ЛАБОРАТОРНАЯ

ТЕХНИКА

УДК 621.38

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

©2027 г. О. Н. Крютченко*, А. Ф. Маннанов, Д. А. Морозов

[a] *Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина*

Россия, 390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1

**E-mail: alar926@yandex.ru*

Поступила в редакцию 13.03.2026

После доработки 26.08.2026

Принята к публикации 26.10.2026

Разработан бесконтактный метод измерения динамического потенциала поверхности металлодиэлектрических систем в условиях газового разряда. Он основан на регистрации в электрической цепи зонда наведенного тока, вызванного перемещающимися образцами, на поверхности которых накоплен положительный заряд. Изготовлена установка, которая обеспечивает контроль вольт-амперных характеристик диэлектрических покрытий, скорости убывания находящегося на них заряда, а также возможность исследования туннельной эмиссии электронов. Анализ результатов позволяет получать информацию об электрофизических свойствах покрытий и идентифицировать механизмы их проводимости.

Ключевые слова: газовый разряд, потенциал поверхности, вольт-амперные характеристики диэлектрических покрытий, туннельная эмиссия электронов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Окисленные металлы используются в газоразрядной технике для изготовления холодных катодов [1], а также в микроэлектронике при формировании эмиссионных систем металл–диэлектрик–металл (МДМ) [2]. Разработка оптимальных технологических приемов изготовления таких изделий предполагает наличие методов, позволяющих оперативно решать две задачи: получение информации об электрофизических свойствах окисных покрытий и определение условий возникновения туннельной эмиссии электронов.

Для этих целей могут использоваться образцы МДМ-систем, на поверхность исследуемого покрытия которых нанесен металлический электрод. Такой подход отличается трудоемкостью и длительностью выполнения экспериментов. Более перспективно в качестве верхнего электрода применение плазмы газового разряда и контроля возникающего при этом на поверхности МД-образцов положительного заряда или соответствующего потенциала ($U_{\text{п}}$).

В настоящей статье приведено описание экспериментальной установки, в которой реализована бесконтактная методика измерения $U_п$ МД-систем в условиях газового разряда [3] и приведены результаты ее применения для исследования образцов из алюминия марки АД1, на поверхности которых нагревом в кислороде сформированы окисные покрытия толщиной 5–20 нм.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Конструкция устройства, реализующего предлагаемую методику, приведена на рис. 1. Она содержит держатель цилиндрической формы *1*, на котором в углублении, изготовленном в радиальном направлении, расположен исследуемый образец *2*. Держатель выполнен из меди, соединен со шкивом электромотора и может вращаться вокруг своей вертикальной оси. Над держателем на равных расстояниях от оси вращения размещены измерительный электрод (зонд) *3*, в электрической цепи которого с помощью осциллографа *7* предусмотрена возможность контроля индуцированного переменного тока, и анод *4*, помещенный в кварцевую трубку *5*. Анод через балластное сопротивление $R_б$ подключен к источнику напряжения *6*.

Рис.1. Схема экспериментальной установки

Поперечные размеры анода, измерительного зонда и ширины углубления в держателе равны 1 см. Зазор между держателем и зондом составляет 0.1–0.2 мм. Расстояние между анодом и держателем равно 10–20 мм. Катодом образованного газоразрядного промежутка поочередно являются образец и держатель.

Измерительная часть установки помещается в вакуумную камеру, которая откачивается до давления остаточных газов, равного 10^{-3} Па, и затем заполняется гелием до давления 133–400 Па. За счет расстояния между катодом и анодом и давления гелия в устройстве возбуждается слабоаномальный тлеющий разряд, равномерно покрывающий поверхность исследуемых образцов. Кварцевая трубка обеспечивает локализацию разряда внутри зазора анод–катод. При исключении трубки разряд стихийным образом заполняет вакуумную камеру.

С помощью электромотора держатель приводится во вращение, а в промежутке между анодом и держателем (образцом) возбуждается и поддерживается разряд постоянного тока с различными значениями его плотности. Периодически проходя через газоразрядный промежуток, поверхность образца заряжается до потенциала $U_п$. Перемещаясь относительно зонда, образец наводит в его электрической цепи импульсы электрического тока (рис. 2).

Рис. 2.Осциллограмма зондового тока.

Амплитуда импульсов наведенного тока пропорциональна $U_п$:

$$I_{\text{п}} = U_{\text{п}} \frac{dC}{dt}, \qquad (1)$$

где C – емкость конденсатора, образованного поверхностью зонда и металлической основой образца.

