

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ С КАТОДОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНОЙ НАНОСТРУКТУРЫ В СВЕРХВЫСОКО ЧАСТОТНЫХ ПОЛЯХ КОРОТКОГО САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

И.А. Гузилов¹, А.В. Костин¹, О.Ю. Масленников¹, В.О. Ничипоренко¹,
М.В. Калинин², В.С. Назаров², В.В. Борисов³, П.В. Минаков³, А.Ю.Поройков³,
А.Т. Рахимов³, Б.В. Селезнев³

¹Москва, ФГУП «НПП «Торий», ²Москва, ОАО «ВМЗ», ³Москва, НИИЯФ МГУ

Получена 29 сентября 2009 г.

Представлены результаты исследования полевой эмиссии с автоэлектронных катодов на основе углеродных наноструктур в коротком сантиметровом диапазоне длин волн. Показано экспериментально, что в рабочем сверхвысокочастотном режиме плотность тока эмиссии увеличилась более, чем в 5 раз по сравнению со статическим режимом – с 0,44 до 2,4 А/см².

Ключевые слова: автоэлектронная эмиссия, углеродные наноструктуры.

ВВЕДЕНИЕ

Автоэлектронные катоды на основе углеродных наноструктур представляют значительный интерес в качестве источников электронов для вакуумных сверхвысокочастотных приборов, в частности, для сеточных СВЧ триодов. Частотные ограничения в традиционных СВЧ триодах с термокатадами связаны с пролетными явлениями в пространстве катод-сетка [1]. При повышении частоты увеличивается угол пролета зазора катод-сетка

и электроны, не успевая достичь сетки в ускоряющей фазе ВЧ поля, начинают колебаться между катодом и сеткой. Увеличение сеточного напряжения или приближение сетки к катоду позволяют компенсировать это явление и повысить рабочую частоту прибора. Однако в силу специфики классических СВЧ триодов с термокатадами попытки продвижения в этом направлении наталкиваются на непреодолимые трудности. В производство запущен СВЧ триод с термокатодом [2], который обеспечивает выходную мощность до 60 Вт, коэффициент полезного действия не превышал 20% в диапазоне частот до 10 ГГц, при этом зазор катод-сетка составлял 15 мкм, составляет 10 ГГц. Очевидно, это весьма скромные показатели, но они были достигнуты в более сложной конструкции, обеспечивающей столь малый зазор катод-сетка.

Использование автоэлектронных катодов позволяет в несколько раз увеличить частотный диапазон триодных СВЧ усилителей (до 32 ГГц и выше [3]), поскольку эмиссия с автокатада начинается только при высокой напряженности электрического поля. Значительно увеличенный потенциал сетки позволяет даже в коротком сантиметровом диапазоне длин волн иметь небольшой угол пролета зазора катод-сетка. При этом образуются сгустки небольшой фазовой протяженности, что позволяет значительно увеличить КПД - до 50...60 % [1].

В экспериментальных установках с автоэлектронными катодами на основе нанокристаллического графита с плоской кремниевой подложкой были достигнуты плотности токоотбора до 10 A/cm^2 [4]. В СВЧ триоде катод является частью электродинамической системы. Его диаметр связан с длиной волны и должен быть достаточно малым по величине. С одной стороны это ограничивает общий ток эмиссии, с другой - может приводить к краевому эффекту усиления поля. Кроме того, проводимости наноуглеродного покрытия и кремниевой подложки существенно ниже, чем у металла, поэтому величина скин-слоя на рабочей поверхности катода значительно превышает толщину эмиссионного слоя.

Целью настоящей работы являлось изучение эмиссионных свойств автоэлектронного катода на основе углеродной наноструктуры при наличии на его поверхности СВЧ полей. В ходе работы были решены следующие задачи:

- рассчитан и сконструирован входной резонатор с емкостным зазором между автоэлектронным катодом и сеткой и развязкой по постоянному току для разделения статических потенциалов этих электродов;
- подобран материал подложки катода с хорошей проводимостью для уменьшения загрузки рабочих колебаний резонатора;
- оптимизирована форма катодной поверхности для устранения краевого эффекта усиления поля и связанной с ним неоднородности автоэлектронной эмиссии;
- согласована связь с входным трактом с учетом потерь в стенках резонатора, на поверхности автоэлектронного катода и в системе потенциальной развязки;
- определены зависимости среднего за период СВЧ тока катода от величины приложенного СВЧ напряжения на сетке при разных напряжениях сеточного смещения;
- определен максимум плотности тока автоэлектронного катода в режиме СВЧ колебаний.

1. ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАКЕТА, МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальный макет являлся прототипом вакуумного усилительного СВЧ триода с рабочей частотой 17 ГГц и выходной мощностью 100 Вт. Расчет фазовых траекторий электронов, коэффициента усиления и КПД которого приведен в [1].

В качестве материала подложки для наноуглеродного покрытия был выбран молибден. Этот материал имеет высокую температуру плавления, что

очень важно при нанесении на него наноуглеродного покрытия с помощью высокотемпературной плазмы. Достаточно высока и удельная электрическая проводимость молибдена $\sigma=1,9 \cdot 10^7$ См/м, при этом толщина скин-слоя на частоте 17 ГГц составляет 0,9 мкм.

В макете из-за ограниченных размеров катода была решена проблема усиления эмиссии на периферии эмиттера из-за краевого эффекта. Увеличение диаметра катода по сравнению с диаметром эмиссионного пятна было нецелесообразно, так как приводило к уменьшению характеристического сопротивления резонатора и, как следствие, уменьшению коэффициента усиления триода. Поэтому был применен способ корректировки полей на поверхности катода, предложенный В. Роговским [5].

Форма катодного электрода была оптимизирована с целью выравнивания полей на торце цилиндра, являющемся эмиссионной поверхностью. Геометрия катодной поверхности, полученная в результате оптимизации, распределение электрического потенциала в пространстве между катодом и сеткой представлены на рис. 1, электрическое поле на поверхности на поверхности катода – на рис. 2.

