

УДК 621.385.69.01

СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ДЛЯ ГИРОТРОНА С ЧАСТОТОЙ 258 ГГц, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЯДЕР

*В. Е. Запевалов, С. Ю. Корнишин, А. В. Котов, А. Н. Куфтин, О. В. Малыгин,
В. Н. Мануилов, А. С. Седов, В. И. Цаллолихин*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Рассматриваются особенности системы формирования электронного пучка для непрерывного высокостабильного гиротрона на второй гирогармонике с рабочей частотой 258 ГГц. Анализируются проблемы, связанные с обеспечением требуемых параметров пучка. Описывается процедура и результаты численного моделирования электронной пушки и коллектора гиротрона. Исследуется влияние различных физических факторов на характеристики электронно-оптической системы гиротрона. Описывается конструкция системы формирования электронного потока и результаты измерений её характеристик.

ВВЕДЕНИЕ

Динамическая поляризация ядер [1] в настоящее время рассматривается как один из наиболее перспективных способов увеличения чувствительности спектрометров, основанных на методе ядерного магнитного резонанса [1–4]. Эта методика требует использования достаточно мощного (по крайней мере, единицы и десятки ватт) высокостабильного источника непрерывного излучения на частотах 250–400 ГГц, которые определяются рабочим магнитным полем спектрометра [1, 2]. В качестве такого рода источников представляется перспективным использование гиротронов, т. к. по уровню предельной выходной мощности они не имеют конкурентов в указанном диапазоне частот [5–7]. Одним из ключевых элементов гиротрона, определяющих максимальный КПД и уровень выходной мощности, является электронно-оптическая система, формирующая винтовой электронный пучок. Как правило, винтовой электронный пучок должен иметь питч-фактор $g \approx 1,1 \div 1,5$ и умеренный (не более 30–35%) относительный разброс по скоростям вращения входящих в резонатор электронов-осцилляторов [5–7].

Традиционно для формирования винтового электронного пучка используются магнетронно-инжекторные пушки (МИП) [5–8], работающие в режиме температурного ограничения эмиссии. Такие системы хорошо отработаны для мощных непрерывных гиротронов диапазона частот 80–170 ГГц, используемых в экспериментах для управления параметрами плазмы на установках управляемого термоядерного синтеза [5, 8]. В этих гиротронах типично использование первой гармоники циклотронной частоты, высоких рабочих мод резонатора, больших ускоряющих напряжений (80 кВ и более), а также диодной (реже — триодной) конструкции электронной пушки. Большой опыт разработки и использования магнетронно-инжекторных пушек накоплен и в непрерывных технологических гиротронах, работающих в диапазоне частот 24–30 ГГц и имеющих мощность порядка 10 кВт [5]. Дальнейшее продвижение к границе миллиметрового диапазона и далее в субмиллиметровый диапазон длин волн, необходимое для реализации спектроскопии с использованием динамической поляризации ядер, требует, тем не менее, существенного изменения концепции построения гиротронов и, соответственно, их электронно-оптических систем.

Таблица 1

Рабочая частота, ГГц	$258,6 \pm 0,5$
Номер гармоники	2
Ускоряющее напряжение U_0 , кВ	15
Анодное напряжение (анод-катод) U_a , кВ	$7 \div 15$
Магнитное поле B_0 в резонаторе при номинальном режиме (ускоряющее напряжение 15 кВ, ток пучка 0,5 А), Тл	4,727
Ток пучка (номинальное значение), А	0,5
Плотность тока на эмиттере (не более), А/см ²	2,5
Радиус резонатора, мм	1,844
Средний радиус пучка в резонаторе, мм	0,984
Относительная энергия осцилляторного движения t_{\perp} (не менее)	0,6
Питч фактор (не менее)	1,2
Разброс поперечных скоростей (не более), %	30

