

ВРЕМЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ТОКА АНОДА В МАГНЕТРОНАХ С БЕЗНАКАЛЬНЫМ ЗАПУСКОМ

В. А. Мельников, С. А. Платонов, Ю. В. Поляков

АО «Плутон»

В статье приведены результаты экспериментов функционирования макетов безнакального магнетрона в различных режимах, в том числе запредельных. Сделаны выводы о временных зависимостях протекания тока анода от условий работы.

Авторами публикаций неоднократно рассматривались преимущества безнакального магнетрона (БМ) [1], особенности работы катода безнакального магнетрона, состоящего из чередующихся автоэмиссионных катодов (АЭК) в виде фольги тугоплавкого материала толщиной несколько единиц микрон и секций вторичноэмиссионного катода (ВЭК) в виде втулок из прессованного палладий-бариевого материала [2]. Показано наличие наноструктурных элементов на поверхности АЭК (вискеров) [3], обладающих автоэмиссионными свойствами и влияющих совместно с кромкой АЭК на процессы формирования «пускового» тока БМ. Предгенерационный режим, механизмы формирования втулки пространственного заряда и генерации электромагнитных колебаний СВЧ для накаливаемых магнетронов рассмотрены в [4]. Влияние наноструктур на процессы в БМ требует уточнения существующих представлений о функционировании таких приборов за счет использования современных способов исследования и анализа: рентгенофазового анализа, масспектрометрического анализа, специального оборудования для оценки эмиссионных свойств катодных материалов. В литературе также отсутствует достаточно полное математическое описание физических процессов в БМ.

Целью исследования является набор данных по функционированию БМ в различных режимах работы для развития теории работы БМ, дальнейшей выработки критериев – показателей качества изделия, позволяющих провести оценку надежности БМ при производстве и эксплуатации, а также рассмотреть возможность выработки общих принципов конструирования безнакальных магнетронов.

Показатели качества БМ взяты из характеристик, принятых в действующих комплексах государственных стандартов (КГС) для оценки накаливаемых приборов. На основании этих КГС разрабатываются технические условия на магнетрон. Такими общими для накального и безнакального магнетрона показателями являются мощность, импульсный (средний) ток, стабильность спектральной характеристики, флуктуации огибающей высокочастотного (ВЧ) импульса и др. Выработка дополнительных, более "тонких" показателей качества, которые в данном случае характеризуют особенности работы БМ, требует проведения экспериментов и создания математических моделей для численного анализа. Изучение публикаций по БМ позволяет сделать вывод, что подобный подход не применялся.

С целью реализации изложенного комплекса мероприятий, конечным результатом которых будет эффективное прогнозирование надежности, в первую очередь, БМ, представляется необходимым изучить особенности его функционирования. Материалы по БМ в настоящее время до конца не объясняют механизм формирования втулки пространственного заряда с учетом влияния неоднородностей эмиссионных свойств АЭК и ВЭК, а также влияние магнитного и ВЧ полей. Безусловно, первичные электроны в БМ эмитируются с эмиссионных центров на поверхности АЭК [6]. Автоэлектронная эмиссия описывается уравнением Фаулера - Нордгейма и зависит от приложенного напряжения, работы выхода на границе металл-вакуум, температуры, давления остаточных газов и других показателей. Для БМ величина напряжения должна, с одной стороны, обеспечивать достаточное количество первичных электронов, необходимых для формирования

объемно-пространственного заряда (ОПЗ), другой – исключать возникновение диодного режима, когда эмитированные катодом электроны не могут вернуться на катод и создают анодный ток.

Для более детального изучения процессов в импульсных магнетронах с безнакальным запуском на базе БМ 2 см диапазона длин волн с минимальной мощностью 1,5 кВт был разработан макет магнетрона с анодом без резонансной системы. Катод в макете не отличается от катода базового магнетрона, т.е. содержит секции АЭК и ВЭК. В таком макете группировка электронов в спицы отсутствует и устойчивые СВЧ колебания не возбуждаются, а ток протекает только после превышения амплитудой импульсов модулирующего напряжения некоторой величины, определяемой параболой критических режимов [7]. Пространство взаимодействия в таком приборе имеет сложную структуру из-за наличия автоэмиттеров и микроострий (вискеров) на их поверхности, поэтому такой эксперимент позволяет на практике оценить напряженность электрического поля в пространстве взаимодействия. В отсутствии постоянного магнитного поля бомбардировка катода электронами незначительна (только за счет разброса начальных скоростей электронов, вылетающих с АЭК и их соударений), поэтому током вторичной электронной эмиссии можно пренебречь. Термоэлектронная эмиссия с катода является незначительной величиной в связи с тем, что напряжение накала для разогрева катода не подается. На этом основании диод на базе БМ в отсутствии магнитного поля позволяет исследовать эмиссионные свойства АЭК, характеристики протекания первичного ("стартового") тока, в том числе режима ограничения первичного тока.

