

10;11;12

Сильноточная электронная пушка на основе автоэмиссионного катода и алмазной сетки

© Н.Н. Дзбановский, П.В. Минаков, А.А. Пилевский, А.Т. Рахимов,
Б.В. Селезнев, Н.В. Суевин, А.Ю. Юрьев

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцина
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
119992 Москва, Россия
e-mail: Yuriev@dnph.phys.msu.su

(Поступило в Редакцию 28 января 2005 г.)

Использование сеточного управления в сильноточных приборах с автоэмиссионными катодами приводит к необходимости поиска особого материала для создания сеток. Этот материал должен обладать высокой механической прочностью, теплопроводностью и электрической проводимостью. Кроме того, должна существовать возможность создания сеток толщиной в несколько микрон. Нами предложено в качестве такого материала использовать легированный бором алмаз.

Введение

Электронные пушки на основе автоэмиссионных катодов обладают целым рядом преимуществ по сравнению с термоэмиссионными аналогами, поскольку потребляют существенно меньше энергии, практически безынерционны, обладают более узким энергетическим спектром эмиттируемых электронов. Немаловажно, что низкая (комнатная) температура работы автоэмиссионного электронного источника позволяет создавать приборы, область применения которых недоступна для устройств с термоэмиссионными источниками [1].

Кроме собственно катода конструкция любого такого прибора должна включать в себя элементы, обеспечивающие независимое управление током и энергией пучка эмиттируемых электронов. В качестве управляющего устройства чаще всего используется сетка. В отличие от термоэмиссионных электронных пушек, где модулирующая (управляющая) сетка обычно является запирающей (имеет отрицательный потенциал по отношению к катоду), в устройствах на основе автокатодов первая сетка, как правило, вытягивающая, что обусловлено необходимостью создания на поверхности катода такой напряженности электрического поля, которая обеспечит необходимую эмиссию электронов. Поэтому ясно, что характерные параметры катодно-сеточного узла существенным образом должны зависеть от физических характеристик автоэмиссионного катода. В данной работе исследуется возможность эффективного управления электронной пушкой, созданной на основе разработанных нами нанокристаллических углеродных пленок [2,3].

Основным механизмом эмиссии электронов в „холодных“ катодах является их туннелирование через поверхностный потенциальный барьер в сильном электрическом поле. Вероятность такого туннелирования определяется фундаментальными свойствами материала, и в лучшем случае для получения практически необходимых токов эмиссии требуется создать на поверхности эмиттера очень большие электрические поля —

порядка 10 МВ/см. Единственным практически возможным способом создания столь больших напряженностей электрического поля является изготовление поверхности эмиттера в форме микроострий. Тогда даже при приложении сравнительно умеренного электрического поля его реальная величина на микроостриях будет на порядки больше за счет геометрического усиления. Как показали многочисленные исследования последних лет, наиболее перспективным материалом для холодных катодов являются пленки, представляющие собой углеродные нанопластины толщиной несколько нанометров, длиной и высотой до нескольких микрон, ориентированные перпендикулярно поверхности катода [2,3].

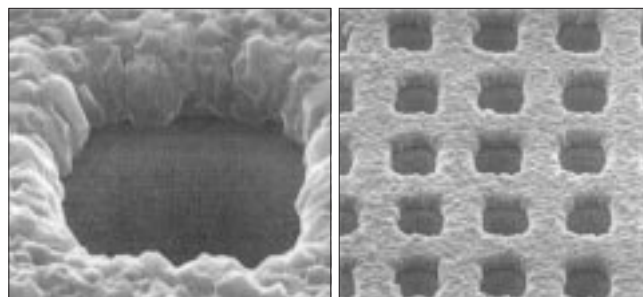
Отметим проблемы, которые возникают при использовании сеточного управления в приборах с автоэмиссионным катодом. С одной стороны, для снижения управляющего напряжения необходимо уменьшать расстояние катод–сетка вплоть до десятков микрон (в принципе можно уменьшить это расстояние и до долей микрона [4], однако для этого придется привлекать микроэлектронные технологии, что неизбежно увеличивает стоимость изделия). С другой стороны, для сохранения высокой однородности эмиссии по поверхности катода и токовой прозрачности сетки необходимо уменьшать диаметр сеточной ячейки и увеличивать ее геометрическую прозрачность, что неизбежно приводит к снижению механической прочности и теплопроводности сетки, а это в свою очередь приводит к ее перегреву, провисанию и замыканию на катод.