Прежде всего, вследствие сильного усложнения и удорожания криомагнитных систем с полем B_0 в рабочем пространстве более $6 \div 7$ Тл, что соответствует частоте генерации 200 ГГц при работе на первой гирогармонике, целесообразно переходить к генерации на второй гармонике циклотронной частоты. Однако использование второй гармоники, в свою очередь, резко обостряет проблему селекции типов колебаний (мод) в резонаторе гиротрона [5, 6] и вынуждает работать с относительно низкими типами колебаний. Элементарные оценки показывают, что перечисленные выше обстоятельства приводят к снижению допустимых радиусов катода примерно на порядок по сравнению с гиротронами для управляемого термоядерного синтеза и ряду других особенностей, частично обсуждаемых ниже. Наконец, для получения более технологичных и простых в обслуживании установок целесообразно снижение ускоряющего напряжения до уровня $15 \div 25$ кВ, что также влечёт существенное изменение параметров МИП. Поэтому разработка электронно-оптических систем гиротронов субмиллиметрового диапазона длин волн имеет ряд специфических особенностей, обсуждаемых ниже на примере разработки МИП для гиротрона с проектной рабочей частотой 258,6 ГГц и выходной мощностью порядка 100 Вт, работающего на второй гармонике гирочастоты.

Данный гиротрон предназначен для работы в непрерывном режиме с высокой стабильностью выходных параметров, его конструкция предусматривает аксиальный вывод энергии на рабочей моде. Для управления выходными параметрами был выбран тип пушки с изолированным анодом. Основные параметры гиротрона представлены в табл. 1.

Магнитная система гиротрона состоит из криомагнита (сверхпроводящего соленоида) с обмоткой из двух секций, а также дополнительной катодной катушки (в проектном режиме она не использовалась) для тонкой подстройки параметров электронного пучка.

1. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ И ТРАЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗ МИП ГИРОТРОНА

Необходимо отметить, что при одинаковом радиусе R_0 расположения ведущих центров электронного пучка в рабочем пространстве электронно-оптические системы гиротронов на второй гармонике циклотронной частоты отличаются от систем гиротронов на основном циклотронном резонансе меньшей величиной перематничивания $\alpha = B_0/B_k$ (отношением величин магнитного

поля в рабочем пространстве и на катоде), которая пропорциональна $B_0^{2/3}$ [9]. Это обстоятельство определяет меньший радиус катода. Снижение вдвое величины B_0 ведёт также к большему подъёму траектории электронов над эмиттером. Последний фактор обуславливает меньшую зависимость разброса скоростей электронов от шероховатости эмиттера, которая играет всё более заметную роль с повышением частоты [7].

Предварительные оценки параметров МИП выполнялись на базе адиабатической теории (см. соответствующие формулы в обзорах [9, 10]). Радиус расположения ведущих центров электронного пучка в рабочем пространстве для выбранной моды TE_{23} [11, 12] с направлением вращения, встречным вращению электронов, составляет $R_0 = 0,984$ мм. Свободным параметром в указанных адиабатических формулах является величина «холодного» электрического поля на катоде E_k . Величина E_k ограничена сверху полем пробоя в вакууме (при давлениях $10^{-7} \div 10^{-6}$ мм рт. ст. это $10 \div 20$ кВ/мм), а снизу — чрезмерным возмущением распределения скоростей в винтовом электронном пучке пространственным зарядом пучка при малых E_k [7–10]. Опыт разработки МИП гиротронов показывает [8], что для снижения роли последнего фактора целесообразно сохранять $E_k > 2 \div 3$ кВ/мм. Оценки показывают, что для выполнения указанного неравенства необходимо ограничиться весьма малым радиусом R_k эмиттера катода — не более 5 мм — и одновременно резко увеличить угол ψ наклона образующей поверхности эмиттера к оси системы (до $30^\circ \div 50^\circ$). Увеличение ψ , кроме того, способствует формированию ламинарного пучка, характеризующегося пониженным влиянием кулоновских сил на разброс скоростей электронов [9, 10]. Предварительные аналитические оценки позволили остановиться на варианте с коэффициентом компрессии магнитного поля $\alpha = 25$, $R_k = 5$ мм, $E_k = 3$ кВ/мм, $\psi = 50^\circ$. На рис. 1 показана типичная конфигурация МИП с напряжением анод–катод $U_a = 10$ кВ, траектории электронов и распределение магнитного поля.

