

09:10

Измерение разброса начальной энергии электронов в гиротроне

© Н.П. Венедиктов, М.Ю. Глявин, А.Л. Гольденберг, В.Е. Запевалов, А.Н. Куфтин, А.С. Постникова

Институт прикладной физики РАН,
603600 Нижний Новгород, Россия

(Поступило в Редакцию 3 июня 1997 г. В окончательной редакции 22 февраля 1999 г.)

Описан анализатор, предназначенный для измерения энергии электронов в гиротронах. В экспериментальном гиротроне найдены энергетические спектры в различных режимах. Показано, что даже в отсутствие СВЧ генерации разброс энергий электронов, обусловленный эффектами пространственного заряда, может достигать нескольких процентов.

Введение

Хорошо известной особенностью гиротрона [1–3] является его слабая критичность к разбросу поступательных (вдоль ведущего магнитного поля) скоростей частиц. Это свойство обусловлено квазипоперечностью распространения рабочей волны, что обеспечивает малость доплеровского уширения линии циклотронного резонанса. В то же время очевидно, что вследствие релятивистской зависимости частоты вращения электронов

$$\omega_B = \frac{eBc}{E} \quad (1)$$

от их энергии E слаборелятивистский гиротрон, в рабочем пространстве которого частицы совершают обычно большое число $N \gg 1$ циклотронных вращений, должен быть весьма чувствительным к разбросу начальной энергии частиц. Соответствующая элементарная оценка $\Delta E/E \ll 1/N$, немедленно следующая из условия поддержания циклотронного резонанса для всех частиц, подтверждается, например, расчетом [4], где показано, что разброс начальной энергии в несколько процентов существенно снижает эффективность гиротрона. Существует немало возможностей возникновения заметного энергетического разброса частиц перед их входом в рабочее пространство гиротрона, связанных, например, с возбуждением паразитных колебаний или развитием собственных неустойчивостей в плотных пучках в пространстве формирования. Возможно, именно этими причинами объясняется некоторый недобор КПД в мощных гиротронах по сравнению с расчетными значениями.

Данная работа посвящена измерению энергетического разброса в электронном пучке гиротрона.

Метод измерения и экспериментальная установка

Для экспериментального определения энергетического спектра электронов можно воспользоваться методом тормозящего поля, который позволяет найти распределение поступательных скоростей электронов по зависимости тока пучка, попадающего на мишень, от тормозящего напряжения. Анализаторы с тормозящим элек-

трическим полем, устанавливаемые в области резонатора [4], позволяют оценить разброс компонент скорости в предположении равенства энергии электронов в пучке. Обычно такие измерения можно выполнить только в моделирующих режимах, т. е. при пониженных значениях магнитной индукции B , напряжения U и тока пучка I . Эти величины выбираются исходя из соотношений подобия, обеспечивающих неизменность невозмущенных (в пренебрежении неустойчивостью отрицательной массы (НОМ)) траекторий электронов

$$B_{\text{mod}} = B_{\text{op}}/k^{1/2}, \quad U_{\text{mod}} = U_{\text{op}}/k, \quad I_{\text{mod}} = I_{\text{op}}/k^{3/2}, \quad (2)$$

где k — коэффициент моделирования, индекс mod соответствует моделирующему режиму, а op — рабочему режиму, в котором гиротрон с данной электронной пушкой имеет расчетную выходную мощность и КПД. Распределение компонент скоростей электронов в винтовом пучке гиротрона принято характеризовать величиной относительного разброса вращательных скоростей

$$\delta\nu_{\perp} = \Delta\nu_{\perp}/\bar{\nu}_{\perp},$$

где $\bar{\nu}_{\perp}$ — средняя скорость вращения; $\Delta\nu_{\perp}$ — интервал скоростей, из которого исключены минимальные и максимальные скорости электронов, токи которых составляют по 10% от полного тока пучка.

В мощных гиротронах величина разброса $\delta\nu_{\perp}$ близка к 20% или несколько больше, что приводит к снижению КПД с 50–60%, достижимых в отсутствие разброса скоростей, до 30–40%.

