

13.2

Иридиевый полевой эмиттер как источник постоянного тока электронов и ионов

© О.Л. Голубев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: O.Golubev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 26 июня 2023 г.

В окончательной редакции 22 сентября 2023 г.

Принято к публикации 21 декабря 2023 г.

С использованием полевой эмиссионной микроскопии исследовались эмиссионные свойства и трансформация формы полевого эмиттера из Ir под воздействием сильного электрического поля и температуры. Создать эмиттер со стабильной поверхностью и достаточно большим количеством эмитирующих нановыступов для получения постоянного ионного тока в случае Ir не удастся, ток всегда носит импульсный характер, однако получить постоянный ток ионов Ir все же возможно, но только с использованием отдельных наноразмерных выступов, которые вырастают на углах $\{012\}$ и $\{023\}$ перестроенного в поле эмиттера. Величины ионных токов при этом невелики, однако каждый такой выступ является практически идеальным точечным источником ионов.

Ключевые слова: иридий, наноразмерные выступы, полевая эмиссия ионов.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.07.57467.19665

Полевые острийные эмиттеры заряженных частиц широко применяются в качестве источников как электронов, так и ионов [1]. Однако наиболее эффективно использовать такие эмиттеры после воздействия на них сильных электрических полей напряженностью F и высоких температур T (термополевого воздействия). Иридий является для многих целей весьма интересным объектом, однако подробного изучения термополевых формоизменений для него практически не проводилось. Для Ir известны только работы по определению энергии активации самодиффузии [2], а также работы по применению Ir-эмиттеров как подложек для нанесения слоя графена и последующей полевой десорбции атомов Ва [3]. Единственной публикацией, посвященной термополевному воздействию на Ir, является работа [4], однако в ней описывается только обнаруженный там „эффект схлопывания колец“, т.е. рост и испарение кристаллических наростов на разных гранях эмиттера.

Главная задача настоящей работы — изучить основные виды изменения формы полевого эмиттера на основе Ir и выяснить, какие ионные токи и какого характера могут давать такие эмиттеры при различных T и F . Исследования выполнены с помощью метода полевой электронной микроскопии. Основными здесь являются величины температуры эмиттера T и напряженности воздействующего электрического поля F . Температура измерялась обычным микропирометром, а напряженность — с помощью известного метода Фаулера–Нордгейма [5] в предположении средней для Ir величины работы выхода $\phi = 5.0$ eV [6].

В настоящее время известны следующие виды термополевых формоизменений полевых эмиттеров (эмиттеры эти практически всегда оказываются монокристаллами вследствие малых, менее микрометра, размеров кончи-

ка острия — эмиттера) [7]. Во-первых, при наиболее низких T и F наблюдается так называемая перестройка эмиттера в поле, когда исходно сглаженный эмиттер превращается в многогранник. Во-вторых, на углах (где сходятся три ребра) и ребрах перестроенного эмиттера вырастают наноразмерные (вплоть до нескольких нанометров) острые выступы. И наконец, при наиболее высоких T и F прежде всего на плотноупакованных гранях вырастают макронаросты, соизмеримые с размером исходного эмиттера. Все эти процессы характеризуются как полевой кристаллический рост. Некоторые стадии этого роста демонстрирует рис. 1, на котором представлены полевые электронные изображения Ir-эмиттера с наиболее часто встречающейся ориентацией гранью $\{100\}$ вперед (по отношению к наблюдателю и экрану прибора) при разных F и T . На рис. 1, *a* приведено исходное изображение поверхности чистого Ir. Первые заметные изменения поверхности эмиттера наблюдаются уже при наиболее низкой температуре острия $T = 900$ K только при воздействующем поле $F = 3.2$ V/nm, при этом исходно сглаженный прогретом эмиттер перестраивается в многогранник и образуются ребра между гранями и углы вокруг граней $\{100\}$ и $\{110\}$ в областях $\{023\}$ (рис. 1, *b*). Повышение температуры обработки до 1500 K несколько изменяет процесс. Ярко эмитирующие углы перестроенного в поле эмиттера перемещаются из областей $\{023\}$ в области $\{012\}$, при этом образование таких углов происходит уже при $F = 1-2$ V/nm. Далее при $F = 3-4$ V/nm на этих же углах растут и наноразмерные выступы (рис. 1, *c*). И хотя эмиссионные изображения углов на рис. 1, *b* и нановыступов на рис. 1, *c* довольно похожи, нановыступы существенно острее, а величины U_{10} в этих случаях совершенно разные: $U_{10} = 7300$ V для углов на рис. 1, *b*