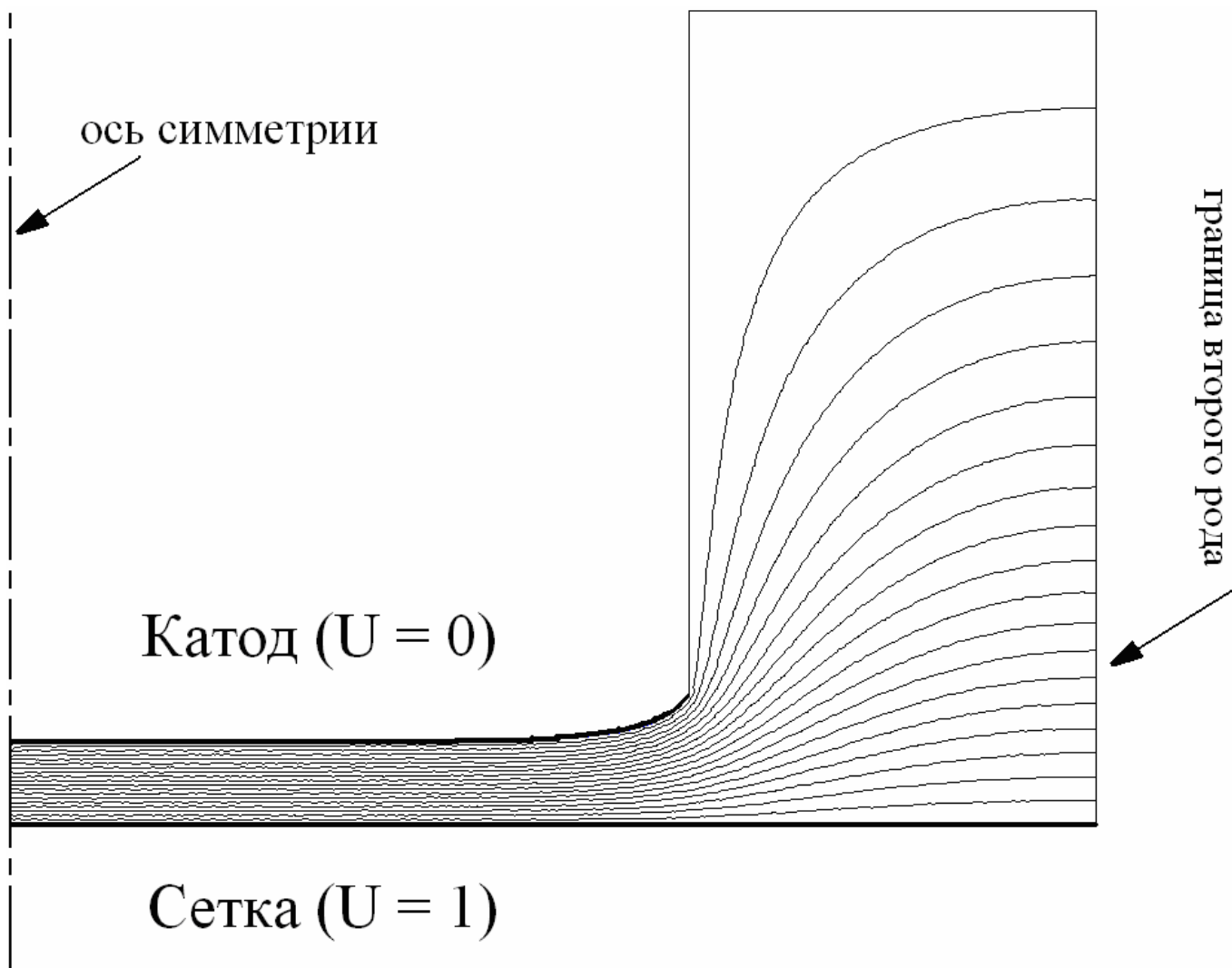


Рис. 1. Распределение электрического потенциала для оптимизированной формы катодной поверхности.

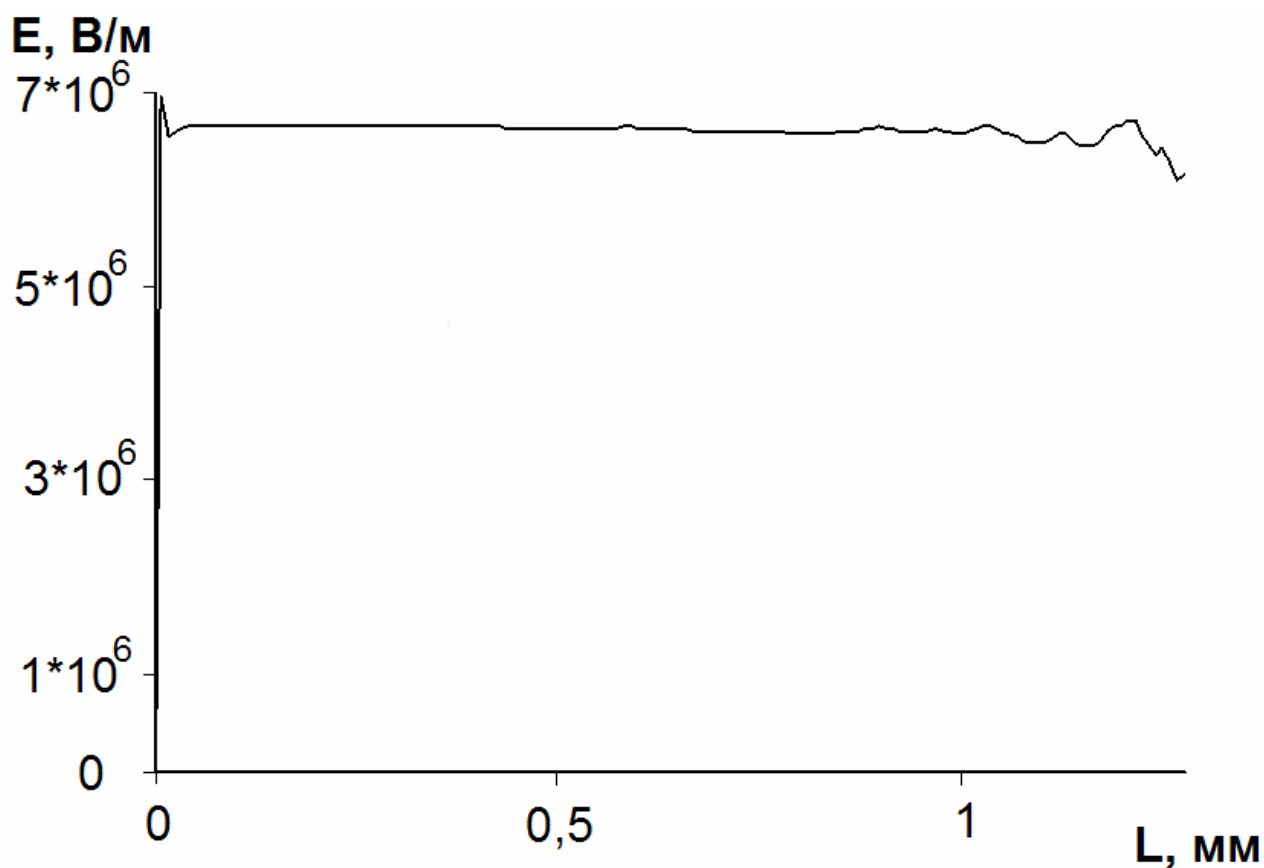


Рис. 2. Распределение поля на поверхности катода оптимизированной формы.

С помощью электродинамического расчета входного резонатора с катодом оптимизированной формы была определена геометрия развязки по постоянному току и СВЧ между катодом и сеткой. Схема части макета, относящейся к входному резонатору, представлена на рис. 3. Между катодом и корпусом, имеющим сеточный потенциал, размещен слой диэлектрика – алунда (Al_2O_3), $\epsilon \approx 9$. Для уменьшения СВЧ излучения между корпусом и катодом применен четвертьволновый дроссель.

