

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
СО АН СССР

Э.И.Горникер, С.Н.Морозов, В.Е.Теряев,
И.А.Шехтман.

АНАЛИЗ ОГРАНИЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ
ГИРОКОНА НЕПРЕРЫВНОГО
ГЕНЕРИРОВАНИЯ МЕГАВАТТНОЙ
МОЩНОСТИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ
МЕТРОВОГО К ДЕЦИМЕТРОВОМУ
ДИАПАЗОНУ ВОЛН

ПРЕПРИНТ 83-46

НОВОСИБИРСК

Горнижер Э.И., Морозов С.Н., Теряев В.Е., Шехтман И.А.

АНАЛИЗ ОГРАНИЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ГИРОКОНА НЕПРЕРЫВНОГО
ГЕНЕРИРОВАНИЯ МЕГАВАТТНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ
МЕТРОВОГО К ДЕЦИМЕТРОВОМУ ДИАПАЗОНУ ВОЛН

А Н Н О Т А Ц И Я

Рассматриваются конструктивные схемы двухрезонаторных ги-
роконов на базе электронно-оптической и высоковольтной систем
гирокона, действующего на частоте 181 МГц, при переходе к час-
тоте 915 МГц. Низкая энергия электронов (200 ± 250 кэВ) ограничи-
вает мощность пучка в режиме непрерывного генерирования вели-
чинами $1 + 2$ МВт.

Анализируются две схемы: радиальный гирокон с ферромагнит-
ным отражателем и аксиальный гирокон с дополнительной фокуси-
ровкой развернутого пучка (т.н. гирокон с удлиненным лучом).
Вывод о возможности прохождения пучка мегаваттной мощности че-
рез электронно-оптические каналы в этих схемах делается на ос-
новании численного счета границ пучка в электростатической фор-
мирующей системе действующего гирокона при максимально возмож-
ном приближении магнитной фокусирующей линзы к анодному отвер-
стию ускоряющего зазора.

Коэффициент усиления, КПД, напряженность ВЧ электрическо-
го поля, удельная мощность, рассеиваемая в выходном резонаторе
и коллекторе, оцениваются с помощью приближенной теории ги-
рокона.

В сравнении с гирконом метрового диапазона тридцатисанти-
метровый гирокон имеет увеличенные (в 2,25 раза) потери в резо-
наторах и по геометрическим соображениям требует в 1,5 раза
большого угла развертки. Это приводит к снижению усиления. Что-
бы повысить коэффициент усиления без увеличения числа резонато-
ров, можно применить развертку луча с регенерацией ВЧ мощности.
Известные в ускорительной технике резонаторы с двумя зазорами, -
резонатор с дрейфовой трубкой или резонатор с шайбой (на π -ви-
де колебаний), - позволяют это сделать.

Таким образом, на частоте 915 МГц возможно, по-видимому,
создание двухрезонаторного гирокона непрерывного генерирования
мегаваттной мощности с КПД до 70% и коэффициентом усиления бо-
лее 20 дБ.

I. Для ВЧ питания ускоряющих резонаторов современных электрон-позитронных накопителей встречных пучков требуются уровни непрерывной мощности от сотен до тысяч киловатт в диапазоне метровых и дециметровых волн. В Институте ядерной физики СО АН СССР в 1977 году для накопителя ВЭПП-4 построен гирокон непрерывного генерирования [1,2] со следующими параметрами: рабочая частота 181 МГц, максимальная выходная мощность $P_{\text{вых}} = 400$ кВт при полном КПД $\eta = 75\%$ и коэффициенте усиления $K = 17$ дБ. Этот гирокон длительное время эксплуатировался на стенде для испытания ускоряющих резонаторов, а затем был включен в ВЧ систему накопителя ВЭПП-4, на котором были начаты эксперименты по точному определению массы $\sqrt{\quad}$ -мезона [3].

Высоковольтная и электронно-оптическая системы, а также система круговой развертки луча гирокона, были кратковременно опробованы в непрерывном режиме при мощности пучка $700 + 1000$ кВт и энергии электронов $220 + 260$ кэВ [2]. В связи с тем, что для ВЧ систем новых накопителей с повышенной энергией частиц становится оптимальным не метровый, а дециметровый диапазон волн, представляет интерес проанализировать возможности создания гирокона непрерывного генерирования мегаваттной мощности в тридцатисантиметровом^{ж)} диапазоне волн на базе высоковольтной и электронно-оптической систем действующего гирокона накопителя ВЭПП-4.

Анализ проведем для частоты 915 МГц^{жж)}. Уменьшение рабочей волны гирокона в пять раз приведет к соответствующему воз-

ж) Частота $900 + 1000$ МГц, по-видимому, близка к предельно высокой для ускоряющих резонаторов оптимальной формы, работающих в непрерывном режиме.

жж) Эта частота выделена ГКРЧ СССР для установок научного и промышленного применения [4].

растанию напряженности электрического поля в выходном резонаторе, а также тепловых нагрузок на стенки этого резонатора и коллектора. Однако, прежде всего, потребуется уменьшить примерно в пять раз поперечные размеры электронного луча и электроно-оптического канала гирокон, чтобы сохранить высокий электронный КПД. При этом зазоры между "границей" пучка и стенками канала также уменьшатся в пять раз в сравнении с зазорами в действующем гироконе. Возможность такого уменьшения зазоров, также как и допустимый уровень напряженности электрического поля в резонаторе в области прохождения мощного пучка, могут быть установлены только в процессе эксперимента на дециметровых волнах.

Ниже анализируются лишь такие ограничения, которые могут быть рассмотрены на основе теории гирокон [5]. Обсуждаются также возможные пути преодоления этих ограничений. Сравняются две разновидности конструктивных схем: аксиальный (рис.1) и радиальный (рис.2) гирокон [6]. Резонатор развертки в каждой из схем рассматривается в виде одиночного E_{H0} -резонатора с круговой поляризацией магнитного поля на оси [2] (рис.3).

2. Расчет и сравнение конструктивных схем ведутся при следующих исходных данных: мощность пучка $P_0 = 1000$ кВт, энергия электронов $eU_0 = 200$ кэВ, (микрореванс*) $\beta_m = 0,043$, длина рабочей волны $\lambda = 32,8$ см, начальный диаметр пучка $D \approx \frac{\lambda}{20} = 1,6$ см [1]. Принятые для расчета значения P_0 и eU_0 были получены экспериментально при хорошем (99%) токопрохождении через канал гирокон метрового диапазона волн [2]. Возможность получения начального диаметра пучка $D = 1,6$ см с помощью электростатической системы формирования луча этого гирокон показана путем численного счета границ пучка с учетом объемного заряда в реальной конструкции электронной пушки с максимально приближенной к аноду первой фокусирующей линзой (рис.4). Сравнимые конструктивные схемы оцениваются затем и при других исходных данных, - $P_0 = 2000$ кВт, $eU_0 = 250$ кВ, ($\beta_m = 0,043$), - которые экспериментально получены не были, но, по-видимому, достижимы на действующих высоковольтной и

* На релятивистских уровнях энергии имеется в виду $\beta_m \text{ экв} \approx \beta_m (1 + 10^{-6} U_0)^{-\frac{1}{2}}$ - "эквивалентный" микрореванс [7].

электронно-оптической системах гирокон накопителя ВЭШ-4.

3. Радиальный гирокон (рис.2) метрового диапазона волн не может быть подобно уменьшен в 5 раз из-за малых размеров центральной части выходного резонатора. Поэтому для дециметровых волн рассматривается без второй фокусирующей системы [2] и с ферромагнитным отражателем [7,8] минимального диаметра (рис. 5, 6). По заданной мощности луча и энергии электронов рассчитываются основные размеры электроно-оптического тракта гирокон на основе моделей свободно расходящегося оптимально сфокусированного параксиального пучка электронов и точечного магнитного отражателя [7] (Табл.1). Выбор угла развертки $\alpha = 0,15$ (рис.5) диктуется соотношениями (3), (4) (Табл.1), т.к. при $\alpha = 0,1$ (2) магнитная индукция в отражателе возрастает на порядок (4).

