными импульсами, используются в лазерах на свободных электронах [1]. Электронные импульсы субпикосекундной и фемтосекундной длительности позволяют отслеживать движение атомов в процессе химических реакций [2, 3]. На базе ультракороткого электронного пучка, возбуждаемого лазерными импульсами, был создан сверхбыстрый просвечивающий электронный микроскоп для проведения исследований динамических процессов в образцах [4, 5].

Одним из направлений развития методов генерации сверхкоротких электронных импульсов является использование эмиттера в виде острой металлической иглы, облучаемого излучением фемтосекундного лазера. Сочетание фемтосекундной длительности электронного импульса с микронным или субмикронным размером источника позволяет реализовать сверхбыструю электронную микроскопию и электронную дифракцию с высоким временным разрешением и обеспечить высокую пространственную когерентность [6, 7]. Исследование коротких электронных импульсов, эмитированных из металлических игл, активно проводится в последние годы [8, 9].

Значительные усилия были направлены на исследование режима получения одиночных электронов и механизмов эмиссии из nanoострий. В работе [10] рассматривалась надпороговая фотоэмиссия из металлического острия, а в [11] исследовался переход от однофотонной ионизации в присутствии сильного постоянного поля к четырехфотонной при его отключении. Однако не для всех приложений необходим режим малоэлектронной эмиссии. В некоторых задачах стоит проблема получения больших зарядов электронных импульсов. В этом случае необходимо повысить интенсивность лазерного излучения, вызывающего фотоэмиссию. Однако повышение интенсивности лазерного излучения ведет к разрушению металлической иглы. Естественным способом преодоления этой проблемы является снижение частоты повторения лазерных импульсов. Если в работах [6, 9, 10] использовались лазеры с частотой повторения в десятки мегагерц, то снижение частоты повторения до килогерцового диапазона [8] позволило поднять рабочий уровень интенсивностей лазерного излучения до уровня, обеспечивавшего гораздо больший заряд электронных импульсов. В частности, в работе [12] отмечено, что уменьшение частоты повторения не только повышает возможный уровень энергии лазерных импульсов, но и меняет энергетическое распределение эмитированных из иглы электронов. В [13] показано, что использование лазерного излучения с частотой повторения импульсов

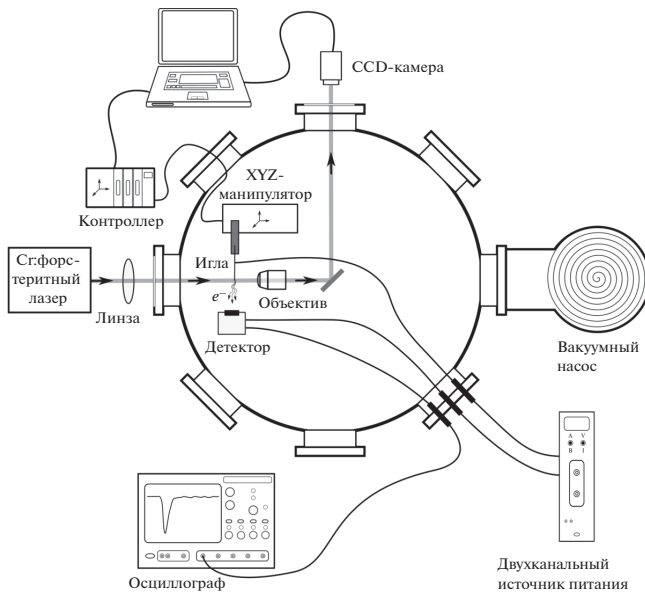


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

менее 1 Гц и длиной волны 800 нм (лазер на Ti:сапфир) позволяет повысить интенсивность лазерного излучения до величины порядка  $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> и обеспечить эмиссию из металлической иглы электронных сгустков с зарядом до 10 пКл за один лазерный импульс.