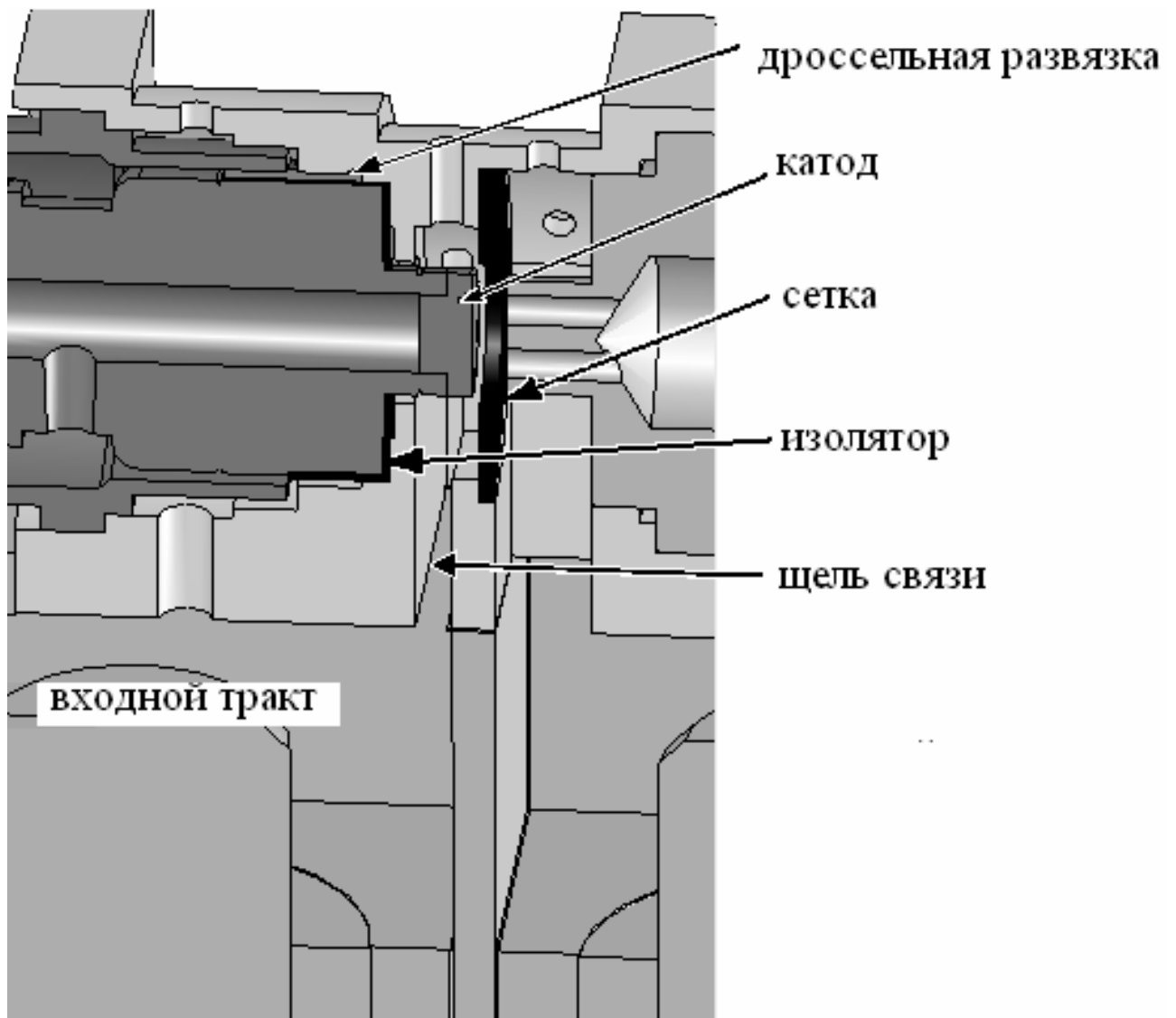


Рис. 3. Поперечное сечение входного резонатора макета триода.

Входной тракт представлял собой волновод поперечного сечения $13 \times 6,5$ мм, соединенный с входным резонатором с помощью щели связи. Зазор между катодом и сеткой составлял 0,15 мм. Сетка была изготовлена из молибденовых проволок диаметром 30 мкм, ячейки имели квадратную форму, период сеточной структуры составлял 110 мкм.

Предварительно на холодных измерениях входной резонатор макета был настроен на требуемую частоту, измерены его собственная и нагруженная добротности и подобран размер щели связи ($4,2 \times 0,7$ мм) с входным трактом с учетом требуемого согласования. СВЧ сигнал при

измерениях подавался со стороны входного тракта. Полученная зависимость КСВ от частоты приведена на рис. 4.

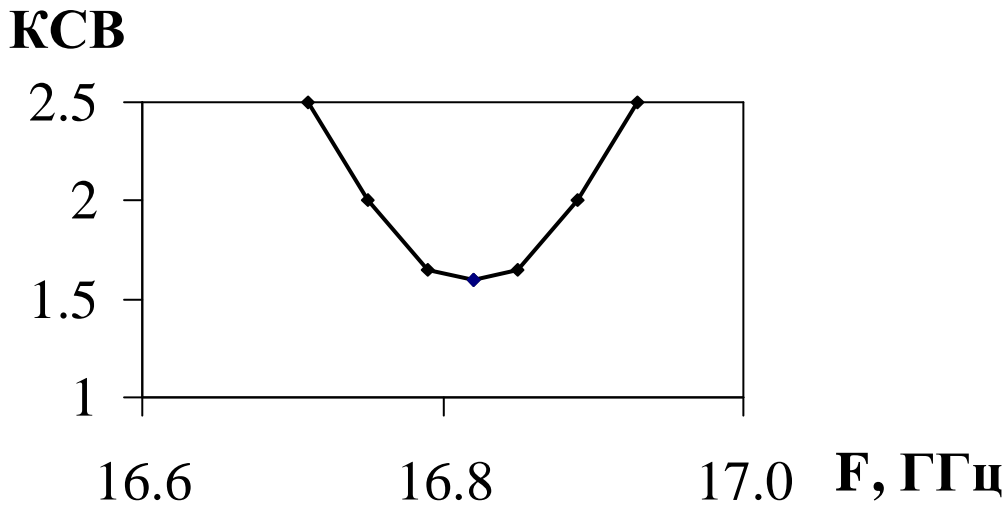


Рис. 4. Зависимость КСВ от частоты входного резонатора при измерениях со стороны входного тракта

При помощи методов аналогичных [6] и [7] была определена нагрузка в стенках резонатора, соответствующая эксперименту, рассчитаны собственная ($Q_0=47$) и нагруженная ($Q_n=30$) добротности резонатора. Также из расчета было получено характеристическое сопротивление ρ резонатора - 15 Ом. Зависимость эквивалентной амплитуды ВЧ напряжения между катодом и сеткой (U_1) от входной мощности ($P_{вх}$) (рис.5) следующая:

$$U = \rho \cdot Q_n \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot P_{вх}}{\rho} \left(\frac{1}{Q_n} - \frac{1}{Q_0} \right)}.$$

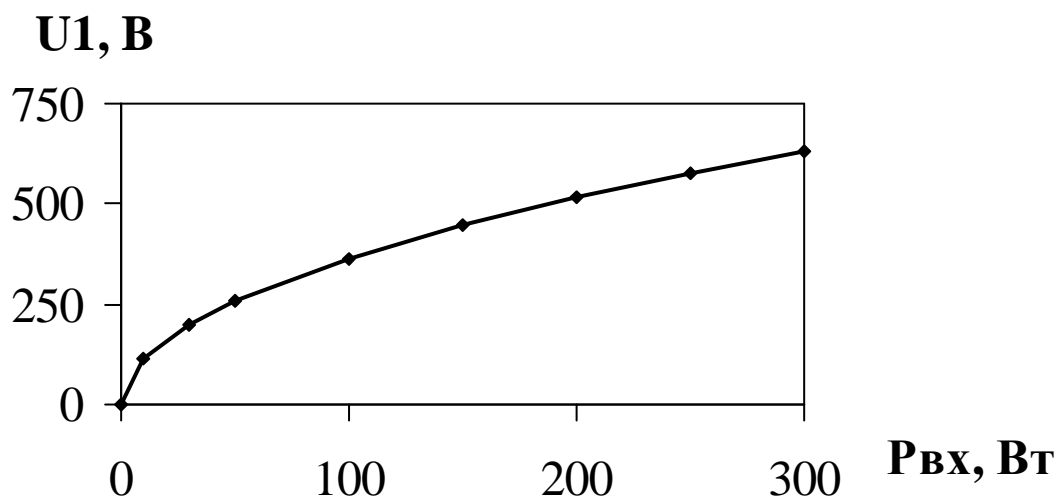


Рис. 5. Расчетная зависимость амплитуды ВЧ напряжения между катодом и сеткой U_1 от входной мощности.

