



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
H01J 17/40 (2020.02)

(21)(22) Заявка: 2019136933, 18.11.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
18.11.2019

Дата регистрации:  
27.07.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 18.11.2019

(45) Опубликовано: 27.07.2020 Бюл. № 21

Адрес для переписки:

199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,  
федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Санкт-Петербургский горный  
университет", Патентно-лицензионный отдел

(72) Автор(ы):

Мустафаев Александр Сеит-Умерович (RU),  
Клименков Борис Давидович (RU),  
Грабовский Артем Юрьевич (RU),  
Кузнецов Виктор Иосифович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Санкт-Петербургский горный  
университет" (RU)

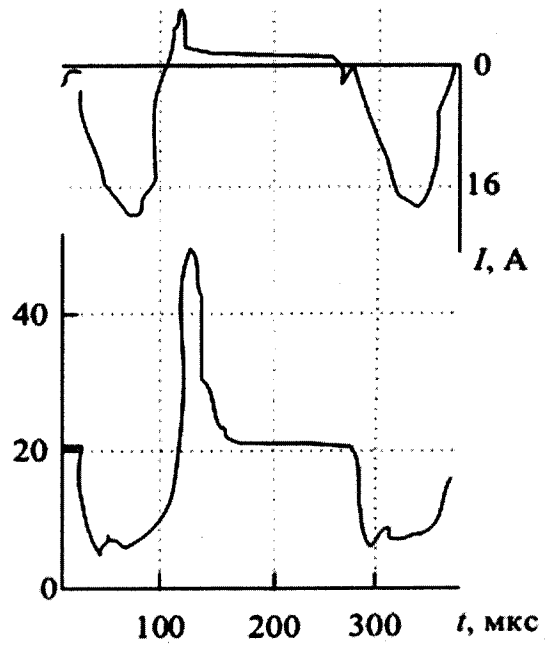
(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: SU 693472 A, 25.10.1979. SU 1563488  
A1, 23.10.1991. RU 1438589 C, 09.08.1995. WO  
2013116787 A1, 08.08.2013. КОСМИЧЕСКАЯ  
ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ, N1(16), 2017,  
с.103-113. ЖТФ, 1982, вып.7, т.52, с.1304-1312.

## (54) СПОСОБ БЕССЕТОЧНОЙ МОДУЛЯЦИИ ТОКА В НЕУСТОЙЧИВОМ РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ РАЗРЯДА

(57) Реферат:

Изобретение относится к плазменной энергетике, к области модуляции тока и может быть использовано при разработке радиационно-стойкой высокотемпературной плазменной электроники для космических и наземных ядерных энергетических установок, систем экологической противорадиационной защиты, при создании низковольтных сильноточных цепей на объектах минерально-сырьевого комплекса при переработке радиоактивных полезных ископаемых. Способ бессеточной модуляции тока в неустойчивом режиме горения разряда включает выбор давления компонент газа из условия  $\lambda_e > d$  и горение разряда в бесстолкновительном режиме. Разряд зажигают в парах бинарной цезий-бариевой смеси, при этом размер межэлектродного зазора должен быть больше 1, далее в плазме возбуждают электронную

неустойчивость Бурсиана-Пирса и формируют виртуальный катод, модулирующий ток, формирование которого происходит за время пробега электронов через зазор, а затем осуществляют управление процессом модуляции, причем регулирование уровня разрядного тока происходит в диапазоне от 1 до 10 А/см<sup>2</sup> путем изменения сопротивления нагрузки R, а в диапазоне от 10 до 20 А/см<sup>2</sup> путем изменения температуры эмиттера, изменение амплитуды тока и времени проводящего и запертого состояния осуществляют регулированием величины ЭДС источника E и величины межэлектродного зазора d. Технический результат - возможность обеспечения полностью управляемой бессеточной модуляции тока плотностью до 20 А/см<sup>2</sup> с частотой 5-20 кГц, 7 ил.