На основе плоской и коаксиальной моделей [6] рассчитывается выходной резонатор гирокон. При относительной скорости бегущей в нем волны $\beta = 1,84$ оптимальный пролетный зазор составит $b_0 \approx 0,2\lambda$ [6]. Радиусы цилиндров и высота оптимального по потерям выходного коаксиального H_{111} -резонатора составят $R_1 = b_0 = 0,2\lambda$, $R_2 = 0,4\lambda$, $H = 0,6\lambda$ (рис.5). Размеры щелей для прохода луча, - $\Delta H/R_1 \approx 2$ см, $\Delta H/R_2 \approx 4$ см, - определяются по размерам пучка (5) (табл.1) с учетом зазора между его "границей" и краем щели. Этот зазор принят равным радиусу пучка, а вблизи отражателя, где луч слабо развернут, - диаметру пучка (рис.6).

Электрическая прочность пролетного промежутка в плоской модели выходного резонатора характеризуется соотношением (6) [6]:

$$E_{min} \approx \frac{U_0}{\lambda} \pi \sqrt{\frac{\beta_0 + 1}{\beta_0 - 1}}, \quad (6)$$

где E_{min} - напряженность электрического поля в пучности при критическом режиме. Для принятых исходных данных $E_{min} \approx 47 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$. Однако, в коаксиальном H_{111} -резонаторе эта величина удваивается. Более точные оценки [6] дают значение $(E_{min})_{R_1} \approx 80 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$, а учет отличия пролетного зазора от оптимального за счет провисания поля в щели (полагаем, что пролетный промежуток увеличивается на половину размеров щелей) повышает это значение

приблизительно на 30%. Таким образом, $(E_{min})_{R_1} \approx 100 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$, что может явиться принципиальным ограничением для радиального ги-рокона. Экспериментальных данных о длительной работе в непре-рывном режиме на дециметровых волнах с такими полями - нет. Наиболее близкими - являются условия испытания ускоряющих ре-зонаторов ВЭП-4 [9]: частота 181 МГц, непрерывный режим, $E_{max} = 80 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$, длительность испытаний 2+3 часа. С укорочением волны электрическая прочность, по-видимому, возрастет, но бли-зость мощного электронного пучка может ее снизить.

По найденным размерам, амплитуде ВЧ напряжения ($U \approx 1,8 U_0$, [6]) и данным о материале стенок*) рассчитывается мощ-ность потерь в выходном коаксиальном H_{110} -резонаторе. Она составляет $P_{\Sigma} \approx 250$ кВт, из них $P_{\Sigma 1} \approx 115$ кВт - потери во внутреннем цилиндре, где плотность мощности достигает $P_{110} = 135 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$. Примерно такая же удельная мощность рассеивает-ся в коллекторе, размеры активной части которого выбраны так, как показано на рис.5 (глубина коллектора $l_k = 0,6 \lambda$, длина окружности входа в коллектор $l_{окр} = 2\pi \lambda$). Если пучок мощностью $P_0 = 1000$ кВт равномерно распределен по коллектору, удельная мощность составит $P_{уд.колл.} = 125 \frac{\text{Вт}^2}{\text{см}}$. Такие тепловые нагрузки на стенки резонатора и коллектора хотя и высоки, но не являются принципиальным ограничением.

Угол развертки (Табл.1), мощность пучка и энергия электро-нов служат исходными для расчета E_{110} -резонатора развертки [2,10] (рис.3). Пролетный зазор, близкий к оптимальному состав-ляет $h = 0,18 \lambda$, потери в стенках - $P_1 = 16$ кВт, потери на ускорение электронов $P_2 = 8$ кВт, т.е. входная мощность $P_{вх} = 24$ кВт.

Снижение КПД за счет энергетического разброса при разверт-ке [2] составит 6%, за счет азимутального размера пучка - менее 1%, за счет нагрева стенок выходного резонатора - 25%. Если принять, что факторы, не рассмотренные здесь (КСВН нагрузки, вторичные электроны, потери тока и т.п.), снизят КПД еще на 10%, то полный КПД составит $\eta \approx 50\%$, выходная мощность $P_{вых} = 600$ кВт, а коэффициент усиления $K = \frac{P_{вых}}{P_{вх}} = 14$ дБ.

*) Здесь и далее рассматривается медь при $t^{\circ} = 80^{\circ}\text{C}$ с шерохо-ватостью, увеличивающей поверхностное сопротивление на 20%.

4. Анализ простейшей аксиальной схемы ги-рокона (рис.1) показывает, что ее преимуществом в сравнении с радиальной схе-мой является повышенная электрическая прочность выходного резо-натора, а главным недостатком - очень низкий ($K < 5$ дБ) коэф-фициент усиления. Последний определяется большим ($\alpha \approx 0,4$) углом развертки.

Повысить усиление ги-рокона можно применением пассивного (третьего) резонатора [1,2,10]. Однако, этого можно достичь и в двухрезонаторном варианте аксиального ги-рокона: в т.н. ги-ро-коне с удлиненным лучом (рис.7). Введение здесь второй фокуси-рующей системы, подобно тому, как это сделано в радиальном ги-роконе [2], позволяет увеличить длину луча, если расположить щели выходного резонатора в области второго кроссовера. Хотя он является линейным, а не точечным, т.е. пучок фокусируется здесь только по радиусу, рост азимутального размера пучка еще не приводит к заметному снижению КПД. Удлинение луча примерно втрое позволяет вернуться к малому углу развертки ($\alpha = 0,15$), т.е. к высокому коэффициенту усиления.

В этой схеме (рис.7) пучок, расширившись после первого кроссовера до начального размера D , фокусируется двумя пара-ми включенных встречно катушек, окруженных ферромагнитным яр-мом. Оценка необходимого тока катушек при расстоянии от оси пучка до стенки канала $\frac{3}{2} D$ и толщине водосхлаждаемой стенки $\Delta = 1$ см дает приемлемые значения тепловыделения в меди (< 300 Вт) и магнитной индукции в железе ($< 0,2$ Т).

Размер щелей в выходном E_{110} -резонаторе, $R = 1,6$ см, приводит к соответствующему увеличению пролетного зазора и к росту напряженности электрического поля на 12%. Незначительные искажения формы E_{110} -резонатора (рассматриваемые как слабая "сферичность") (рис.7) дополнительно увеличивают поле на выпук-лой поверхности еще на 4%. Таким образом, в сравнении с плоской моделью выходного резонатора, работающего в критическом режиме [6] (6), электрическое поле в пучности возрастает незначи-тельно и составит $E_{min} = 55 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$, что, по-видимому, не является серьезным ограничением.

В аксиальном ги-роконе с удлиненным лучом потери мощности в выходном E_{110} -резонаторе составят $P_{\Sigma} \approx 150$ кВт (при ампли-туде ВЧ напряжения $U = 1,55 U_0$, [6]), а потери КПД - 15%.

Здесь, однако, появится дополнительное снижение КПД за счет искривления траекторий [1] - 3%. Полный КПД этого гирокон (с учетом 10% снижения за счет нерассмотренных факторов) превысит 65%, но главное - в этом варианте может быть снято ограничение по электрической прочности выходного резонатора.

Недостатком варианта (рис.7) является высокая удельная мощность на коллекторе заданной глубины ($l_k = 0,6 \lambda$) при работе с расстроенным выходным резонатором ($P_{уд.колл.} = 400 \frac{Вт}{см^2}$). Это ограничение, однако, не является принципиальным, т.к. его можно обойти, усложнив коллектор (введя устройство, рассеивающее пучок по увеличенной поверхности) или схему питания (исключением возможности работать в непрерывном режиме на расстроенный резонатор). Результаты оценок параметров двух рассмотренных вариантов даны в таблице 2.

В сравнении с гирокон метрового диапазона [2] тридцатисантиметровый гирокон имеет повышенные потери в резонаторах, что снижает КПД примерно на 10%, и усиление на 3,5 дБ. Еще на столько же снижается усиление за счет увеличенного в 1,5 раза угла развертки. Восстановить пониженный коэффициент усиления, не увеличивая число резонаторов, можно путем регенерации ВЧ-мощности при отклонении пучка.