Перед сборкой катода и постановкой в макет было проведено его испытание в импульсном режиме $\tau=250$ мкс, $f_{повт}=50$ Гц в экспериментальной установке НИИЯФ МГУ с плоским сплошным анодом, в ходе которого был получен ток эмиссии 75 мА при напряжении на катоде $-2,2$ кВ, что соответствовало плотности тока $1,5$ А/см².

После сборки катода и его монтажа в корпус триода было проведено тестовое измерение его ВАХ в вакуумной камере. Измерения показали, что при максимальном напряжении $2,2$ кВ ток эмиссии снизился до 22 мА (плотность тока упала до $0,44$ А/см²). Причиной этого могли явиться:

- непреднамеренное механическое воздействие на рабочую поверхность катода в процессе сборки;
- неоднородность эмиссии по поверхности, связанная с достаточно крупной сеточной структурой по сравнению с зазором катод-сетка.

Полученная вольтамперная характеристика катода (статическая) приведена на рис. 6. Максимальное напряжение на сетке $2,2$ кВ близко к предельному значению, при котором происходит пробой в зазоре катод-сетка [8].

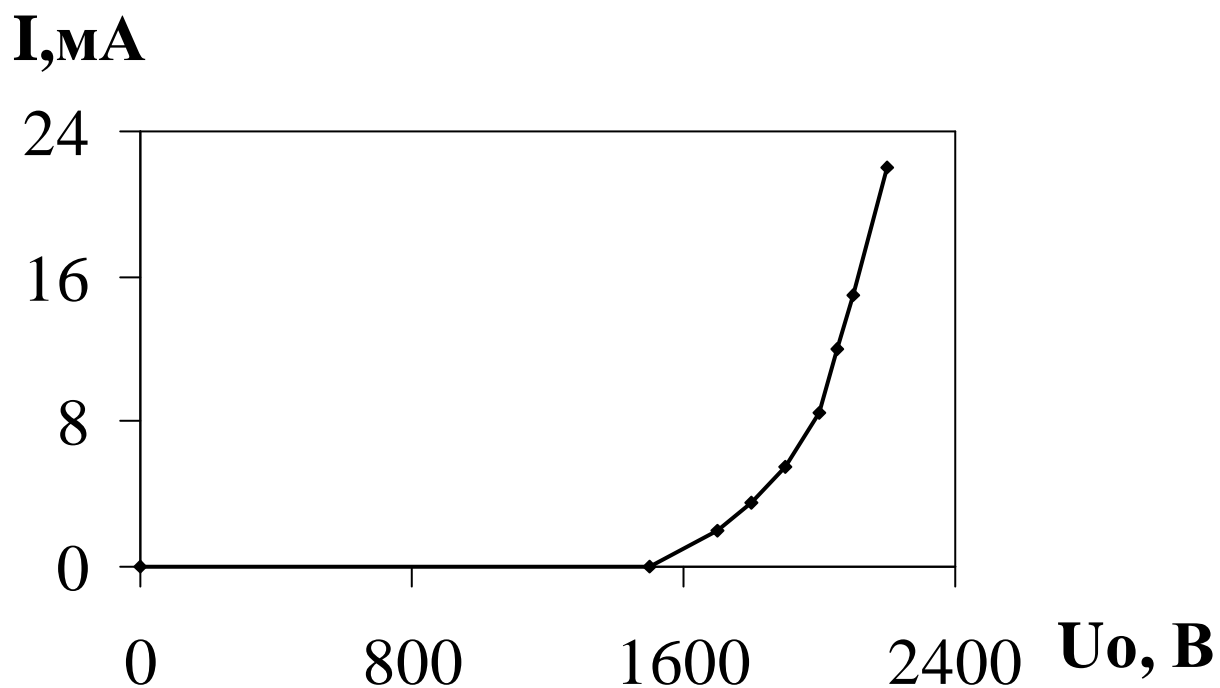


Рис. 6. Статическая вольтамперная характеристика автоэлектронного катода в составе СВЧ триода.

2. СВЧ ЭКСПЕРИМЕНТ

В качестве источника входного сигнала при проведении испытаний в СВЧ режиме использовался клистрон с импульсной выходной мощностью до 300 Вт на рабочей частоте триода (16,85 МГц). Фотография экспериментальной установки представлена на рис. 7.