Отметим, что близкие проблемы возникают и в современных мощных СВЧ лампах с термокатодом, работающих в режиме больших сеточных токов. Поэтому в большинстве такого рода устройств используются сетки, изготовленные из металлов с высокой температурой плавления (например, W, Mo, Hf, Zr, Ta). Но, так как управляющая сетка в этих устройствах расположена вблизи катода (особенно в высокочастотных лампах), ее термические деформации (провисание) могут приводить к изменению зазора сетка–катод, что ведет к изменению

характеристик устройства. В связи с этим в последнее время ведется широкий поиск материалов, более подходящих для изготовления сеток в мощных электронно-вакуумных приборах. Одним из наиболее перспективных материалов считается пиролитический графит, имеющий хорошие термические свойства. Однако он является чрезвычайно хрупким и анизотропным материалом, и для дальнейшего использования в лампах приходится наносить его на металлическую основу, что технически сложно и малонадежно. Кроме того, термические напряжения, возникающие в местах контактов такой сетки с металлическим держателем, приводят к ее разрушению. К недостаткам сеток из пирографита следует также отнести наличие шероховатости поверхности, приводящее к сеточной вторичной электронной эмиссии и низкой высоковольтной стойкости. Причиной этих шероховатостей могут быть прилипшие графитовые частицы, а также острые кромки отверстий, возникающие, в частности, при изготовлении отверстий методом резки лазерным лучом. В этом случае конденсация углерода вблизи отверстий приводит к образованию гранул на краях отверстий или около них. Вообще говоря, углеродные частицы или другие образуются за счет перекристаллизации материала во всех методах резки, не только лазерным лучом (ионное травление, электронный пучок, электроискровой метод, механические или электромеханические методы). Для устранения этих частиц применяют метод отжига сеток в химически активной атмосфере при температурах 900–1000°С в воздухе, кислороде или кислородно-азотной смеси при пониженных давлениях. Все это усложняет изготовление и использование пирографитовых сеток.

Таким образом, для преодоления вышеизложенных проблем необходимо использовать сетку из материалов с высокой механической прочностью, малым коэффициентом теплового расширения и высокой теплопроводностью. Кроме того, материал сетки должен быть достаточно хорошо проводящим во избежание эффектов зарядки. Исходя из этих соображений, нами предложено изготавливать управляющую и фокусирующую сетки из легированной алмазной пленки, которая, как известно, обладает уникальными термическими и механическими свойствами и высокой изотропной прочностью. Указанная пленка может быть как поликристаллической, так и монокристаллической, так как недавно появились технологии гетероэпитаксиального роста алмаза на пленках иридия.

Возможность изготовить тонкую алмазную сетку (2–5 μm) и расположить ее вблизи катода (на расстоянии порядка десятка μm) позволяет уменьшить управляющее напряжение и пролетное время электронов в пространстве катод–сетка, что существенно для использования сетки в высокочастотных приборах (более 2 GHz) (для сравнения, расстояние между термокатодом и металлической управляющей сеткой в электронно-вакуумных приборах обычно более 100 μm).



MR1/6 91 min
Distance – 5.00 μm

Рис. 1. Алмазная сетка. Изображение полученное с использованием электронного микроскопа. Прозрачность около 50%.

Алмазные сетки

Алмаз хорошо известен как материал, обладающий высокими теплопроводностью и механической прочностью, прекрасной устойчивостью к воздействию агрессивных сред и рядом других выдающихся свойств, что определяет перспективы для широкого применения его. При этом чистый алмаз обладает крайне низкой электропроводностью. Метод создания дырочной проводимости в алмазе хорошо известен и состоит во введении в него примеси бора, которая достаточно легко активируется уже при комнатной температуре [5].