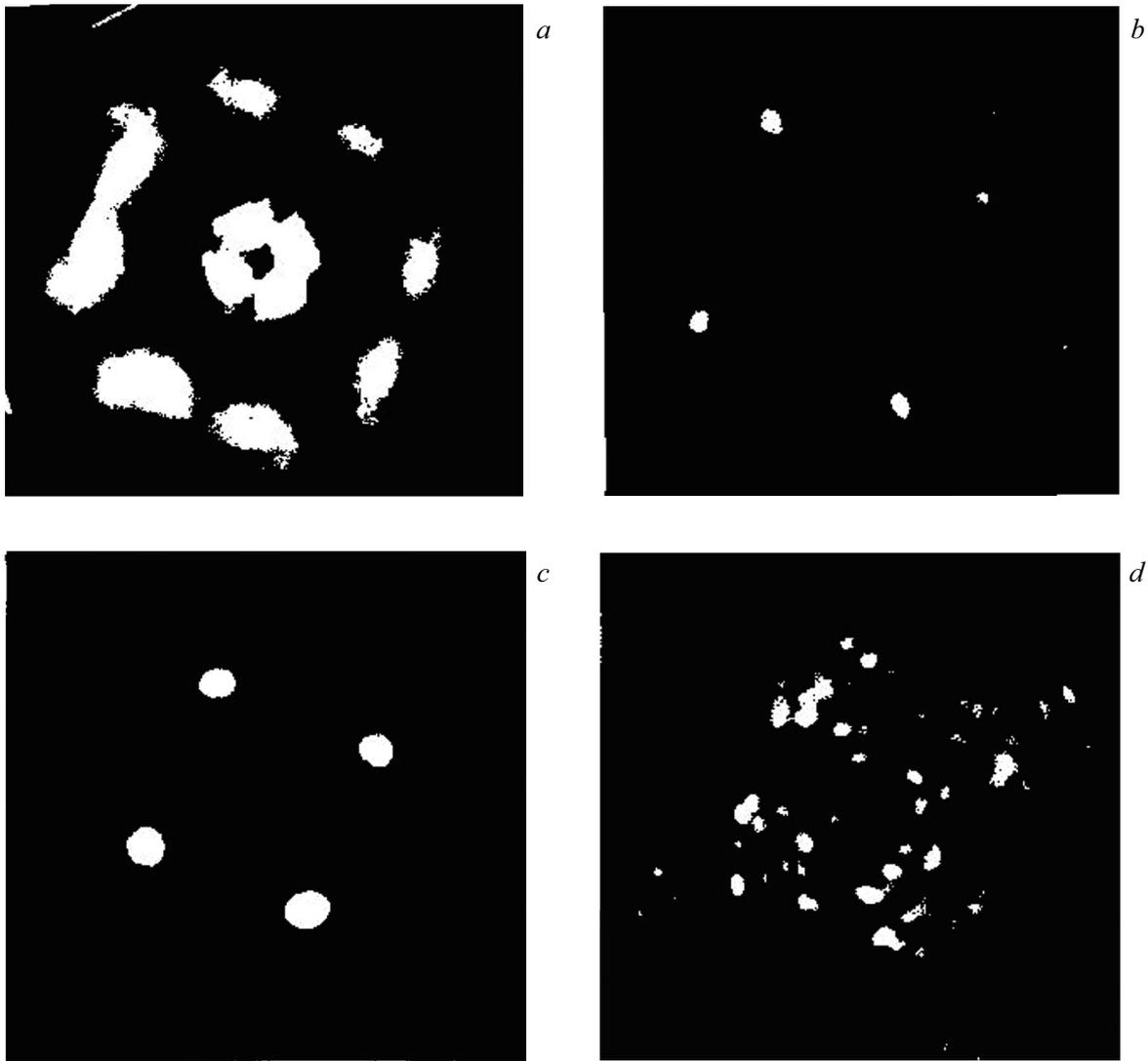


Рис. 1. Полевые электронные изображения поверхности Ir с ориентацией гранью $\{100\}$ вперед. *a* — исходная поверхность Ir; *b* — после воздействия при $T = 900$ К и $F = 3.2$ В/нм, четыре угла перестроенного острия в областях $\{023\}$; *c* — после воздействия при $T = 1500$ К и $F = 3.2$ В/нм, четыре нановыступа в областях $\{012\}$, *d* — после воздействия при $T = 1500$ К и $F = 5.0$ В/нм, нановыступы по всей поверхности Ir.

и $U_{10} = 3870$ В для нановыступов на рис. 1, *c* (U_{10} — величина приложенного напряжения, необходимая для получения одной и той же величины эмиссионного электронного тока $I = 10$ нА). При более высоких $F = 4.5$ – 5.2 В/нм нановыступы вырастают уже практически по всей поверхности эмиттера (рис. 1, *d*).