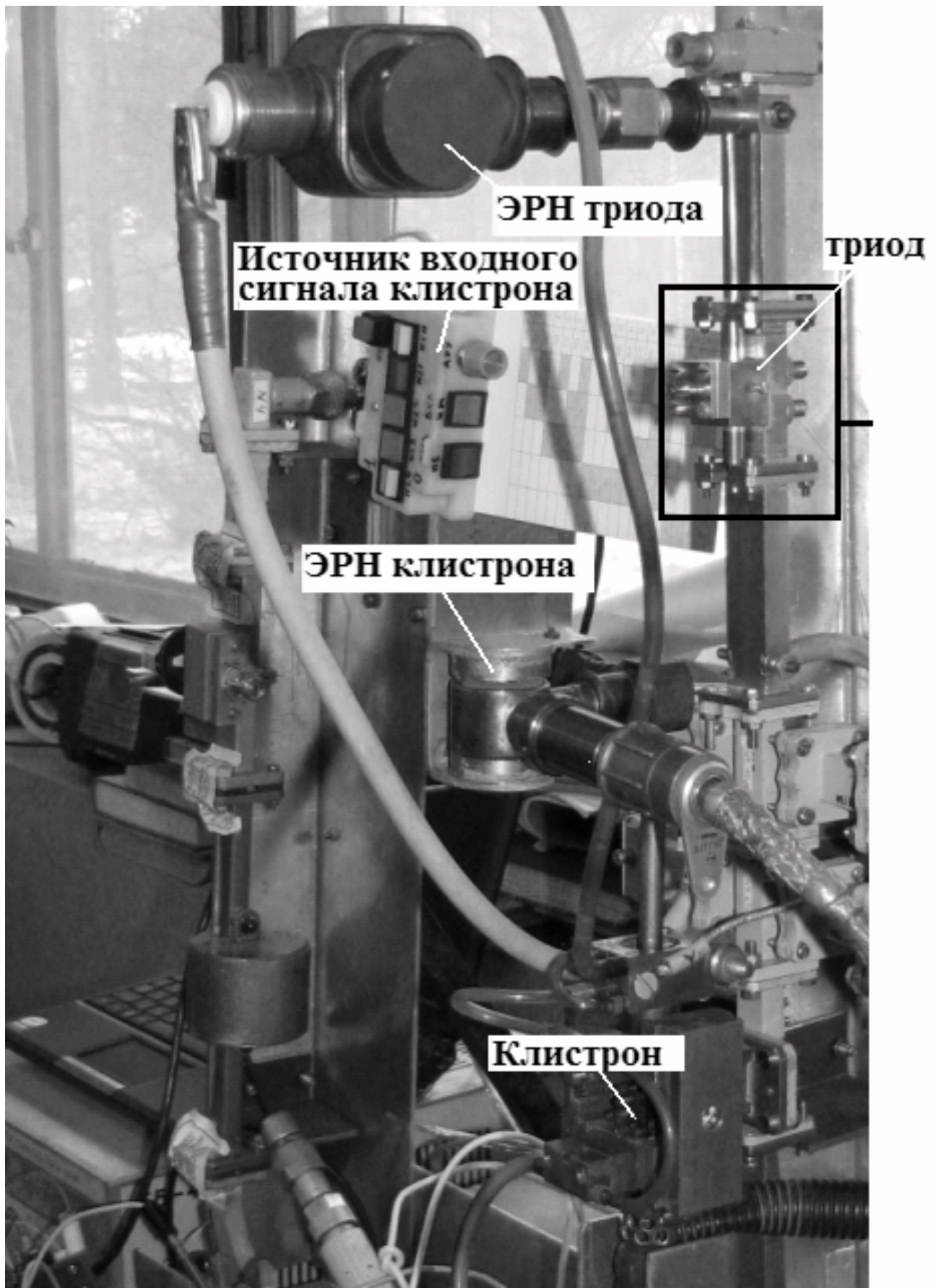


Рис. 7. Фотография экспериментальной установки.

При испытаниях на катод подавались импульсы отрицательной полярности длительностью до 100 мкс с амплитудой до 2,3 кВ. Синхронно с ними от клистрона через тракт во входной резонатор поступали импульсы СВЧ мощности такой же длительности, амплитуду которых можно изменять в пределах от 0 до 300 Вт. Скважность импульсов постоянного и переменного СВЧ напряжения была одинаковой: $Q=200$. С помощью осциллографа Tektronix TDS 1012 проводилось измерение амплитуды импульсного тока, что соответствует среднему за время импульса тока. Значение амплитуд СВЧ напряжения и тока во время ускоряющей фазы невозможно было измерить из-за ограничений частотных свойств осциллографа.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ СВЧ ЭКСПЕРИМЕНТА

Зависимости среднего за время импульса тока от входной мощности для различных значений напряжения смещения представлены на рис. 8. Из зависимостей можно заключить, что при максимальном значении входной мощности $P_{вх}=300$ Вт (амплитуда ВЧ напряжения $U_1=630$ В) средний за время импульса ток эмиссии для напряжений смещения $U_0 \leq 2,0$ кВ увеличился более, чем в 2 раза в сравнении со статической ВАХ. Для напряжений смещения $U_0=2,1 \div 2,2$ кВ коэффициент увеличения тока эмиссии составил несколько менее 2. Повторное тестирование автоэлектронного катода после проведенных испытаний в СВЧ режиме выявило ослабление эмиссионных свойств, в среднем на 12 %. Это явление продемонстрировано на рис. 9, на котором приведены две статические ВАХ – до и после СВЧ эксперимента. Возможными причинами ослабления эмитирующих свойств явились процессы, приведшие к изменениям в эмитирующей наноструктурной поверхности:

- усиленное СВЧ сигналом поле на катоде;
- ВЧ токи в скин-слое.

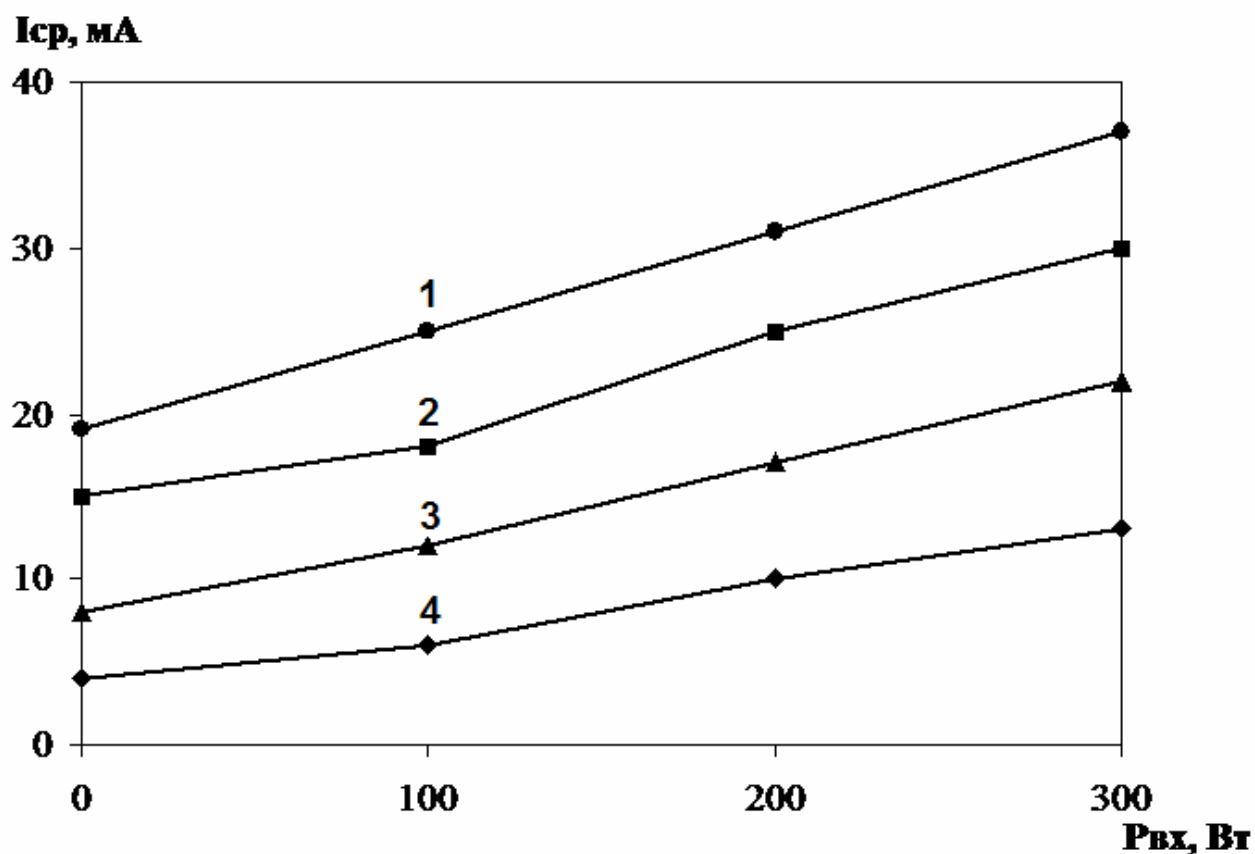


Рис. 8. Зависимости среднего за время импульса тока от входной мощности для различных значений напряжения смещения (1 - $U_0 = 2,2$ кВ, 2 - $U_0 = 2,1$ кВ, 3 - $U_0 = 2,0$ кВ, 4 - $U_0 = 1,8$ кВ).