Сетки могут иметь плоскую, цилиндрическую или любую другую геометрию, необходимую для выполнения ее функций управления электронным потоком, в зависимости от типа прибора. Указанная алмазная сетка может быть получена методом травления сплошной алмазной мембраны или селективным газофазным осаждением. Осаждение легированных алмазных пленок проводилось в реакторе с возбуждением среды сверхвысокочастотным разрядом (частота 2.45 GHz, мощность до 1 kW). детальное описание установки и метода осаждения даны в [6].

Типичный пример сетки, полученной таким способом, представлен на рис. 1. Видно, что сетка достаточно однородна и обладает достаточно высокой прозрачностью. Исследование полученных сеток с использованием рамановской спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии показало, что полученные сетки состоят из достаточно „качественного“ алмаза с низким содержанием неалмазной фазы.

Исследование автоэмиссионного триода с алмазной сеткой

Использовался автоэмиссионный катод, характеристики которого описаны в работах [2]. Диаметр эмиссионного пятна составлял 2.3 mm ($S = 0.04 \text{ cm}^2$). Эмиссионные характеристики используемого автокатада были предварительно исследованы в диодной схеме с использованием люминофорного экрана. Результаты измерений

представлены на рис. 2. Как видно из этого рисунка, полученный катод имеет достаточно однородное распределение эмиссионного тока и высокую плотность центров эмиссии. Этот катод в дальнейшем использовался для измерений в триодной схеме с использованием алмазной сетки.

Зазор между катодом и алмазной сеткой устанавливался $40 \mu\text{m}$. Такой зазор, с одной стороны, обеспечивал однородное распределение напряженности электрического поля на катоде, а с другой стороны, позволял управлять электронным потоком достаточно низкими потенциалами на сетке.

Исследования проводились как в непрерывном, так и в импульсном режимах. В последнем случае на катод подавались отрицательные импульсы длительностью $340 \mu\text{s}$ и частотой 50 Hz . Отметим, что для алмазных сеточных узлов (в отличие от металлических сеток) результаты, полученные в этих режимах, практически не отличались, что свидетельствует о высокой стойкости алмазных сеток. Типичная вольт-амперная характеристика одного из исследованных нами сеточных узлов представлена на рис. 3 (измерения проводились в импульсном режиме). Как видим, вольт-амперные характеристики как в диодной, так и в триодной конструкции практически совпадают, что свидетельствует о достаточно высокой однородности электрического поля на поверхности катода.

В целом ряде приложений принципиальное значение имеет не полная разность потенциалов катод–сетка, а

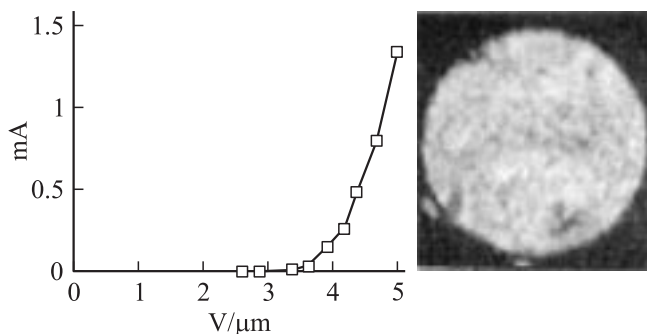


Рис. 2. Эмиссия в диодной схеме с люминофором.

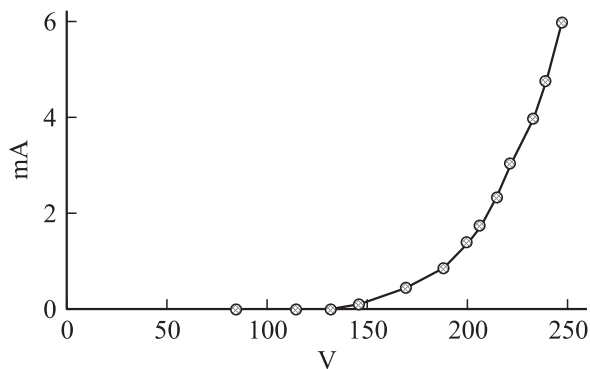


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика на зазоре $40 \mu\text{m}$.