5. Регенерация возможна, в частности, в E_{110} -резонаторе развертки (рис.3) при увеличении пролетного зазора. Входная мощность гирокон зависит от него следующим образом [2]:

$$P_{вх} = A \frac{\beta_0 \alpha + 1,9}{\sin^2 \alpha} + B(1 - \alpha \operatorname{ctg} \alpha) P_0 \quad (7)$$

Здесь α - половина угла пролета ($h = \beta_0 \lambda \frac{\alpha}{\pi}$, h - высота пролетного зазора), $\beta_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 - 1}}$, P_0 - мощность пучка. A и B не зависят от P_0 и α . Первый член в (7), - потери в стенках резонатора, - минимален при $\alpha \approx \frac{\pi}{2}$ (для $eU_0 = 200$ кэВ, $h = 0,35 \lambda$), второй член, - мощность взаимодействия с пучком, - при $\alpha = \operatorname{tg} \alpha$ ($\alpha = 1,42 \pi$) меняет знак. Следовательно, дальнейшее увеличение угла пролета ($2\alpha > 2,84 \pi$) приведет к частичной компенсации потерь в стенках за счет энергии электронов. Однако, высота такого резонатора чрезмерно велика ($h > \lambda$), т.к. после пролета электроном расстояния, соответствующего минимуму потерь ($2\alpha = \pi$, $h = 0,35 \lambda$), угол разверт-

ки начинает уменьшаться и падает до нуля ($\operatorname{tg} \alpha \sim \sin \alpha$, $\alpha = \pi$, $h = 0,7 \lambda$), так что необходимо дальнейшее увеличение пролетного промежутка.

Если же участок пути электрона $\pi \leq 2\alpha \leq 2\pi$ экранировать трубкой дрейфа^{ж)} (рис.8), то угол развертки после первого зазора ($h_1 = 0,35 \lambda$) сохранится и на участке дрейфа ($h_g = 0,35 \lambda$), а во втором зазоре ($h_2 \approx 0,1 \lambda$) электрон отойдет от оси резонатора настолько, что станет возможной регенерация ВЧ мощности. Такой резонатор размещается в схеме аксиального гирокон с удлиненным лучом, но в нем велико выходное отверстие для пучка ($\phi 0,25 \lambda$).

Более короткий E_{110} -резонатор развертки с двумя пролетными зазорами приводит к регенерации ВЧ мощности, если фазу поля после первого зазора повернуть на 180° (π -вид колебаний)^{жж)} (рис.9). Его высота составляет приблизительно $0,5 \lambda$, так что он размещается и в схеме радиального гирокон.

Количественную оценку характеристик этих резонаторов можно сделать на основе результатов приближенного анализа E_{110} -резонатора развертки с малым углом отклонения луча [5]. Рассчитываются координаты и скорости электронов на выходе первого зазора, а далее каждый из последующих пролетных промежутков рассматривается как одиночный резонатор с соответствующими начальными условиями для входящих в него электронов.

В резонаторе с трубкой дрейфа высотой $h_g = h_1 = 0,35 \lambda$ (что соответствует $2\alpha_1 = \pi$, если $eU_0 = 200$ кэВ) результирующий угол развертки равен α (8),

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha_e \sqrt{1 + 3 \sin^2 \alpha_2} \quad (8)$$

Здесь α_e - угол развертки в одиночном резонаторе высотой $h = \frac{1}{2} \beta_0 \lambda$ (максимальный угол в заданном поле), α_2 - половина угла пролета второго зазора. Мощность взаимодействия пучка с

ж) Подобная экранировка делается в ускоряющих E_{010} -резонаторах Альвареса [11], где частица летит в трубке дрейфа в течение неблагоприятного периода.

жж) Резонаторы такого типа с симметричным видом колебаний описаны Андреевым, т.н. резонатор с шайбами [12] и резонатор с шайбами и диафрагмами [13].

таким резонатором составляет P_n (9):

$$P_n = P_0 \left(1 + \frac{1}{\delta_0}\right) \left(1 - \frac{\frac{3}{2} \alpha_2 + \pi}{1 + 3 \sin^2 \alpha_2} \cdot \sin 2 \alpha_2\right) \operatorname{tg}^2 \alpha, \quad (9)$$

где P_0 — мощность пучка. Отрицательное значение мощности взаимодействия соответствует регенерации. Максимум ее наступает при $\alpha_2 \approx \frac{\pi}{4}$, и для $P_0 = 10^3$ кВт, $eU_0 = 200$ кэВ ($h_2 = 5,6$ см), $\alpha = 0,15$ составит $P_n = -16$ кВт. Такая мощность превзойдет потери в стенках резонатора и приведет к самовозбуждению системы развертки. Действительно, мощность потерь в одиночном E_{110} -резонаторе при $\alpha_1 = \frac{\pi}{2}$ (первый зазор) составит для $\operatorname{tg} \alpha_1 = \operatorname{tg} \alpha_e \approx 0,1$ (8) $P_1 \approx 4,5$ кВт [5]. Высота резонатора с трубкой дрейфа вдвое больше, но торцевых стенок — две, а не четыре, как в двух одиночных резонаторах, поэтому удвоение потерь, $-P_{\text{рез}} = 2P_1 \approx 9$ кВт, — дает с запасом оценку мощности поглощаемой стенками, трубкой дрейфа и поддерживающими штангами (рис.8). При уменьшении второго зазора до $h_2 = 1,4$ см регенерация прекращается. Промежуточная величина $h_2 = 2,3$ см ($\alpha_2 = \frac{\pi}{10}$) приводит к значению мощностей $P_n = -11,4$ кВт при $P_{\text{рез}} = 17,6$ кВт.

Таким образом, входная мощность гирокона составит $P_{\text{вх}} = P_{\text{рез}} - |P_n| = 6,2$ кВт, т.е. снизится примерно вчетверо, в сравнении с мощностью в схемах с одиночным оптимальным резонатором развертки. Невысокая степень регенерации, $\frac{|P_n|}{P_{\text{рез}}} = 0,65$, обеспечивает умеренный рост требований к стабильности амплитуды ВЧ генератора развертки и тока пучка.

Для сдвоенного резонатора с π -видом колебаний при одинаковой высоте первого и второго зазоров ($h_1 = h_2$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$) (рис.9) мощность взаимодействия составит

$$P_n = P_0 \left(1 + \frac{1}{\delta_0}\right) (1 - 2 \alpha \operatorname{ctg} \alpha) \operatorname{tg}^2 \alpha, \quad (10)$$

а результирующий угол развертки α — (II):

$$\operatorname{tg} \alpha = 2 \operatorname{tg} \alpha_1 \sin \alpha, \quad (11)$$

где α_1 — угол развертки в одиночном резонаторе высотой h_1 . Регенерация возможна при $\alpha \operatorname{ctg} \alpha > \frac{1}{2}$ ($\alpha < 1,16$), что соответствует $h_1 = h_2 < 0,26 \lambda$ (при $eU_0 = 200$ кэВ). Так, например, при $h_2 = 0,24 \lambda$ ($\alpha = 1,08$) и $\alpha = 0,15$ мощность регенерации $P_n = -6$ кВт, а потери в стенках $P_{\text{рез}} = 12$ кВт. Эти потери оцениваются как потери в трех одиночных E_{110} -резонаторах,

т.к. при возбуждении π -вида колебаний в таком резонаторе имеются три пучности напряжения, если следовать по радиусу вдоль поверхности диска от оси до края и обратно (рис.9), $P_{\text{рез}} \approx 3P_1$. Мощность потерь P_1 вычисляется для угла развертки α_1 (II) [5].

Таким образом, входная мощность гирокона $P_{\text{вх}} = P_{\text{рез}} - |P_n| = 6$ кВт получается здесь при степени регенерации $\frac{|P_n|}{P_{\text{рез}}} = 0,5$. Незначительной регулировкой пролетных зазоров (в пределах 1 ± 2 см) можно изменять степень регенерации.