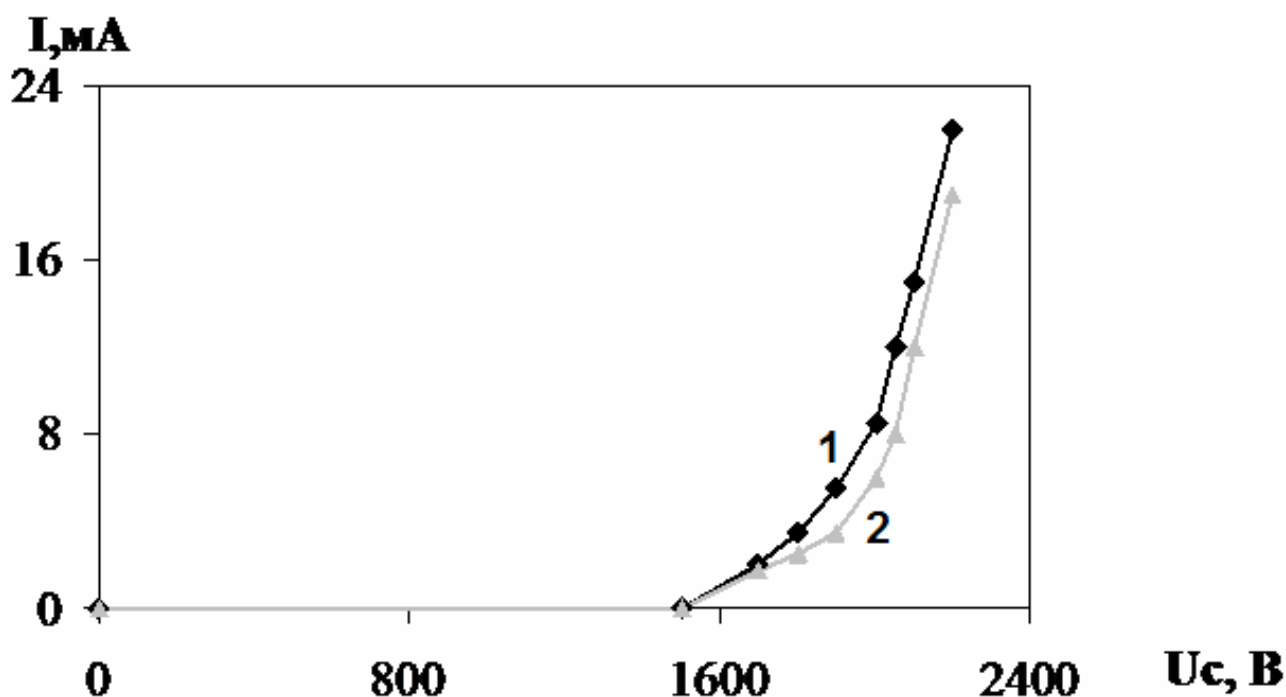


Рис. 9. Уменьшение тока в статическом режиме после СВЧ испытаний (1 – до СВЧ эксперимента, 2 – после СВЧ эксперимента).

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ СВЧ ЭКСПЕРИМЕНТА

Вследствие технических причин в эксперименте оказалось невозможным измерить пиковое значение тока. Однако полученные значения среднего за время импульса тока позволили расчетным путем восстановить форму вольтамперной характеристики. С помощью одномерной программы расчета фазовых траекторий [1] по результатам СВЧ эксперимента статическая ВАХ автоэлектронного катода была экстраполирована «динамической» частью, соответствовавшей усилению эмиссии СВЧ сигналом (рис. 10). Как следует из рисунка, максимальное значение тока в режиме СВЧ сигнала в 5 раз превышает максимальное значение, полученное в статическом режиме. В статическом режиме получить такие значения оказалось невозможным из-за ограничений, связанных с электрической прочностью зазора катод-сетка.

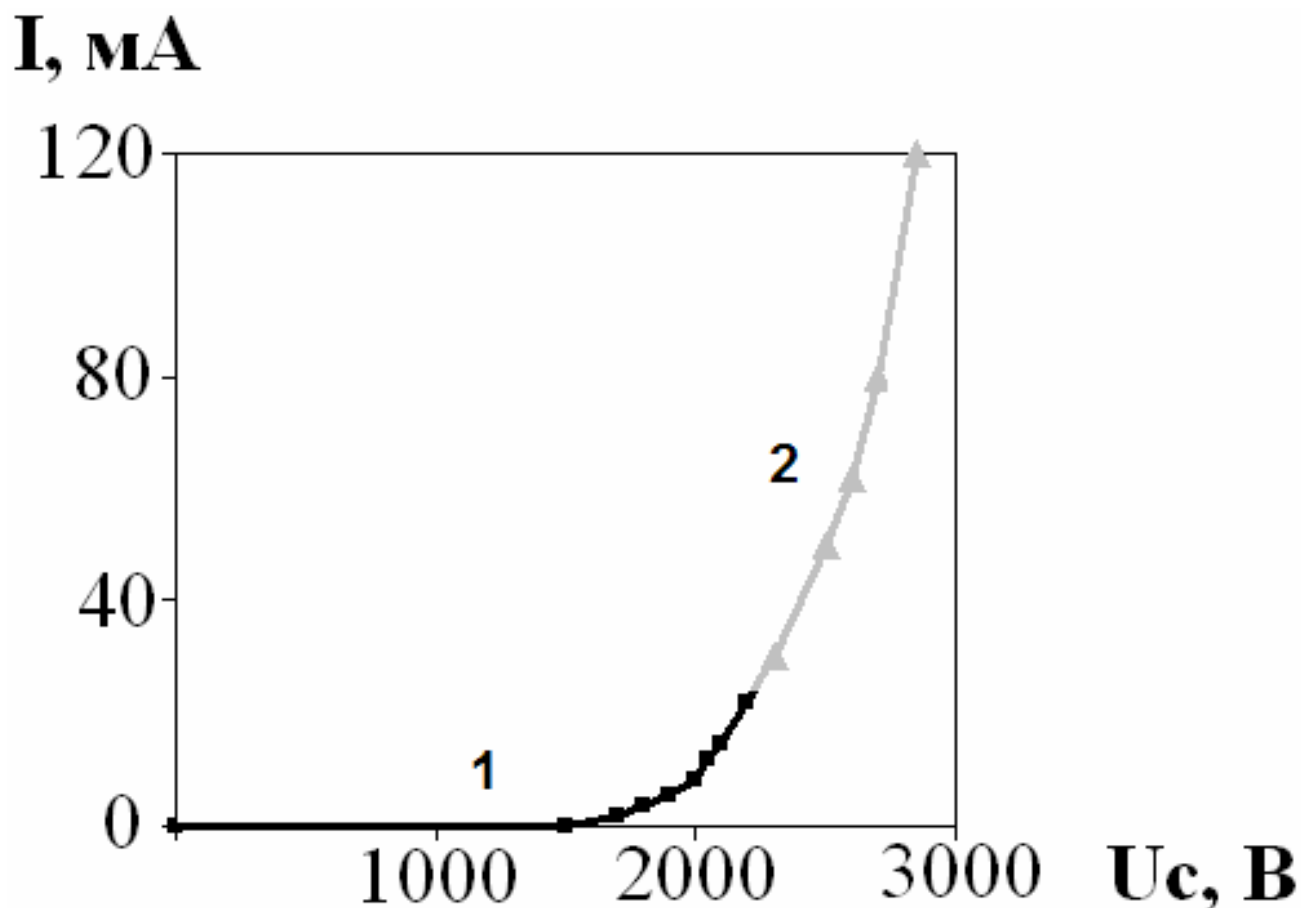
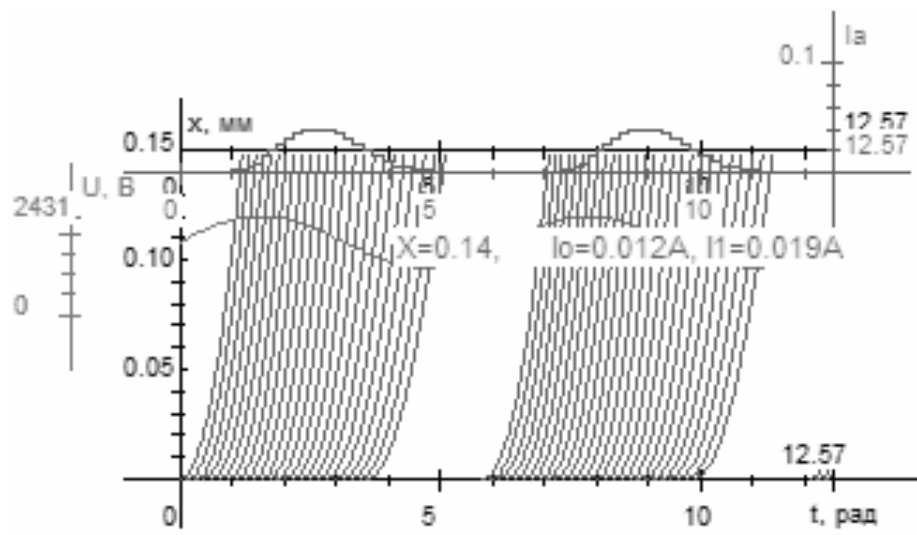
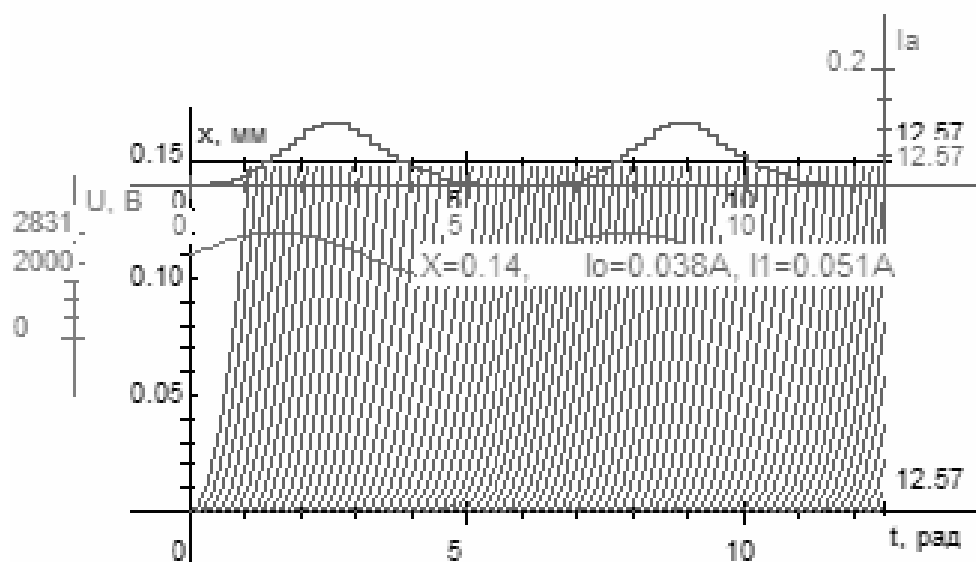