С учетом сказанного выше, были проведены эксперименты с БМ в трех конфигурациях: диод без магнитного поля, диод в магнитном поле, БМ с магнитным полем.

Измерительная установка была выполнена на базе мобильного автоматизированного комплекса [5]. Далее исследования осуществлялись в режиме одиночных импульсов питающего напряжения (период повторения импульсов составлял 0,5 сек). Импульсы тока и напряжения для диода без магнитного поля приведены на рис.1. При амплитуде импульсов напряжения 4,5 кВ достигался ток автоэмиссии 36 мА.

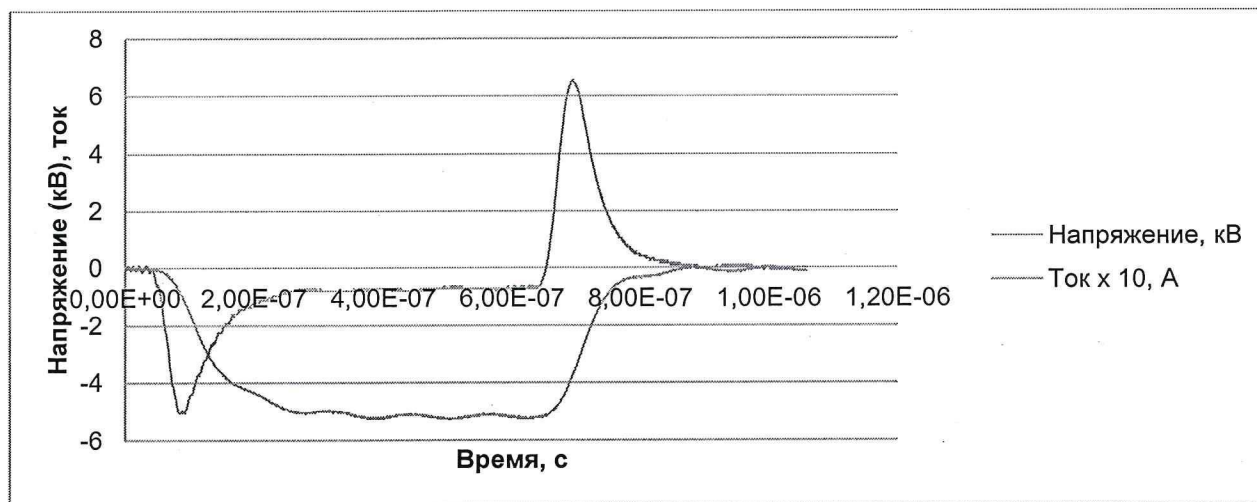


Рис. 1 Импульсы тока и напряжения диода без магнитного поля

Следующий эксперимент проводился с тем же диодом в присутствии магнитного поля за счет его сборки с постоянными магнитами. Импульсы токов и напряжений для различных значений амплитуд модулирующего напряжения изображены на рис. 2а и 2б соответственно.