Необходимость использования моделирующего режима при измерениях в области резонатора обычно связана с тем, что при рабочих параметрах пучка даже в импульсном режиме невозможно избежать пробоя или разрушения мишени из-за малых размеров деталей анализатора и зазоров между ними. В отличие от этого анализатор, предложенный в [5] и используемый в данной работе, позволяет проводить измерения не только в моделирующем режиме, но и при рабочих напряжениях пучка (порядка нескольких десятков киловольт), а также измерять разброс полной скорости электронов.

Данный анализатор (рис. 1) размещен в трубе, соединенной к коллектору гиротрона, описанного в [6,7],

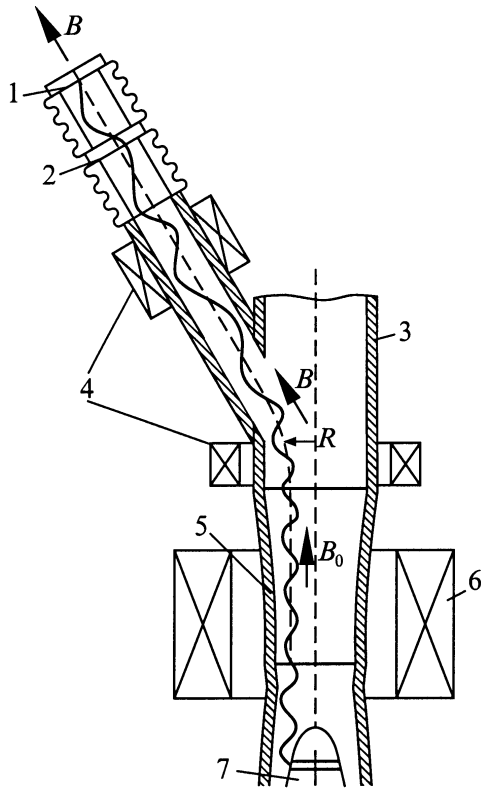


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 — мишень анализатора, 2 — сетка, 3 — коллектор, 4 — дополнительный соленоид, 5 — резонатор гиротрона, 6 — основной соленоид, 7 — электронная пушка.

под углом, совпадающим с углом наклона силовой линии магнитного поля. Через узкую продольную щель, прорезанную в коллекторе, электроны попадают в эту трубу и движутся к мишени, установленной перпендикулярно силовой линии магнитного поля, величина которого в этой области много меньше, чем на коллекторе и тем более в резонаторе. По пути электроны подвергаются торможению электрическим полем и по зависимости тока на мишень от тормозящего напряжения определяются скорости электронов.

Из траекторного анализа следует, что движение электронов в пучке вплоть до мишени анализатора достаточно точно описывается адиабатическим приближением. В области коллектора (щели) магнитное поле меньше, чем в резонаторе, в 25 раз, а в области мишени — в 400 раз. Используя адиабатический инвариант $\nu_{\perp}^2/B = \text{const}$, находим, что в области тормозящего поля анализатора вращательные скорости электронов примерно в 20 раз меньше, чем их поступательные скорости вдоль магнитного поля. Таким образом, метод тормозящего поля в данной системе позволяет определить полную скорость (энергию) электронов, с которой они поступают в коллекторную область. Функция распределения электронов по энергии определяется как производная от тока коллектора по напряжению тормозящей сетки, а величину

разброса энергии будем определять как

$$\delta\varepsilon = \frac{U_{0.1} - U_{0.9}}{U_0},$$

где $U_{0.9}$ и $U_{0.1}$ — напряжения сетки, при которых ток мишени равен соответственно 0.9 и 0.1 максимальной величины; U_0 — полное напряжение пучка, определяющее максимальную энергию электронов.

Мишень анализатора выполнялась в двух вариантах: либо металлической, либо стеклянной с нанесенным на нее слоем люминофора. Щель в коллекторе шириной около 3 мм пропускала в анализатор примерно 1% полного тока. Ширина щели определялась требованием, чтобы сигнал с мишени существенно превышал шумы в системе автоматизированной обработки данных.

