

АВТОЭМИССИОННЫЙ КАТОД НА ОСНОВЕ ЛЕГИРОВАННЫХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ КРЕМНИЙ-УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК

Емец В.М.¹, Лыткин Л.К.¹, Филатов Г.А.¹ Цепилов Г.В.¹, Шупегин М.Л.²

¹ЗАО «Межрегиональное производственное объединение технического комплектования «Технокомплект», (ЗАО «МПОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ»), (141981, Московская обл. г. Дубна, ул. Школьная д. 10-А), e-mail: nio@techo-com.ru;

²Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий», (ФГБНУ НИИ ПМТ), (115054 г. Москва, ул. Малая Пионерская, д.12), e-mail: shupegin@gmail.com.

Исследования полевой эмиссии электронов углеродными и алмазоподобными плёнками, также фуллеренами и нанотрубками вызывают в настоящее время повышенный интерес. Низковольтные холодные катоды с малым порогом по напряжению на основе таких структур найдут широкое применение в электровакуумных приборах различного типа. Однако низкая воспроизводимость традиционных структур при выполнении технологических процессов, и, как следствие, нестабильность их автоэлектронной эмиссии, требуют изучения большого разнообразия алмазоподобных плёнок. В научной литературе практически отсутствуют данные об эмиссионных свойствах легированных металлом алмазоподобных кремний-углеродных плёнок. В данной работе приводятся результаты исследования автоэмиссионных свойств алмазоподобных кремний-углеродных плёнок для пяти легирующих металлов Ti, Zr, Hf, Nb, Ta. Особое внимание обращено на получение стабильности вольтамперной характеристики при многократных повторных измерениях. В большинстве измерений, ток характеризующий эмиссию аппроксимируется линией в координатах Фаулера–Нордгейма.

Ключевые слова: автоэлектронная эмиссия, автоэмиссионный катод, легированные металлом кремний-углеродные алмазоподобные пленки, автоэмиссионный диод.

FIELD EMISSION CATHODES BASED ON DOPED SILICON-CARBON DIAMOND-LIKE FILMS

Emets V.M.¹, Lytkin L.K.¹, Filatov G.A.¹ Tsepilov G.V.¹, Shupegin M.L.²

¹JSC "MPOTK" TEKHNOKOMPLEKT", Dubna, Moscow region. Russia (141981, Moscow region. Dubna, str. School, 10-a), e-mail: nio@techo-com.ru;

²Federal State Scientific Institution «Research Institute of Advanced Materials and Technologies» (SRI FGBNU PMT) (115054, Moscow, Malaya Pionerskaya, 12), e-mail: shupegin@gmail.com.

Of great interest one have in investigation field electrons emission by carbon and diamond-like thin film, fullerene and nanotubes. The cold cathodes with low electric field threshold emission have been attracted more and more attentions for its important applications in vacuum electronic devices. However, the present cold cathodes do not have so good performance, stability emission that it can be considered as commercial application on large scale. All of that need to be considered large number of different kind diamond-like film. Difficult to find any data about the emission property of diamond-like nanocomposite silicon-carbon film. This article presents a result of measurement the electron emission for five metal-doped diamond-like nanocomposite silicon films Ti, Zr, Hf, Nb, Ta. The special attention is turned on the receipt of stability of current-voltage characteristic at the frequent repeated measuring. In majority measuring, a current characterizing emission were approximately linear in Fowler-Nordheim coordinates.

Keywords: field emission, metal-doped diamond-like film nanocomposite silicon-carbon, field-emission diode.

Исследования полевой эмиссии электронов углеродными алмазоподобными плёнками, также фуллеренами и нанотрубками вызывают в настоящее время повышенный интерес. Однако в литературе не было обнаружено данных, связанных с исследованием автоэмиссионных свойств легированных металлами алмазоподобных кремний-углеродных пленок (АКУП). Низковольтные холодные катоды на основе таких структур найдут широкое применение в электровакуумных приборах различного типа. Основной отличительной

характеристикой эмиссии таких структур являются аномально малые величины напряженности порогового электрического поля, при которых начинается эмиссия. В этой работе приведены результаты исследования автоэмиссионных свойств АКУП.