Рассмотренные примеры резонаторов развертки с регенерацией ВЧ мощности показывают, что усиление двухрезонаторного гирокона мегаваттной мощности на частоте 915 МГц можно поднять с 14 до 20 дБ и более при ужесточении в два-три раза требований к системам стабилизации питания и развертки в сравнении с гироконом метрового диапазона.

6. Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что на частоте 915 МГц возможно, по-видимому, разработать двухрезонаторный гирокоп непрерывного генерирования мощностью 600 + 1300 кВт с полным КПД 60 + 70 % и коэффициентом усиления более 20 дБ. Гирокоп может быть построен как по радиальной конструктивной схеме, так и по аксиальной схеме с удлиненным лучом. В первом варианте может возникнуть принципиальное ограничение по электрической прочности выходного резонатора, во втором — требуется усложнение схемы питания или конструкции коллектора для исключения тепловых перегрузок. Оба варианта требуют применения интенсивного охлаждения и резонаторов развертки с регенерацией ВЧ мощности. Это усложнит конструкцию, а также системы стабилизации и управления, по сравнению с действующим гироконом метрового диапазона волн. Однако, значительное уменьшение линейных размеров резонаторов при переходе к дециметровому диапазону дает и определенные конструктивно-технологические преимущества, облегчая экспериментальное исследование тех ограничений, которые недоступны расчетным оценкам.

Таблица 1

Электронно-оптический канал радиального гирокона

№ формулы	Величина или соотношение	Обозначение, формула	Результат оценки для $U_0 = 2 \cdot 10^5$ В, $P_0 = 10^6$ Вт
(1)	Пропускная способность канала	$\frac{D}{L} \approx 160 \sqrt{\frac{P_0}{U_0^{\frac{5}{2}} (1 + 10^{-6} U_0)^{\frac{1}{2}}}}$	$\frac{1}{30}$
(2)	Условие токопрохождения (при допущении $\Delta + \alpha = 2\varnothing_{\min}$ [7])	$\frac{\sin \alpha}{3} \geq \frac{\varnothing}{L}$	$\alpha \geq 0,1$
(3)	Радиус отражателя (рис. 6.)	$a = \frac{L}{2} \sin \alpha - \Delta - \frac{3}{2} \varnothing_{\min}$	1,65 см
	Толщина водоохлаждаемой стенки	Δ	1 см
	Диаметр пучка в кроссовере	$\varnothing_{\min} = \frac{\varnothing}{2,38}$	0,7 см
	Угол развертки	α	0,15 см
	Длина канала	$L = \left(\frac{L}{\varnothing}\right) \frac{\lambda}{20}$	1,5 λ
(4)	Максимальная магнитная индукция в ферромагнитном стержне-отражателе (рис. 5)	$B_{\max} = 15 \cdot 10^{-4} \sqrt{\gamma_0^2 - 1} \cdot \frac{L \sin \alpha}{a^2}$	0,4 Тесла
	Относительная энергия электронов	$\gamma_0 = \frac{U_0}{511 \cdot 10^3} + 1$	1,4
(5)	Угол расходимости пучка в вертикальной (рис. 5) и горизонтальной плоскостях	$(\Delta \rho)_0 = 1,5 \frac{\varnothing_{\min}}{L \sin \alpha}$ $(\Delta \psi)_0 = 2 \frac{\varnothing_{\min}}{L \sin \alpha}$	$(\Delta \rho)_0 = 0,14$ $(\Delta \psi)_0 = 0,19$

Таблица 2

Результаты оценок параметров гирокона

Основные характеристики	Радиальный гирокон		Аксиальный гирокон с удлиненным лучом	
	$U_0 = 200$ кВ $P_0 = 1000$ кВ	$U_0 = 250$ кВ $P_0 = 1000$ кВт	$U_0 = 200$ кВ $P_0 = 1000$ кВт	$U_0 = 250$ кВ $P_0 = 2000$ кВт
Выходная мощность $P_{\text{вых.}}$ [кВт]	600	1300	650	1400
Полный КПД η %	60	65	65	70
Коэффициент усиления $K_{\text{КВ}}$	14	16	14	16
E [$\frac{\text{кВ}}{\text{см}}$]	100	125	55	70
$P_{\text{уд. колл}}$ [$\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$]	125	180	400	800
P_1 уд. вых. рез. [$\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$]	135	200	30	45

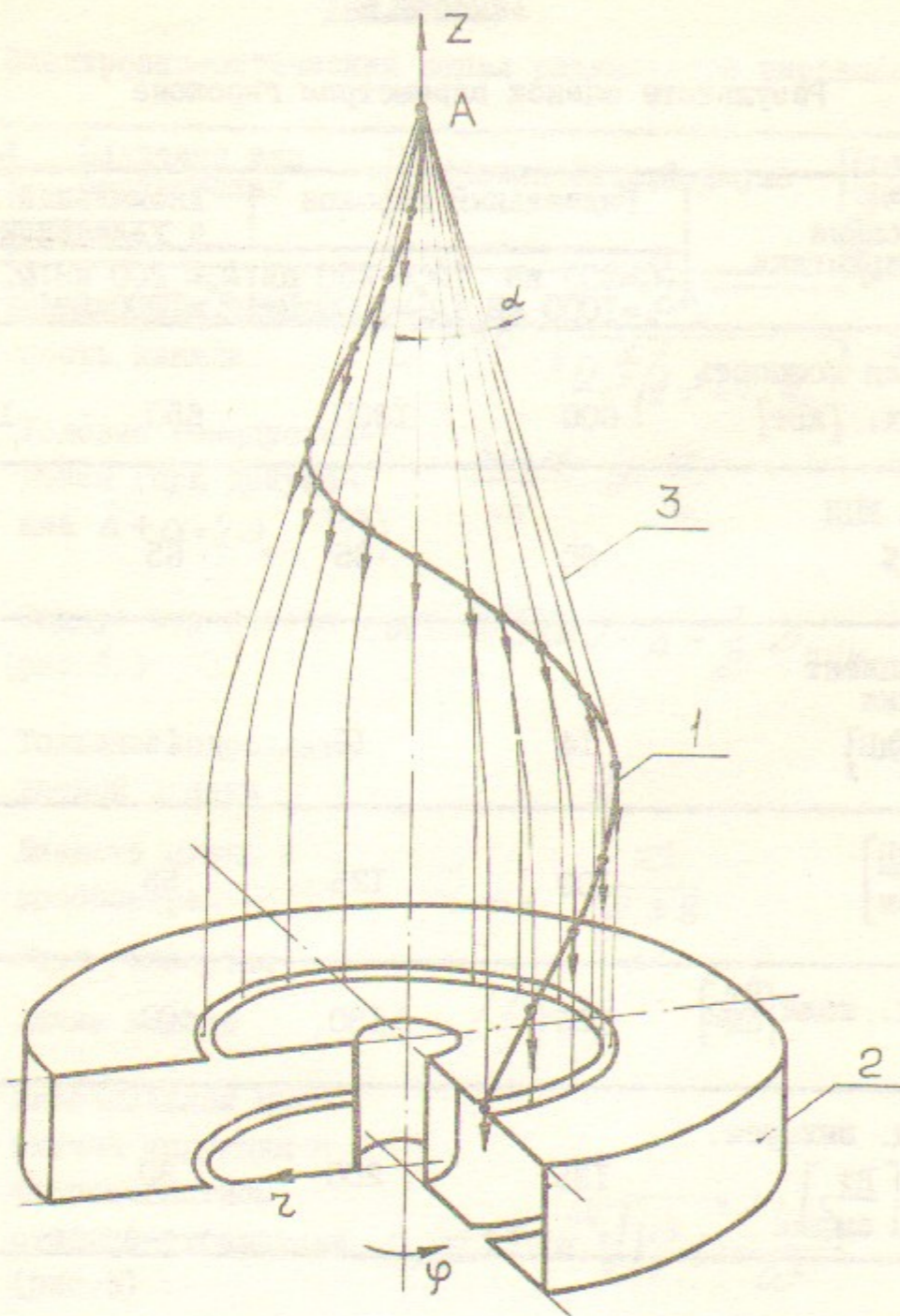


Рис.1. Электронный пучок и выходной резонатор аксиального ги-
рокона

- 1 - мгновенные положения и скорости электронов;
- 2 - выходной резонатор;
- 3 - траектория электрона;
- A - центр резонатора развертки;
- α - угол развертки.