Фиг. 1

RU 2727927 C1

RU 2727927 C1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC  
*H01J 17/40 (2020.02)*

(21)(22) Application: **2019136933, 18.11.2019**

(24) Effective date for property rights:  
**18.11.2019**

Registration date:  
**27.07.2020**

Priority:

(22) Date of filing: **18.11.2019**

(45) Date of publication: **27.07.2020** Bull. № 21

Mail address:

**199106, Sankt-Peterburg, V.O., 21 liniya, 2,  
federalnoe gosudarstvennoe byudzhethnoe  
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego  
obrazovaniya "Sankt-Peterburgskij gornyj  
universitet", Patentno-litsenziornyj otdel**

(72) Inventor(s):

**Mustafaev Aleksandr Seit-Umerovich (RU),  
Klimenkov Boris Davidovich (RU),  
Grabovskij Artem Yurevich (RU),  
Kuznetsov Viktor Iosifovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**federalnoe gosudarstvennoe byudzhethnoe  
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego  
obrazovaniya "Sankt-Peterburgskij gornyj  
universitet" (RU)**

(54) **METHOD OF GRIDLESS MODULATION OF CURRENT IN UNSTABLE MODE OF DISCHARGE COMBUSTION**

(57) Abstract:

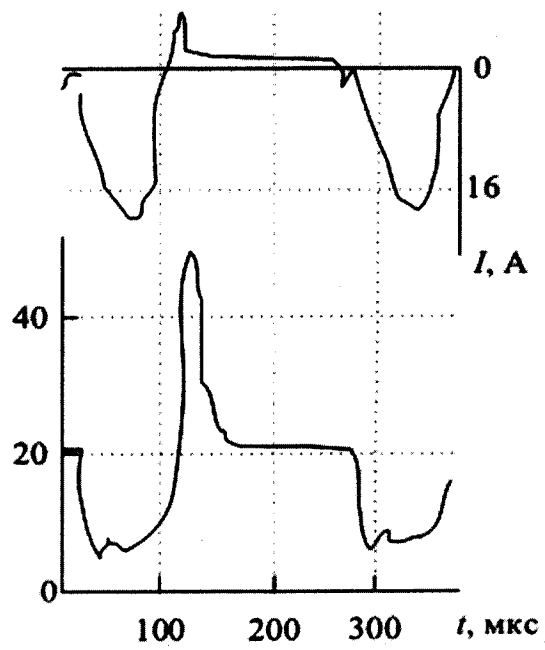
FIELD: power engineering.

SUBSTANCE: invention relates to plasma power engineering, to current modulation and can be used in development of radiation-resistant high-temperature plasma electronics for space and ground nuclear power plants, systems of environmental anti-radiation protection, when creating low-voltage high-current circuits on objects of mineral-raw material complex during processing of radioactive minerals. Method of gridless current modulation in unstable mode of discharge combustion includes selection of gas component pressure from condition  $\lambda_e > d$  and discharge combustion in collisionless mode. Discharge is ignited in pairs of binary cesium-barium mixture, wherein size of interelectrode gap should be greater than 1, then in

plasma excited electronic Bursian-Pierce instability and forming virtual cathode, modulating current, formation of which occurs during time of electrons path through gap, and then controlling the modulation process, wherein the discharge current level is controlled in range of 1 to 10 A/cm<sup>2</sup> by changing the load resistance R, and in the range of from 10 to 20 A/cm<sup>2</sup> by changing the emitter temperature, the change in the current amplitude and the time and the locked state of the conductive regulation value is carried EMF source E and the interelectrode gap d.

EFFECT: possibility of providing completely controlled gridless modulation of current with density of up to 20 A/cm<sup>2</sup> with frequency of 5–20 kHz.

1 cl, 7 dwg



Фиг. 1

RU 2727927 C1

RU 2727927 C1

Изобретение относится к плазменной энергетике, к области модуляции тока и может быть использовано при разработке радиационно-стойкой высокотемпературной плазменной электроники для космических и наземных ядерных энергетических установок, систем экологической противорадиационной защиты, при создании  
5 низковольтных сильноточных цепей на объектах минерально-сырьевого комплекса при переработке радиоактивных полезных ископаемых и др.