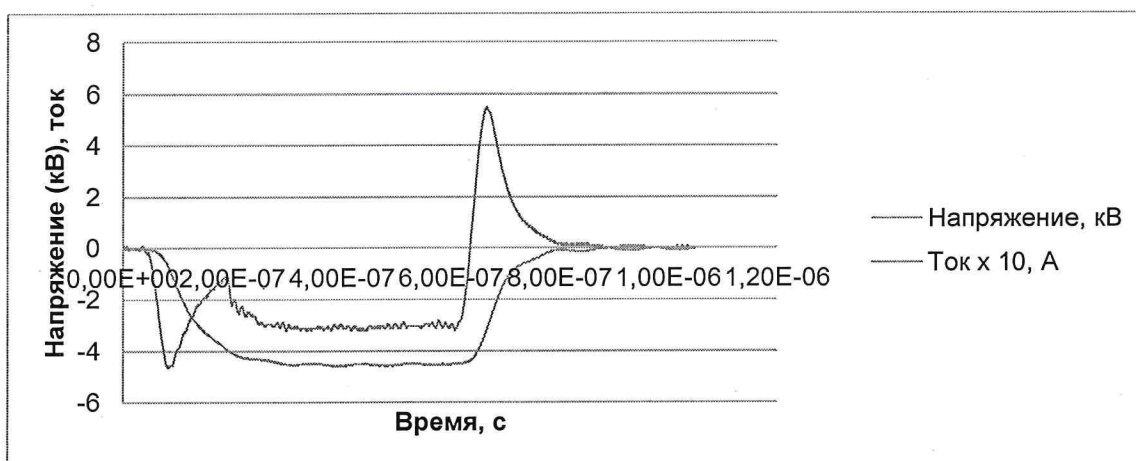


Рис. 2а Импульсы тока и напряжения диода с магнитным полем, напряжение 4,5 кВ

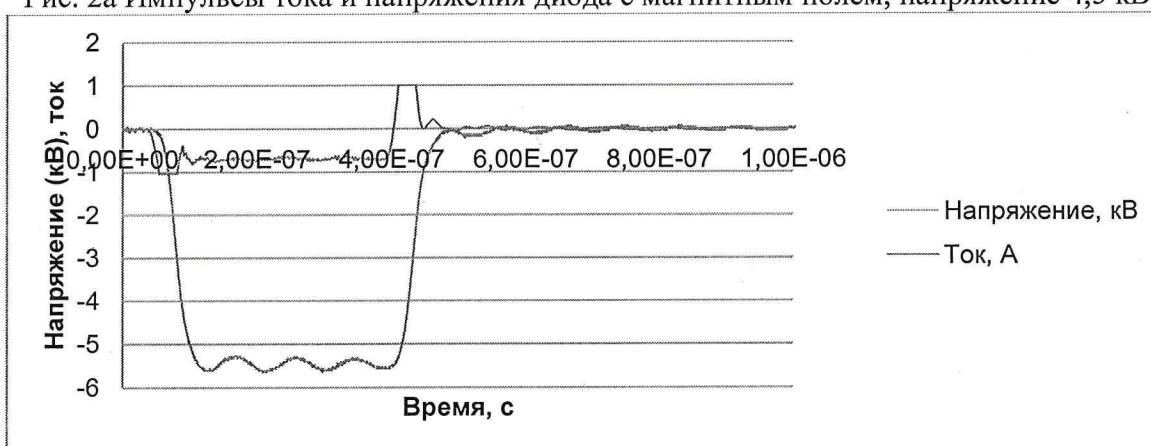


Рис. 2б Импульсы тока и напряжения диода с магнитным полем, напряжение 5,5 кВ

Ток через диод в этом случае создавался в основном вторичными электронами. По сравнению с величиной тока в диоде без магнитного поля (около 0,036 А импульсной), величина тока в диоде с магнитным полем составила около 0,25 А при одинаковом значении напряжения 4,5 кВ, что связано с увеличением количества носителей заряда, вызванного вторичной электронной эмиссией (рис. 2а). Режим работы диода по магнитному полю соответствует рабочему режиму функционирования магнетрона: магнитная индукция 0,8 Тл, напряжение выше порогового и ниже параболы критических режимов [7]. Была измерена ВАХ диода в магнитном поле (рис. 3 первая активировка).

Также после снятия ВАХ диода в магнитном поле была снята ВАХ диода без магнитного поля (рис. 4). Минимальное напряжение, при котором регистрируется ток автоэлектронной эмиссии, составляло 3300 В, при напряжении 5000 В рост тока с напряжением прекращался, а после 10-го импульса напряжения с амплитудой 5500 В ток через диод перестал протекать. Уменьшение амплитуды напряжения не приводило к возобновлению тока. Прекращение автоэлектронной эмиссии свидетельствует о полной деградации АЭК, что может объясняться его разогревом и структурными изменениями (например, исчезновением вискероидов, концентрирующих электрическое поле, и соответствующим снижением его напряженности на поверхности АЭК). Подобные изменения в АЭК могут объяснять и ход вольт-амперной характеристики в области больших напряжений. Для восстановления эмиссии требуется дополнительная активировка катода с подачей напряжения накала. После подобной активировки была снята вольт-амперная характеристика диода в магнитном поле (рис. 3 вторая активировка).