Настоящая работа продолжает исследования, направленные на расширение возможностей получения электронных импульсов из металлических игл путем применения для эмиссии электронов излучения более длинноволнового фемтосекундного лазера на хром-форстерите с длиной волны излучения, лежащей в области ближнего инфракрасного диапазона (1240 нм). В работе показано, что с использованием лазерных импульсов с энергией в 45 мкДж можно получить заряд электронного импульса в 40 пКл. Зависимость заряда электронного сгустка оказалась пропорциональна шестой степени энергии лазерного импульса, что свидетельствует о многофотонном механизме эмиссии электронов из иглы.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальная схема для исследования электронной эмиссии из катода в виде металлической иглы под действием фемтосекундных лазерных импульсов представлена на рис. 1. В экспериментах использовалась фемтосекундная хром-форстеритовая лазерная система [14], которая генерировала импульсы на длине волны излучения 1240 нм, длительностью 100 фс, энергией до 50 мкДж и частотой повторения 10 Гц. Поскольку основным механизмом разрушения металлической

иглы, используемой в качестве эмиттера электронов, является нагрев до высокой температуры, то в настоящих экспериментах для уменьшения средней температуры иглы частота повторения импульсов была понижена и составляла менее 1 Гц. Это позволило обеспечить работу без разрушения иглы при повышении интенсивности лазерного излучения на игле до нескольких ТВт/см<sup>2</sup>.

Лазерное излучение (диаметр лазерного пучка  $d = 7$  мм) вводилось в вакуумную камеру через стеклянное окно и фокусировалось в область, где находился кончик металлической иглы, линзой с фокусным расстоянием 350 мм. Энергия лазерных импульсов изменялась с помощью входящего в состав лазерной системы поляризационного ослабителя, который состоял из полуволновой пластины и призмы Глана–Томпсона. Для контроля положения иглы в лазерном пучке и ее состояния после облучения использовалась оптическая система переноса изображения, состоящая из апланхроматического объектива ПЛАН-П  $3.5 \times 0.10$ , поворотного зеркала и видеокамеры (в экспериментах использовалась кремниевая ПЗС-камера Видеоскан-415). Игла в специальном держателе устанавливалась на моторизованный трехкоординатный линейный транслятор, предназначенный для эксплуатации в условиях вакуума. Управление транслятором осуществлялось с помощью контроллера и персонального компьютера. Двухканальный источник питания использовался для подачи на иглу постоянного отрицательного напряжения в диапазоне 0–100 В и для питания детектора электронов. Поляризация лазерного излучения была выбрана таким образом, чтобы направление вектора электрического поля лазерного излучения совпадало с осью иглы, направленной на детектор заряженных частиц. Регистрация сигналов детектора производилась цифровым осциллографом. Остаточное давление внутри вакуумной камеры ( $10^{-4}$ – $10^{-5}$  Тор) поддерживалось вакуумным постом на базе турбомолекулярного насоса.

На рис. 2 приведено изображение пространственного распределения интенсивности лазерного пучка на длине волны излучения 1.24 мкм, зарегистрированного с помощью кремниевой ПЗС-камеры Видеоскан-415 в фокальной плоскости линзы с фокусным расстоянием 350 мм. На рис. 3 представлены горизонтальный и вертикальный профили интенсивности лазерного пучка, соответствующие направляющим линиям, изображенным на рис. 2.

На рис. 4 приведено теневое изображение кончика иглы в лазерном пучке, используемой в экспериментах. Игла изготовлена из вольфрамовой проволоки толщиной 100 мкм методом электро-

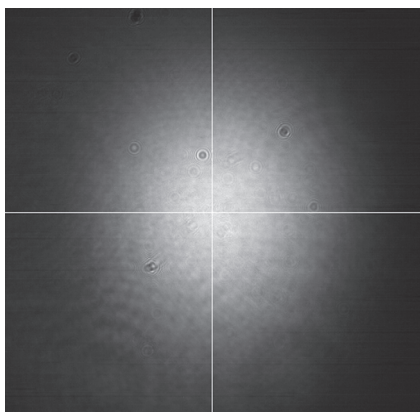


Рис. 2. Изображение пространственного распределения интенсивности лазерного пучка с длиной волны 1.24 мкм в фокальной плоскости линзы.

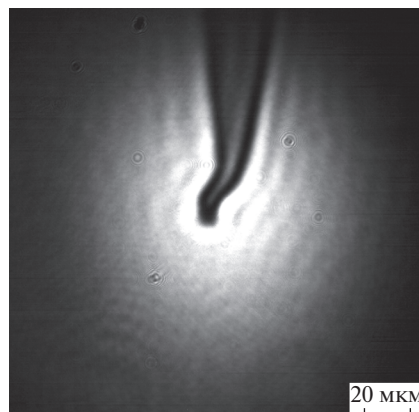


Рис. 4. Изображение кончика иглы в лазерном пучке.

