

05;11;12

МИКРОШЕРОХОВАТЫЕ ПЛОСКИЕ АВТОЭМИССИОННЫЕ КАТОДЫ ИЗ ГРАФИТА, ПОЛУЧЕННЫЕ РАДИАЦИОННЫМ СПОСОБОМ

© А. Л. Суворов, Е. П. Шешин, В. В. Протасенко,
Н. Е. Лазарев, А. Ф. Бобков, В. П. Бабаев

Институт теоретической и экспериментальной физики,
117259 Москва, Россия
(Поступило в Редакцию 14 марта 1995 г.)

Предложен и реализован способ получения плоских протяженных автоэлектронных катодов из графита за счет облучения исходно отшлифованной поверхности ионами средних энергий. Показано, что наиболее эффективно для этих целей использование тяжелых ионов газов с энергиями в пределах 50–200 кэВ при интенсивности облучения 10^{14} ионов/см²·с и флюенсе 10^{17} – 10^{18} ионов/см². Указанные параметры облучения обеспечивают относительно высокие коэффициенты распыления по механизму образования каскадов атомных смещений и создание в результате этого существенно развитой (испещренной) поверхности. Проведенный анализ получаемой рабочей поверхности автокатодов в сканирующем туннельном микроскопе выявил образование эмиссионных центров со средней кривизной поверхности в пределах 10–100 нм и плотностью 10^8 см⁻². Получены вольт-амперные и другие характеристики катодов. Проанализирована перспектива использования указанных катодов в приборах и устройствах на основе автоэлектронной эмиссии, в частности в эффективных источниках света.

Введение

Как известно, для решения некоторых задач вакуумной микроэлектроники требуются многоострийные автоэмиссионные катоды (катоды на основе автоэлектронной эмиссии) [1]. К таким задачам, в частности, относятся следующие: разработка и изготовление плоских дисплейных экранов (см., например, [2,3]), мощных импульсных электронных источников для рентгеновских трубок и ускорителей [4], эффективных источников света [5,6] и т. д. Причем в ряде случаев для таких катодов нет необходимости в удовлетворении высоких требований, связанных с равномерностью индивидуальных острий по высоте, эмиссионным параметрам, взаимной изоляции и т. п. Так, для люминесцентных источников света на основе автоэлектронной эмиссии основными требованиями к катодам являются высокая плотность эмиссионных центров и их удовлетворительная стабильность при бомбардировке ио-

нами остаточных газов в условиях технического вакуума и весьма высокого рабочего напряжения (несколько кВ). Более того, некоторые варианты источников света требуют применения многоострийных автоэмиссионных катодов с геометрией, отличной от плоской (например, полусферической, других фигур вращения, пирамидальных и т. п.).

В предшествующих работах [6-8] авторы изучали эмиссионные параметры углеродных автоэмиссионных катодов, в частности углеродных волокон. В [9,10] авторы использовали комбинированные автоэлектронно- и автоионно-микроскопические анализы, изучая в деталях поведение металлических и углеродных автоэлектронных катодов при бомбардировке низкоэнергетичными ионами остаточных газов, образованных в пространстве анод-катод по механизму электронного удара. В результате было показано, что металлические острия после такого радиационного воздействия довольно быстро выходят из строя: с другой стороны, такое радиационное воздействие приводит только к перестройке развитой эмиттирующей поверхности углеродных материалов, постепенно удаляя одни и создавая другие эмиссионные центры. Это позволяло обеспечить большой срок службы катодов из углеродных материалов по сравнению с катодами из металлов.

Для того чтобы изготовить многоострийные автоэмиссионные катоды большой площади авторы настоящей работы предложили ранее объединять углеродные волокна в жгуты с последующим поперечным разрезанием и металлизацией одной из сторон жгута. Другой метод приготовления автоэлектронных углеродных катодов предлагается в настоящей работе.

Приготовление катодов и их анализ

Для приготовления катодов использовались плоские заготовки из высокопрочного графита марки МПГ-6 [11]. Сечение заготовок было квадратным и круглым, соответственно их ребро и диаметр имели размер 1.0 см, толщина заготовок 3.0 мм. После нарезания заготовки отжигались в вакууме при 1000°С в течение 1 ч и помещались на мишень ионного инжектора. Для различных образцов облучение проводилось ионами Ag^+ , Xe^+ и La^+ в условиях технического вакуума (на уровне 10^{-4} Тор), при этом варьировались энергии ионов (они составляли 50, 100 и 200 кэВ), флюенсы (10^{16} , 10^{17} , 10^{18} и 10^{19} ионов/см² при приблизительно неизменной интенсивности облучения на уровне 10^{14} ионов/см² · с) и углы падения пучка (углы между осью пучка и поверхностью заготовок составляли 90, 60 и 45°).