Известен способ управления током в полупроводниковых приборах - полевых транзисторах или биполярных транзисторах с изолированными затворами (патент РФ №2523598, опубл. 20.07.2014). Способ заключается в создании между источником и  
10 приемником управляющей информации и энергии беспроводного энерготранспортирующего канала в электроизолирующей среде светопроводящего стержня путем размещения на одном из торцов стержня мощного светодиода, а на другом торце стержня - матричного солнечного элемента. Далее при помощи светодиода в стержне возбуждают световой поток, энергию потока преобразуют в матричном  
15 солнечном элементе в энергию электрического тока, с помощью которой питают затвор транзистора, при этом управляющую информацию кодируют путем изменения времен включенного и выключенного состояний светодиода.

Недостатком способа является нестабильность параметров управления затворами транзисторов вследствие помех, возникающих в энерготранспортирующем канале при  
20 реализации способа в условиях высоких температур, в агрессивных средах, а также в условиях повышенного уровня радиации.

Известен способ зажигания разряда в газоразрядном промежутке (патент РФ №1438589, опубл. 09.08.1995), в котором зажигание разряда в основном разрядном промежутке, образованном между двумя основными электродами, рядом с одним из  
25 которых расположен вспомогательный электрод, образующий с ним вспомогательный разрядный промежуток, осуществляется за счет зажигания вспомогательного разряда в области дугового разряда и изменения электромагнитного поля в основном разрядном промежутке за счет кратковременного приложения дополнительной разности потенциалов между основными электродами.

Недостатками являются наличие вспомогательного электрода (коммутирующего элемента, управляемого по фазе), снижающее общую надежность конструкции, сложность подбора параметров RLC-составляющих внешнего контура для согласования частоты свободных колебаний тока, необходимых для нахождения рабочей точки на  
30 падающем участке вольт-амперной характеристики вспомогательного разряда.

Известен способ управления током в импульсных газоразрядных коммутаторах (патент РФ №2152115, опубл. 27.06.2000), при котором управляющий электрод и электрод, коммутирующий ток расположены в изолированных друг от друга объемах, а управляющее воздействие осуществляется волной ионизации. При данном способе  
35 управления образование плазмы в межэлектродном пространстве (между катодом и анодом) происходит со скоростью, значительно превышающей скорость образования плазмы при ионизации электронным ударом.

Недостатками являются сложность получения и контроля оптимальных условий формирования волны ионизации, а именно реализация контроля давлений в каждом из изолированных объемов.

Известен способ управления током в газоразрядных приборах с помощью подачи импульса напряжения на управляющий электрод (сетку) (Ворончев Т.А. Импульсные тиратроны. - М.: Сов. радио. - 1958. - 164 с.), находящийся в одном объеме с электродами, коммутирующими ток. Сначала разряд зажигается на сетку, а после достижения  
45

сеточным током определенной величины (пускового сеточного тока) разряд через отверстия в управляющем электроде перебрасывается на анод и после начинается формирование дуги между анодом и катодом.

5 Недостатком является ограниченная скорость модуляции тока, связанная с тем, что образование плазмы под действием управляющего импульса происходит не одновременно во всем разрядном промежутке.

Известен способ управления импульсными газоразрядными приборами низкого давления (авторское свидетельство СССР №1824655, опубл. 30.06.1993), в котором с целью уменьшения времени включения и улучшения энергетических характеристик  
10 прибора, на управляющий электрод подают импульс положительной полярности с амплитудой не менее 10 кВ, длительностью не менее 5 нс, с передним фронтом, не превышающим 10 нс.

Недостатками являются - ограничение области его применения только для тиратронов ТГИ 270/12, сложность конструкции прибора, связанная с необходимостью применения  
15 дополнительных электронных компонентов для контроля устойчивости работы.