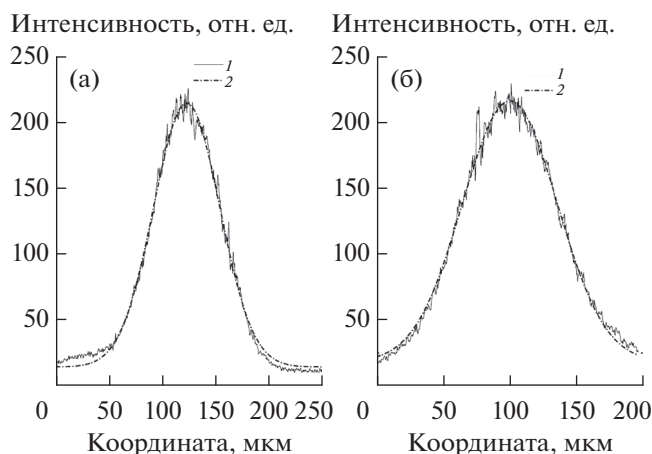


Рис. 3. Горизонтальный профиль лазерного пучка (а): 1 – измеренный профиль, 2 – его аппроксимация функцией Гаусса (FWHM = 73.1 мкм); (б) 1 – вертикальный профиль лазерного пучка, 2 – аппроксимация функцией Гаусса (FWHM = 83.8 мкм).

химического травления в растворе гидроксида калия (КОН) в ИПФ РАН.

Для количественной оценки заряда электронных сгустков, эмитированных из иглы, использовался цилиндр Фарадея, представляющий собой латунный цилиндр с внутренним диаметром 15 мм и длиной 60 мм. Цилиндр Фарадея располагался в вакуумной камере на оси иглы на расстоянии около 10 мм от ее острия, телесный угол сбора электронов составлял  $\Omega \approx 1.8$  ср. Электроны, эмитированные из иглы, попадая внутрь цилиндра, поглощались и заряжали его. Напряжение на цилиндре регистрировалось цифровым осциллографом. На рис. 5 приведена типичная осциллограмма сигнала цилиндра Фарадея.

На рис. 6 показана зависимость экспериментально измеренного заряда импульса эмитиро-

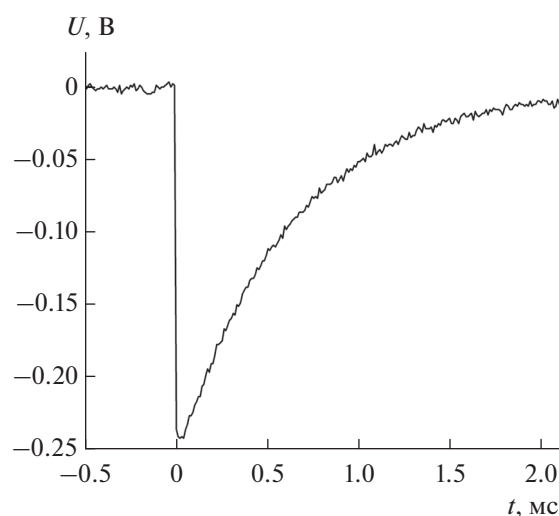


Рис. 5. Осциллограмма сигнала цилиндра Фарадея (нагрузка – 1 МОм); постоянная времени – 620 мкс.

ванных электронов из иглы от энергии лазерного импульса  $E_{\text{las}}$  на длине волны излучения 1240 нм при напряжении на игле  $U = -60$  В.

Для энергии фотона хром-форстеритового лазера  $\hbar\omega = 1$  эВ и работы выхода электрона из вольфрама, которая в среднем составляет  $A = 4.5$  эВ, фотоэмиссия будет обусловлена в основном многофотонным процессом и пропорциональна  $n$ -й степени интенсивности (энергии) лазерного импульса  $j \sim I^n$ . Значение показателя степени можно вычислить из выражения  $n = 1 + A/\hbar\omega$  и сравнить с полученным в эксперименте. Для рассматриваемых условий теоретическое значение  $n = 5.5$ , а экспериментально найденное составляет  $\sim 6$  (рис. 6). Хорошее совпадение теоретического и экспериментального значений показателей степени служит неоспоримым доказательством мно-