Рабочее магнитное поле гиротрона создавалось сверхпроводящим соленоидом, помещенным в криостат. Для того чтобы обеспечить попадание электронов примерно в центр мишени, использовались дополнительные катушки в области коллектора и по пути движения электронного потока, а также небольшие постоянные магниты, корректирующие магнитное поле в области мишени анализатора. Тем не менее, поскольку магнитное поле в области анализатора было слабым и потому подверженным влиянию возмущающих внешних полей, не удалось избежать задевания пучка за трубу анализатора, приведшего, как показали измерения, к систематической ошибке в определении разброса энергии. Для первоначальной настройки использовалась стеклянная мишень, а для измерений энергии электронов — металлическая, которая покрывалась слоем циркония для уменьшения вторичной электронной эмиссии при бомбардировке электронным пучком.

Экспериментальные результаты

Хотя анализатор проектировался для работы с тормозящим напряжением до 70 кВ и более и испытывался с таким напряжением, преобладающая часть измерений энергетического спектра электронов проводилась в моделирующем режиме, т.е. при пониженных напряжениях и токе пучка. Это позволило избежать искажений энергетического спектра частиц, возникающих при возбуждении мощных ВЧ колебаний в рабочем пространстве гиротрона. Основные рабочие параметры исследуемого короткоимпульсного гиротрона следующие: тип колебаний — $TE_{11,3}$, рабочая частота 83 GHz, выходная мощность 1 MW, длительность импульса 100 μs , ускоряющее напряжение 70 кВ, максимальный ток пучка 40 А, пичфактор 1.3, магнитное поле 30 кОе.

Коэффициент моделирования для моделирующего режима k принимался равным 10. При этом значения основных параметров гиротрона в моделирующем режиме $U_{\text{mod}} = 7 \text{ kV}$, $I_{\text{mod}} \approx 1 \text{ A}$, $B_{\text{mod}} \approx 10 \text{ kOe}$. В ходе экспериментов изменялись магнитное поле и ток пучка.

Измерение скоростей электронов попадающей в анализатор части пучка проводилось следующим образом.

На катод гиротрона подавался прямоугольный импульс, а на сетку анализатора — треугольный импульс той же полярности с максимальной амплитудой, превышающей амплитуду импульса катодного напряжения на 20%. Сигналы, пропорциональные току мишени и тормозящему напряжению, поступали в автоматизированную систему сбора и обработки данных. В экспериментах использовалась система на основе модуля "КАМАК" и компьютеров HiCom(Dec) и IBM PC. Автоматизация процесса сбора и обработки данных обеспечила получение большого числа точек на кривой отсечки и высокую скорость измерений. Это позволило уменьшить ошибки, связанные с нестабильностью источников питания, и получить большой массив данных, повышающий достоверность результатов измерений.

Значения тока мишени и напряжения на сетке заносились в соответствующие буферы памяти с заданной частотой. Полученные данные записывались на диск для вторичной обработки и выводились на экран монитора. Для повышения точности измерений и избавления от шумовых помех применялось переключение диапазонов АЦП в зависимости от уровня сигналов. Точность измерений параметров электронного пучка существенно зависела от качества юстировки пучка в трубке дрейфа и точности калибровки, определяющей коэффициенты пересчета сигналов. Калибровка АЦП осуществлялась подачей на ЭВМ и осциллограф калибровочного сигнала и подбором соответствующего коэффициента пересчета. При этом точность определялась чувствительностью шкалы осциллографа и составляла около 2%. Требуемая относительная точность измерения регистрируемых сигналов составляла 1–2%. Контроль точности измерений осуществлялся при малых токах пучка, когда энергетический разброс должен быть пренебрежимо малым.

Одним из основных источников ошибок при измерениях могли быть наводки, возникающие в измерительной аппаратуре при формировании и подаче на гиротрон высоковольтного импульса ускоряющего напряжения. Для подавления помех при обработке сигнала использовалось вычитание сигнала, возникающего в измерительной аппаратуре в отсутствие тока эмиссии. В результате принятых мер ошибка измерений, связанная с электрическими наводками в системе, составляла около 0.5%, что проверялось по калибровочным сигналам.

