

10;11;12

Автоэлектронный эмиттер для ионизации воздуха в сверхзвуковом потоке

© С.В. Бобашев, Ю.П. Головачев, О.П. Коровин,
В.Н. Шредник, Д.М. Ван Ви

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия
Джонс Гопкинс Университет, Лаурел, Мериленд, США

Поступило в Редакцию 17 декабря 2001 г.

Предлагается использовать автоэлектронный эмиттер на базе жидкого галлия для ионизации воздуха в сверхзвуковом потоке.

В последние годы активно обсуждается применение магнитогидродинамических (МГД) технологий для сверхзвуковых и гиперзвуковых течений. В частности, в предложенной десять лет назад концепции создания гиперзвукового самолета АЯКС [1] ключевым элементом является МГД-устройство, которое позволит изменять энтальпию потока и управлять газодинамическими структурами течения с помощью магнитного поля. Однако на пути практической реализации обсуждаемого подхода возникает широкий спектр физико-технических проблем, требующих обстоятельного изучения.

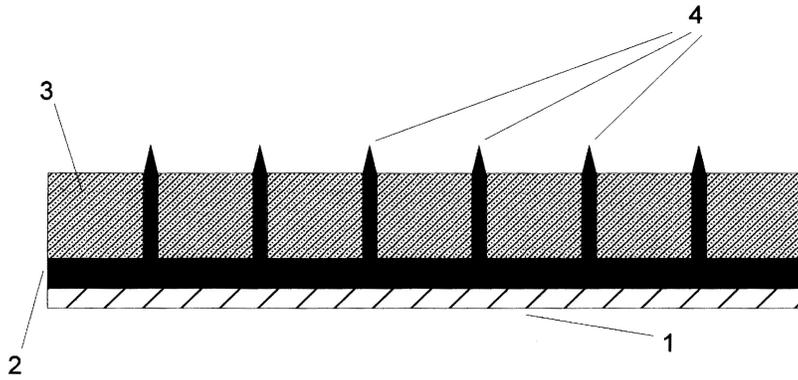
Эксперименты и расчеты, выполненные в последнее время [2,3], показали, что магнитные поля ≤ 1 Т могут существенно повлиять на газодинамическую структуру потока слабоионизованного газа в лабораторных моделях сверхзвуковых диффузоров. Эти исследования проводились в потоках слабоионизованного тяжелого инертного газа. Очевидным преимуществом инертного газа для рассматриваемых исследований по сравнению с воздухом и азотом являются низкие сечения рекомбинации атомных ионов, что позволяет проводить исследования на лабораторных газодинамических стендах. Для практики наибольший интерес представляют исследования МГД-процессов в сверхзвуковых потоках слабоионизованных молекулярных газов, точнее, воздуха или азота. При этом первоочередной проблемой является создание и поддержание в течение значительного времени степени ионизации газа, необходимой для существенного

МГД-взаимодействия. Эта проблема активно и всесторонне обсуждается [4]. Из обсуждения следует, в частности, что одним из наиболее эффективных способов создания плазмы является ионизация сверхзвукового газового потока электронным пучком с энергией 10–100 keV и плотностями тока 1–100 mA/cm². В общем, речь идет о создании низкотемпературной плазмы в сверхзвуковом потоке при скоростях 1.500–2000 m/s (числа Маха 4–6) и статическом давлении 0.01–0.1 ат. (5–70 Torr). Для изменения энтальпии потока на несколько мегаджоулей на килограмм за счет МГД-взаимодействия при разумных значениях магнитных полей (~ 1–5 Т) необходимо поддерживать в объеме ~ 1 м³ плотность электронов за счет внешней ионизации в интервале 10¹²–10¹⁴ см⁻³.

В рассматриваемой проблеме нетривиальным является вопрос о создании интенсивных пучков электронов и способах их введения в сверхзвуковой поток. Анализ существующих эмиттеров электронов показывает, что использование накаливаемых катодов нецелесообразно, так как потребуются большие энергозатраты на накал, если речь идет о значительных эмитирующих поверхностях. Кроме того, накапливаемые катоды крайне чувствительны к вакуумным условиям и в большинстве своем отравляются в контакте с атмосферой.