Последующая оптимизация проводилась по программе траекторного анализа ЭПОС [10]. Рассматривалась триодная конструкция пушки, обеспечивающая более гибкое управление параметрами пучка с потенциалом первого анода относительно катода $U_a \approx (0,5 \div 0,7) U_0$. Предварительная численная оптимизация осуществлялась по самосогласованной модели [10], учитывающей реальное двумерное распределение магнитного поля фокусирующей системы, электрическое поле электродов пушки и кулоновское поле пучка. При этом начальные скорости электронов v_0 в точках старта с эмиттера полагались равными нулю (модель с нулевыми начальными скоростями). Окончательная оптимизация проводилась в рамках более сложной модели [13], учитывающей дополнительно такие факторы, как тепловые скорости электронов в момент старта и влияние

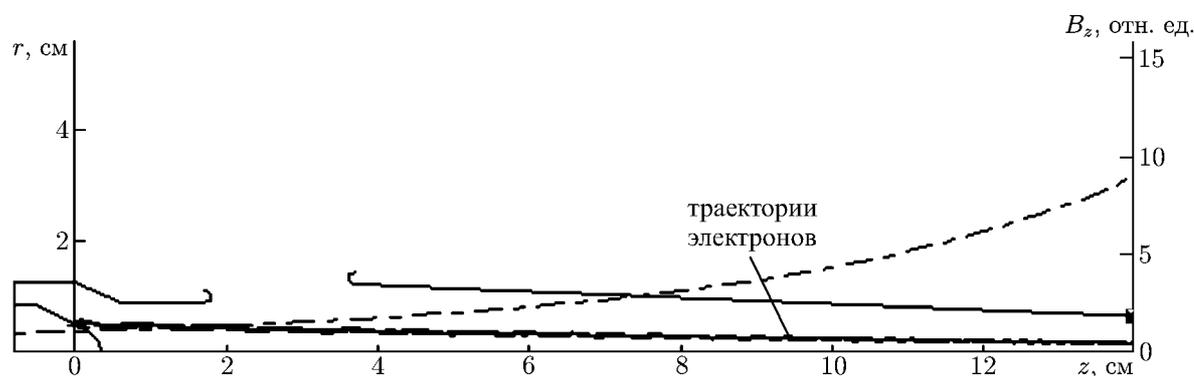


Рис. 1. Конфигурация электродов МИП (сплошные линии) с потенциалом первого анода $U_a = 10$ кВ, траектории электронов и зависимость магнитного поля B_z от продольной координаты z (штриховая линия); r — радиальная координата

шероховатостей эмиттера. Модель [13] позволяла также вычислить функцию распределения электронов по осцилляторным скоростям $f(v_{\perp})$ в рабочем пространстве и по её виду оценить степень устойчивости электронного пучка в рабочих режимах (соответствующая методика подробно изложена в [8]). Во внимание принимались и технические ограничения, например связанные с креплением подогревателя катода.

Расчёт был начат с варианта, при котором $\psi = 50^{\circ}$. Поскольку оптимизация МИП показала умеренное влияние пространственного заряда на относительный разброс осцилляторных скоростей δv_{\perp} (по данным моноскоростной модели разброс δv_{\perp} увеличивается всего на $3 \div 4\%$ при возрастании тока пучка I от 0 до рабочего значения 0,5 А), то далее были также рассмотрены пушки с меньшими углами наклона образующей поверхности эмиттера к оси системы: $\psi = 30^{\circ}, 35^{\circ}, 40^{\circ}$ и 45° (отметим, что ламинарность пучка и сопутствующее ему умеренное влияние кулоновских сил на его параметры сохраняется до $\psi = 27^{\circ}$). Для каждого угла ψ проводилась оптимизация как формы электродов, так и потенциала первого анода U_a , чтобы обеспечить в рабочем режиме (ток пучка 0,5 А) величину пгч-фактора g , близкую к 1,2. Отметим, что отношение t_j рабочего тока пучка к ленгмюровскому току МИП для всех рассмотренных вариантов пушек близко к 0,1, т. е. параметр пространственного заряда t_j достаточно велик.