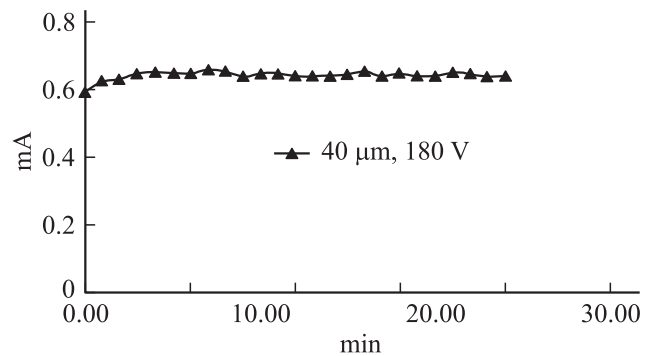


Рис. 4. Старение в режиме постоянного тока на зазоре $40 \mu\text{m}$.

амплитуда модулирующего напряжения. В нашем случае для модуляции тока можно использовать только „активную“ часть, например, начиная с $3 \text{ V}/\mu\text{m}$. Как видно из рисунка, на зазоре $40 \mu\text{m}$ ток 6 mA может быть полностью промодулирован напряжением $\Delta U = 120 \text{ V}$ (рис. 3). Этому соответствуют плотность тока на катоде $150 \text{ mA}/\text{cm}^2$ и плотность мощности на сетке около $0.3 \text{ W}/\text{cm}^2$.

Как показали наши измерения, электронная прозрачность сетки 50% , что в точности соответствует геометрической прозрачности. Сетка выдерживала импульсную плотность тока с катода $1 \text{ A}/\text{cm}^2$ при напряжении 1.5 kV . Ни одна из множества исследованных нами металлических сеток даже близко не приближалась к подобным параметрам.

Стабильность работы разработанного нами алмазного сеточного узла исследовалась в режиме постоянного тока на зазоре $40 \mu\text{m}$. Результаты измерений долгосрочной стабильности тока представлены на рис. 4. Как видно, ток очень стабилен, не отмечено существенных осцилляций, в том числе и в импульсном режиме. Отметим, что аналогичные измерения на металлических сетках неизбежно показывали наличие механических колебаний сетки, вызванных ее термическим расширением и провисанием в сильном электрическом поле.

Заключение

Предложено использовать в качестве вытягивающих сеток автокатодов легированные алмазные сетки, выращенные методами газофазного осаждения. Приведены сравнительные исследования алмазных и металлических сеток.

Из проведенных нами измерений следует, что алмазная сетка выдерживает импульсную плотность тока с катода $1 \text{ A}/\text{cm}^2$ при напряжении 1.5 kV . Ни одна из металлических сеток даже близко не приближалась к подобным параметрам.

Продемонстрирована возможность управления током автоэмиссии до $150 \text{ mA}/\text{cm}^2$ при модуляции напряжения не более 120 V .

Работа поддержана грантом по поддержке ведущих научных школ президента РФ (№ НШ-1713.2003.2).

Список литературы

- [1] *Busta H.H., Chem J.M., Shen Z. et al. // JVST B. 2003. Vol. 21. P. 344–349.*
- [2] *Bliablin A.A., Pilevsky A.V., Rakhimov A.N. et al. // IEEE Intern. Vacuum Electron Sources Conf. Orlando (Florida), 2000. Technical Digest. P. 44.*
- [3] *Busta H.H., Espinosa R.J., Rakhimov A.T. et al. // Sol. St. Electron. 2001. Vol. 45. N 6. P. 1039–1047.*
- [4] *Busta H.H., Furst D., Samorodov S. et al. // Appl. Phys. Lett. 2001. Vol. 78. N 22. P. 3418–3420.*
- [5] *Fontaine F., Gheeraert E., Deneuille A. // Diamond Relat. Mater. 1996. N 5. P. 753–756.*
- [6] *Дворкин В.В., Дзбановский Н.Н., Минаков П.В. и др. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 9. С. 851–857.*