Еще один источник ошибок при измерениях, как уже упоминалось выше, был связан с задеванием электронами стенки трубы анализатора, происходящим, по видимому, из-за искажений магнитного поля в этой области. Попытки скорректировать траекторию электронов слабыми локальными полями с помощью постоянных магнитов результата не дали. Указанный эффект приводил к появлению систематической ошибки измерений разброса энергии около 5% даже при достаточно малой величине пространственного заряда (рис. 2) (рост измеренного разброса при малых магнитных полях обусловлен неустойчивостью, связанной с захватом электронов в магнитную ловушку в пространстве дрейфа электро-

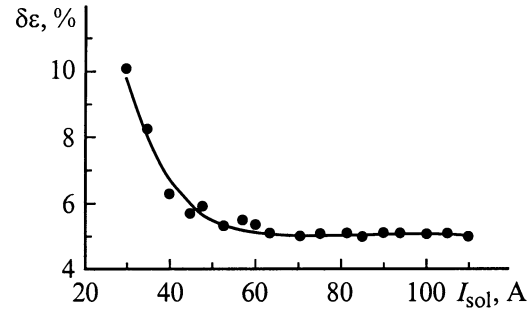


Рис. 2. Зависимость разброса электронов по энергии от тока (магнитного поля) соленоида в моделирующем режиме при малом электронном токе.

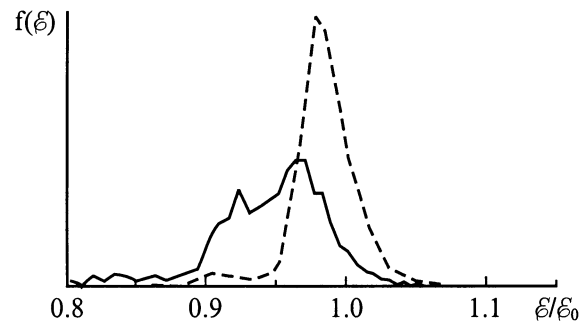


Рис. 3. Функции распределения электронов по энергии при малом (сплошная кривая) и рабочем (штриховая кривая) магнитных полях.

нов от катода к резонатору гиротрона). При обработке экспериментальных результатов данная систематическая погрешность вычиталась из найденного значения энергетического разброса. Поскольку систематическая погрешность, связанная с задеванием пучка за стенку трубы анализатора, зависит от начальной энергии, то все измерения проводились при одном фиксированном напряжении электронного пучка.

Зависимость тока от тормозящего напряжения на сетке анализатора представляет собой ступеньку, крутизна которой определяется энергетическим разбросом. Для двух режимов нормированные кривые производных этой зависимости по тормозящему напряжению, характеризующие энергетическое распределение электронов, показаны на рис. 3. Узкая функция распределения (штриховая кривая) получена при малом токе пучка (20% от тока, соответствующего в моделирующем режиме рабочему значению) и высоком магнитном поле, что обеспечивало малое число отраженных электронов, малую плотность пространственного заряда и, как следствие, малые возмущения в пучке под действием его собственных полей. Систематическая ошибка измерения, о которой говорилось выше, привела к уширению распределения примерно на 5% и соответствующему сдвигу максимума функции распределения в сторону меньших значений энергии на 2–2.5%. Если исключить этот сдвиг, то уширение

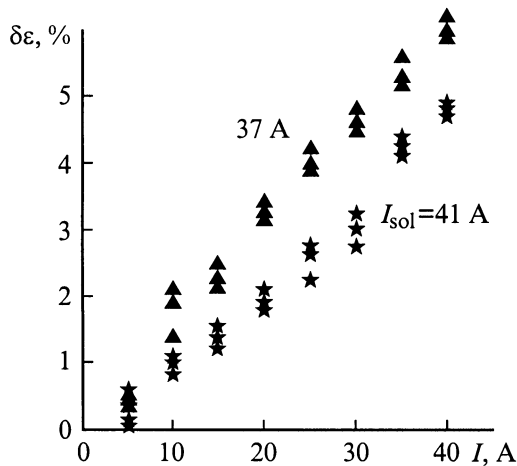


Рис. 4. Зависимость энергетического разброса электронов от тока в моделирующем режиме гиротрона при различных токах в соленоиде.