На рис. 2 показаны только два примера термополевого формоизменения иридия с ориентацией гранью $\{111\}$ вперед, поскольку объем публикации не позволяет привести больше изображений. Это более редко встречающаяся ориентация, однако процесс изменения формы идет абсолютно тем же путем. На рис. 2, *a* показан исходный Ir, ориентированный вперед гранью $\{111\}$, у которого $U_{10} = 6440$ В, а на рис. 2, *b* представлено образование шести эмитирующих нановыступов, расположенных на углах в кристаллографических областях

$\{012\}$, и в этом случае величина $U_{10} = 2561$ В, т.е. эмиттер становится „острее“ почти в 3 раза.

Таким образом, формоизменения Ir в процессе термополевого воздействия заключаются прежде всего в расширении плотноупакованных граней $\{111\}$ и $\{100\}$ с образованием острых трехгранных углов в областях $\{023\}$ при $T = 900$ – 1400 К, а при $T = 1500$ – 1900 К углы сдвигаются в области $\{012\}$. Большие наросты — макронаросты — также вырастают прежде всего на плотноупакованных гранях $\{111\}$ и $\{100\}$ при $T = 1300$ – 1500 К, а при более высоких T (1700 – 1900 К) эти наросты вырастают также и на рыхлых гранях эмиттера, таких как $\{110\}$ и $\{012\}$, причем их рост вызывает только наличие наноразмерных выступов как инициаторов роста. Следовательно, на поверхности такого эмиттера можно получить четыре или шесть точечных источников

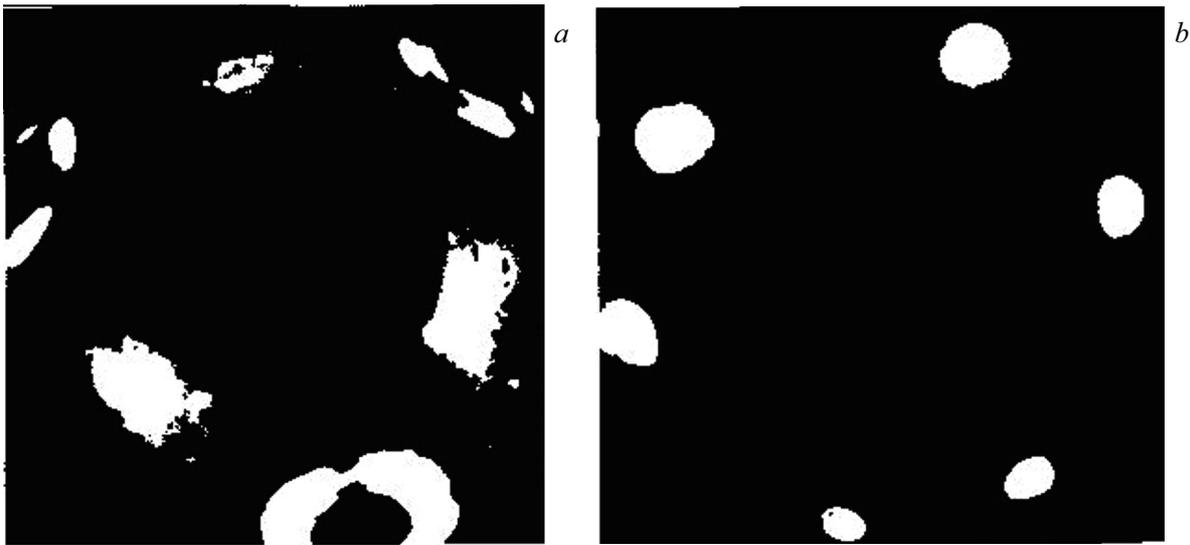


Рис. 2. Полевые электронные изображения поверхности Ir с ориентацией гранью $\{111\}$ вперед. *a* — исходная поверхность Ir; *b* — после воздействия при $T = 1500$ К и $F = 4.7$ В/нм, шесть нановыступов в областях $\{012\}$.

электронов и ионов в виде углов либо наноразмерных выступов в областях $\{012\}$ или $\{023\}$. Возможно и получение единственного эмитирующего выступа. Для этого необходимо либо использовать метод ступенчатого понижения приложенного напряжения U , а значит, и F при неизменной температуре T [8] (что не всегда приводит к успеху), либо использовать для изготовления острейного эмиттера ориентированные проволоки соответствующей ориентации, т. е. $\{012\}$ и $\{023\}$.