Расчётные данные для моноскоростной модели показывают, что существует оптимальный диапазон углов $35^{\circ} \leq \psi \leq 45^{\circ}$. В этом случае δv_{\perp} увеличивается от $5,5 \div 6\%$ при $I = 0$ до $10 \div 11\%$ при $I = 0,5$ А. Пушка с $\psi = 30^{\circ}$ отличается слишком большим влиянием поля пространственного заряда на разброс скоростей, а пушка с $\psi = 50^{\circ}$ — относительно большой величиной позиционного разброса скоростей. Кроме того, для указанных значений ψ характерны большая чувствительность пгч-фактора к величине тока пучка и большее значение итогового (полного) разброса скоростей при номинальном рабочем токе.

Триодная конструкция пушки приводит к возникновению иммерсионной линзы между первым и вторым анодами пушки и формированию неоднородного электрического поля между электродами указанной линзы, приводящего за счёт неадиабатического движения частиц к дополнительному возмущению распределения скоростей. Для снижения роли указанного фактора целесообразно уменьшать разность потенциалов $U_0 - U_a$ между электродами линзы вплоть до реализации диодного режима работы ($U_0 = U_a = 15$ кВ). Однако траекторный анализ показывает, что реализация диодного режима с $g \approx 1,2 \div 1,4$ оказывается практически невозможной, поскольку требует чрезмерно больших габаритов первого анода (отношение радиусов анода R_a и катода R_k превышает 10). В результате был выбран компромиссный вариант с $U_a \approx 10$ кВ ($R_a/R_k \approx 2,5$), характеризующийся достаточно малым возмущением распределения скоростей.

Для МИП гиротронов миллиметрового диапазона длин волн принципиально важным фактором, влияющим на характеристики винтового электронного пучка, является влияние шероховатостей эмиттера [7, 9]. Роль этого фактора увеличивается по мере укорочения длины волны и в миллиметровом диапазоне часто оказывается даже больше, чем возмущение распределения скоростей, вносимое полем пространственного заряда пучка [7–9] (см. также ниже). Поэтому окончательная оптимизация МИП коротковолновой части миллиметрового диапазона должна проводиться с использованием более полной модели, учитывающей шероховатости эмиттера [13]. Это позволяет более адекватно вычислить величину разброса скоростей и провести предварительную оценку степени устойчивости пучка в рабочем режиме по виду функции распределения $f(v_{\perp})$.

Анализировались все рассмотренные выше варианты пушек с углами ψ , лежащими в интервале от 30° до 50° . Из аналитических оценок [9] следует, что разброс скоростей, связанный с

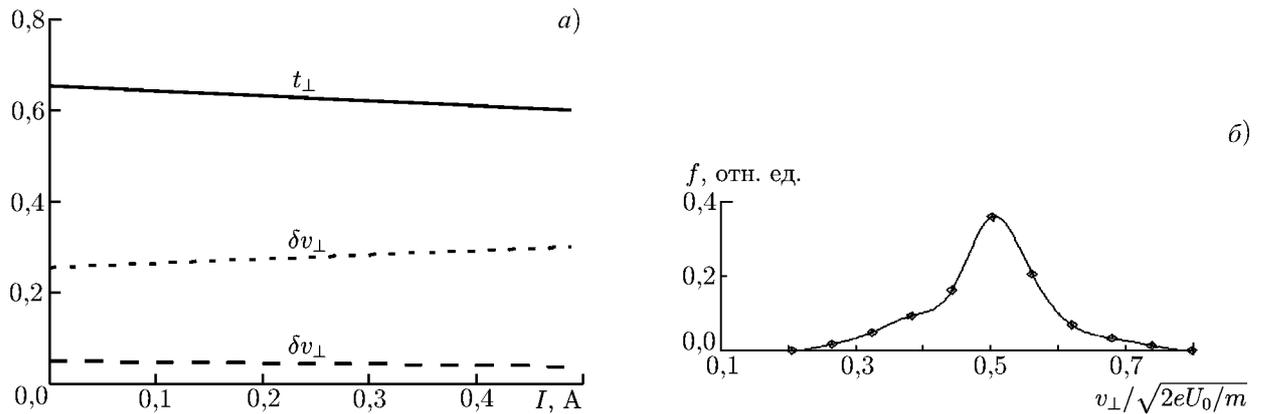


Рис. 2. (а) Расчётные зависимости разброса скоростей электронов и относительной энергии осцилляторного движения от тока пучка. (б) Расчётная функция распределения по осцилляторным скоростям $f(v_{\perp})$; здесь $e > 0$ и m — элементарный заряд и масса электрона соответственно