Данная емкость состоит из двух последовательно соединенных составляющих: емкости “зонд–заряженная поверхность образца” C_1 и емкости “заряженная поверхность–металлическая основа образца” C_2 (емкость диэлектрического покрытия). Поскольку толщина покрытия значительно меньше расстояния между зондом и образцом, а диэлектрическая проницаемость окисла почти на порядок превышает проницаемость газовой среды, C_2 существенно превышает C_1 и поэтому $C \approx C_1$.

Для контроля наведенного тока использован осциллограф с входным сопротивлением $R_{\text{в}}$=1 МОм и входной емкостью $C_{\text{в}}$=100 пФ. В связи с этим необходимо, чтобы постоянная входной цепи осциллографа, равная $R_{\text{в}}C_{\text{в}}=10^{-4}$ с, была существенно меньше времени протекания наведенного тока, что и реализуется в установке (рис. 2). В этом случае регистрируемый осциллографом полезный сигнал ($U_{\text{ос}}$) определяется соотношением

$$U_{\text{ос}} = R_{\text{в}}\, U_{\text{п}} \frac{dC_1}{dt} = R_{\text{в}}\, I_{\text{п}}. \qquad (2)$$

Амплитудное значение $U_{\text{ос}}$ достигается при максимальной скорости изменения C_1, зависящей от площади перекрытия поверхностей образца и зонда. Анализ изменения данной площади при движении прямоугольной заряженной полоски образца под круглым зондом позволяет получить следующие соотношения:

$$S(t) = \frac{r[x - \sin(2x)]}{2} \frac{dS}{dt} = [S_{\max} - S(t)]\, \text{tg}(x) \frac{dx}{dt}, \qquad (3)$$

где

$$x = \arccos[k \cos(\omega t + \varphi_0)], \quad \frac{dx}{dt} = \frac{k\, \omega \sin(\omega t + \varphi_0)}{\sqrt{1 - k^2 \cos^2(\omega t + \varphi_0)}},$$

ω – угловая скорость вращения держателя, φ_0 – постоянная, зависящая от углового размера зонда, k – постоянная, определяемая соотношением радиуса зонда r и расстояния l от оси вращения до центра зонда:

$$k = \sqrt{1 + \left(\frac{l}{r}\right)^2}.$$

Из анализа полученных соотношений следует, что максимальные значения dS/dt и dC_1/dt достигаются через ¼ времени прохождения образца под зондом. При этом площадь перекрытия составляет ½ от максимально возможной ($S_{\max}$), а $U_{\text{ос}}$ в точке d (рис. 2) определяется следующим соотношением:

$$U_{\text{ос}} = \frac{1}{2} \omega k U_{\text{п}} R_{\text{в}} C_1. \qquad (4)$$

Формула (4) показывает, что на величину полезного сигнала оказывают влияние конструкция измерительной части установки и величина ω. При малых значениях ω возможна релаксация $U_п$ за время перемещения образца из области разряда до зонда. Начиная со значения ω =10 об/с, наблюдается линейная зависимость $U_{ос}$ от ω, и при этом $U_п$ сохраняется неизменным.

Непосредственное использование соотношения (4) для определения $U_п$ затруднительно из-за погрешности, связанной с расчетом C_1. Для ее исключения выполнена градуировка измерительного тракта осциллографа, которая заключалась в том, что вместо МД-образцов были использованы аналогичных размеров пластины из фольгированного текстолита с размещенными на нем элементами СЦ 0.018–2 с известной ЭДС. При использовании полученной градуировочной зависимости погрешность измерения $U_п$ не превышала ±5%.

Разработанная установка позволяет по измеренным значениям тока разряда и $U_п$ получать вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследуемых диэлектрических покрытий, контролировать временные зависимости $U_п$ после выключения разряда, а также исследовать туннельную эмиссию электронов.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследуемые образцы изготавливались термическим окислением алюминия марки АД1 [4]. Толщина окисленного слоя контролировалась с помощью электронного микроскопа на поперечных шлифах образцов, она составляла 5–20 нм. Равномерность окисления оценивалась методом электролитического декорирования по количеству сквозных пор, суммарная площадь которых составляла 7–20%.

Толщина и пористость окисных покрытий относятся к переменным параметрам, зависящим от технологии формирования исследуемых МД-систем, и они во многом определяют особенности их зарядки в газовом разряде. Кроме того, на скорость релаксации образованного поверхностного заряда влияет гидратация поверхности покрытий.