Современные высоковольтные ненакаливаемые катоды, удовлетворяющие требованиям обсуждаемой задачи, представлены в основном твердотельными одно- и многоострийными эмиттерами, работающими в режиме автоэлектронной или взрывной эмиссии [5]. Использование таких катодов позволяет избежать больших затрат энергии на накал. Напряжения, необходимые для работы в режиме автоэлектронной или взрывной эмиссии соответствуют величинам, необходимым для оптимальной ионизации воздуха в газовом потоке. Требуемую для ионизации плотность тока такие многоострийные катоды могут обеспечить при условии создания системы одинаковых по высоте и радиусу закругления острий. Недостатком такой системы является повышенная чувствительность к ионной бомбардировке острий, которая особенно проявится при давлениях воздуха, требуемых для создания МГД-устройства. В режиме взрывной эмиссии время жизни острий мало, так как при каждом взрывном импульсе происходит частичное разрушение острия и вынос части материала.

Наиболее отвечающим требованиям задачи является, по нашему мнению, многоострийный жидкометаллический эмиттер на основе жид-



Схематический вид эмиттера: 1 — подложка, 2 — слой жидкого галлия, 3 — трековая мембрана, 4 — острия из жидкого галлия.

кого галлия, в котором для создания системы острий используется ядерная мембрана [6]. Схематический вид эмиттера представлен на рисунке.

Основой эмиттера является слой жидкого галлия, при этом одна сторона слоя имеет общий контакт с токопроводом, а другая покрыта трековой мембраной из лавсана. Трековые мембраны создаются путем облучения полимерной пленки пучками тяжелых ионов мегавольтных энергий. Толщина пленки составляет обычно $10\ \mu\text{m}$. Диаметр трековых каналов может варьироваться при изготовлении в пределах $0.3\text{--}1.0\ \mu\text{m}$. Плотность каналов в пленке может достигать $10^8\ \text{cm}^{-2}$. Площадь эмиттера ограничивается размерами пленки и может составлять десятки квадратных метров.

Электрический ток при подаче внешнего напряжения создается за счет автоэлектронной эмиссии с острий жидкого галлия, формирующихся вследствие капиллярного проникновения в трековом канале. Высокая стабильность эмиссионной способности отдельного острия обеспечивается отрицательной обратной связью, не позволяющей остриям неограниченно обостряться, а току эмиссии неограниченно возрастать. Согласно работе [6], такая обратная связь создается за счет силы поверхностного натяжения жидкого металла, стремящейся затупить конец отдельного острия. С другой стороны, по мере роста

внешнего потенциала $U(t)$ растет напряженность электрического поля $E(t)$ у закругленного конца галлиевого столбика, которая вытягивает и обостряет эмиттер. В какой-то момент электрическое давление поля становится равным сжимающему давлению сил поверхностного натяжения. При этом выполняется условие

$$\varepsilon_0 E_0^2 / 2 = 2\sigma / r_0, \quad (1)$$

где ε_0 — электрическая постоянная, равная $8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m; E_0 — равновесная напряженность электрического поля, V/m; σ — поверхностное натяжение, N/m; r_0 — равновесный радиус острия, м. В предположении, что отдельный эмиттер — тело вращения, а его торец заканчивается полусферой радиуса r , из условия равновесия можно оценить

$$E_0 = 5.7 \cdot 10^5 (r_0)^{-0.5}, \quad (2)$$

где коэффициент поверхностного натяжения галлия $\sigma = 0.712$ N/m. Как следует из формулы (2), при радиусах острий 35–50 nm напряженность равновесного поля составляет $E_0 \geq 10^7$ V/cm. Это обстоятельство нам представляется очень важным с точки зрения ввода электронного пучка в сверхзвуковой поток, так как электроны ускоряются до энергии 10 keV на расстояниях $\sim 10 \mu\text{m}$. Полагая площадь эмиттирующей поверхности равной $\sim r_0^2$, можно вычислить ток электронов с одного острия I_0 , и если плотность острий n (cm^{-2}) известна, то плотность тока эмиттера (A/cm^2) определяется как nI_0 .

В настоящее время эмиттеры испытаны в автономном режиме при различных способах подачи напряжения: синусоидального с частотой 50, 400 Hz и 50 kHz, полуволна синусоиды с теми же частотами; постоянного напряжения и импульсного длительностью 100 ns и частотой повторения несколько kHz [6]. В автоэмиссионном режиме получены плотности токов до 100 mA/cm^2 . В таблице приводятся параметры эмиттера, рассчитанные по теории Фаулера–Нордгейма, учитывающей равновесие давления сил электрического поля и поверхностного натяжения жидкого галлия. В таблице приведены величины напряженности электрического поля E , плотности электронного тока J_{Ga} и величины тока I_0 с одного острия, а также плотность тока с поверхности эмиттера $I = I_0 \cdot n$ при числе острий $n = 10^7 \text{ cm}^{-2}$ в зависимости от величины равновесного радиуса острия r_0 . Известно [7], что жидкометаллическое острие может обеспечить стабильный ток в непрерывном режиме