шероховатостью эмиттера, вычисляется по формуле.

$$\delta v_{\perp} = 1,6 \sqrt{\left(1 + \frac{\pi^2}{4} \operatorname{tg}^2 \phi\right) \frac{r_0}{h}}. \quad (1)$$

Здесь h — высота подъёма электронной траектории над эмиттером, r_0 — средняя высота шероховатостей, ϕ — угол наклона магнитного поля к поверхности эмиттера. Формула (1) может быть также записана в виде

$$\delta v_{\perp} = k r_0^{1/2} B_0^{1/3} t_{\perp}^{-1/3} E_k^{1/6} U_0^{-1/3}, \quad (2)$$

где B_0 — магнитное поле в резонаторе, E_k — электрическое поле на эмиттере, U_0 — ускоряющее напряжение, t_{\perp} — относительная энергия осцилляторного движения, k — коэффициент пропорциональности, не зависящий от режима работы. Из выражения (2) следует, что работа на гирогармониках благоприятна для повышения качества формируемого пучка, а понижение ускоряющего напряжения, напротив, ухудшает ситуацию.

Расчёт проводился для размера шероховатости $r_0 = 20$ мкм. В нашем случае из оценок следует, что разброс скоростей, связанный с шероховатостью, составляет $\delta v_{\perp} \approx 0,27$. Поэтому при численном моделировании функция распределения электронов по начальным скоростям (см. подробнее [13]) подбиралась таким образом, чтобы в случае предельно малых токов получить значение разброса скоростей, близкое к указанной выше величине. Функция распределения по начальным скоростям полагалась близкой к гауссовой.

Расчётные параметры пучка — относительная энергия осцилляторного движения t_{\perp} и разброс скоростей δv_{\perp} как функции тока пучка приведены на рис. 2а. Нижняя зависимость $\delta v_{\perp}(I)$ получена без учёта влияния начальных скоростей, верхняя — с учётом указанного фактора. Анализ функций распределения по осцилляторным скоростям $f(v_{\perp})$ при рабочем токе $I = 0,5$ А показал, что предпочтительными являются варианты с $\psi = 35^\circ$ и 40° , поскольку для них функция $f(v_{\perp})$ (см. рис. 2б) остаётся унимодальной при токе пучка, лежащем в интервале от нуля до рабочего. В остальных случаях функция $f(v_{\perp})$ трансформируется из квазигауссовой при $I \approx 0$ в многогорбую при $I = 0,5$ А, что согласно [8] является признаком потери устойчивости пучка в рабочих режимах. Кроме того, прирост разброса скоростей электронов $\Delta \delta v_{\perp}$, вызванного пространственным зарядом, существенно зависит от угла ψ . Диапазон углов $\psi = 35^\circ \div 40^\circ$ характеризуется наименьшим приростом скоростей разброса (величина $\Delta \delta v_{\perp}$ близка к $6 \div 10\%$). Для значений ψ ,

лежащих вне указанного диапазона углов, величина $\Delta\delta v_{\perp}$ составляет 16÷19%. В оптимизированном варианте МИП ($\psi = 35^{\circ}$) величина δv_{\perp} , вычисленная по уровням 0,1, 0,9 кривой отсечки коллекторного тока, меняется от 24% до 30% при увеличении тока от нуля до рабочего.

Завершающий этап оптимизации пушки заключался в проверке пушки на критичность к сдвигу катода и (или) сдвигу магнитной системы. Соответствующие расчёты показывают, что изменение продольного положения катода на $\pm 0,5$ мм практически не меняет разброс скоростей и приводит к вариации пичч-фактора не более, чем на 10% от номинальной величины. Аналогичные данные получаются при продольном сдвиге магнитной системы как целого на ± 1 мм от расчётного положения.