Рис. 10. Вольтамперная характеристика с учетом испытаний в СВЧ поле (1 - статическая характеристика, 2 – «динамическое» дополнение).

На рис. 11 показаны фазовые траектории для рабочей точке U_0 , I_0 , для нижней (а) и верхней (б) частей статической вольтамперной характеристики при СВЧ напряжении, соответствовавшем максимальному значению 630 В ($P_{вх}=300$ Вт). Расчеты показали, что средний за импульс ток составляет 12 мА в первом случае (I_0 при этом равно 3,5 мА) и 38 мА во втором случае (I_0 при этом равно 22 мА). Аналогичные расчеты были проведены для остальных значений напряжений смещения.



a)



б)

Рис. 11. Фазовые траектории при максимальном СВЧ сигнале для разных рабочих точек U_0, I_0 .

Сравнение зависимостей среднего за импульс тока от величины входной мощности (для разных рабочих точек), полученных в эксперименте, с рассчитанными по одномерной программе зависимостями на основе ВАХ рис. 10 представлено на рис. 12. Можно отметить, что средний ток, полученный из характеристики рис.10 на «динамическом» участке в пределах погрешности 5% отражал зависимости, полученные в

эксперименте. Также из расчета фазовых траекторий была определена величина тока, достигнутого в максимуме ускоряющей фазы ВЧ поля. Для входной мощности 300 Вт и напряжении в рабочей точке $U_0=2,2$ кВ (максимальное значение для статической характеристики) эта величина составила 120 мА, что соответствовало плотности тока $2,4$ А/см².

$I_{ср}$, мА

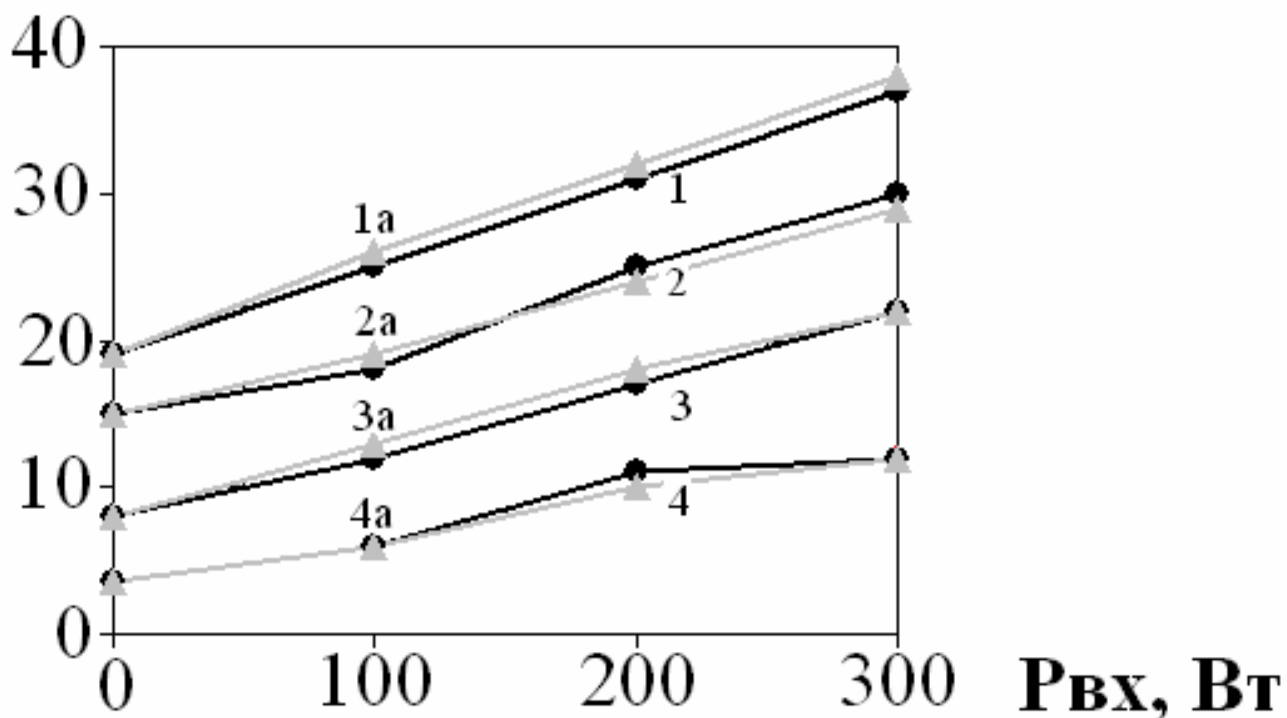


Рис. 12. Сравнение зависимостей среднего за импульс тока от величины входной мощности (для разных рабочих точек), полученных в эксперименте с рассчитанными по одномерной программе зависимостями на основе ВАХ рис.10 (1-4 – Эксперимент, 1a-4a – расчет. Для 1 и 1a $U_0 = 2,2$ кВ, для 2 и 2a $U_0 = 2,1$ кВ, для 3 и 3a $U_0 = 2,0$ кВ, для 4 и 4a $U_0 = 1,8$ кВ).