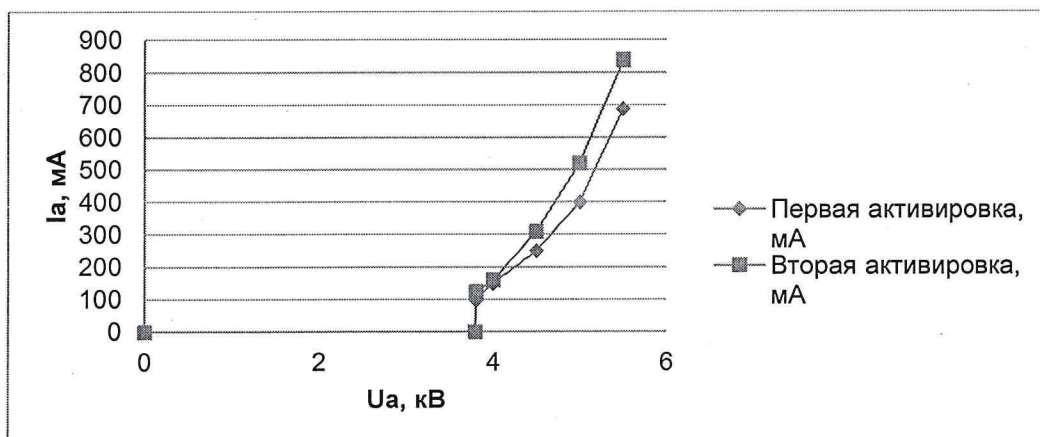


Рис. 3. ВАХ диода в магнитном поле

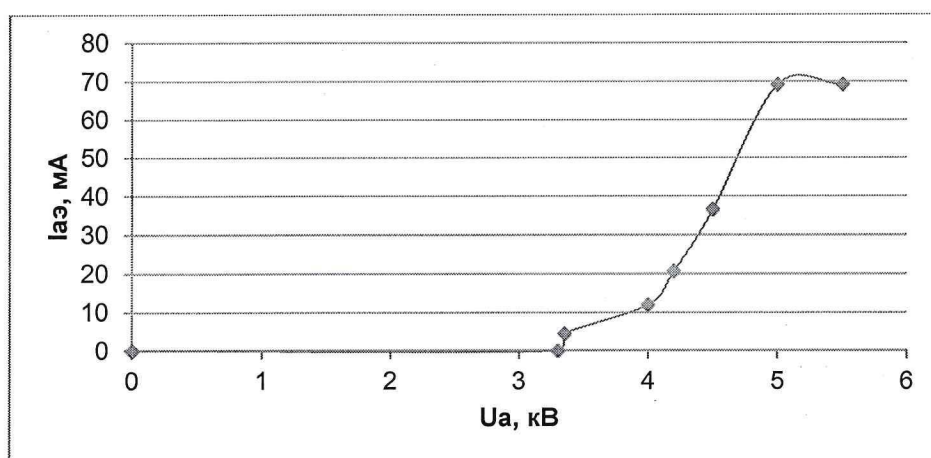


Рис. 4 Вольт-амперная характеристика диода без магнитного поля после активировки

Из сравнения графиков рис. 3 и рис. 4 видно влияние магнитного поля на величину напряжения начала протекания тока диода: у диода с магнитным полем оно выше (3800 В), чем у диода без магнитного поля (3300 В). При этом, повторные активировки не ухудшают эмиссионную способность катода, а приводят к увеличению суммарного тока АЭЭ и ВЭЭ катода.

Результаты, полученные при исследованиях характеристик диодов БМ без и в присутствии магнитного поля необходимо сравнить с результатами работы безнакального магнетрона того же типа но уже с полноценной колебательной системой, обеспечивающей наличие высокочастотного поля (ВЧ) в пространстве взаимодействия, оказывающего воздействие на основные носители заряда. Пример осциллограммы работы такого БМ приведен на рис. 5.

На осциллограмме рис. 5 амплитуда анодного напряжения соответствует 5700 В. По сравнению со значениями импульсной величины тока анода 0,8 А (вторая активировка) для диода с магнитным полем, в БМ эта величина выше и составляет 3,5 А. Объяснение этого отличия будет дано авторами в следующих публикациях.