Наличие локальных участков данной поверхности с повышенной проводимостью (сквозных пор) приводит к неоднородности потенциала поверхности образцов и влияет на установившееся значение потенциала. Данная неоднородность – объективная реальность, связанная с особенностями окисления металлов, она не может быть полностью устранена.

Зависимость величины $U_п$ исследуемых МД-образцов от плотности тока газового разряда J_p (ВАХ окисного покрытия) для различных температур их окисления показана на рис. 3, а процесс “стекания” заряда с поверхности покрытия после прекращения разряда иллюстрирует рис. 4.

Рис. 3. Вольт-амперные характеристики окисного покрытия

Рис. 4. Релаксация потенциала поверхности окисных покрытий после прекращения

Полученные ВАХ покрытий существенно нелинейны. Их характерная особенность заключается в ограничении роста $U_п$ по мере увеличения J_p. Повышение температуры окисления вызывает возрастание наклона начального участка ВАХ, что свидетельствует об уменьшении проводимости окисного покрытия.

Механизмы протекания тока через слой окисного покрытия, существующие при наличии газового разряда, обусловлены поступлением на его поверхность ионов, возбужденных атомов, а также фотонов резонансного излучения гелия. Это приводит к образованию в объеме окисла свободных носителей заряда, приводящих к его фото- и ионно-стимулированной проводимости, а также появлению $U_п$ вследствие оже-процессов и фотоэффекта [5].

Времена релаксации стимулированной проводимости и поверхностного заряда существенно различны. Так, например, время релаксации фотопроводимости в МДП-приборах со слоем диэлектрика из окисла алюминия составляет 10^{-9}–10^{-3} с [6, 7], что значительно меньше времени перемещения образцов из зоны разряда до измерительного зонда. Поэтому в момент регистрации $U_п$ образцов стимулированная проводимость такого рода практически отсутствует.

Характерная особенность окисных покрытий заключается в наличии в их объеме сквозных пор, в которые поступает часть ионного тока, которая зависит от характерных размеров и общего количества пор. Например, для алюминия марки АД1, окисленного при температуре 200°С, суммарная пористость составляет 18–20%, причем количество пор с размерами около 30 мкм достигает более 40% от их общего количества. С учетом электростатического усиления тока данными порами доля поступающего в них ионного тока составляет 30% при $U_п$, равном 4 В, и 60% при $U_п$, равном 8 В [5].

У образцов, окисленных при температуре 400°С, суммарная пористость составляет 7–10%, а характерные размеры пор не превышают 10–13 мкм. В этом случае эффект фокусировки тока порами существенно меньше: даже при $U_п$, равном 10 В, доля ионного тока, поступающего в поры, не превышает 15%.

Повышенная пористость окисных покрытий является основным фактором, замедляющим рост $U_п$ при увеличении разрядного тока (кривая *1* на рис. 3). В случае снижения пористости ВАХ покрытий формируется альтернативным механизмами (кривая *3* на рис. 3). Полученные результаты демонстрируют возможность определения

бесконтактным способом на основе контроля начальных участков ВАХ окисных покрытий наличия в них сквозных пор.

Контролируемое после выключения разряда время заметного изменения потенциала (рис. 4) существенно превышает период оборота держателя образца. При этом кривая изменения потенциала во времени может быть разделена на два участка: быстрое неэкспоненциальное снижение в течение первых 7–10 с, а затем экспоненциальный спад с постоянной времени в десятки секунд. Наличие таких двух характерных участков свидетельствует о существовании нескольких механизмов релаксации поверхностного потенциала, каждый из которых характеризуется своей постоянной времени.

Одним из наиболее общих релаксационных процессов является максвелловская релаксация заряда в диэлектрике через его объемную проводимость с характерным временем, равным $\tau_м = \rho\varepsilon\varepsilon_o$ (ρ – удельное электрическое сопротивление, ε – диэлектрическая проницаемость, ε_o – диэлектрическая постоянная). Рассчитанное значение для $\rho = 1.4 \cdot 10^{12}$ Ом·м, $\varepsilon = 7$ [8] и $\varepsilon_o = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м составляет 86 с, что удовлетворительно совпадает с постоянной времени на экспоненциальном участке кривых, приведенных на рис. 4.