2. КОЛЛЕКТОРНАЯ СИСТЕМА ГИРОТРОНА

Важным элементом электронно-оптической системы является коллектор электронного пучка. Поскольку в проекте гиротрона предполагается прямой вывод выходного излучения, то коллектор одновременно является элементом волноводного тракта и должен проектироваться с учётом этого обстоятельства. При этом в нём не должно быть таких изменений формы, которые могут привести к нежелательным отражениям или паразитной трансформации выходного излучения. Исходя из вышеизложенного, был выбран коллектор цилиндрической формы с радиусом $R_{col} = 10$ мм (рис. 3), обусловленным апертурой выходного окна гиротрона [11]. Расчёт проводился в предположении равномерного распределения электронов пучка по фазам осцилляторного движения и радиусам расположения ведущих центров для наиболее энергетически нагруженного режима работы, когда генерация в гиротроне отсутствует. На рис. 3 показаны траектории электронов в коллекторной области без учёта разброса ведущих центров. Пунктиром указаны границы зоны оседания пучка с учётом разброса ведущих центров. Здесь же качественно приведено распределение плотности рассеиваемой мощности вдоль зоны оседания пучка. Согласно расчётным данным удельная плотность мощности рассеяния электронного пучка не превышает $0,4$ кВт/см², что является вполне приемлемой величиной.

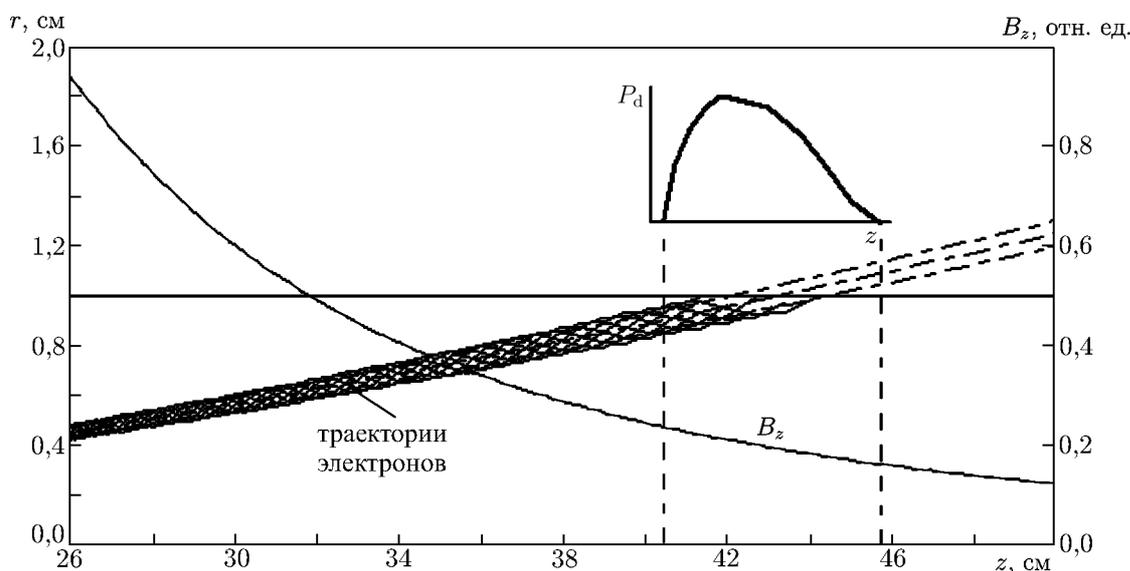


Рис. 3. Траектории электронов в коллекторной области и распределение плотности рассеиваемой мощности P_d вдоль зоны оседания пучка

3. КОНСТРУКЦИЯ МИП И ЕЁ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Триодная магнетронно-инжекторная пушка была спроектирована в виде металло-керамической конструкции (рис. 4). Эмиттер катода с диаметром 10 мм выполнен на основе гексаборида лантана. Подогреватель катода изготовлен из тугоплавкой вольфрамовой проволоки. Конструкция катода оптимизирована по уровню требуемой мощности подогревателя. Керамические изоляторы между анодом и катодом, между анодом и корпусом гиротрона и для вывода накала (рис. 4) подобраны с учётом используемых напряжений.