Материал и цель исследования

Задача легирования алмазоподобных пленок металлами с низкой работой выхода электронов была поставлена из следующих соображений.

Во-первых, экспериментально удалось установить [1], что тип проводимости АКУП носит сложный характер, зависящий как от типа металла, так и от концентрации его в пленке. Тип проводимости может быть полупроводниковый, прыжковый, металлический. Поэтому появилась гипотеза, что внесение примесей в поверхностную зону пленки снизит рабочую напряженность поля автоэмиссионного катода, что может расширить спектр применения таких катодов в различных приложениях.

Во-вторых, были основания предположить, что внесение примесей в достаточных концентрациях должно укрепить структуру пленки, т.е. также сыграть роль связующего вещества для крупных нанокластеров. Это необходимо для предотвращения перенапыления материала катода на анод, зачастую присущего нанокластерным пленкам при сильных токах.

В-третьих, как следует из результатов исследований, приведенных в [2], нанофаза в легированных металлом АКУП представляет собой карбид, при этом карбид находится в виде частиц с размерами от 0,6 до 3 нм, а среднее расстояние между проводящими кластерами около 0,5 нм. Это факт позволяет получать легированные кремний-углеродные пленки с контролируемым размером частиц нанофазы в пределах определенного диапазона. Эта возможность чрезвычайно важна для технологии создания холодного эмиттера электронов.

Пленки, легированные металлом АКУП получают с помощью комбинированного процесса, включающего одновременное осаждение из плазмы паров полифенилметилсилоксана (ПФМС) и магнетронное распыление металла [3, 4].

Главным фактором, определяющим выбор металла, используемого для легирования нанокompозитной пленки, является величина работы выхода электрона материалом нанофазы являющейся карбидом металла, вводимого в состав нанокompозита. Из перечня металлов, имеющих наиболее стабильные карбиды выбраны пять металлов с минимальной работой выхода электрона из соответствующих им карбидов: TiC, ZrC, HfC, NbC, TaC.

Испытания проводились с целью изучения автоэмиссионных свойств пленок, легированных различными металлами. В экспериментах в качестве катода использовались образцы АКУП содержащие следующие карбиды металлов и соответствующие металлы

контактов, указанные в скобках: TiC (титан) ZrC (титан), HfC (нерж. ст.), NbC (нерж. ст.), TaC (нерж. ст.).

Образцы катодов представляют собой многослойную структуру. На ситалловую подложку толщиной 0,5 мм напыляется металл толщиной 0,1 мкм, выполняющий роль контактного слоя и поверх металла легированная АКУП толщиной 0,1 мкм.

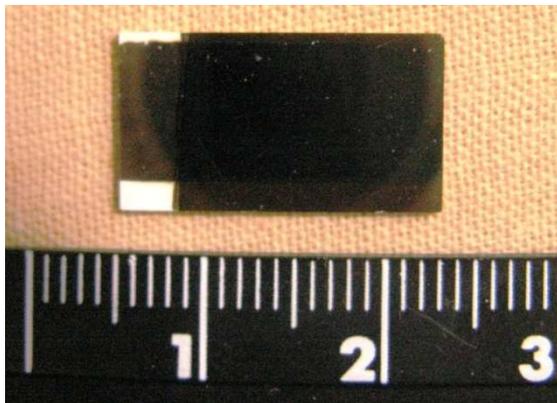


Рис. 1. Образец катода

Для создания вакуумного диода использовался вспомогательный элемент с двумя медными площадками. На одну из площадок произведено гальваническое наращивание слоя меди для получения фиксированного зазора анод–катод величиной 400 нм.