Известен способ управления импульсным тиратроном с ограничительным резистором в цепи питания (авторское свидетельство СССР №1075328, опубл. 23.02.1984), включающий зажигание разряда путем подачи управляющего импульса положительной полярности на сетку тиратрона, отличающийся тем, что, с целью расширения диапазона  
20 управления током путем достижения управляемости на запираение, ток тиратрона ограничивают в пределах 0,01-1 А, а гашение осуществляют повторной подачей на сетку управляющего импульса.

Недостатком является сложный алгоритм сеточного управления, а именно повторная подача на сетку управляющего импульса для достижения управляемости на запираение  
25 требует уменьшенной проницаемости сетки, что требует предварительного изменения конструкции тиратрона.

Известен способ модуляции тока в газовом разряде, осуществляемый в цезиевых приборах с сеточным управлением (авторское свидетельство СССР №693472, опубл. 28.10.1979) принятый за прототип, заключающийся в том, что для обеспечения  
30 бесстолкновительного режима горения разряда давление компонент газа выбирают из условия  $\lambda_e > d$  ( $\lambda_e$  - длина свободного пробега электронов,  $d$  - величина межэлектродного зазора), изменяют плотность надкритического разрядного тока  $j_a > j_{\text{крит}}$  путем регулировки температуры катода, на управляющий электрод подают импульсы отрицательной полярности длительностью порядка времени деионизации и  
35 амплитудой порядка прямого падения напряжения в проводящем состоянии. При этом температуру катода выбирают из условия  $j_s > j_{\text{крит}}$  ( $j_s$  - ток электронной эмиссии катода,  $j_a$  - анодный ток,  $j_{\text{крит}}$  - критический ток, объемный заряд которого можно скомпенсировать при полной ионизации атомов плазмообразующей компоненты газа).  
40 При выполнении указанных условий создается внутренняя неустойчивость разряда в проводящем состоянии, что существенно облегчает гашение разряда при плотностях разрядного тока порядка десятков ампер на квадратный сантиметр и более.

Недостатками способа является то, что при реализации способа на сетку подаются большие (порядка нескольких сотен вольт) напряжения, что повышает требования к  
45 питающей сети и ухудшение эффективности способа вследствие самопроизвольной сеточной эмиссии, обусловленной близостью сетки к нагретому катоду.

Техническим результатом изобретения является полностью управляемая бессеточная модуляция тока плотностью до  $20 \text{ А/см}^2$  с частотой 5-20 кГц, не требующая внешних

энергетических воздействий и дополнительных управляющих элементов.

Технический результат достигается тем, что разряд зажигают в парах бинарной цезий-бариевой смеси, при этом размер межэлектродного зазора должен быть больше длины Дебая-Хюккеля, далее в плазме возбуждают электронную неустойчивость Бурсиана-Пирса и формируют виртуальный катод, модулирующий ток, формирование которого происходит за время пробега электронов через зазор, а затем осуществляют управление процессом модуляции, причем регулирование уровня разрядного тока в диапазоне от 1 до 10 А/см<sup>2</sup> происходит путем изменения сопротивления нагрузки R, а в диапазоне от 10 до 20 А/см<sup>2</sup> путем изменения температуры эмиттера, изменение амплитуды тока и времени проводящего и запертого состояния осуществляют регулированием величины ЭДС источника E и величины межэлектродного зазора d.

Способ бесщеточной модуляции тока в неустойчивом режиме горения разряда поясняется следующими фигурами:

фиг. 1 - осциллограммы зависимостей тока (сверху) и напряжения (снизу) от времени в модуляторе;

фиг. 2 - эволюция распределения потенциала  $\Phi$  в ходе электронного перехода с формированием виртуального катода (в качестве характерной длины выбрана

"эмиссионная" длина Дебая-Хюккеля  $\lambda_D^E$ , определяемая по тепловой энергии  $W=kT_E/2$  и концентрации электронов у поверхности эмиттера).