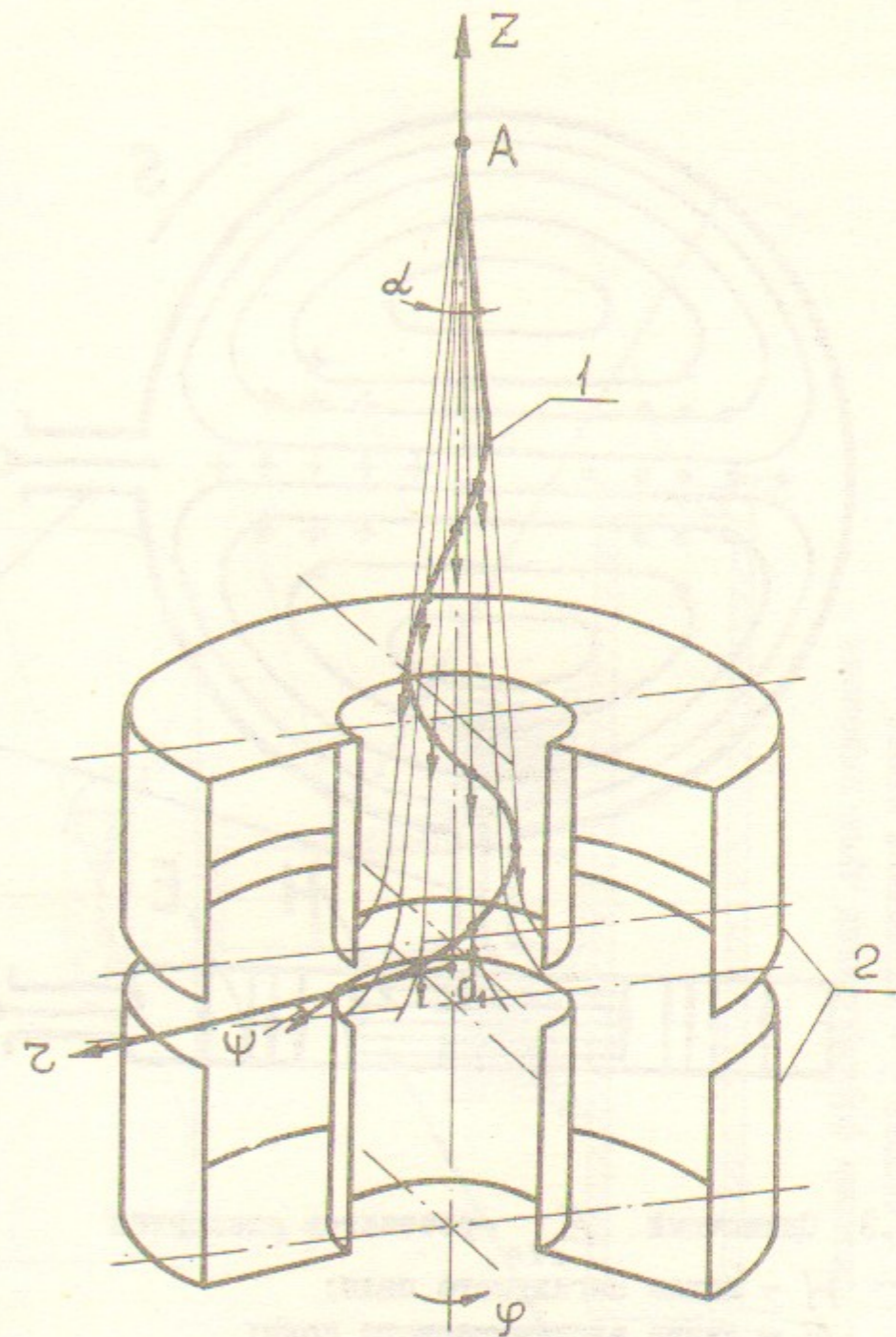


Рис.2. Электронный пучок и выходной резонатор радиального ги-
рокона

- 1 - мгновенные положения и скорости электронов;
- 2 - выходной резонатор;
- A - центр резонатора развертки;
- α - угол развертки.

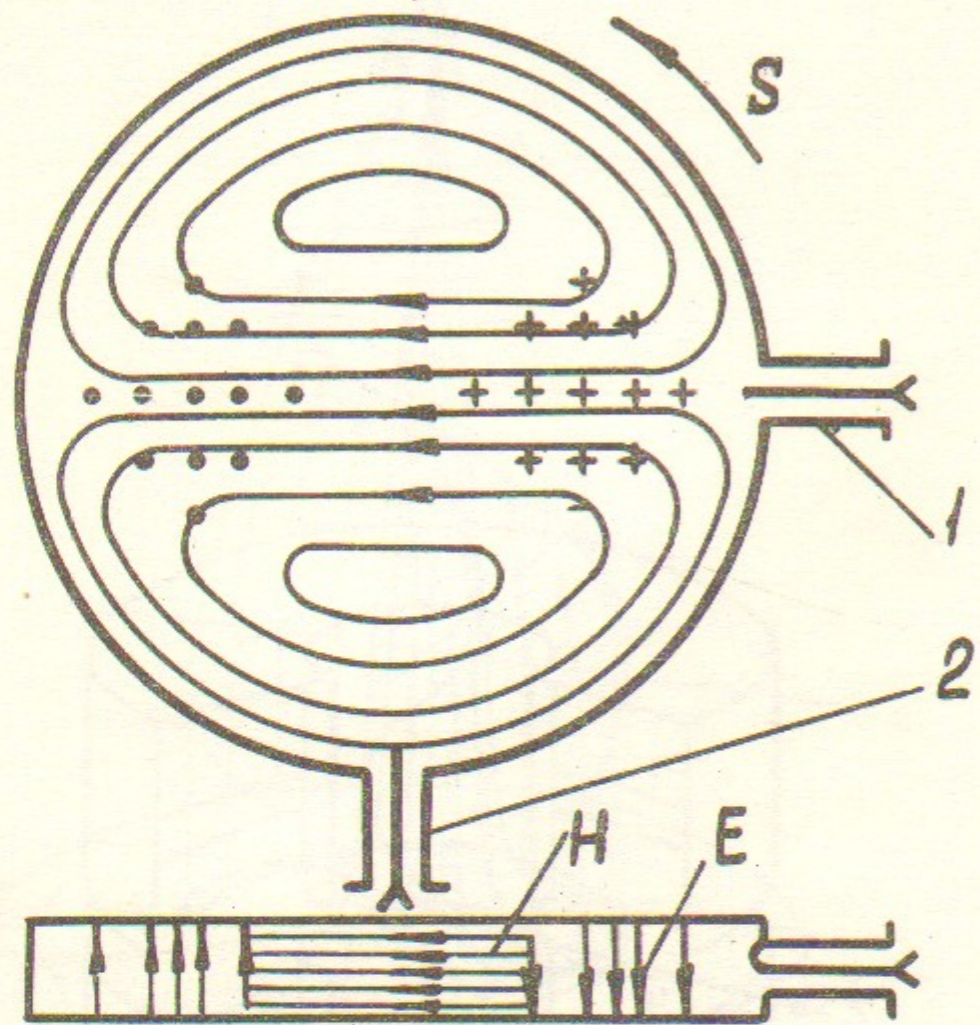


Рис.3. Единичный E_{110} -резонатор развертки

- H - линии магнитного поля;
- E - линии электрического поля;
- 1,2 - вводы мощности;
- S - направление вращения поля.