Методика измерений

На рисунке 2 представлена схема стенда для исследования характеристик автоэмиссионных диодов 1 на основе АКУП. Стенд включает в себя: вакуумную камеру 2 в которую помещается автоэмиссионный диод 1, пост вакуумный 5, вакуумметр 7 с датчиком 6, пикоамперметр 3 со встроенным блоком питания для автоматизированного снятия вольт-амперной характеристики (ВАХ), а также персональный компьютер 4 для обработки всех данных поступающих с плат и датчиков.

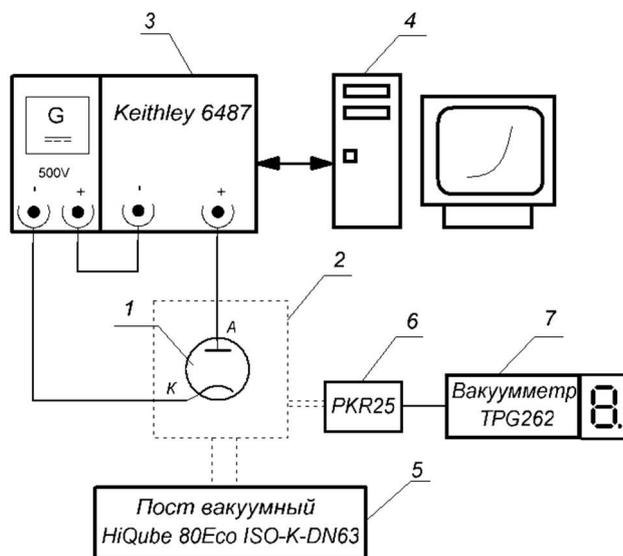


Рис.2. Схема стенда. 1 – диод, на основе АКУП. 2 – вакуумная камера, 3 – пикоамперметр со встроенным блоком питания, 4 – персональный компьютер, 5- пост вакуумный, 6 – датчик вакуумметра, 7 – вакуумметр

С помощью программного продукта LabView установленного на персональный компьютер можно задавать индивидуальные параметры для каждого эксперимента.

Еще одним достоинством данного метода организации эксперимента является простота адаптации процесса измерения под конкретные задачи, то есть для изменения метода длительного испытания не требуется полного изменения управляющей программы, а достаточно лишь изменить файл, содержащий схему эксперимента.

Испытания проводились при вакууме с давлением от $9 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-6}$ мбар.

Описание результатов экспериментов

Для анализа полученных результатов используются основные принципы теории Фаулера-Нордгейма (Ф-Н) [5].

Типичная вольтамперная характеристика для каждого образца и представлена в координатах Фаулера-Нордгейма. Ток ниже 1 нА не рассматривается так как обусловлен аппаратными утечками и шумами.

Результаты экспериментов продемонстрировали многократную повторяемость ВАХ. Типичная осциллограмма на примере образца NbC (напыление на нерж. ст.) показана на рисунке 3. На вкладке рисунка 3 показана одна из кривых ВАХ образца в координатах Ф-Н. Результаты показывают, что эмиссионный ток начинается при напряжениях больше 4,5 В.