фиг. 3 - зависимость электронного конвекционного тока от времени за период колебаний, где  $j_E$  - ток эмиссии;

фиг. 4 - осциллограммы импульса тока (сверху) и напряжения (снизу) при процессе модуляции напряжения в надкритическом режиме, где  $E=54$  В;

$$p_{Cs}=2 \cdot 10^{-3} \text{ тор}; p_{Ba}=10^{-3} \text{ тор}; T_K=1600 \text{ К.}$$

фиг. 5 - зависимости от величины электродвижущая сила (ЭДС) E;

фиг. 6 - изменение длительности проводящего состояния диодного модулятора путем изменения температуры катода;

фиг. 7 - зависимости от величины межэлектродного зазора.

Способ осуществляется следующим образом. Зажигается разряд в парах бинарной цезий-бариевой смеси, при этом размер межэлектродного зазора d выбирается из условия  $\lambda_e > d$  (здесь  $\lambda_e$  - длина свободного пробега электронов). Таким образом, заряд горит в бесстолкновительном режиме. На фиг. 1 приведена типичная осциллограмма тока и напряжения в цезий-бариевом модуляторе.

В указанном режиме горение сильноточного разряда сопровождается развитием электронной неустойчивости Бурсиана-Пирса, и образованием в разряде виртуального катода, модулирующего ток (фиг. 2). Процесс формирования виртуального катода протекает за время порядка времени пробега электронов через зазор (при d~1 мм оно составляет единицы наносекунд), поэтому ток в диоде изменяется практически мгновенно. Образовавшаяся структура является устойчивой, движется по направлению к коллектору с характерной ионной скоростью  $\sim \sqrt{2kT_E / m_i}$  и управляет электронным током, протекающим через диод. На фиг. 3 этим структурам соответствуют участки сплошных кривых с током, меньшим 1, здесь же вертикальными пунктирными прямыми отмечены быстрые электронные переходы.

Таким образом, по прошествии ~ 100 мкс после зажигания разряда, происходит

резкий обрыв тока. Сам процесс обрыва протекает за время порядка 1 мкс. Уровень тока после этого оказывается близким к нулю. Сразу же вслед за обрывом тока в контуре начинается переходный процесс, сопровождающийся значительным увеличением напряжения на диоде. Переходный процесс заканчивается примерно через 40 мкс.

5 Напряжение, приложенное к диоду, оказывается равным напряжению внешнего источника  $E$ . Диод сохраняет электропрочность еще 140 мкс. Только спустя 180 мкс после обрыва тока в модуляторе вновь зажигается разряд (фиг. 1). Далее осуществляется управление процессом модуляции, причем регулировка уровня разрядного тока в диапазоне от 1 до 10 А/см<sup>2</sup> осуществляется путем изменения сопротивления нагрузки

10  $R$ , а в диапазоне 10-20 А/см<sup>2</sup> путем изменения температуры эмиттера. Регулировка амплитуды тока и времени проводящего и запертого состояния осуществляется варьированием величины ЭДС источника  $E$  и величины межэлектродного зазора  $d$ . В рассматриваемом способе, частота модуляции составляет 5-20 кГц, при плотностях

15 разрядного тока до 20 А/см<sup>2</sup>.

Способ поясняется примерами. На фиг. 4 представлены осциллограммы импульсов тока, зарегистрированные при реализации способа для модуляции и управления током в низковольтной силовоточной цепи. В момент времени  $\tau_1$  происходит развитие разряда и переход модулятора в проводящее состояние. В момент времени  $\tau_2$  происходит

20 развитие неустойчивости Бурсиана-Пирса с последующим обрывом тока. В течение времени  $\tau_3 - \tau_2$  модулятор находится в запертом состоянии, а в момент времени  $\tau_3$  заряд загорается вновь.

Необходимый уровень тока в разряде выставляется путем варьирования ЭДС источника  $E$  и сопротивления нагрузки  $R$ . При фиксированном значении  $R$  с ростом  $E$

25 увеличивается амплитуда тока, а времена проводящего и запертого состояний уменьшаются (фиг. 5). Путем изменения  $R$  от 1 до 40 Ом можно изменять плотность тока в разряде от 10 до 1 А/см<sup>2</sup>. И во всем этом диапазоне токов наблюдается устойчивая модуляция.