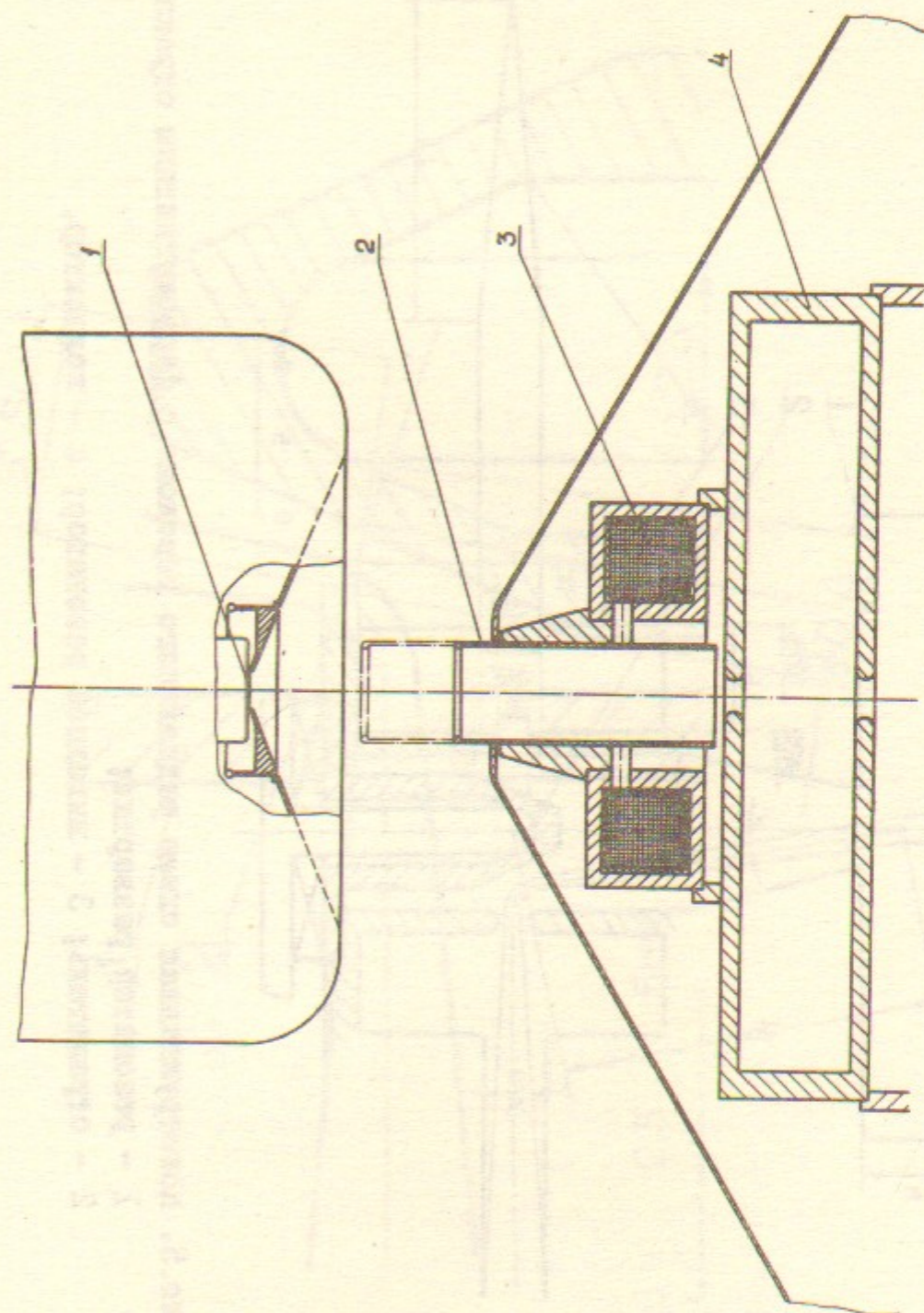


Рис.4. Система формирования луча гирокона

- 1 - катод;
- 2 - подвижный анод;
- 3 - первая фокусирующая линза;
- 4 - резонатор развертки.

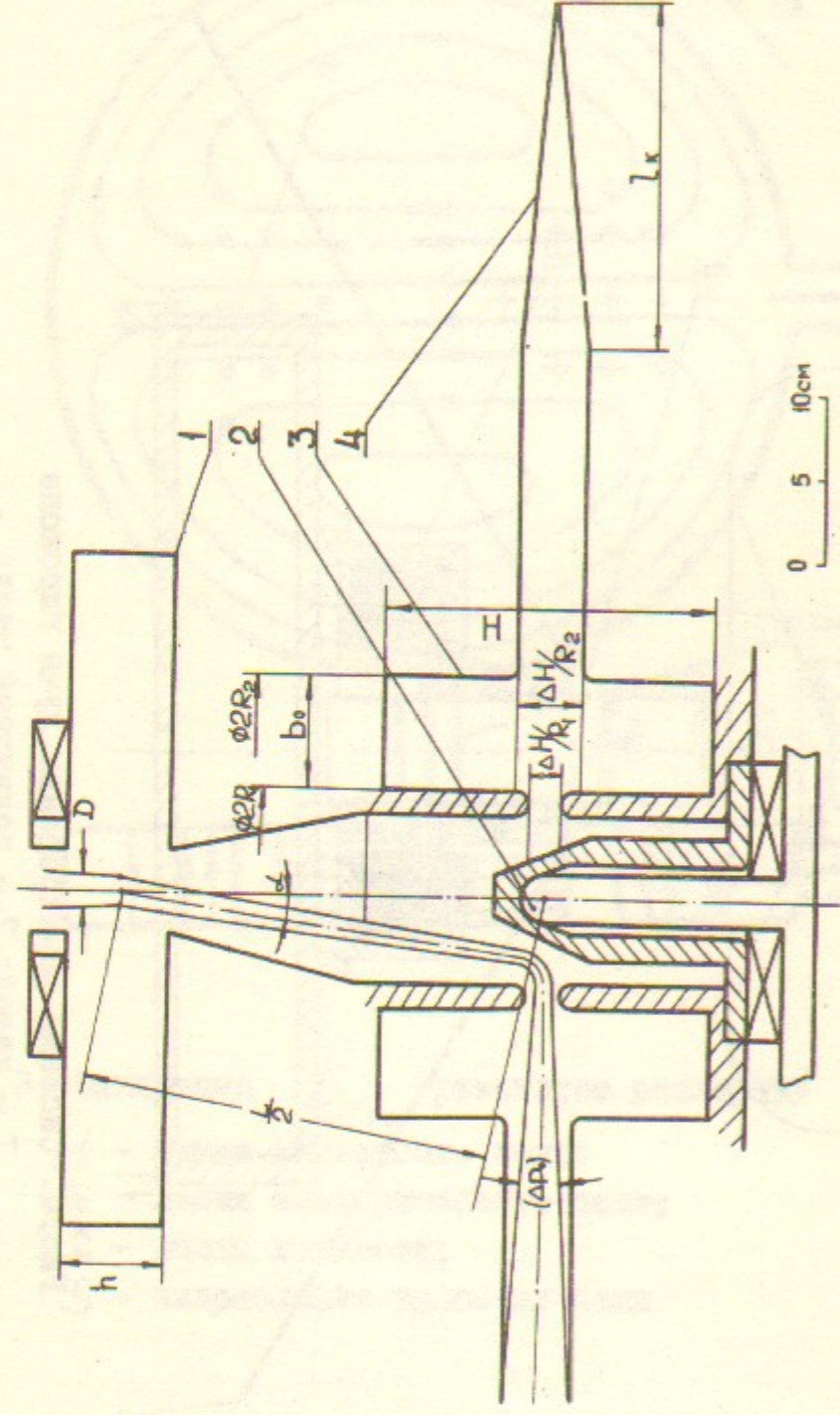


Рис.5. Конструктивная схема радиального гироскона с ферромагнитным отражателем
 1 - резонатор развертки;
 2 - отражатель; 3 - выходной резонатор; 4 - коллектор.