Пирометрирование изготовленного узла подогрева катода электронной пушки было выполнено в вакуумной камере при рабочих уровнях мощности подогревателя и температуры катода.

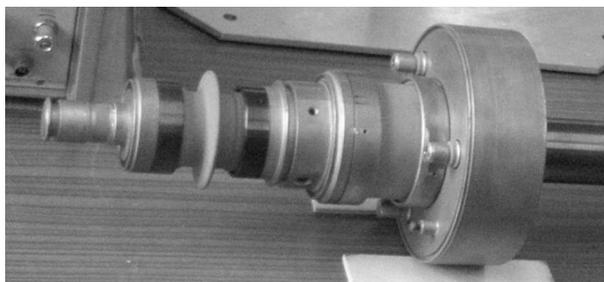


Рис. 4. Внешний вид электронной пушки



Рис. 5. Фотография нагретого катода

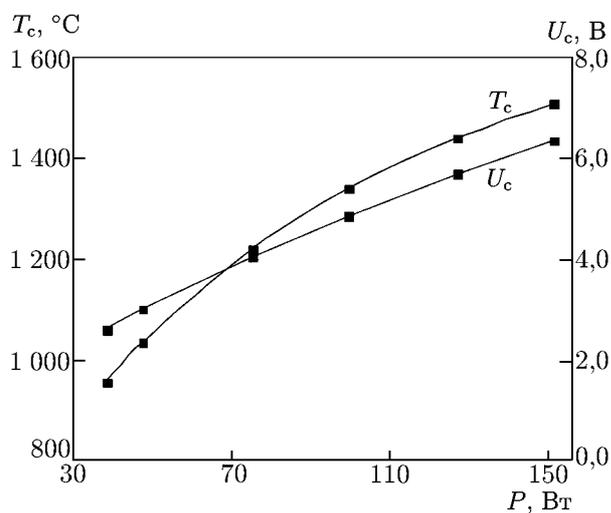


Рис. 6. Зависимости температуры T_c керна эмиттера и напряжения на подогревателе U_c от мощности подогрева P

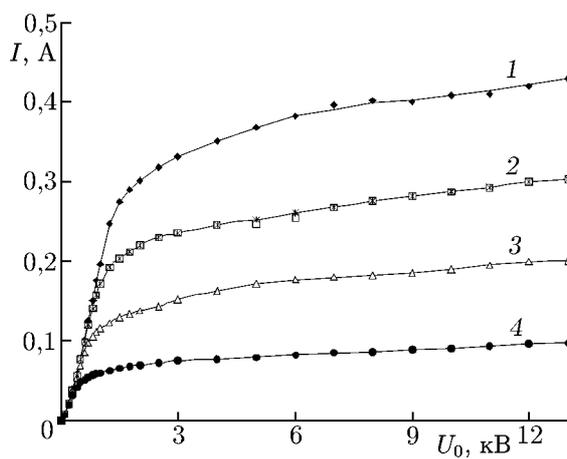


Рис. 7. Семейство вольт-амперных характеристик электронной пушки при различной мощности подогрева: кривая 1 соответствует наибольшему значению P , кривая 4 — наименьшему

Фотография нагретого катода представлена на рис. 5. Результаты пирометрирования в виде зависимостей температуры ядра эмиттера от мощности подогрева показаны на рис. 6.

После изготовления и откачки гиротрона с разработанной электронной пушкой было проведено тестирование прибора и в непрерывном режиме работы снято семейство её вольт-амперных характеристик. Указанные характеристики приведены на рис. 7. На них чётко видны область пространственного заряда, характерный перегиб и область сравнительно медленного нарастания тока, обусловленного эффектом Шоттки. Типичное значение мощности подогревателя в рабочих режимах составляло $60 \div 80$ Вт.