Выдержка окисленных образцов в атмосфере приводит к увеличению скорости стекания заряда (кривая *4* на рис. 4), что связано с образованием гидрата окиси алюминия.

Таким образом, контроль характерного времени релаксации заряда на экспоненциальном участке позволяет оценивать объемное электрическое сопротивление окисного покрытия и его гигроскопические свойства.

Оценка плотности тока, протекающего через покрытие, по скорости уменьшения $U_п$ дает для первого участка кривой *2* на рис. 4 максимальную величину, равную 30–50 мкА/см^2, а для второго составляет $0.3 – 0.5$ мкА/см^2. Существование столь сильных расхождений в величине проводимости покрытия в условиях газового разряда и без него вызвано двумя факторами: влиянием собственно разряда на механизмы протекания электрического тока через покрытие и критичностью последних к величине внутреннего электрического поля в слое окисла.

Зарядка поверхности окисного покрытия может приводит к образованию в нем электрического поля с напряженностью, превышающей $5 \cdot 10^6$ В/см. Наличие такого поля из-за туннельного эффекта способно вызвать рост проводимости покрытия и эмиссию электронов в газоразрядный промежуток. Признаками туннельной эмиссии являются пороговый характер зависимости электронного тока от величины $U_п$ и характерный вид ВАХ покрытия [9].

Для регистрации тока туннельных электронов с поверхности МД-образцов перед зондом *3* размещалась сетка (на рис. 1 не показана), на которую подавалось положительное

относительно заземленного держателя напряжение U. Чтобы исключить ионизационное усиление тока в газе, мы оставляли значение ускоряющей электроны разности потенциалов $U - U_{\text{п}}$, не превышающим значения потенциала ионизации гелия. В такой установке наведенный заряженным образцом электрический ток экранируется сеткой, а в цепи зонда может регистрироваться импульс тока электронов. Степень ослабления электронного тока из-за рассеяния в газе определялась экспериментально при использовании в качестве источника электронов вольфрамового катода с постоянной температурой.

Зависимость плотности тока электронного тока (J_e) от $U_{\text{п}}$ образцов, окисленных при температуре 400 °С, приведена на рис. 5. Из нее следует, что эмиссия электронов возникает после достижения критического значения потенциала $U_{\text{п}}'$, которому соответствует ток газового разряда J_p'. Затем плотность эмиссионного тока быстро увеличивается с ростом $U_{\text{п}}$.

Рис.5. Зависимость тока туннельной эмиссии от потенциала поверхности катода.

Если из J_p вычесть пороговое значение J_p', то экспериментальные точки зависимости $(J_p - J_p')$ от $U_{\text{п}}$ в координатах $\ln(J_p - J_p')/U^2_{\text{п}} - 1/U_{\text{п}}$ укладываются на прямые (рис. 6), соответствующие уравнению Фаулера–Нортгейма [9].

Рис.6. Прямая Фаулера–Нордгейма**.**

Характер зависимости тока эмиссии от $U_{\text{п}}$ и сопровождающее ее увеличение проводимости диэлектрических покрытий дают основание для идентификации обнаруженного эффекта с процессом туннелирования электронов из металлической основы в оксидный слой с последующим выходом в газоразрядный промежуток. Полученные зависимости близки к результатам исследования туннельной эмиссии структур $Al–Al_2O_3–Al$ с толщиной окисного покрытия, равной 5–10 нм [2].

Кроме контроля факта существования туннельной эмиссии электронов из исследуемых МД-систем, устройство позволяет контролировать толщину окисных покрытий. Для этого достаточно определить величину $U_{\text{п}}'$ и по ней рассчитать искомую толщину покрытия, равную $U_{\text{п}}'/5\cdot10^8$ (м).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана установка, в которой реализована методика экспресс-измерения потенциала поверхности МД-образцов в газовом разряде. Она позволяет контролировать ВАХ окисных покрытий, временные зависимости уменьшения поверхностного заряда, а также исследовать эффект туннелирования электронов. На основе анализа экспериментальных результатов возможно получение информации о ряде электрофизических

свойств окисных покрытий: пористости, толщине, удельном электрическом сопротивлении и устойчивости к воздействию атмосферы.