30 Регулировка плотности тока в диапазоне до 20 А/см<sup>2</sup> достигается за счет изменения температуры эмиттера (фиг. 6). Управление временем горения разряда достигается изменением величины межэлектродного промежутка  $d$  (фиг. 7).

Таким образом, способ обеспечивает полную и эффективную модуляцию тока без использования дополнительных электродов и каких-либо дополнительных внешних

35 воздействий. В отличие от аналогичных устройств, в которых для управления процессом модуляции служит сетка, модуляция тока в диоде осуществляется за счет развития электронной неустойчивости и образования нелинейных структур в плазме.

#### (57) Формула изобретения

40 Способ бессеточной модуляции тока в неустойчивом режиме горения разряда, включающий выбор давления компонент газа из условия  $\lambda_e > d$  и горение разряда в бесстолкновительном режиме, отличающийся тем, что разряд зажигают в парах бинарной цезий-бариевой смеси, при этом размер межэлектродного зазора должен

45 быть больше длины Дебая-Хюккеля, далее в плазме возбуждают электронную неустойчивость Бурсиана-Пирса и формируют виртуальный катод, модулирующий ток, формирование которого происходит за время пробега электронов через межэлектродный зазор, а затем осуществляют управление процессом модуляции, причем регулирование уровня разрядного тока в диапазоне от 1 до 10 А/см<sup>2</sup> происходит путем



изменения сопротивления нагрузки  $R$ , а в диапазоне от 10 до 20 А/см<sup>2</sup> путем изменения температуры эмиттера, изменение амплитуды тока и времени проводящего и запертого состояния осуществляют регулированием величины ЭДС источника  $E$  и величины межэлектродного зазора  $d$ .