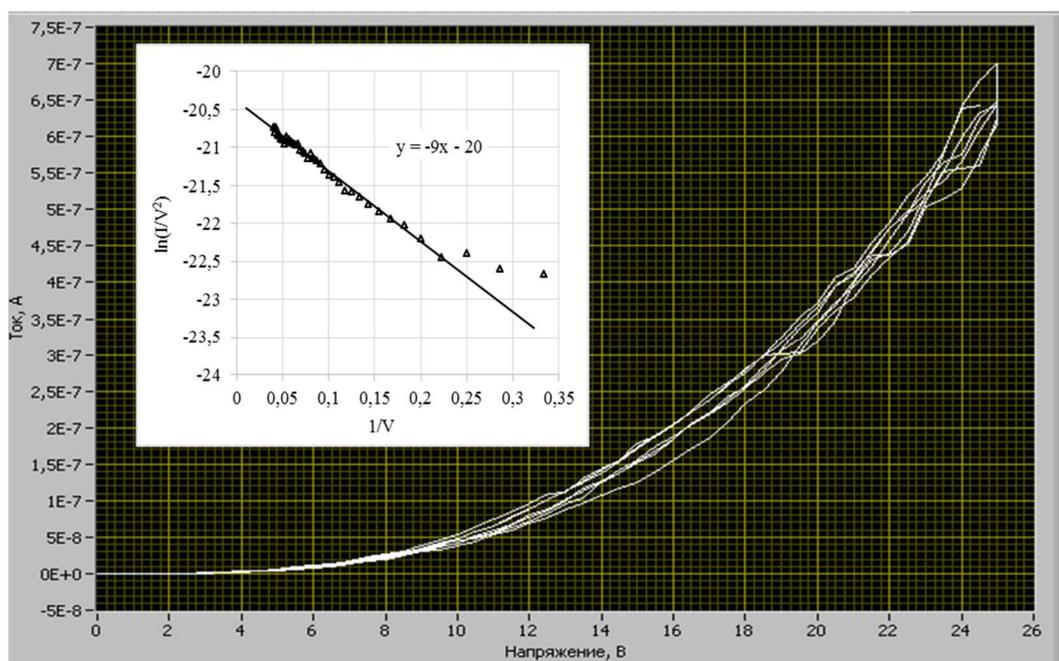


Рис.3. ВАХ образца Nb (Нерж. Ст.). На вкладке ВАХ в координатах Ф-Н

Результаты экспериментов для других АЭЖ представлены в координатах Ф-Н на совмещенном графике (рисунок 4).

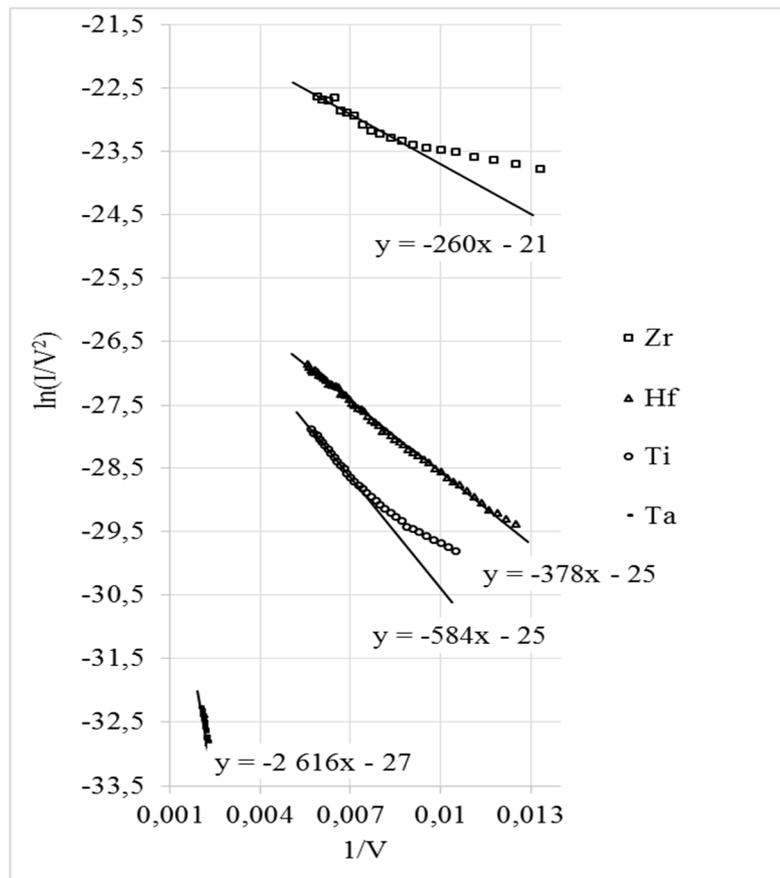


Рис.4. Результаты экспериментов для образцов: Zr (титан), Hf (нерж. ст.), Ti (титан), Ta (нерж. ст.) в координатах Ф-Н. В уравнениях прямых обозначены $y = \ln(I/V^2)$, $x = 1/V$