Установка является простой в изготовлении и эксплуатации. Она может быть использована как в исследовательских целях, так и для контроля технологических процессов изготовления окисных покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Крютченко О.Н., Маннанов А.Ф., Степанов В.А., Чиркин М.В.* Механизм деградации поверхности холодного катода в гелий-неоновых лазерах. Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41. № 8. С. 990.
2. *Hall L.H.* J. Appl. Phys. 1988. V. 64. № 5. P. 2630. https://doi.org/10.1063/1.341628
3. *Крютченко О.Н., Маннанов А.Ф., Улитенко А.И., Соколовский Э.И.* Авторское свидетельство СССР 1780124 А1. Опубл. 07.12.1992.
4. *Киселева Л.И., Косенкова О.Я., Крютченко О.Н., Маннанов А.Ф., Носов А.А., Чиркин М.В.* РФ Патент 2012943 С1, 1994.
5. *Крютченко О.Н., Маннанов А.Ф., Носов А.А., Степанов В.А., Чиркин М.В.* Поверхность: физика химия, механика. 1994. № 6. С. 93. https://elibrary.ru/item.asp?id=23675537
6. *Шульман А.Р., Фридрихов С.А.* Вторично-эмиссионные методы исследования твердого тела. М.: Наука, 1977.
7. *Войцеховский А.В.* Фотоэлектрические МЛП структуры из узкозонных проводников. Томск: Радио и связь, 1990.
8. *Лазарев В.Б., Красов В.Г., Шаплыгин И.С.* Электропроводность окисных систем и пленочных структур. М.: Наука, 1979.
9. Ненакаливаемые катоды. Под ред. М.И. Елинсона М.: Советское радио, 1974.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *1* – держатель; *2* – образец; *3* – зонд; *4* – анод; *5* – стеклянная трубка; *6* – источник питания; *7* – осциллограф

Рис. 2. Осциллограмма зондового тока

Рис. 3. Вольт-амперные характеристики окисного покрытия. Материал катода – алюминий марки АД1. Температуры окисления равны: 200°С (кривая *1*), 300 °С (кривая *2*), 400 °С (кривая *3*)

Рис.4. Релаксация потенциала поверхности окисных покрытий после прекращения разряда величиной 1.7 мА/см² (кривая *1*), 0.65 мА/см² (кривая *2*), 0.3 мА/см² (кривые *3*, *4*). Кривые *1*, *2*, *3* соответствуют исходным образцам, прошедших этап термического окисления, *4* – образцу, выдержанному в атмосфере в течение 3 часов

Рис. 5. Зависимость тока туннельной эмиссии от потенциала поверхности катода. Материал катода – алюминий марки АД1, температура окисления 400 °С.

Рис.6. Прямая Фаулера–Нордгейма. Материал основы катода – алюминий марки АД1, температура окисления 400 °С.

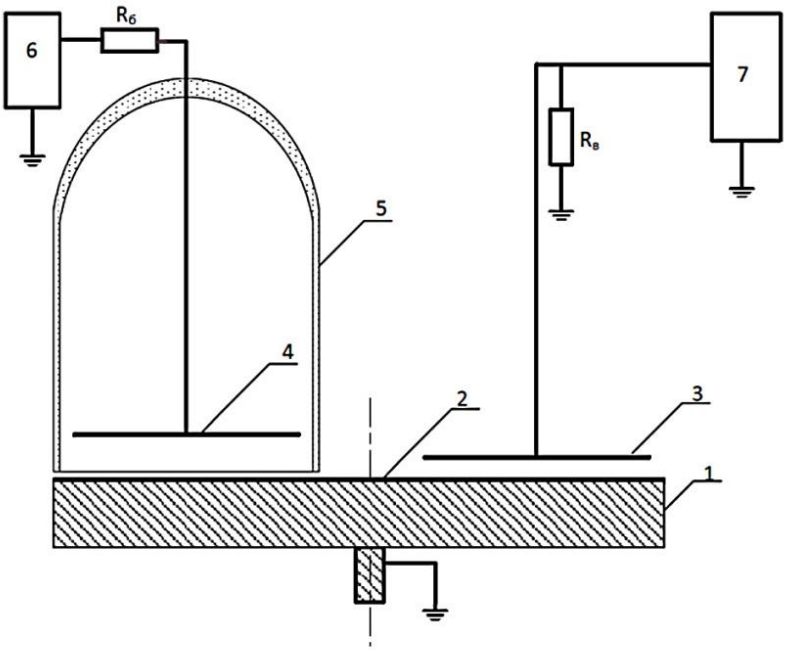


Рис. 1.

