

11;12

Многоострый жидкометаллический автоэлектронный эмиттер

© О.П. Коровин, Е.О. Попов, В.Н. Шредник, С.С. Каратецкий

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 29 декабря 1998 г.

На основе технологии трековых мембран создан стабильный автоэлектронный эмиттер с большой плотностью (до 10^8 $1/\text{cm}^2$) острий. Эмиттер испытан в различных режимах отбора тока от постоянного до коротких импульсов наносекундной длительности с частотой посылок несколько кГц. Высокая стабильность тока эмиссии при умеренной плотности электронного тока до 100 mA/cm^2 объясняется авторами наличием большого числа эмитирующих острий и динамическим равновесием между вытягивающими силами электрического поля и силами поверхностного натяжения.

В литературе широко обсуждаются результаты исследований жидких взрывных эмиттеров электронов на основе острий [1–3]. Меньшее внимание уделялось жидкометаллическим автоэлектронным эмиттерам, по-видимому, вследствие легкости перехода эмиссии из режима автоэлектронной эмиссии в режим взрывной электронной эмиссии [2].

В данной работе излагаются и обсуждаются результаты исследования многоострого жидкометаллического эмиттера новой конструкции, стабильно работающего в режиме автоэлектронной эмиссии. Для создания эмиттера используется трековая мембрана из полиэтилентерефталата, отверстия в которой заполнены жидким галлием. С тыльной стороны пленка галлия имеет общий контакт с токоподводом. Использование трековой мембраны позволяет создать ансамбль острий с заранее заданной плотностью и соотношением между высотой отдельного эмиттера и его диаметром. Трековые мембраны, применяемые в настоящее время в фильтрах селективной очистки, получают путем облучения пленки тяжелыми ионами с энергией несколько десятков MeV. После облучения пленка освещается ультрафиолетом и подвергается химическому травлению. Толщина пленки обычно $10 \mu\text{m}$. Диаметр отверстий в зависимости от требований может быть от 0.3 до $1 \mu\text{m}$. Плотность каналов в

пленке может достигать 10^8 $1/\text{cm}^2$. Площадь эмиттера ограничивается размерами пленки и, в принципе, может составлять десятки квадратных метров.

Исследование автоэлектронной эмиссии проводилось в диодной конструкции с плоским анодом. Расстояние анод–катод в разных опытах составляло 3–4 мм. В наших экспериментах площадь катода составляла примерно 0.25 cm^2 при плотности каналов $6 \cdot 10^7$ $1/\text{cm}^2$. Диаметр канала составлял 0.3–0.4 μm . На катод подавалось синусоидальное напряжение U с частотой 50 Hz, 440 Hz или 50 kHz, а также постоянное напряжение, или же короткие отрицательные импульсы наносекундной длительности. Наиболее подробно были исследованы режимы переменного синусоидального $U(t)$. Именно эти режимы будут обсуждаться в данной статье.

На рис. 1, *a* показана осциллограмма напряжения U и эмиссионного тока I в одном из случаев, когда частота $U(t)$ составляла 440 Hz. Наблюдается типичный ”пороговый” характер, возникающей (и исчезающей) автоэлектронной эмиссии. Амплитуды $U(t)$ и $I(t)$ в этом случае относительно невысоки. Достижимая максимальная напряженность поля E недостаточна для возбуждения на обратной полуволне заметного ионного тока за счет полевого испарения. Положение кривой $I(t)$ относительно $U(t)$ симметрично. Таким же оно было и при 50 Hz и при $5 \cdot 10^4$ Hz, из чего следует безынерционность изменения формы (вслед за $U(t)$) эмитирующей поверхности на исследованных частотах. Рис. 1, *b* демонстрирует типичную вольтамперную характеристику, полученную для одного из положительных полупериодов напряжения. Ход характеристики рис. 1, *b* близок к экспоненциальному.

Рис. 2 демонстрирует стабильность тока эмиссии на протяжении длительного времени. Средний разброс амплитуд тока не превышает 5%. Максимально отбираемые токи могли быть увеличены до нескольких mA с ростом амплитуды напряжения U_{max} без нарушения стабильности в течение длительного (часы) времени.