Проектные характеристики гиротрона с описанной МИП [11, 12] были реализованы в ходе последующих экспериментальных исследований при уровне выходной мощности порядка 100 Вт [14], что косвенно подтверждает реализацию приемлемых параметров винтового электронного пучка в рабочем режиме. Результаты экспериментальных испытаний гиротрона на второй гармонике гирочастоты с разработанной электронно-оптической системой будут подробно изложены в отдельной статье.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спроектирована и изготовлена система формирования и транспортировки электронного пучка для высокостабильного гиротрона с рабочей частотой 258 ГГц для спектроскопии методом ядерного магнитного резонанса. Электронная пушка позволяет реализовать в гиротроне устойчивый винтовой электронный пучок с параметрами, приемлемыми для генерации СВЧ излучения. Для снижения влияния роли пространственного заряда магнетронно-инжекторная пушка гиротрона формирует ламинарный в прикатодной области электронный пучок. Показано, что даже при больших углах наклона эмиттера МИП к оси системы, обеспечивающих формирование ламинарного ВЭП, существует область оптимальных углов, для которой разброс скоростей электронов минимален. Экспериментальное исследование параметров МИП, включавшее пирометрирование катода и изучение вольт-амперных характеристик пушки, подтвердили возможность её использования в гиротроне, предназначенном для спектроскопии методом ядерного магнитного резонанса, где с её помощью была получена проектная выходная мощность порядка 100 Вт на частоте 258 ГГц. Результаты экспериментальных испытаний гиротрона с разработанной электронно-оптической системой будут изложены в отдельной статье.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 08-02-00668-а) и Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bajaj V., Farrar C., Hornstein M., et al. // J. Magnetic Resonance. 2002. V. 160. P. 85.
2. Bajaj V. S., Hornstein M. K., Kreisher K. E., et al. // J. Magnetic Resonance. 2007. V. 189. P. 251.
3. Idehara T., Ogawa I., Agusu La, et al. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 2007. V. 28. P. 433.
4. Hornstein M. K., Bajaj V. S., Griffin R. G., Temkin R. J. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2007. V. 35, No. 1. P. 27.
5. Гольденберг А. Л., Денисов Г. Г., Запевалов В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39, № 6. С. 635.
6. Nusinovich G. S. Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore, London: The Johns Hopkins University Press, 2004. 355 p.

7. Tsimring Sh. E. *Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics*. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 2007. 485 p.
8. Kuftin A. N., Lygin V. K., Manuilov V. N., et al. // *Int. J. Infrared Millimeter Waves*. 1999. V. 20, No. 3. P. 361.
9. Tsimring Sh. E. // *Int. J. Infrared Millimeter Waves*. 2001. V. 22. P. 1433.
10. Krivosheev P. V., Lygin V. K., Manuilov V. N., Tsimring Sh. E. // *Int. J. Infrared Millimeter Waves*. 2001. V. 22, No. 8. P. 1119.
11. Zapevalov V. E., Fix A. Sh., Kopelovich E. A., et al. // *Proceedings of Strong microwaves: Sources and Applications. VII International Workshop*. Nizhny Novgorod. P. 117.
12. Завольский Н. А., Запечалов В. Е., Малыгин О. В. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2009. Т. 52, № 5–6. С. 541.
13. Lygin V. K. // *Int. J. Infrared Millimeter Waves*. 1995. V. 16, No. 2. P. 363.
14. Zapevalov V. E., Dubrov V. V., Fix A. Sh., et al. // *34th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 17th Int. Conference on Terahertz Electronics*, 2009, Sept. 20–Sept. 27, Busan, Korea: *Conference Digest*. P. W3D04.0389.

Поступила в редакцию 18 февраля 2010 г.; принята в печать 29 апреля 2010 г.

SYSTEM FOR ELECTRON BEAM FORMATION IN THE 258 GHz GYROTRON DESIGNED FOR EXPERIMENTS ON DYNAMIC POLARIZATION OF NUCLEI

*V. E. Zapevalov, S. Yu. Kornishin, A. V. Kotov, A. N. Kuftin, O. V. Malygin, V. N. Manuilov,
A. S. Sedov, and V. I. Tsalolikhin*

We consider peculiarities of the system, which forms the electron beam in a continuous-wave high-stability gyrotron operated at the second gyrofrequency harmonic and an operating frequency of 258 GHz. The problems connected with the maintenance of the required beam parameters are analyzed. The procedure and results of numerical simulation of the electron beam and the gyrotron collector are described. The influence of different physical factors on the parameters of the electron-optical system of the gyrotron are studied. The design of the electron beam formation system is described along with the results of measuring its parameters.