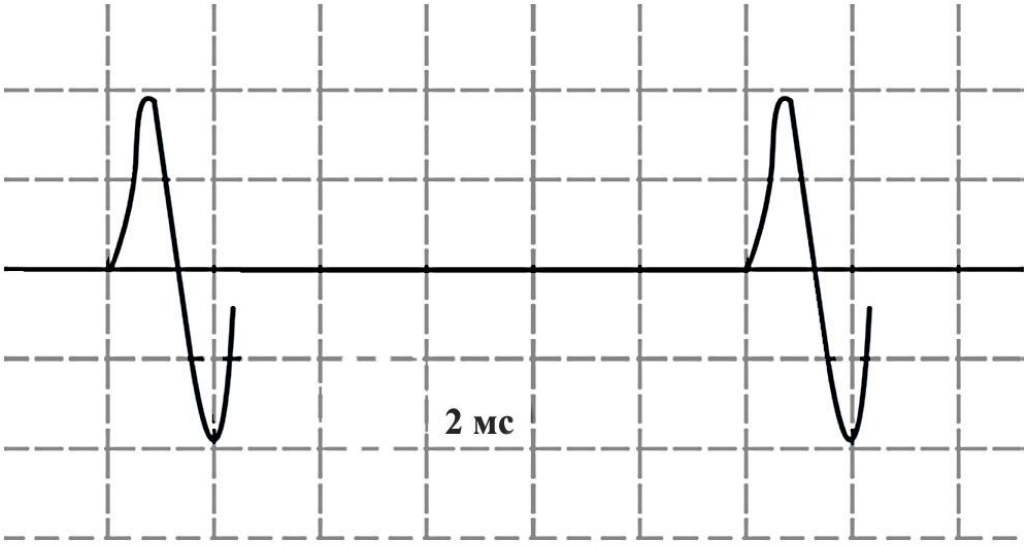


Рис. 2.

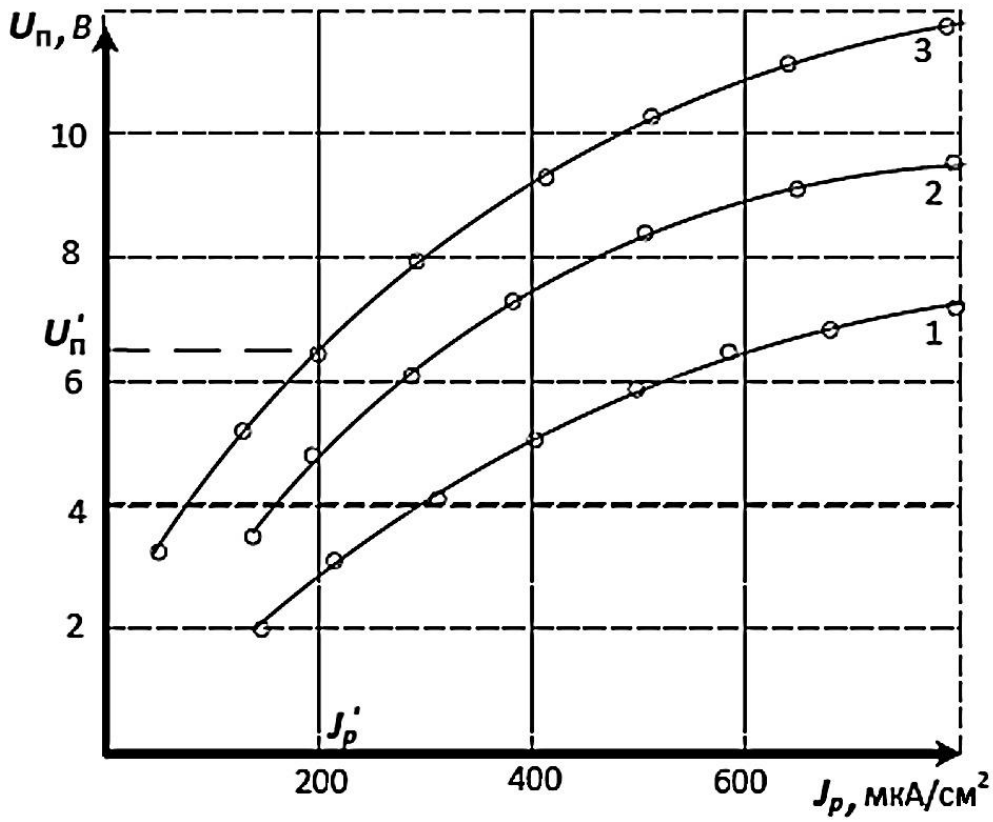


Рис. 3.