спектров при различных токах и магнитных полях $B \geq B_0$ (B_0 — магнитное поле моделирующего режима, соответствующее оптимальному режиму генерации гиротрона) происходит одинаково в стороны больших и меньших значений энергии, что свидетельствует об энергообмене между электронами пучка. Широкая функция распределения энергии измерена при большом токе моделирующего режима, соответствующем максимальному току гиротрона, и магнитном поле, близком к пробочному режиму ($B < B_0$). При этом значительное количество электронов отражается от магнитной пробки и возникают паразитные колебания, о чем свидетельствует дополнительное уширение спектра и уменьшение средней энергии частиц, связанное с потерей энергии пучка на излучение.

Графики зависимости энергетического разброса от тока пучка при двух значениях магнитного поля B_0 и $0.9B_0$ приведены на рис. 4 (параметры гиротрона — магнитное поле, напряжение, ток пучка даны в пересчете к рабочему режиму). Для номинального магнитного поля B_0 при изменении тока от 5 до 40 А (последнее соответствует генерируемой выходной мощности около 1 МВт при КПД более 40% [6,7]), энергетический разброс возрастает с ростом тока пучка. При поле $0.9B_0$, значительно отличающемся от рабочего, разброс сравнительно немного превышает разброс при таких же токах и магнитном поле B_0 номинального режима.

Заключение

Таким образом, предложенная методика измерения разброса энергии в электронном пучке гиротрона позволила экспериментально получить характерные энергетические спектры для различных режимов. Полученные результаты свидетельствуют, что в моделирующем режиме разброс энергии электронов в пучке, формируемом стан-

дартной электронной пушкой гиротрона, в отсутствие взаимодействия частиц с ВЧ полем возрастает с ростом пространственного заряда (тока пучка) и для рабочих значений тока на выходе из системы составляет несколько процентов. В качестве наиболее вероятной причины возможно развитие универсальной для гиротронов собственной неустойчивости типа НОМ [8,9]. Эта неустойчивость, может в принципе обеспечить конвективное усиление возмущений и появление энергетического разброса в электронном пучке в процессе его формирования и движения от катода к рабочему резонатору гиротрона. Подробный анализ механизма развития НОМ и интерпретация экспериментальных результатов приводится в работе [10]. При снижении магнитного поля происходит уширение спектра. При относительно небольшом снижении магнитного поля этот эффект удается объяснить усилением НОМ. По мере дальнейшего уменьшения магнитного поля и увеличения числа частиц, отраженных от магнитной пробки, происходит дополнительное уширение спектра. Это уширение связано как с ростом полей пространственного заряда из-за увеличения числа отраженных электронов, так и с возникновением неустойчивостей в дрейфовом пространстве между катодом и магнитной пробкой.

Работа была поддержана АОЗТ НПП "ГИКОМ".

Список литературы

- [1] Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлпатов В.К. // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10. № 9–10. С. 1414–1453.
- [2] Flyagin V.A., Nusinovich G.S. // IEEE. 1988. Vol. 76. N 6. P. 644–656.
- [3] Гиротроны. Сб. науч. тр. / Под ред. В.А. Флягина. Горький: ИПФ АН СССР. 1989. 216 с.
- [4] Авдошин Е.Г., Гольденберг А.Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. № 10. С. 1605–1612.
- [5] Goldenberg A.L. // Digest 19th Intern. Conf. on Infrared and Millimeter Waves. Sendai, 1994. P. 349–350.
- [6] Венедиктов Н.П., Запезалов В.Е., Куфтин А.Н. // Гиротроны. Горький: ИПФ АН СССР, 1989. С. 12–19.
- [7] Flyagin V.A., Kuftin A.N., Luchinin A.G. et al. // Proc. Joint IAEA Tech. Committee Meeting on ECE and ECRH (EC-7 Joint Workshop). Hefei (China). P. 355–372.
- [8] Cai S.Y., Antonsen T.M., Jr., Saraph G., Levush B. // Int. J. Electron. 1992. Vol. 72. P. 759–766.
- [9] Братман В.Л. // ЖТФ. 1976. Т. 46. Вып. 10. С. 2030–2036.
- [10] Братман В.Л. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 4. С. 90–94.