Из расчета фазовых траекторий также определена важная для определения общих характеристик усилительного триода величину первой гармоники импульсного СВЧ тока (рис.13).

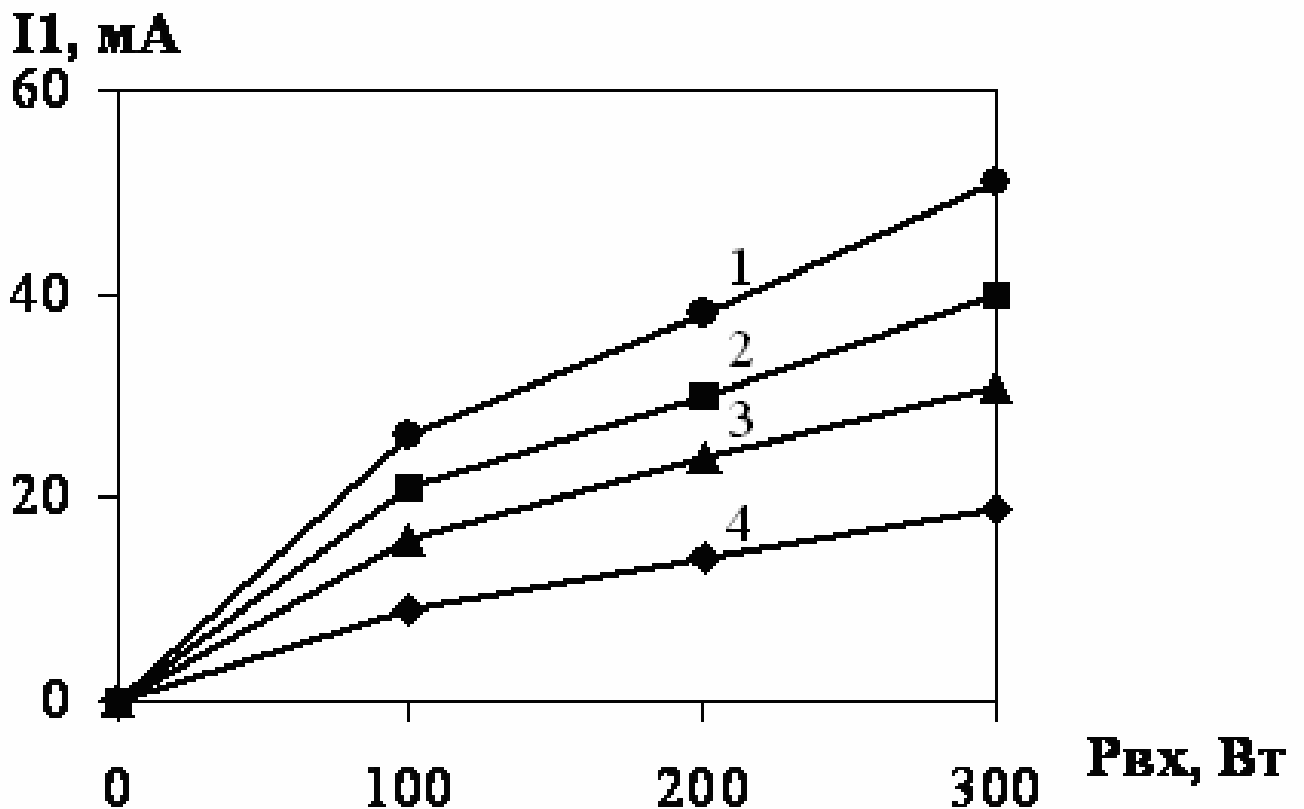


Рис. 13. Полученные расчетным путем из ВАХ рис. 10 зависимости первой гармоники СВЧ тока от входной мощности для различных значений напряжения смещения. 1 – $U_0 = 1,8$ кВ; 2 – $U_0 = 2,0$ кВ; 3 – $U_0 = 2,1$ кВ; 4 – $U_0 = 2,2$ кВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненной работы обоснована возможность создания эффективного СВЧ триода в частотном диапазоне 17 ГГц с автоэлектронным катодом на основе наноструктурированного графита. На подготовительном этапе были выполнены расчеты геометрии электродов и рабочих характеристик прибора, исходя из данных об эмиссионной способности применяемого эмиттера. Было проведено конструирование, изготовление и сборка первого макета прибора.

В ходе экспериментальных исследований были исследованы эмиссионные свойства катода в статическом режиме и режиме СВЧ колебаний во входном резонаторе.

Эксперимент показал, что в рабочем СВЧ режиме плотность тока эмиссии увеличилась более, чем в 5 раз по сравнению со статическим режимом – с 0,44 до 2,4 А/см². Полученная в СВЧ режиме плотность эмиссии была недостижима в статическом режиме вследствие электрической прочности зазора катод-сетка.

Повторное измерение статической ВАХ после СВЧ эксперимента выявило уменьшение эмиссионной способности автокатода (на 12%).

Полученные результаты по рабочему напряжению и мощности пучка позволяют рассчитывать на значительное улучшение выходных параметров вакуумных СВЧ триодов с автоэмиттерами на основе наноструктурированного графита в коротком сантиметровом диапазоне длин волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гузилов И.А., Калинин М.В., Костин А.В., Масленников О.Ю.* // Использование автоэлектронных катодов на основе углеродных наноструктур в сеточных усилителях короткого сантиметрового диапазона, Материалы российской научно-технической конференции «Вакуум-2007», Сочи, 2007, стр. 287-290.
2. http://ru.nevz.ru/downloads/fpdf/SVSH/gener_lamp_SVSH.pdf 6C45K ЖТ3.323.053ТУ.
3. *Legagneux R., Le Sech N., Guiset P.* // Carbon nanotube based cathodes for microwave amplifiers/ IVEC 2009, Rome, Italy, p. 80-81.
4. *Gulyaev Yu.V., Chernozatonskii L.A., Kosakovskaya Z.Ya., Sinitsyn N.I., Torgashov G.V., Zakharchenko Yu.F.* // Field Emitter Arrays on Nanofilament Carbon Structure Films / Revue "Le Vide, Les Couches Minces", 1994, № 271, p. 322.

5. *Воробьев А.А.* Техника высоких напряжений/ А.А. Воробьев. – М.: Мосэнергоиздат, 1945. С. 517.
6. *Богданович Б.Ю., Калюжный В.Е., Каминский В.И., Собенин Н.П.* Ускоряющие структуры и СВЧ устройства линейных коллайдеров. – М.: Энергоатомиздат, 2004.
7. *С.Е. Банков, А.А.Курушин, В.Д. Разевиг* «Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ структур с помощью HFSS». – М.: СОЛОН – Пресс, 2004.
8. *И.Н. Сливков* «Электроизоляция в вакууме», Москва, «Атомиздат» 1972.