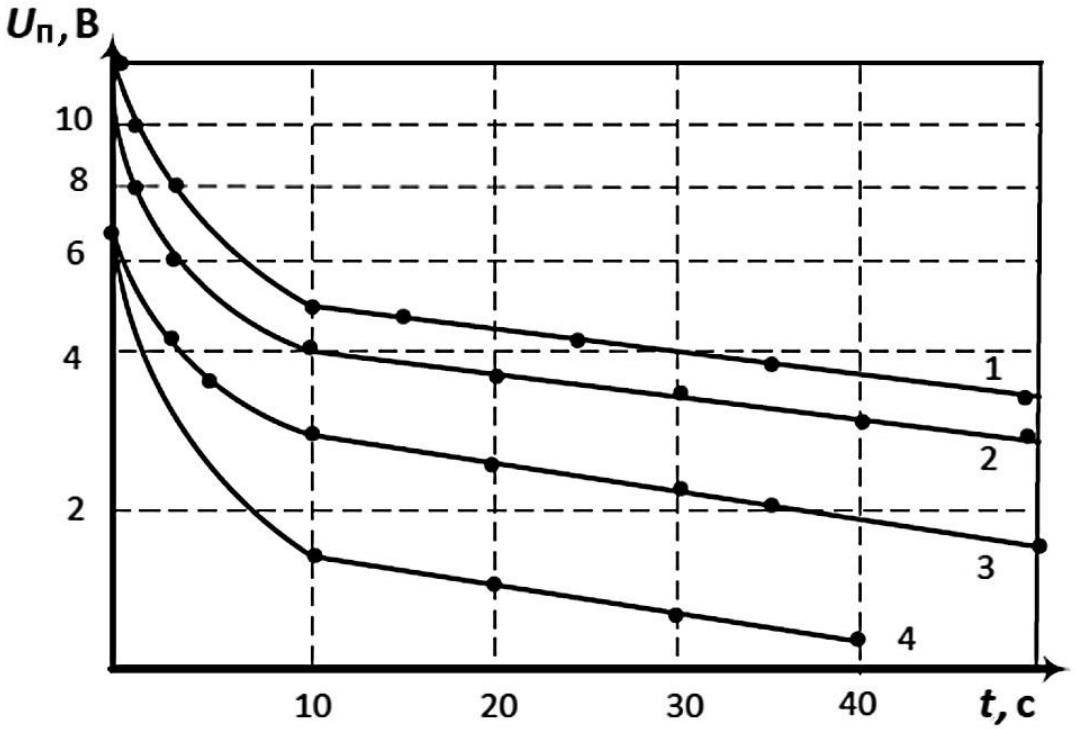


Рис. 4.