После облучения профили полученных таким образом катодов анализировались в воздушном сканирующем туннельном микроскопе оригинальной конструкции и в некоторых выборочных случаях в сканирующем электронном микроскопе. Отобранные путем качественного визуального (по СТМ изображениям) анализа катоды последовательно (один за другим) помещались в специальную вакуумную систему для анализа их эмиссионных свойств. При этом анодом служил стеклянный экран с прозрачным электропроводящим покрытием и флуоресцирующим экраном. Используемая вакуумная система (экспериментальная установка) позволяла проводить анализы (проводить замеры тока, получать вольт-амперные характеристики и т. п.) в различном

вакууме: от технического 10^{-3} – 10^{-4} Тор до высокого 10^{-8} Тор. Кроме того, имелась возможность менять расстояние катод–анод от 3.0 см практически до нуля (до взаимного контакта). Наконец, визуальный и фотографический контроль флуоресцирующего экрана использовался для качественной оценки возможности применения изготовленных катодов с теми или иными эмиссионными параметрами в качестве элементов источников света.

Результаты и обсуждение

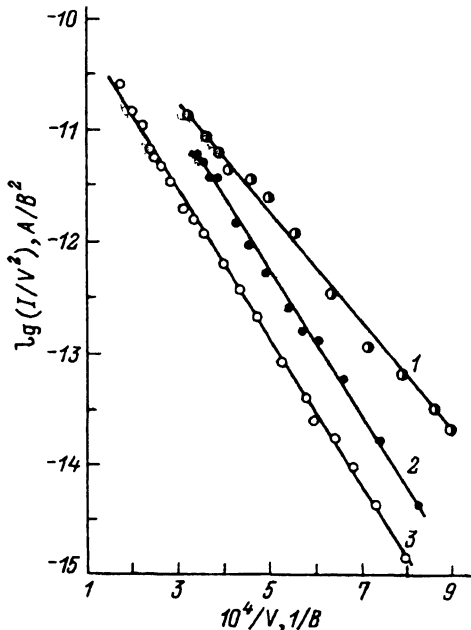
Как показал анализ профилей изготовленных катодов в сканирующем туннельном микроскопе, наиболее развитая поверхность, содержащая большое число потенциальных центров эмиссии, формируется при флюенсах облучения порядка 10^{17} – 10^{18} ионов/см² и угле падения ионного пучка 45° к исходной поверхности. При этом плотность эмиссионных центров была не менее 10^8 см⁻², а их кривизна менялась в пределах 10–100 нм. Говоря об этом, следует отметить одно важное обстоятельство: можно ожидать, что при указанном способе изготовления автоэмиссионных катодов удастся подобрать режим облучения, обеспечивающий разброс эмиссионных центров по высоте не более чем на 100–1000 нм. Это в свою очередь позволит существенно приблизить катод к флуоресцирующему экрану, снизив тем самым рабочее напряжение до нескольких сот и менее вольт.

Отметим также, что преобладающим механизмом распыления материала поверхности заготовок является развитие каскадов атомных смещений [12], а выбранные параметры облучения обеспечивали предпочтительно высокий коэффициент распыления графита.

Отметим также, что в вакуумную систему для измерений эмиссионных параметров последовательно устанавливались все изготовленные катоды независимо от вида СТМ изображений их поверхности. В процессе снятия вольт-амперных характеристик катодов (при этом расстояние катод–анод не менялось и составляло 5.0 мм) вывод об оптимальных параметрах облучения был подтвержден. Именно такие катоды позволяли получить устойчивую автоэлектронную эмиссию при напряжениях от 1 до 10 кВ, при этом максимальный ток достигал нескольких мА. Была также установлена существенная зависимость долговечности катодов от напряжения их эксплуатации: начиная с определенного напряжения (в среднем на уровне 5 кВ) срок службы катодов падал от сотен и более часов до нескольких минут. Логичное объяснение этому — полное разрушение центров эмиссии в результате высокового токоотбора (нагрева катода) и интенсивной ионной бомбардировки его поверхности.

На рисунке приведены типичные вольт-амперные характеристики одного из катодов. Первая из них была получена сразу после подачи на катод высокого напряжения, вторая — после его предварительной тренировки в течение 0.5 ч в вакууме 10^{-6} Тор при токоотборе 0.8 мА и третья — после работы катода в течение 3 ч в вакууме 10^{-4} Тор при токоотборе 1.5 мА.

Тот факт, что приведенные вольт-амперные характеристики не имеют излома, а также мало отличаются друг от друга, свидетельствует, на наш взгляд, о подключении в работу при подаче высокого напряжения сразу большинства центров эмиссии. В то же время наблюда-



Вольт-амперные характеристики (в параметрах Фаулера-Нордгейма) графитового многоострийного автоэмиссионного катода, полученного радиационным способом.