Зависимость величины F , необходимой для изменения формы поверхности, от температуры носит обычный для металлов характер: чем выше T , тем при меньшей величине F происходит соответствующее изменение формы. Так, если для образования наноразмерных выступов при $T = 900$ К требуется $F = 4.8$ В/нм (при $F = 3.2$ В/нм только начинается перестройка эмиттера в поле), то при $T = 1900$ К величина F уже равна 2.8 В/нм. Использование T выше 1900 К нецелесообразно, поскольку при таких T происходит быстрое затупление эмиттера.

Иридий как материал, не окисляющийся на воздухе, а главное — диффузионно-стойкий, интересен прежде всего для целей нанотехнологии, а значит, эмиттер на основе Ir представляет интерес прежде всего как точечный источник ионного тока. Испарение при криогенных температурах здесь неприменимо, так как эмиттер быстро затупляется, и получить непрерывный поток ионов невозможно. Здесь применимо только высокотемпературное полевое испарение, способное создать непрерывный ионный поток вследствие постоянного диффузионного притока атомов на вершину эмиттера и последующего испарения их в виде ионов. По сравнению с другими тугоплавкими металлами (W, Ta и Re) иридий испаряется относительно легко, главным образом вследствие меньшей теплоты испарения. В случае использования в качестве ионного источника эмиттера, покры-

того большим количеством нановыступов, ионный ток максимален: для Ir он может достигать до $I \sim 10\text{--}15$ нА, что довольно много и вполне достаточно для целей нанотехнологии. Но так же как и для случаев W и Ta, ток носит характер отдельных всплесков с переменной скважностью. Сформировать поверхность с достаточно большим количеством нановыступов, дающую практически постоянный ионный ток, здесь в отличие от Ta [9] не удастся. Однако в данном случае стабильным и даже практически постоянным источником тока может служить поверхность Ir с четырьмя углами в окрестностях граней $\{012\}$, а лучше с выросшими на них нановыступами. Это очень стабильная форма, которая может давать ионные токи $I \sim 10^{-12}$ А, т. е. даже несколько больше, чем в случае Ta. Источников здесь меньше (всего четыре нановыступа), однако ток может быть и несколько больше вследствие более легкой испаряемости Ir. Кроме того, в данном случае ток дают четыре или шесть точечных источников, поскольку на вершинах нановыступов, выросших на углах, находится всего несколько атомов. Если же использовать эмиттер, ориентированный вперед гранью $\{012\}$, то можно создать и источник с единственным нановыступом в центре поверхности острия. Ток с этого единственного выступа будет, конечно, небольшой ($\sim 10^{-13}$ А), однако угол эмиссии при этом будет минимальным (порядка $0.05\text{--}0.07$ sr).

Таким образом, главным результатом настоящей работы является факт, что при проведении соответствующей термополевой обработки иридиевого эмиттера можно получить стационарный источник тока ионов Ir, который дает практически постоянный ионный ток. Источник этот представляет собой либо четыре-шесть углов перестроенного в электрическом поле острия, либо столько же выросших на этих углах нановыступов. При этом

источник этот будет практически точечный. Ток он дает, конечно, небольшой, но имеет очень высокую локальную яркость и очень малый угол эмиссии.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Kumar, G.S. Duesberg, R. Pratap, S. Raghavan, *Appl. Phys. Lett.*, **105** (10), 103107 (2014). DOI: 10.1063/1.4895022
- [2] P.C. Bettler, G. Barnes, *Surf. Sci.*, **10** (2), 165 (1968). DOI: 10.1016/0039-6028(68)90017-4
- [3] Д.П. Бернацкий, В.Г. Павлов, *Письма в ЖТФ*, **47** (18), 18 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.18.51466.18854 [D.P. Bernatskiy, V.G. Pavlov, *Tech. Phys. Lett.*, **48** (13), 9 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.13.53379.18854].
- [4] В.Г. Бутенко, О.Л. Голубев, Е.Л. Конторович, В.Н. Шредник, *Письма в ЖТФ*, **18** (8), 86 (1992).
- [5] R.H. Fowler, L. Nordheim, *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, **119** (781), 173 (1928). DOI: 10.1098/rspa.1928.0091
- [6] В.С. Фоменко, *Эмиссионные свойства материалов: Справочник* (Наук. думка, Киев, 1981), с. 130.
- [7] В.Н. Шредник, в кн. *Проблемы современной кристаллографии* (Наука, М., 1975), с. 150.
- [8] О.Л. Голубев, В.А. Ивченко, *Письма в ЖТФ*, **38** (20), 63 (2012). [O.L. Golubev, V.A. Ivchenko, *Tech. Phys. Lett.*, **38** (10), 944 (2012). DOI: 10.1134/S1063785012100203].
- [9] О.Л. Голубев, *Письма в ЖТФ*, **48** (18), 3 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.18.53389.19235 [O.L. Golubev, *Tech. Phys. Lett.*, **48** (9), 41 (2022)].