Параметры эмиттера на жидком галлии

r_0 , nm	$E \times 10^{-7}$, V/cm	J_{Ga} , A/cm ²	$I_0 = j_{Ga} \cdot r_0^2$, A	$I = I_0 \cdot n$, A/cm ²
10	5.7	$1.9 \cdot 10^7$	$1.9 \cdot 10^{-5}$	190
20	4.0	$2.1 \cdot 10^5$	$8.4 \cdot 10^{-7}$	8.4
30	3.35	$7.6 \cdot 10^3$	$6.9 \cdot 10^{-8}$	0.69
40	2.84	$4.9 \cdot 10^2$	$7.9 \cdot 10^{-9}$	0.079
50	2.5	$4.5 \cdot 10^1$	$1.14 \cdot 10^{-9}$	0.0114

не менее $10 \mu\text{A}$. Следовательно, при плотности размещения острий 10^7 cm^{-2} может быть обеспечен ток порядка 100 A/cm^2 .

В заключение укажем на свойства многоострийного холодного катода на жидком галлии, которые, по нашему мнению, существенны для ионизации молекулярного газа в сверхзвуковом потоке. Катод в режиме автоэмиссии или взрывной эмиссии позволяет получить стабильные и воспроизводимые электронные пучки килоэлектронвольтных энергии с плотностями до сотен A/cm^2 . Стабильность и воспроизводимость связаны с тем, что режим автоэлектронной эмиссии автоматически поддерживается надежной отрицательной обратной связью, обусловленной достижением равновесия электрических сил и сил поверхностного натяжения. При этом плотность тока с одного острия оказывается достаточно низкой для автоэмиссионного процесса. Значительный полный ток обеспечивается большим числом ($10^7 - 10^8 \text{ cm}^{-2}$) работающих острий. В этом случае нет проблемы выравнивания параметров острий, существенной для твердотельных эмиттеров, так как параметры жидких эмиттеров выравниваются автоматически. В равной мере и дефекты, которые накапливаются в случае твердых острий, самозалечиваются. В режиме взрывной эмиссии реализована длительная работа эмиттера с импульсными токами до сотен ампер при длительности импульса 30–100 ns и с частотами повторения от 1 Hz до нескольких kHz в течение многих часов без видимых изменений параметров эмиссии. Стабильность в этом случае обеспечивается восстановлением острий после каждого взрывного импульса.

Как отмечалось выше, при высокой напряженности электрического поля, создаваемого в области эмиссии, электроны приобретают киловольтную энергию на расстояниях нескольких μm . Это обстоятельство

позволяет по-новому подойти к проблеме ввода электронного пучка в сверхзвуковой поток. Эмитирующие поверхности рассматриваемых катодов могут быть изготовлены значительных размеров и разнообразных форм.

Мы планируем провести изучение свойств многоострийных пленочных галлиевых эмиттеров в условиях, отвечающих требованиям инжекции килоэлектронвольтовых пучков электронов в сверхзвуковой поток воздуха в МГД-каналах.

Список литературы

- [1] *Fraishtadt V.L., Kuranov A.L., Sheikin E.G.* // Technical Physics. 1998. V. 43 (11). P. 1309–1313.
- [2] *Bobashev S.V., Vasil'eva R.V., D'yakonova E.A., Erofeev A.V., Lapushkina T.A., Maslennikov V.G., Ponyaev S.A., Sakharov V.A., Van Wie D.* // Tech. Phys. Lett. 2001. V. 27 (1). P. 71–73.
- [3] *Golovachev Yu.P., Il'in S.A., Sushchikh S.Yu.* // Tech. Phys. Lett. 1977. V. 23 (8). P. 615–616.
- [4] *Macheret S.O., Shneider M.N., Miles R.B., Lipinski R.J.* // AIAA Journal. 2001. V. 39 (6). P. 1127–1138.
- [5] *Ненакаливаемые катоды* / Под ред. М.И. Елинсона. М.: Сов. радио, 1974.
- [6] *Коровин О.П., Попов Е.О., Шредник В.Н., Каратецкий С.С.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25 (8). С. 39–44. [*Korovin O.P., Popov E.O., Shrednik V.N., Karatetskii S.S.* // Tech. Phys. Lett. 1999. V. 35 (2). P. 310–312].
- [7] *Fursey G.N., Shirochin L.A., Baskin L.M.* // J. Vac. Sci. Technol. 1997. B 15 (2). P. 410–421.