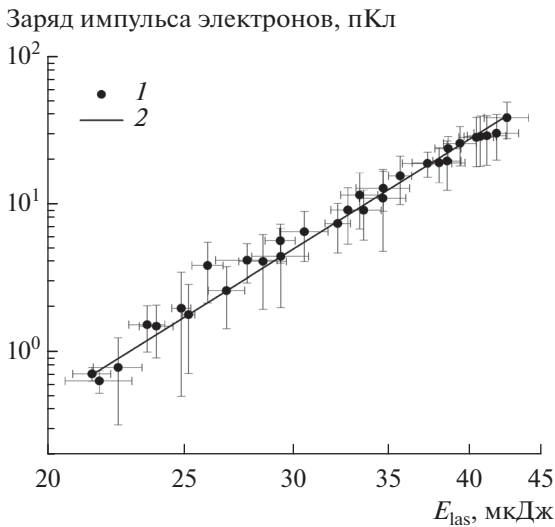


Рис. 6. Зависимость заряда эмитированных электронов из иглы от энергии лазерного импульса; напряжение смещения на игле равно  $-60$  В: 1 – экспериментальные данные, 2 – аппроксимация функцией  $y = ax^b$ ,  $b \approx 6$ .

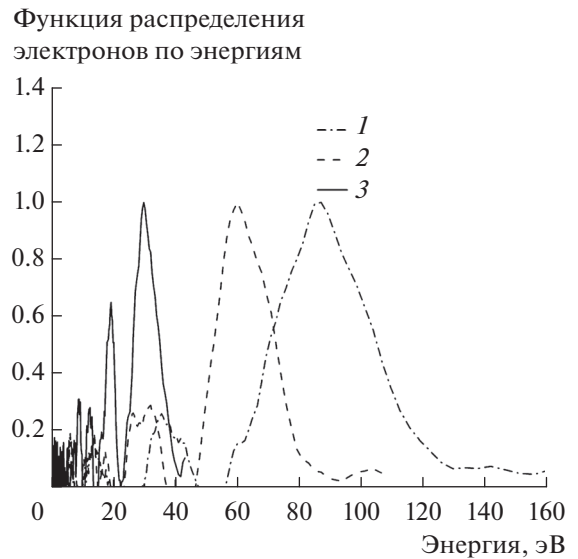


Рис. 7. Функция распределения электронов по энергиям: 1 –  $E_{\text{las}} = 9$  мкДж,  $U = -90$  В; 2 – 8,  $-60$ ; 3 – 8,  $-30$ .

гофотонной природы наблюдаемого процесса электронной эмиссии. В диапазоне энергий лазерного импульса от 20 до 50 мкДж интегральный заряд электронов изменяется почти на два порядка и составляет 0.7 и 40 пКл соответственно.

Отметим, что в работе [13] на аналогичной зависимости заряда электронного сгустка от энергии лазерного импульса при больших энергиях наблюдалось насыщение. Насыщение роста заряда электронного сгустка по мере увеличения энергии в лазерном импульсе происходит тогда, когда поле пространственного заряда, эмитированного с иглы, становится сопоставимым с лазерным полем. Величина поля пространственного заряда определяется не только величиной эмитированного из иглы заряда, но и размерами кончика иглы: чем меньше радиус кривизны, тем больше плотность на единицу площади имеют электроны и тем больше поле пространственного заряда. Поэтому разница между зависимостями, приведенными в настоящей работе и в [13], очевидно, определяется разницей в геометрии кончика иглы (в настоящей работе использовалась более тупая игла).

Для измерения временных и спектральных характеристик эмитированных из иглы электронов применялся вторично-электронный умножитель ВЭУ-7М, состоящий из шевронного соединения двух микроканальных пластин типа МКП 25-10Ф. Детектор ВЭУ-7М располагался на расстоянии  $109 \pm 2$  мм от кончика иглы. На рис. 7 приведены восстановленные по времени пролета энергетические распределения эмитированных из иг-

лы электронов при воздействии на нее лазерными импульсами с энергией порядка 9 мкДж для различных напряжений, приложенных к игле. Максимум в спектре эмитированных из иглы электронов соответствует приложенному к игле отрицательному напряжению. С ростом напряжения на игле происходит смещение максимальной энергии в спектре в область электронов с большей энергией.