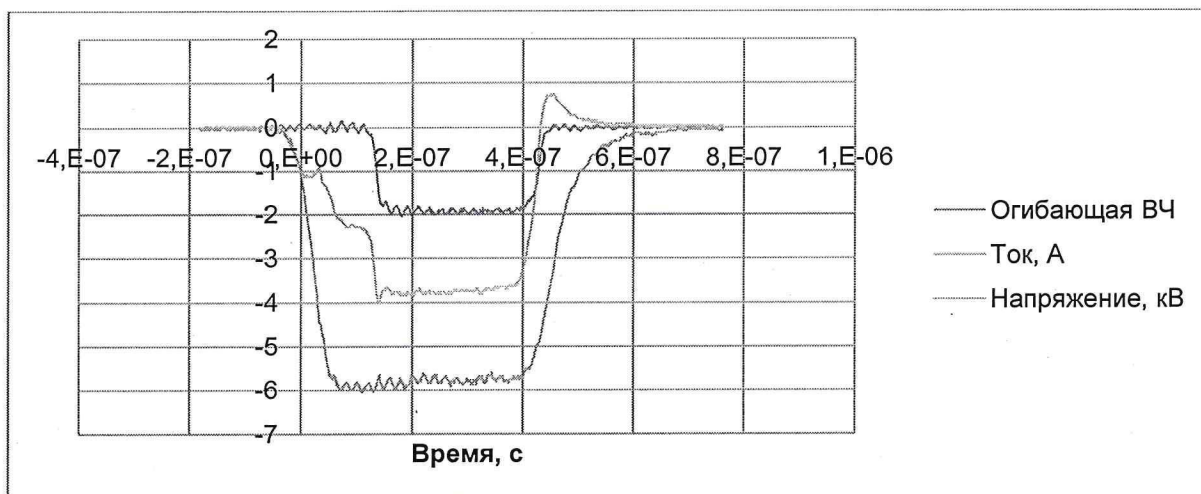


Рис. 5 Осциллограммы тока, напряжения и огибающей ВЧ импульса БМ

Результаты исследований диодов БМ позволяют сделать следующие выводы:

- диод без магнитной системы дает возможность определить граничное (минимальное) напряжение, при котором возникает АЭЭ, что безусловно необходимо учитывать в процессе изготовления БМ при его тренировке;
- ток АЭЭ растет с увеличением напряжения, но только до определенного предела;
- при больших напряжениях анода возможна полная деградация АЭЖ, что в условиях БМ приведет к выходу прибора из строя;
- в случае деградации АЭЖ эмиссия восстанавливается активировкой прибора;
- электронов и их энергий, эмитированных АЭЖ в рассматриваемом диапазоне напряжений для конкретного типа БМ, достаточно для создания вторичной электронной эмиссии;
- вид вольт-амперных характеристик зависит от режимов и количества активировок;
- величина суммарного тока в диоде с магнитным полем больше тока автоэмиссии в диоде без такового, а зависимость суммарного тока от напряжения соответствует закону в степени $3/2$, описывающему вторичную электронную эмиссию, т.е. ОПЗ образован в основном вторичными электронами;

1. Ли И. П. Магнетроны импульсного действия – всё дело в катоде // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. № 5 (00119). 2012. С. 84-87.
2. Ли И. П. и др. «Прессованный металлосплавной палладий-бариевый катод для магнетронов с безнакальным запуском». Материалы XIX научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». 2012 г. Стр. 213 – 216.
3. Ли И.П. Наноструктуры в палладий — бариевых катодах СВЧ-приборов. // Электроника. Наука. Технологии. Бизнес. – 2018 № 5, с. 144 – 151.
4. В. А. Мельников и др. «Некоторые особенности функционирования магнетронов с безнакальным запуском». Материалы XXVIII научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». 2021 г. Стр. 289 – 293.
5. В. А. Мельников, и др. «Прогнозирование надежности безнакальных магнетронов. Расширение технических возможностей» // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. № 1 (00212). 2022. Стр. 130 – 134.
6. Ли И. П. и др. «Магнетрон с безнакальным катодом» Патент РФ № 2380784 // Приоритет от 24 октября 2008 г.
7. С. И. Бычков «Вопросы теории и практического применения приборов магнетронного типа». Издательство «Советское радио», Москва, 1967 г.