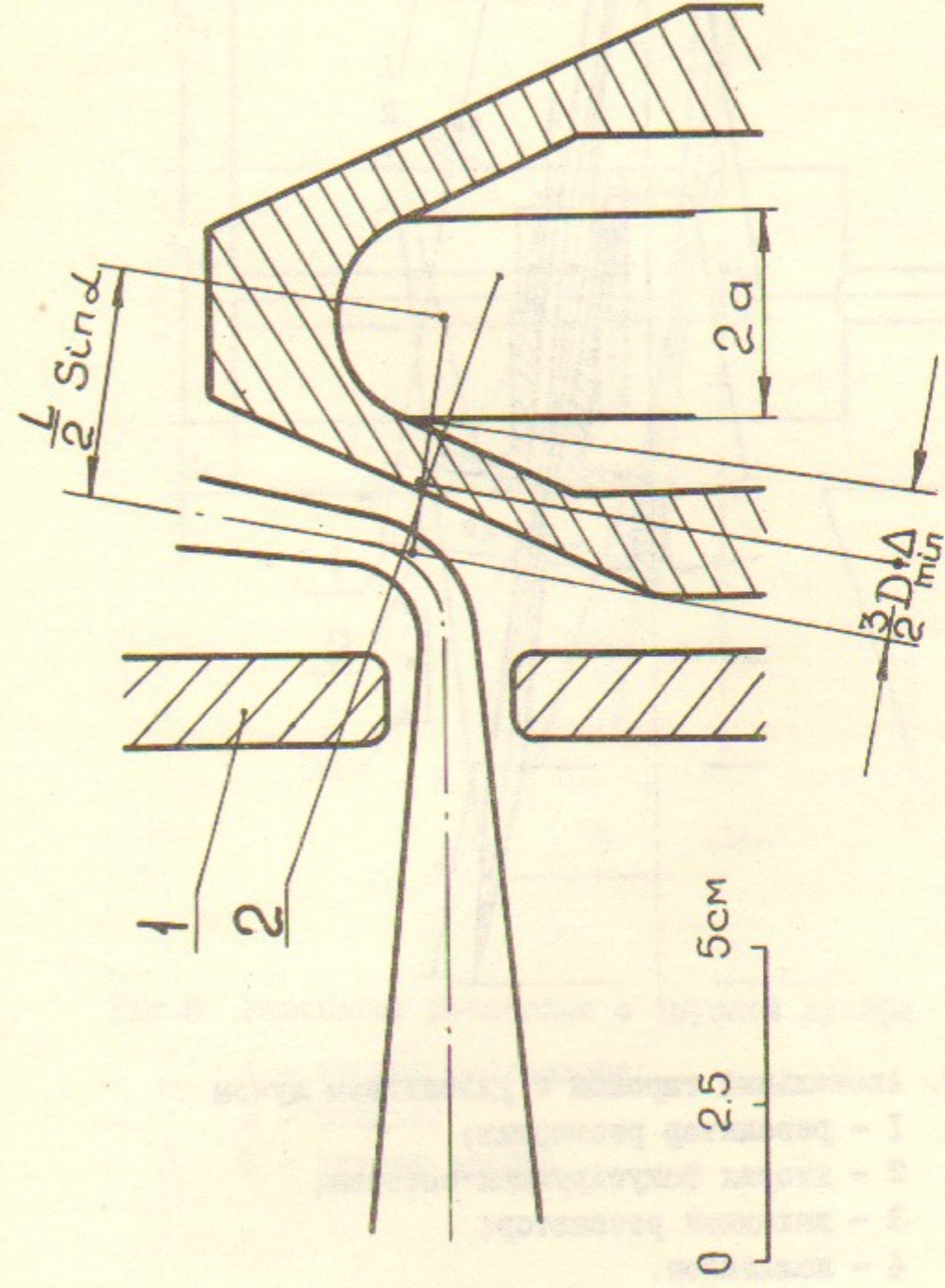


Рис.6. Область вблизи отражателя радиального гироскона.
 1 - выходной резонатор; 2 - отражатель.

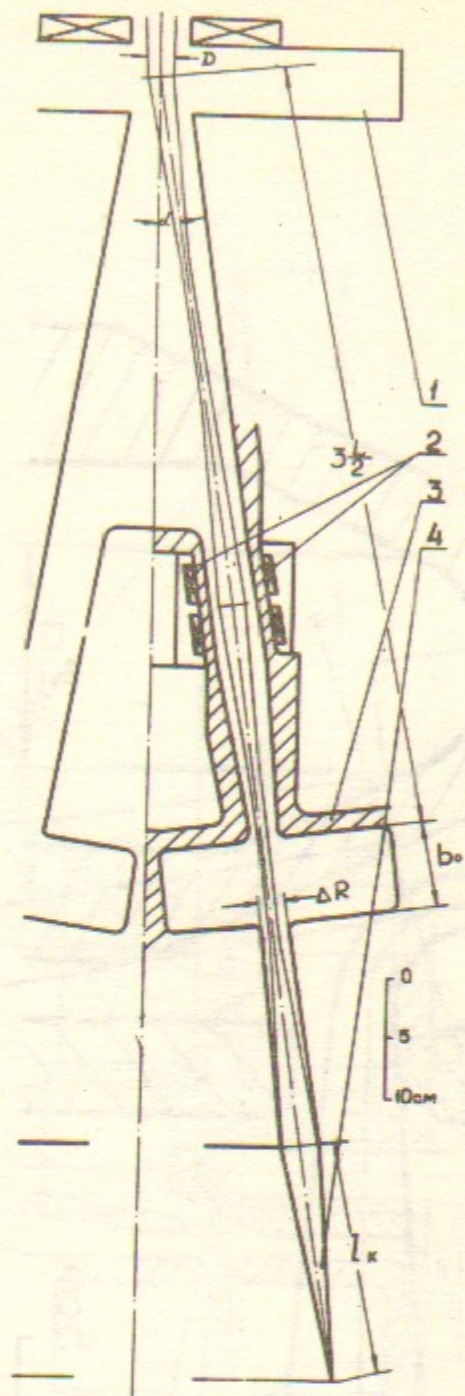


Рис.7. Аксиальный гирокон с удлиненным лучом
 1 - резонатор развертки;
 2 - вторая фокусирующая система;
 3 - выходной резонатор;
 4 - коллектор.