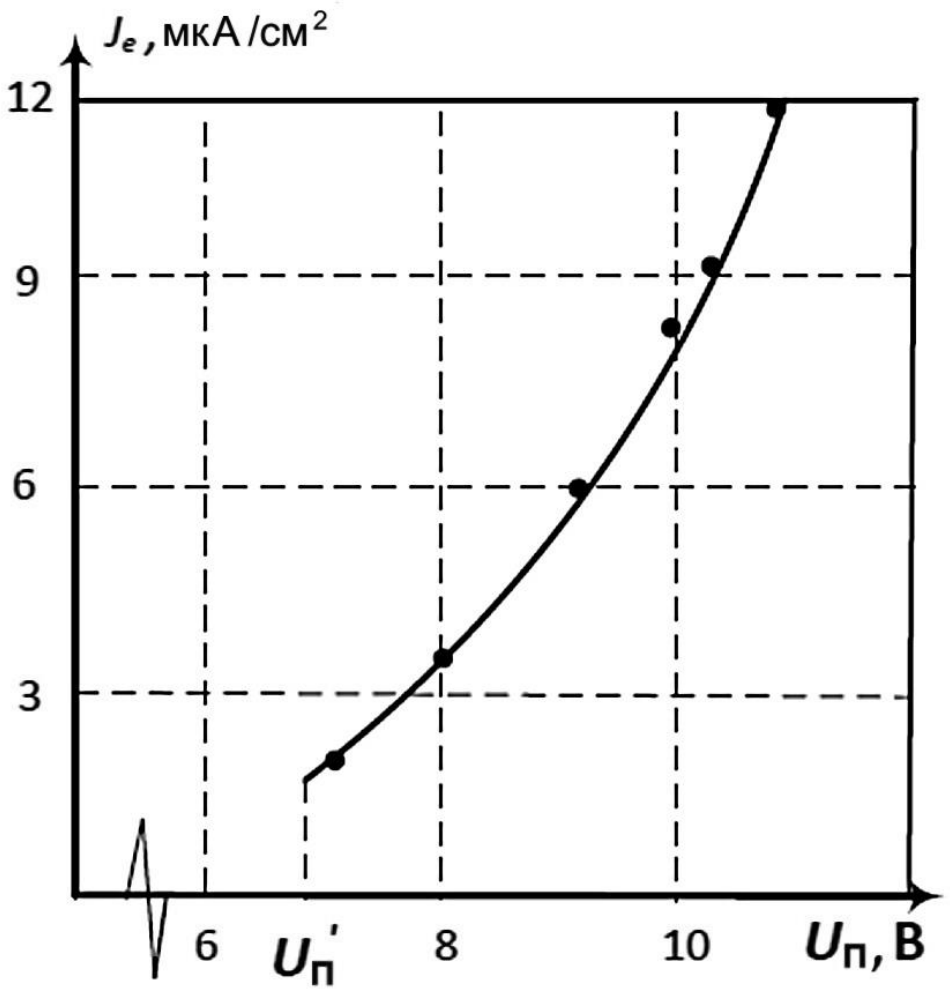


Рис. 5.

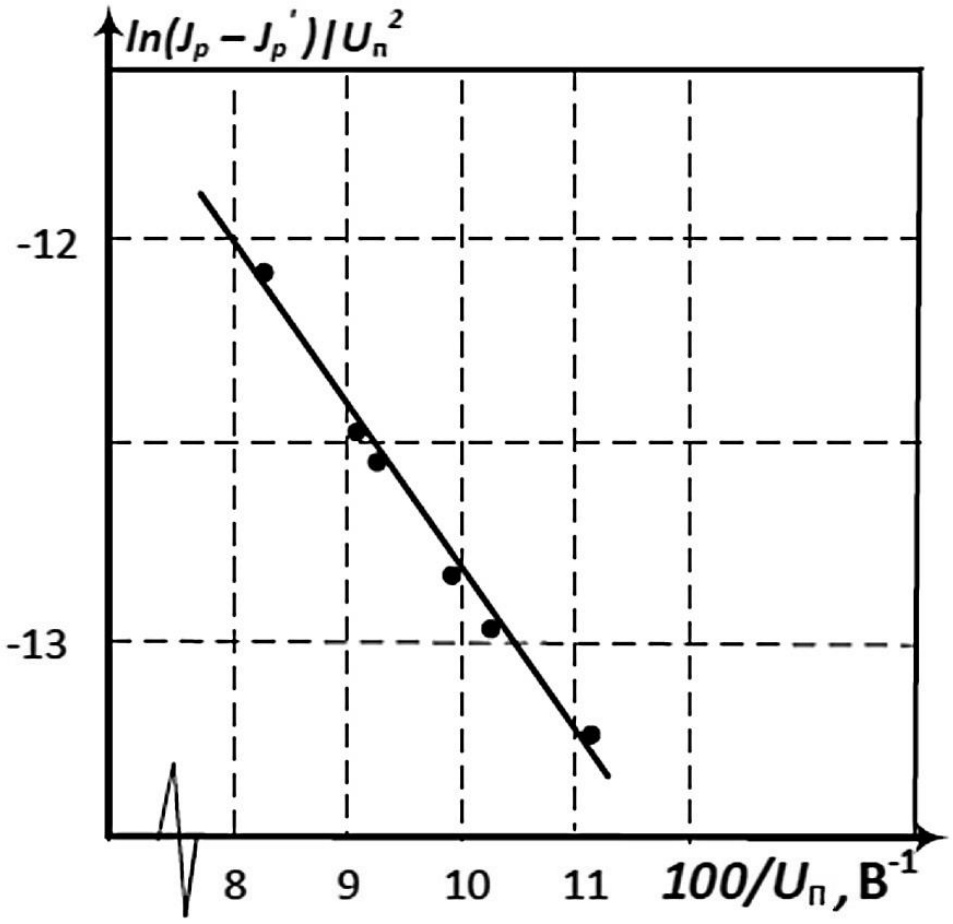


Рис. 6.