Облучение ионами Ag с энергией 100 кэВ, флюенс $2 \cdot 10^{17}$ ионов/см², угол падения пучка ионов на поверхность графита 45°, расстояние катод-анод 2.0 мм; 1 — исходная характеристика; 2 — характеристика после предварительной тренировки в течение 30 мин при среднем токе $I_{cp} = 400$ мкА и давлении $P = 5 \cdot 10^{-6}$ Тор; 3 — характеристика после работы катода при $I_{cp} = 1.0$ мА в течение 1 ч, $P = 10^{-3}$ Тор.

емая тенденция к смещению вольт-амперных характеристик влево (в сторону больших напряжений) в процессе эксплуатации может свидетельствовать о постепенном уменьшении числа центров эмиссии.

Наконец, измерения долговечности автоэмиссионных катодов и стабильности эмиттируемого ими тока автоэлектронов показали, что более перспективно использовать при изготовлении катодов облучение тяжелыми ионами газов, нежели ионами металлов. Возможно, это связано с тем, что в первом случае мы имеем дело с эмиссией чисто углеродных материалов, тогда как во втором — с работой частично металлизированного и имплантированного металлами углерода (графита).

В настоящей работе не были проведены законченные анализы долговечности изготовленных катодов. Тем не менее уже проведенные измерения показывают, что наилучшие образцы катодов выдерживают непрерывную эксплуатацию в вакууме 10^{-4} Тор в течение до 1000 ч без существенного изменения параметров эмиссии.

И последнее, в настоящей работе была опробована работоспособность и измерены параметры изготовленных указанным способом автоэмиссионных катодов в люминесцентных двухэлектродных источниках света. В результате была получена удельная светоотдача на уровне 16.0 Лм/Вт. Это несколько превышает аналогичный показатель для выпускаемых отечественной промышленностью ламп накаливания и галогенных ламп.

1. Радиационная обработка позволяет в принципе получать развитые поверхности углеродных материалов с большим числом центров эмиссии; такие поверхности могут служить рабочими в приборах на основе автоэлектронной эмиссии.

2. Оптимальными характеристиками и параметрами радиационной обработки являются использование тяжелых газовых ионов со средними энергиями порядка 100–200 кэВ при интенсивности облучения 10^{14} ионов/см²·с, флюенсе 10^{17} – 10^{18} ионов/см² и угле падения пучка ионов на приготавливаемую поверхность графитовой заготовки автоэмиссионного катода 45°.

3. При использовании рассмотренного типа автоэмиссионных катодов отпадает необходимость в длительной тренировке (формовке) рабочей поверхности, как это имеет место в случае катодов на основе углеродных волокон.

4. Стабильность эмиссионных параметров изученных катодов в существенной степени зависит от рабочего вакуума. С увеличением степени шероховатости автоэлектронного катода (увеличением плотности центров эмиссии) увеличивается отбираемый с катода автоэлектронный ток и его стабильность.

5. Использование разработанных катодов перспективно в люминесцентных источниках света на основе автоэлектронной эмиссии. Поскольку на данном этапе не были проведены ни оптимизация геометрии источника света, ни подбор используемого люминофора, то можно полагать, что указанный выше параметр светимости может быть значительно улучшен.

Список литературы

- [1] Brodie I., Spindt C. // Adv. Electr. Phys. 1992. Vol. 83. P. 1–113.
- [2] Gray H.F. // Proc. 29th Intern. Field Emission Symp. 1982. P. 11–112.
- [3] Grand-Clement J.-L. VI Intern. Vacuum Microelectr. Conf. Newport (USA), 1993. P. 3–4.
- [4] Mitterauer J. // Surf. Sci. 1991. Vol. 246. P. 107–112.
- [5] Kondo Y., Matsuma J., Kimura H. // IV Intern. Vacuum Microelectr. Conf. Nagahama (Japan), 1991. P. 56–67.
- [6] Sheshin E.P., Suvorov A.L., Grigoriev Yu.A., Shesterkin V.I. // VI Intern. Vacuum Microelectr. Conf. Newport (USA), 1993. P. 117–118.
- [7] Chachovskoi A.G., Sheshin E.P., Kupryashkin A.S., Seleverston V.A. // J. Vac. Sci. Technol. 1993. Vol. B11. P. 511–514.
- [8] Sheshin E.P., Suvorov A.L., Bobkov A.F. et al. // Le Vide, les Couches Minces. Suppl. au N 271. 1994. P. 423–426.
- [9] Суворов А.Л. Структура и свойства поверхностных атомных слоев металлов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 296 с.
- [10] Долин Д.Е., Сосунов А.А., Суворов А.Л., Шешин Е.П. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 12. С. 115–121.
- [11] Свойства углеродных конструкционных материалов. Справочник / Под ред. В.П. Соседова. М.: Металлургия, 1975. 175 с.
- [12] Курсанов В.В., Суворов А.Л., Трушин Ю.В. Процессы радиационного дефектообразования в металлах. М.: Энергоатомиздат, 1985. 272 с.