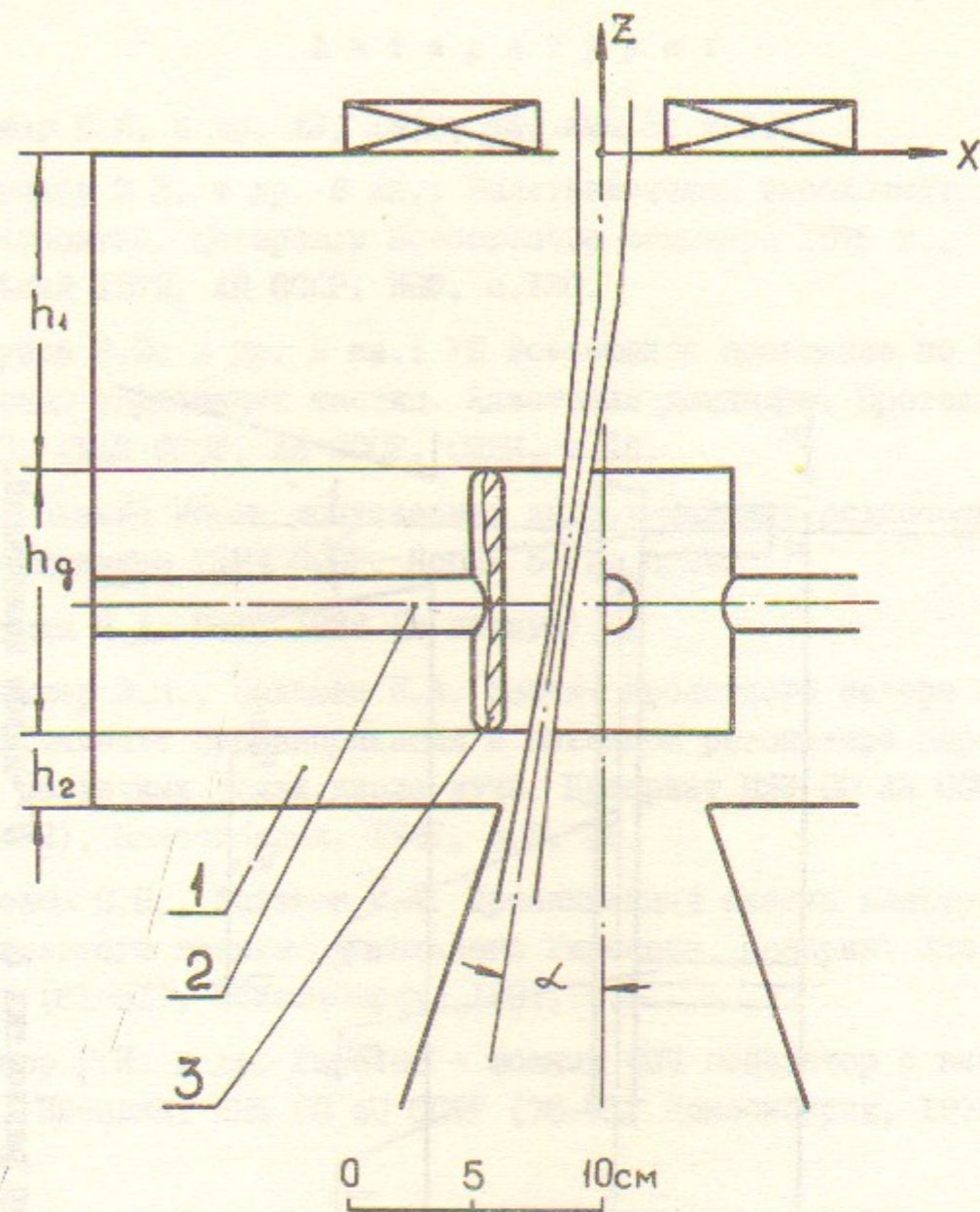


Рис.8. Резонатор развертки с трубкой дрейфа

- 1 - стенка резонатора;
- 2 - штанга;
- 3 - трубка дрейфа.

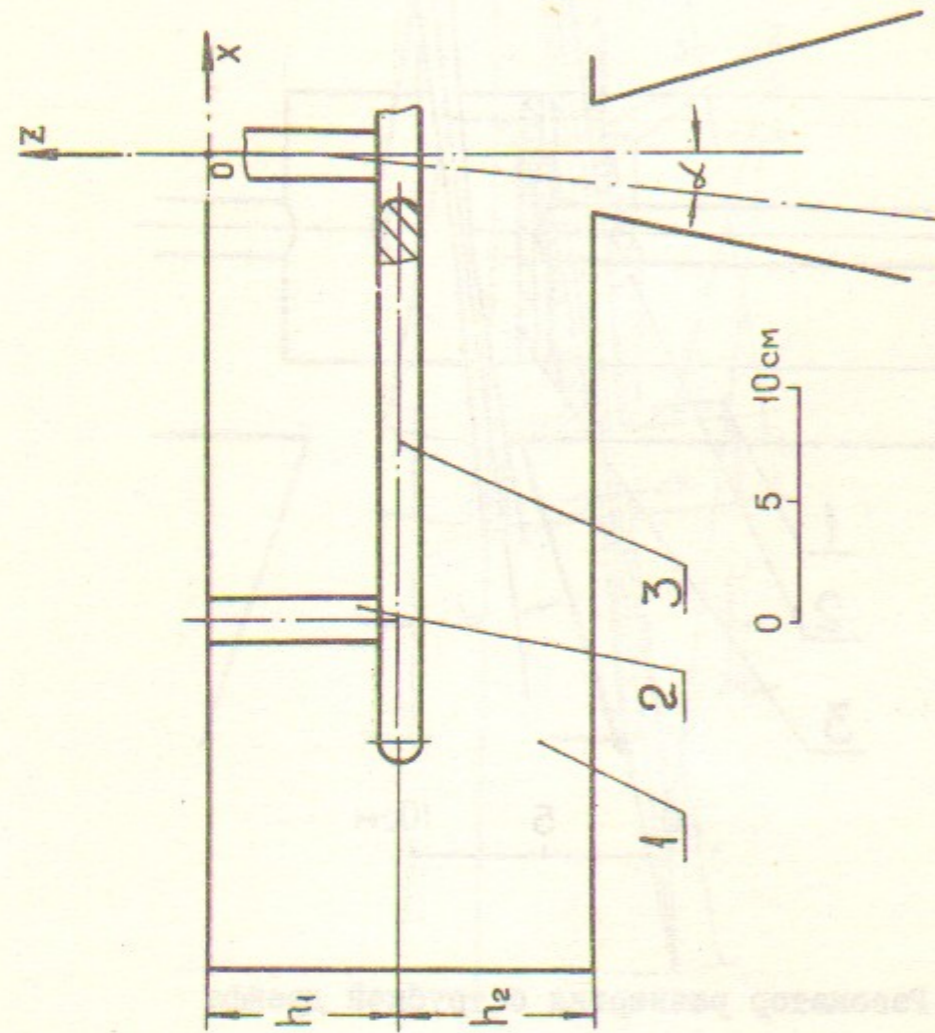


Рис. 9. Сдвоенный резонатор развертки с π -видом колебаний.
1 - стенка резонатора; 2 - штанга; 3 - диск.

Л и т е р а т у р а :

1. Будкер Г.И. и др. АЭ, 1978, 44, вып.5, с.397.
2. Горникер Э.И. и др. В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Материалы Всесоюзного семинара 1978 г., Горький 1979, АН СССР, ИФЭ, с.130.
3. Арбузов В.С. и др. В кн.: УШ Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Аннотации докладов. Протвино, 1982, ИКАЭ СССР, АН СССР, ОИЯИ, с.18.
4. Общесоюзные нормы допускаемых промышленных радиопомех, утвержденные ГКРЧ СССР. Нормы 5-72, с.34.
5. Шехтман И.А. РиЭ, 1983 (в печати).
6. Горникер Э.И., Шехтман И.А. Расчет пролетного зазора и коэффициента перенапряжения в выходном резонаторе гирокона при различных углах ввода луча. Препринт ИЯФ СО АН СССР (81-52), Новосибирск, 1981, с.5, 35.
7. Морозов С.Н., Шехтман И.А. Приближенный анализ электронно-оптического тракта радиального гирокона. Препринт ИЯФ СО АН СССР (81-51), Новосибирск, 1981, с.5.
8. Будкер Г.И. и др. Гирокон - мощный СВЧ генератор с высоким КПД. Препринт ИЯФ СО АН СССР (78-9), Новосибирск, 1978, с.25.
9. Вещеревич В.Г. и др. Труды УИ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, 1978, Дубна, 1979, АН СССР, ИКАЭ, ОИЯИ, т.1, с.315.
10. Карлинер М.М. и др. Круговая развертка пучка электронов в гироконе. Препринт ИЯФ СО АН СССР (82-147), Новосибирск 1982, с.9.
11. Alvarez L.W. et al. Rev. Sci. Instr., 1955, 26, 2, p.111.
12. Андреев В.Г. ЖТФ, 1968, XXXIII, № 8, с.1306
13. Андреев В.Г., Пашковский В.В. ЖТФ, 1970, X, № 3, с.523.

Э.И.Горникер, С.Н.Морозов, В.Е.Теряев,
И.А.Шехтман

АНАЛИЗ ОГРАНИЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ГИРОКОНА НЕПРЕРЫВНОГО
ГЕНЕРИРОВАНИЯ МЕГАВАТТНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ
МЕТРОВОГО К ДЕЦИМЕТРОВОМУ ДИАПАЗОНУ ВОЛН

Препринт
№ 83-46

Работа поступила - 18 февраля 1983 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 19.04-1983 г. МН 10098
Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.1,3 печ.л., 1,1 учетно-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 46.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90