Дальнейшее увеличение U_{max} приводило к ситуации, когда на фоне стабильных периодических импульсов тока, время от времени (и тем чаще, чем выше U_{max}) появлялись сильные выбросы тока. Из осциллограмм было видно, что времена этих сильных всплесков были много меньше периода $U(t)$ или $I(t)$. Мы связываем эти всплески с возбуждением взрывной электронной эмиссии. Подробнее эти менее стабильные режимы мы предполагаем описать позднее. Важно отметить,

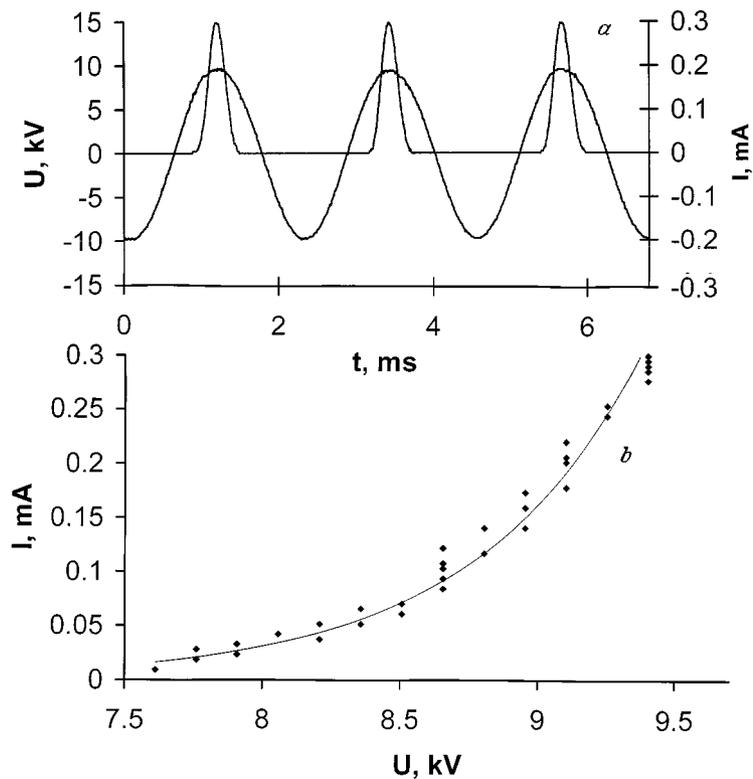


Рис. 1. Осциллограмма напряжения U и эмиссионного тока I (а); вольт-амперная характеристика, записанная при помощи компьютера через аналого-цифровой преобразователь (б).

что при U_{\max} ниже тех, которые отвечают режимам со всплесками тока, автоэлектронная эмиссия была стабильна и долговечна, обеспечивая среднюю по периоду плотность тока не менее 0.1 A/cm^2 . В режиме редких всплесков взрывной эмиссии автоэлектронная эмиссия после всплеска восстанавливалась в прежнем виде по всем своим параметрам. В противоположность этому многоострыйные системы из твердых эмиттеров, работающие в автоэлектронном режиме, как известно, не

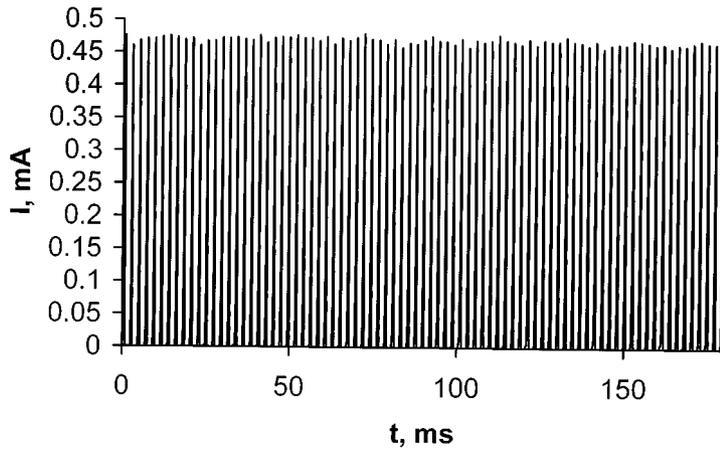


Рис. 2. Ток эмиссии в зависимости от времени (каждый пик соответствует импульсу тока, см. рис. 1, а).

восстанавливают свои прежние параметры после взрывов отдельных острий и постепенно деградируют.

Таким образом, обсуждаемый жидкометаллический автоэлектронный катод отличается хорошей стабильностью и долговечностью при умеренной средней плотности тока j в вакууме на уровне 10^{-6} Торг. Другим достоинством такого холодного и безынерционного катода является возможность увеличения его площади и возможность использования практически любых ориентаций и конфигураций катода. Пленочный эмиттер может быть либо плоским, либо согнутым в кольцо, трубку или же в более сложную фигуру, если это окажется целесообразным.

Интересно оценить параметры отдельных острий и объяснить высокую воспроизводимость тока обсуждаемого катода. Стабильность эмиттеров в режимах без взрывов обусловлена отрицательной обратной связью, не позволяющей остриям неограниченно обостряться, а току эмиссии неограниченно возрастать. Такой обратной связью в нашем случае, скорее всего, является сила поверхностного натяжения жидкости, стремящаяся затупить кончик отдельного острия. По мере роста $U(t)$ растет напряженность электрического поля E у закругленного конца галлиевого столбика. В какой-то момент электростатическое давление

поля p_E (вытягивающее и обостряющее эмиттеры) становится равным сжимающему давлению сил поверхностного натяжения p_σ . В предположении, что отдельный эмиттер (острие) — тело вращения, а его торец заканчивается полусферой радиуса r , условия равновесия p_E и p_σ будут означать [4]:

$$\frac{E_o^2}{8\pi} = \frac{2\sigma}{r_o}, \quad (1)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения. Индекс «о» отражает то обстоятельство, что теперь это равновесные поле и радиус. Равновесное E_o из (1) равно:

$$E_o = 4\sqrt{\frac{\pi\sigma}{r_o}}. \quad (2)$$

В каждый момент времени выполняется равенство (1). Измеряя E_o , σ и r_o соответственно в V/cm, N/cm и Å, перепишем (2) для галлия при комнатной температуре ($\sigma = 7.12 \cdot 10^{-3}$ N/cm [5]) в виде:

$$E_o = 56.76 \cdot 10^7 \frac{1}{\sqrt{r_o}}. \quad (3)$$

По формуле (3) нетрудно вычислить различные E_o в интересующем нас интервале r_o . При заданной E и известной работе выхода $\varphi = 4$ eV для галлия [6] по формуле для плотности тока автоэлектронной эмиссии j [7] нетрудно найти связь между j и r_o . Если j измеряется в A/cm², а r_o в Å, получим:

$$j = 1.766 \cdot 10^{13} \frac{1}{r_o} 10^{-0.3975\sqrt{r_o}}. \quad (4)$$

Полагая эмитирующую площадь, равной r_o^2 (что для оценки вполне справедливо), можно вычислить ток эмиссии I_o с одного острия, и если число работающих острий n известно (или как-то задано) можно вычислить суммарный ток $I_o \cdot n$ и сравнить его с измеренным.

Стабильные токи (без "взрывов") составляли не более 15 mA в амплитуде. Если принять в качестве n близкое к максимально возможному в нашем случае значение 10^7 , ток 15 mA обеспечат уравновешенные относительно сил поверхностного натяжения острия радиусом около 485 Å. При этом плотность тока $j \approx 64$ A/cm² относительно невелика для автоэлектронной эмиссии. Если же допустить $n = 10^6$, то для

полного тока около 15 мА требуется ансамбль острий с r_o около 370 Å при $j \approx 10^3$ А/см². При $n < 10^6$ дальнейший рост j может привести к саморазогреву острий и к развитию взрывной эмиссии. Поэтому мы полагаем, что стабильная работа нашего катода реализуется при j не более 10^3 А/см² и при минимальных радиусах "пульсирующих" острий в пределах 350–500 Å.

Таким образом, наблюдаемая стабильная и воспроизводимая эмиссия обсуждаемого катода объясняется тем, что автоэлектронный катод с физически надежной отрицательной обратной связью работает в режиме относительно низких для автоэлектронной эмиссии плотностей тока j . При этом значительный общий ток определяется большим числом (n) одновременно работающих острий. В этом случае нет проблемы выравнивания ансамбля острий, существенной для твердотельного катода. Жидкие острия выравниваются автоматически за счет капиллярного равновесия, установлению которого способствует малый исходный радиус жидкого столбика, заданный малым диаметром канала.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 98–02–18414.

Список литературы

- [1] Месяц Г.А., Фурсей Г.Н. // Ненакаливаемые катоды / Под ред. М.И. Елисона. Сов. радио, 1974. С. 284–286.
- [2] Fursey G.N., Shirochin L.A., Baskin L.M. // J. Vac. Sci. Techn. 1997. V. 15(2). P. 410–421.
- [3] Фурсей Г.Н., Жуков В.М. // ЖТФ. 1974. Т. 44. В. 6. С. 1280–1286.
- [4] Herring C. Structure and properties of solid surface / Ed. by R. Gomer and C.S. Smith, Chicago, Univ. Chicago Press, 1953. P. 5–72.
- [5] Химическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, т. 2, 1988. С. 479.
- [6] Фоменко В.С. Электронные свойства материалов. Справ. Киев: Наукова думка, 1984.
- [7] Шредник В.Н. // Ненакаливаемые катоды / Под ред. М.И. Елисона. М.: Сов. радио, 1974. С. 166–169.