5

10

15

20

25

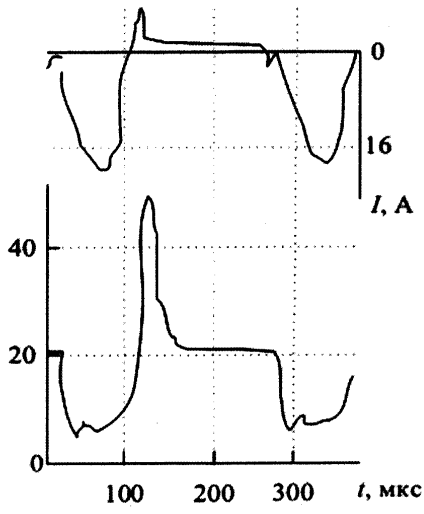
30

35

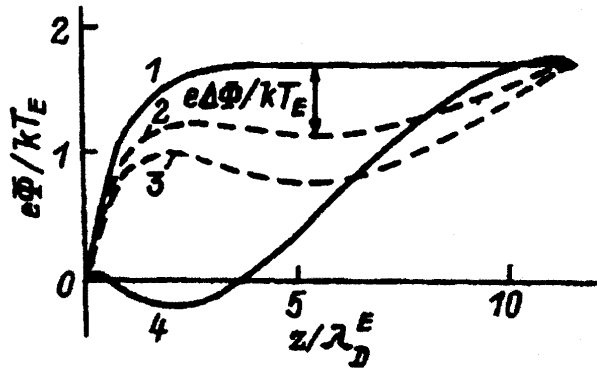
40

45

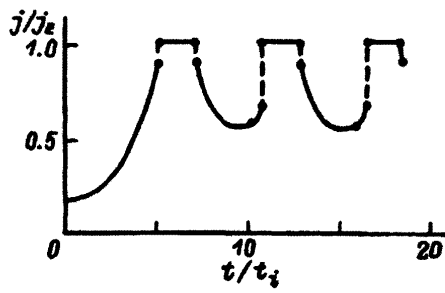
1



Фиг. 1

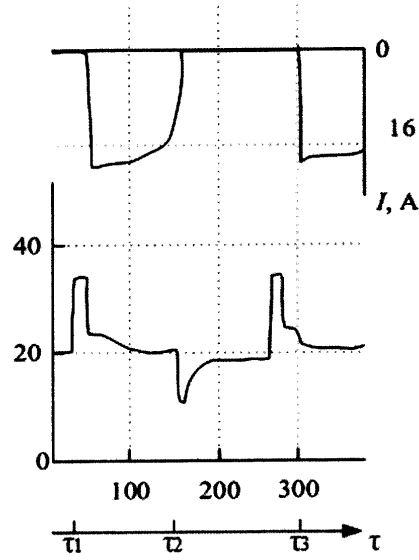


Фиг. 2

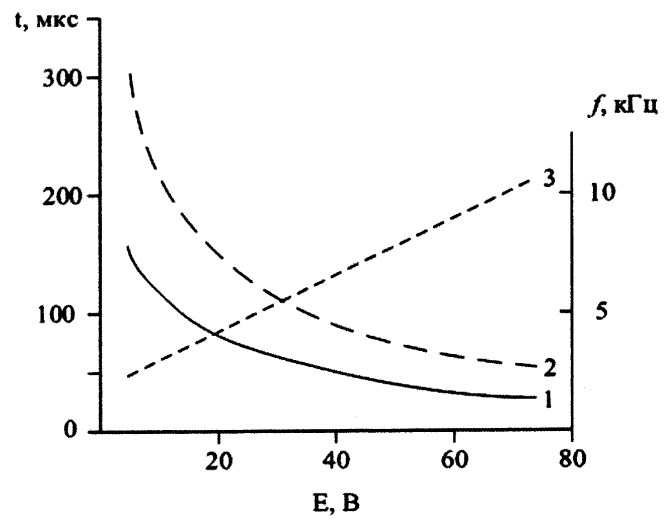


Фиг. 3

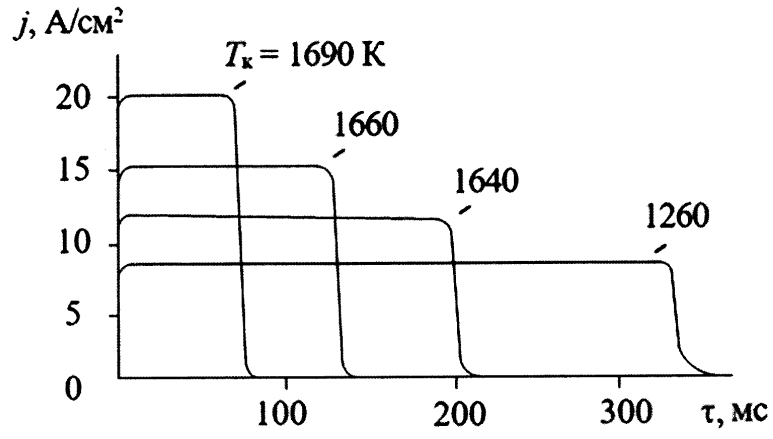
2



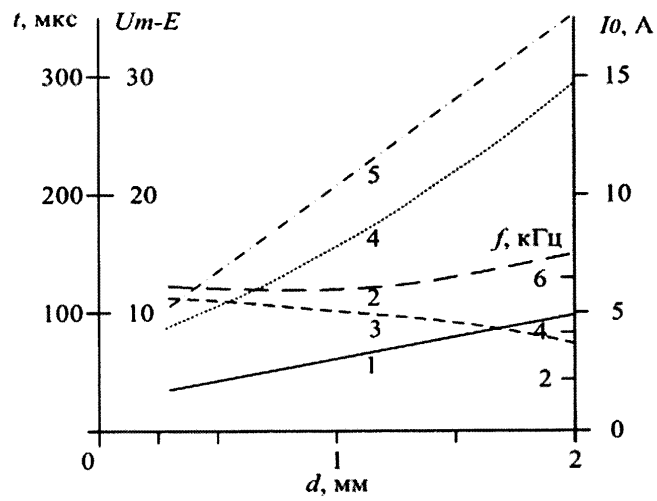
Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7