В низкоэнергетической части функции распределения электронов по энергиям наблюдаются некоторые осцилляции. Природа этих осцилляций на настоящий момент не имеет адекватного объяснения. Наиболее вероятной причиной, как представляется, является радиотехнический “звон” схемы диагностики микроканальной пластинки после резкого импульсного возбуждения. Этот факт требует дополнительного исследования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей работе продемонстрировано, что использование в качестве эмиттера электронов металлических игл микронного размера, облучаемых лазерным излучением с длиной волны 1240 мкм, позволяет получать электронные импульсы с зарядом до 40 пКл при энергии в импульсе лазера 45 мкДж. Наблюдаемая в эксперименте зависимость заряда электронного импульса, пропорциональная шестой степени энергии лазерного импульса, свидетельствует о многофотонном механизме эмиссии электронов. Короткая наносекундная длительность электронных импульсов, синхронизованных с ла-

зерным излучением, и микронный размер источника позволяют использовать их в фундаментальных исследованиях, требующих высокой пространственной когерентности и больших электронных потоков.

Все экспериментальные работы проводились на уникальной тераваттной хром-форстеритовой лазерной системе (УНУ “ЛТФК”) в центре коллективного пользования “Лазерный фемтосекундный комплекс” ОИВТ РАН. Данная работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 19-42-04133.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ayvazyan V., Ayvazyan V., Baboi N., Bohnet I. et al.* Generation of GW Radiation Pulses from a VUV Free-electron Laser Operating in the Femtosecond Regime // *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 88. P. 104802.
2. *Miller R.J.D.* Mapping Atomic Motions with Ultrabright Electrons: The Chemists' Gedanken Experiment Enters the Lab Frame // *Annu. Rev. Phys. Chem.* 2014. V. 65. P. 583.
3. *Зевайль А., Томас Дж.* Трехмерная электронная микроскопия в реальном времени. Долгопрудный: Интеллект, 2013. 328 с.
4. *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.* Сверхбыстрый просвечивающий электронный микроскоп для исследования динамики процессов, индуцированных фемтосекундным лазерным излучением // *Квантовая электроника.* 2017. Т. 47. № 2. С. 116.
5. *Houdellier F., Caruso G.M., Weber S., Kociak M., Arbouet A.* Development of a High Brightness Ultrafast Transmission Electron Microscope Based on a Laser-driven Cold Field Emission Source // *Ultramicroscopy.* 2018. V. 186. P. 128.
6. *Yanagisawa H., Hengsberger M., Leuenberger D., Klöckner M., Hafner C., Greber T., Osterwalder J.* Energy Distribution Curves of Ultrafast Laser-induced Field Emission and Their Implications for Electron Dynamics // *Phys. Rev. Lett.* 2011. V. 107. P. 087601.
7. *King W.E., Campbell G.H., Frank A., Reed B., Schmerge J.F., Siwick B.J., Stuart B.C., Weber P.M.* Ultrafast Electron Microscopy in Materials Science, Biology, and Chemistry // *J. Appl. Phys.* 2005. V. 97. P. 111101.
8. *Hilbert S.A., Neukirch A., Uiterwaal C.J.G.J., Batelaan H.* Exploring Temporal and Rate Limits of Laser-induced Electron Emission // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 2009. V. 42. P. 141001.
9. *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. P. 142.
10. *Schenk M., Krüger M., Hommelhoff P.* Strong-field Above-threshold Photoemission from Sharp Metal Tips // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 105. P. 257601.
11. *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. P. 043907.
12. *Bionta M.R., Weber S.J., Blum I., Mauchain J., Chatel B., Chalopin B.* Wavelength and Shape Dependent Strong-field Photoemission from Silver Nanotips // *New J. Phys.* 2016. V. 18. P. 103010.
13. *Абрамовский Н.А., Бодров С.Б., Киселев А.М., Мурзанев А.А., Ромашкин А.В., Степанов А.Н.* Генерация электронных ступков пикокулоного уровня из металлической иглы под воздействием фемтосекундным излучением титан-сапфирового лазера // *ТВТ.* 2020. Т. 58. № 6. С. 951.
14. *Агранат М.Б., Ашитков С.И., Иванов А.А., Конященко А.В., Овчинников А.В., Фортвов В.Е.* Тераваттная фемтосекундная лазерная система на хром-форстерите // *Квантовая электроника.* 2004. Т. 34. № 6. С. 506.