На графиках так же представлены уравнения прямых с помощью которых аппроксимируются экспериментальные данные для различных диапазонов напряжений. Аппроксимация прямой для различных элементов металла соответствующего образца начинается с разных значений напряжений: Nb – 4,5 В, Zr – 10 В, Hf – 84 В, Ti – 137 В, Ta – 444 В. Аппроксимация геометрического положения точек данных в координатах Ф-Н показывает отклонение от уравнения прямой. Тем не менее, та часть кривых в результатах, которые достаточно хорошо можно интерполировать прямой, позволяет делать оценки работы выхода и форм-фактора усиления поля для различного образцов катода. Для этого можно воспользоваться следующим соотношением:

$$p = \frac{\Phi^{3/2}}{\beta},$$

где: p – тангенс угла наклона прямой Ф-Н,

Φ – работа выхода (эВ),

β – форм фактор.

На основе полученных данных был определен тангенс угла наклона для каждого испытуемого образца в координатах Ф-Н. Сравнение его значения с работой выхода соответствующих карбидов [6] не показало явной корреляции (таблица). Это может быть

связано как с неоднозначностью измеренных величин работы выхода, так и неопределенностью форм-фактора локальных источников эмиссии на плёнке.

Сравнение коэффициентов наклона образцов и работы выхода соответствующих карбидов

Название образца	Работа выхода карбида	Тангенс угла (ρ)
TiC (титан)	2,35-3,35eV	-584
ZrC (титан)	2,2-3,8eV	-260
HfC (нерж. ст.)	2,04eV	-378
NbC (нерж. ст.)	2,24eV	-9
TaC (нерж. ст.)	3,05-3,14eV	-2616

Заключение

В статье изложены результаты экспериментальных исследований автоэмиссионных токов из АКУП легированных различными металлами. Показана стабильность автоэмиссионных свойств при многократном изменении прикладываемого напряжения. Сделаны оценки порогового значения напряжений. Полученные результаты показали отклонение от уравнения Фаулера-Нордгейма, что требует дальнейшего изучения.

Исследование автоэмиссионного катода проводится в рамках работы по разработке перспективных технологий и конструкций изделий интеллектуальной силовой электроники для применения в аппаратуре промышленного назначения и в специальных системах (триод с автоэмиссионным катодом на основе алмазоподобных пленок) при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного контракта № 14.429.11.0001 от 03 октября 2013 г.

Список литературы

1. Катаева Е.А. Механизмы электронного транспорта и структура металл-углеродных нанокомпозитов, содержащих W, Сг и Nb : дис. канд. физ.-мат, наук. – М.. 2011. – 141 с.
2. Пресняков М. Ю. Структура и термостабильность пленок металлосодержащих кремний-углеродных нанокомпозитов : дис. канд. тех., наук. – М.. 2014г. – 168 с.
3. Технология получения, структура и свойства металлосодержащих нанокомпозитов с кремний–углеродной матрицей / Ю.Н. Пархоменко, М.Д. Малинкович, Е.А. Скрылева, М.Л. Шупегин // Изв. вузов. Материалы элек-трон. техники. – 2005. – № 3. – С. 12-16.
4. Шупегин М.Л. Осаждение пленок металлосодержащих нанокомпозитов с кремний-углеродной матрицей // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т.79, №2. – С. 28-32.
5. Fowler R.H., Nordheim L.W. Electron emission in intensive fields // Proc. Roy. Soc. 1928. A119. P. 173-181.
6. Фоменко В.С. Эмиссионные свойства материалов. Справочник. / Издательство «Наукова думка»; [под ред. И.Я. Дехтяр]. Киев: Изд-во. «Наукова думка», 1981. 339 с.

Рецензенты:

Крянев А.В., д.ф.-м.н., профессор Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва;

Иванов В.В., д.ф.-м.н., старший научный сотрудник (доцент), главный научный сотрудник, Лаборатория информационных технологий, Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна.