

УДК 621.385.6

ВОЗБУЖДЕНИЕ МАЗЕРА НА ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ ПРИ НИЗКИХ УСКОРЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯХ

Б. П. Ефимов, С. А. Кишко, А. Н. Кулешов, С. С. Пономаренко, Э. М. Хуторян

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: yefimov@ire.kharkov.ua

Поступила в редакцию 22 декабря 2010

В работе представлены результаты по возбуждению электромагнитных колебаний на частоте 8 ГГц в мазере на циклотронном резонансе с ускоряющим напряжением 2,2 кВ. Дано описание магнетронно-инжекторной пушки, формирующей поливинтовой электронный пучок с питч-фактором 2, магнитной системы с участком адиабатически нарастающего поля в области катод – резонатор и спадающего поля в коллекторной части. Приведены зависимости зон генерации на TE_{11q} модах от величины магнитного поля и электрических параметров.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мазер на циклотронном резонансе, азимутально-фазовая группировка, магнетронно-инжекторная пушка, поливинтовой электронный поток

У роботі представлені результати щодо збудження електромагнітних коливань на частоті 8 ГГц у мазері на циклотронному резонансі з прискорювальною напругою 2,2 кВ. Дано опис магнетронно-інжекторної гармати, що формує полі-гвинтовий електронний пучок з питч-фактором 2, магнітної системи з ділянкою адиабатично зростаючого поля в області катод - резонатор, поля що спадає в колекторній частині. Надано залежності зон генерації на TE_{11q} модах від величини магнітного поля і електричних параметрів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: мазер на циклотронному резонансі, азимутально-фазове угруповання, магнетронно-інжекційна гармата, полі гвинтовий електронний пучок.

The results on the 8 GHz electromagnetic wave excitation in a maser at cyclotron resonance with an accelerating voltage about 2,2 kV. The description of the magnetron-injector gun generating annular electron beam with a pitch factor of 2, the magnetic system with adiabatically increasing field in the cathode – cavity gap and decreasing field at the collector side have been presented. Dependences of oscillation ranges of TE_{11q} modes on both magnetic field and electrical parameters are presented.

KEY WORDS: maser on a cyclotron resonance, azimuthally-phase bunching, magnetron-injection gun, annular electron beam.

Источниками электромагнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне являются приборы, основанные на использовании индуцированного Вавилова-Черенкова (ЛЮВ, ЛБВ, магнетрон), дифракционного (ГДИ, оротрон), переходного (клистроны) и циклотронного (мазеры на циклотронном резонансе (МЦР)) излучений [1]. Энергия электромагнитного поля в таких приборах черпается из активной среды, представляющей собой потоки свободных электронов. Наиболее мощными источниками в указанных диапазонах оказались МЦР [1], которые, в отличие от приборов на излучении Вавилова-Черенкова и переходном излучении, не требуют замедляющих структур с периодом порядка длины волны и электродов с такими же размерами. Благодаря возможности развивать выходную мощность порядка мегаватт на частотах порядка сотни гигагерц, МЦР нашли широкое применение в установках управляемого термоядерного синтеза с магнитным удержанием плазмы [1].

В МЦР активной средой является винтовой электронный пучок, представляющий собой потоки электронов, движущихся по спиральным траекториям в однородном магнитном поле. В одном из наиболее удачных разновидностей МЦР – гиротроне используются поливинтовые электронные потоки с толщиной пучка много меньше поперечных размеров пространства, в котором он движется, формируемые магнетронно-инжекторной пушкой (МИП) [1]. В энергию электромагнитных колебаний переходит и энергия поперечного движения электронов, поэтому сформированный МИП винтовой электронный пучок помещается в адиабатически нарастающее магнитное поле, где происходит увеличение вращательной компоненты скорости электронов до требуемого значения.

При создании МЦР особое внимание уделяют проблеме высококачественного электронного пучка. Известно, что КПД гиротрона в значительной мере зависит от величины питч-фактора, определяющейся как отношение осциляторной и поступательной скоростей электронного потока. Чем выше значение питч-фактора, тем больше будет КПД прибора. Поэтому, при проектировании пушек, стараются добиться максимальной величины питч-фактора.

Прямая зависимость частоты циклотронного излучения от величины приложенного магнитного поля накладывает ограничения на использование gyroприборов в диапазонах короче терагерцового. В настоящее время идет активная разработка МЦР на гармониках циклотронной частоты, что позволяет как уменьшать длину волны излучения, так и величину магнитного поля [2]. Также актуальной задачей для МЦР является снижение ускоряющих напряжений [3]. Низковольтные МЦР с достаточным уровнем мощности могут найти широкое применение в медицине, нанотехнологии, в порошковой технологии и создании новых материалов.

Существует ряд работ [4, 5] в которых анализируется возможность создания МЦР, работающих при низких ускоряющих напряжениях. В низковольтном МЦР из-за низкой величины электрического поля на эмиттере в МИП наблюдается очень сильное влияние поля пространственного заряда на параметры формируемого винтового электронного пучка, что приводит к разбросу электронов по скоростям и, как следствие, к снижению КПД и качества пучка. В работе [4] предложено отказаться от адиабатической МИП и предложена не адиабатическая электронно-оптическая система, работа которой предполагается в режиме полного пространственного заряда. Однако зависимость осциляторной скорости и разброс скоростей электронов в такой пушке от малых перемещений электродов значительно сильнее, чем в адиабатической МИП.

Данная работа продолжает теоретическое и экспериментальное исследование способов генерации электромагнитного излучения на циклотронных частотах при малых магнитных полях и ускоряющих напряжениях.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для обеспечения эффективного взаимодействия электронов с полем резонатора МЦР, так же как и в клистроне или ЛОВ, необходимо обеспечить группировку электронного потока. В приборах данного типа имеет место азимутально-фазовая группировка, которая объясняется с позиции релятивистской зависимости массы электрона от его кинетической энергии [1]. При малой скорости электрона его масса равна массе покоя. Циклотронная частота при этом остается неизменной. С ростом энергии электрон становится тяжелее и циклотронная частота уменьшается. При этом происходит перераспределение электронов в поперечном сечении резонатора. Чем «легче» электрон, тем больше радиус на котором происходит группировка электронного сгустка.

Несмотря на то, что объяснение работы МЦР происходит с позиции релятивистской зависимости массы электрона от его кинетической энергии, как ни парадоксально, актуальной задачей является снижение ускоряющих напряжений.

В МЦР к основным параметрам, характеризующим взаимодействие винтового электронного потока с высокочастотным полем резонатора, относят ток электронного пучка I_0 , ускоряющее напряжение U_0 и магнитное поле B в области резонатора. Ускоряющее напряжение обычно отождествляют с так называемым параметром неизохронности μ , который связан с параметрами электронного пучка и длиной резонатора следующим выражением:

$$\mu = \pi g \beta_{\perp} L / \lambda, \quad (1)$$

где $g = \beta_{\perp} / \beta_{\parallel}$ - питч-фактор, β_{\perp} и β_{\parallel} отношение осциляторной (β_{\perp}) и поступательной (β_{\parallel}) скоростей электронов к скорости света c , L - эффективная длина резонатора, λ - длина волны излучения. Эта формула показывает, что уменьшение напряжения приводит к увеличению длины резонатора, и как следствие к увеличению его дифракционной добротности [5].

Кроме этого, эффективность отбора энергии электронного пучка во многом зависит от параметров определяющих профиль продольного сечения резонатора, скоростного разброса электронов, радиуса и питч-фактора электронного пучка.

С учетом перечисленных выше параметров был произведен расчет источника поливинтового электронного потока, электродинамической и магнитной систем, описание которых изложено ниже.

Электродинамической системой прибора является цилиндрический резонатор длиной 240 мм с внутренним диаметром $2a=22$ мм и запредельными вставками на концах диаметром 19 мм (Рис. 1.).

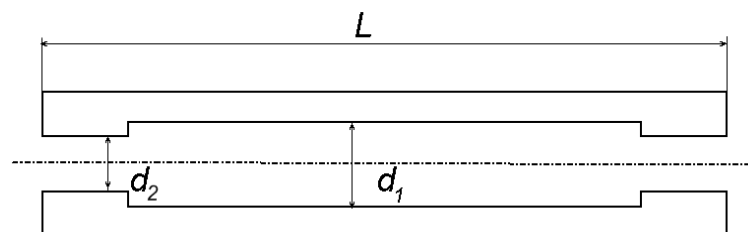


Рис. 1. Профиль резонатора

В данном резонаторе нет дифракционного вывода энергии и дифракционная добротность высока. При этом мощность колебания в основном идет на омические потери и почти не идет в нагрузку, однако это обеспечивает пониженный стартовый ток, что является существенным при рассмотрении возможности возбуждения МЦР при низких ускоряющих напряжениях. В 3-х сантиметровом диапазоне волновод, образующий резонатор, является одномодовым, и модами цилиндрического резонатора с боковыми крышками являются TE_{11q} , поля которых определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} E_r &= \pm \frac{ikZ}{r} J_1\left(\frac{\chi_{11}r}{a}\right) \sin\theta \sin \frac{q\pi}{L} z \\ E_\theta &= ikZ \frac{\chi_{11}}{a} J_1'\left(\frac{\chi_{11}r}{a}\right) \cos\theta \sin \frac{q\pi}{L} z, \\ E_z &= 0 \end{aligned} \tag{2}$$

где $J_1'(\chi_{11}) = 0$; резонансные частоты мод TE_{11q} определяются выражением:

$$k^2 = \left(\frac{\chi_{11}}{a}\right)^2 + \left(\frac{q\pi}{L}\right)^2, \tag{3}$$

и для первых шести продольных мод приведены в Табл. 1.

Табл. 1. Зависимость частоты генерации от продольного количества вариаций поля

q	1	2	3	4	5	6
$f, \text{ГГц}$	7,97	8,07	8,2	8,37	8,57	8,89

Для открытого резонатора собственные частоты определяются численными методами. Однако, учитывая, что $L \gg a$ и то, что отражение от концов близко к -1, резонансные частоты близки к частотам закрытого резонатора; разница становится существенной для продольных мод с большим числом вариаций q . С увеличением q уменьшается дифракционная добротность и увеличивается коэффициент связи с нагрузкой, однако при этом ухудшаются условия взаимодействия электронов с полем и увеличивается влияние разброса скоростей. Так как частота, на которой происходит взаимодействие электронов в МЦР $\omega \approx \omega_c + \frac{q\pi}{L} v_z$, зависит от q , то для больших q частота генерации немного отличается от циклотронной частоты.

Кроме того, был проведен расчет собственных полей резонатора при помощи компьютерного моделирование в среде разработки СВЧ устройств CST Microwave Studio [6]. В результате были определены частоты и характер мод резонатора. Основные результаты, полученные в процессе моделирования, приведены на рис. 2.

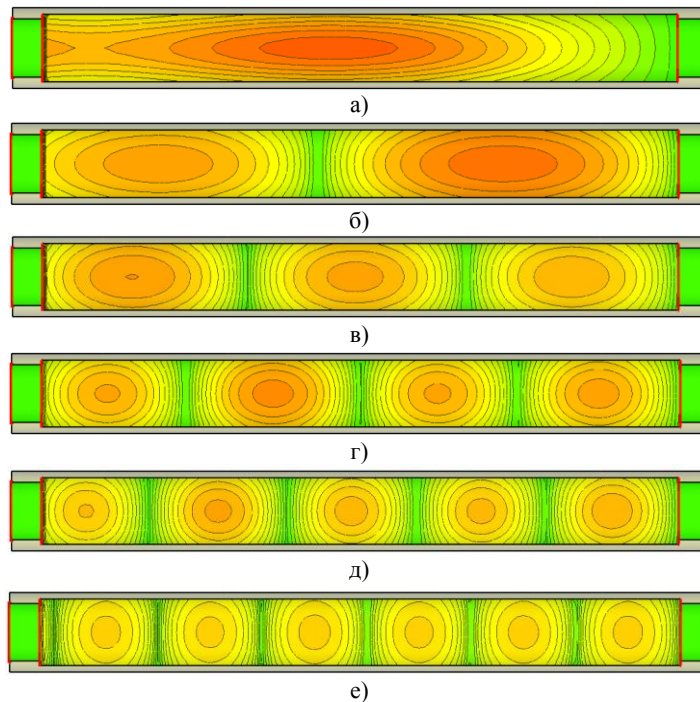
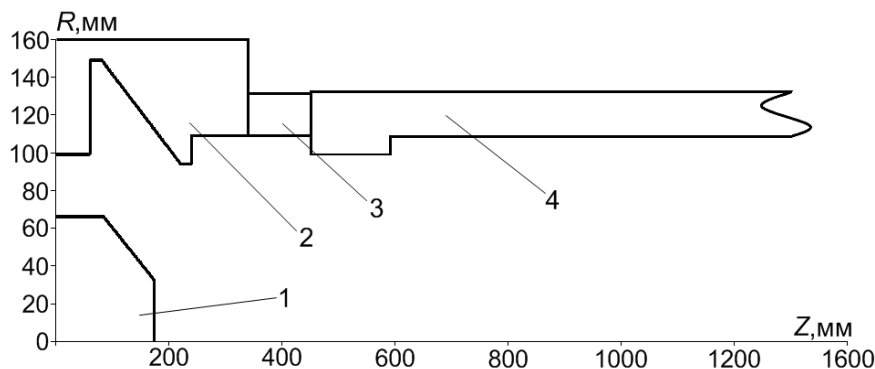


Рис. 2. Вариации поля вдоль резонатора при возбуждении волны TE_{11q} :а) $q=1$ $f=7,79$ ГГц; б) $q=2$ $f=8,1$ ГГц; в) $q=3$ $f=8,25$ ГГц; г) $q=4$ $f=8,46$ ГГц; д) $q=5$ $f=8,7$ ГГц; е) $q=6$ $f=9,1$ ГГц

На рис. 3. схематически в плоскости, проходящей через продольную ось системы Z , изображена прикатодная область экспериментального прибора. Для создания винтового электронного пучка, данная область помещается в магнитное поле. Чтобы снизить влияние магнитной ловушки и появление отраженных электронов, магнитное поле вблизи пушки должно быть неоднородным и слабо нарастающим. В тоже время, для поддержания генерации, из резонатора требуется выводить «отработавшие» электроны [1]. Для этого на выходе резонатора создается неоднородное магнитное поле, которое слабо спадает. При этом радиус траектории электронов, оказавшиеся в данной области, увеличивается. В итоге электроны, прошедшие резонатор оседают на коллекторе.

Рис. 3. Общий вид электродов в области электронной пушки в плоскости, проходящей через продольную ось системы Z : 1 – катод, 2 – анод, 3 – стеклянные соединения, 4 – резонатор

Руководствуясь изложенными рассуждениями, была создана магнитная фокусирующая система, профиль магнитного поля которой приведен на рис. 4.

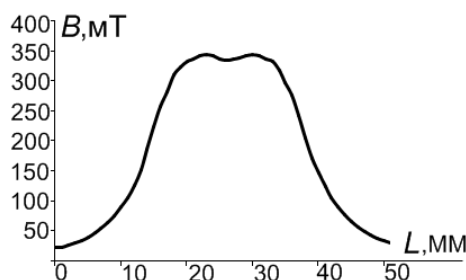


Рис. 4. Распределение индукции продольной компоненты магнитного поля для двух одинаковых катушек, расположенных соосно на расстоянии 10 мм между собой при токе в катушках 20 А

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как уже было сказано, для создания винтовых электронных пучков необходимы магнитные системы с участками адиабатического нарастающего поля в области пушки и адиабатического спадающего поля в области коллектора. В экспериментальной магнитной системе было использовано два соленоида, представляющие собой катушки медного провода сечением 4 мм^2 , собранных в латунные обоймы с внешним диаметром 230 мм и толщиной 110 мм. Катушки собраны с зазором 1 см между собой для осуществления охлаждения. Для поддержания постоянного тока катушки включались через стабилизатор тока на $20 \text{ А} \times 160 \text{ В}$. Данная магнитная система создавала поле $0,3 - 0,35 \text{ Т}$, что соответствует циклотронной частоте электронного потока $8 - 10 \text{ ГГц}$.

Расчёт магнетронно-инжекторных пушек в нарастающем магнитном поле довольно сложный. Материалы по расчету МИП подробно изложены в работах [7-11]. Отметим, что расчет геометрических параметров, проектирование и оптимизация МИП базировались на модели с нулевыми начальными скоростями в программе E-GUN [12]. Данная модель полезна для качественного анализа и оперативного поиска оптимальных по скоростному разбросу конфигураций электродов и достаточно хорошо предсказывает величину отношения осцилляторной энергии пучка к полной для требуемого тока пучка I .

Кроме этого, был проведен ряд предварительных экспериментов по нахождению оптимальных режимов работы электронно-оптической системы с учетом скоростного разброса и эффекта магнитного зеркала. Для этого производился подбор топологии ВЭП, путем изменяя угол наклона эмитирующей поверхности катода к магнитному полю [7-11]. По результатам расчетов была выбрана геометрия с

пограничным пучком (угол наклона 18°). На рис. 5. приведены траектории электронов и общий вид электронного пучка, построенные в программе E-GUN [13].

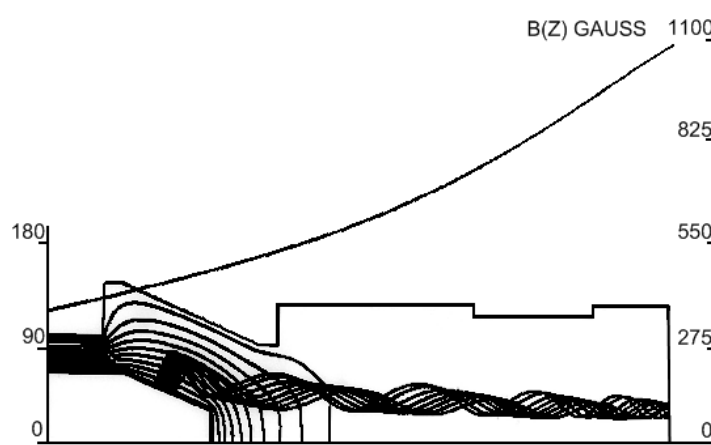


Рис. 5. Результаты расчетов МИП с использованием второго анода для уменьшения влияния магнитного зеркала при $U_{a1}=3$ кВ, $U_{a2}=4$ кВ

В результате, была разработана магнетронно-инжекторная пушка на ускоряющее напряжение до 6 кВ, ток до 300 мА для гиротрона 3-х см диапазона длин волн. На рис. 6. представлены фотографии экспериментальных катодов для МИП [13].



Рис. 6. Фотографии экспериментальных катодов для МИП с разной шириной эмитирующего пояса

В ходе экспериментальных исследований была получена устойчивая генерация излучения на циклотронной частоте электронного потока при напряженности магнитного поля 2,8 кЭ. При этом пусковой ток составил около 60 мА, а значение ускоряющего напряжения всего 2,2 кВ.

Регистрация излучения производилась через стеклянное окно между резонатором и коллектором при помощи детекторной секции работающей в 3 см диапазоне длин волн. Для определения частоты генерации регистрируемого излучения использовался анализатор спектра С4-27. Экспериментально полученные зоны генерации показаны на рис. 7.

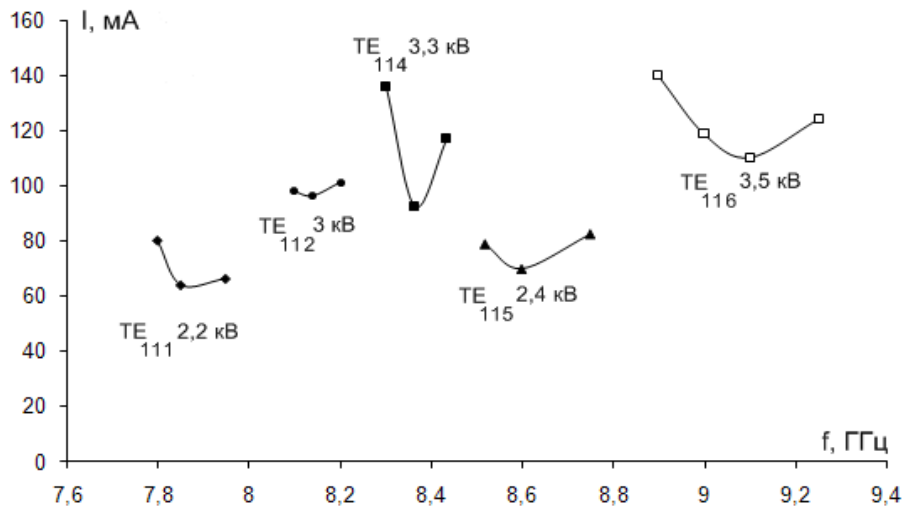


Рис. 7. Зависимости стартового тока для мод TE_{11q} при различных ускоряющих напряжениях

В резонаторе возбуждались колебания типа TE_{11q} . Этот тип колебаний связан со стенками резонатора, в результате чего большая часть запасенной энергии тратится на омические потери.

Из приведенной зависимости видно, что с ростом ускоряющего напряжения наблюдается и увеличение пускового тока. Минимальный пусковой ток составлял 27 мА. При увеличении ускоряющего напряжения до 4 кВ наблюдался срыв генерации.

ВЫВОДЫ

1. В работе показано, что возбуждение электромагнитных волн на основе электронно-циклотронного резонанса возможно при малых ускоряющих напряжениях порядка нескольких киловольт.

2. Экспериментально установлено, что при заданных геометрических размерах колебательной системы наблюдается в широком диапазоне ускоряющих напряжений (2,2 - 3,5 кВ). Они достаточно хорошо разнесены по частоте.

3. Столь низковольтные режимы возбуждения колебаний свидетельствуют о высоком качестве спроектированной МИП, магнитной системы и адиабатического пространства для ввода электронного потока в колебательную систему.

4. Полученные теоретические и экспериментальные результаты создают перспективы для уменьшения количества видов колебаний либо путем уменьшения диаметра волноведущей структуры, либо размещением в нем периодических чебышевских неоднородностей. Использование сверхпроводящих магнитов позволит продвинуться в мм диапазон волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гапонов А.В. Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике / А.В. Гапонов, М.И. Петелин, В.К. Юлпатов // Изв. Вузов. Радиофизика. – 1967. – Т. 10, № 9-10. – С. 1414–1453.
2. Антаков И.И. Гиротроны на гармониках гирочастоты / И.И. Антаков, В.Е. Запечалов, Т.Б. Панкратова, Ш.Е. Цимринг. – Гиротрон. Горький: ИПФ АН СССР, 1981. – 192 с.
3. Operational characteristics of a 14-W 140-GHz gyrotron for dynamic nuclear polarization / C. Joye, R. Griffin, M. Hornstein, K. Hu, K. Kreischer, M. Rosay, M. Shapiro, J. Sirigiri, R. Temkin, P. Woskov // IEEE Trans Plasma Sci. – 2006. – Vol. 34, No 3. – P. 518–523.
4. Гольденберг А.Л. Электронно-оптическая система мощного гиротрона с неадиабатической электронной пушкой / А.Л. Гольденберг, В.Н. Мануилов, М.Ю. Глявин // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2005. – Т. 68, № 6. – С. 517-522.
5. Гольденберг А.Л. Технологический гиротрон с низким ускоряющим напряжением / А.Л. Гольденберг, М.Ю. Глявин, Н.А. Завольский, В.Н. Мануилов // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2005. – Т. 68, № 10-11. – С. 835-841.
6. Курушин А.А., Пластиков А.Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. – М. Издательство МЭИ, 2010, 160 с.
7. Запечалов В.Е. Численное моделирование и экспериментальное исследование магнетронно-инжекторных пушек мощных коротковолновых гиротронов / В.Е. Запечалов, А.Н. Куфтин, В.К. Лыгин, Ш.Е. Цимринг // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1992. – Т. 35, № 11-12. – С. 999-1007.
8. Запечалов В.Е. К теории винтовых пучков с захваченными электронами / В.Е. Запечалов, В.Н. Мануилов, Ш.Е. Цимринг // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1990. – Т. 33, № 12. – С. 1406-1411.
9. Мануилов В.Н. Траекторный анализ винтовых электронных пучков с учетом сил пространственного заряда / В.Н. Мануилов, Ш.Е. Цимринг // Электрон. Техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1977. – № 4. – С. 67-76.
10. Мануилов В.Н. Об учете сил пространственного заряда при траекторном анализе протяженных электронных пучков / В.Н. Мануилов, Ш.Е. Цимринг // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1981. – Т. 24, № 4. – С. 491-497.
11. Гольденберг А.Л. Формирование ВЭП в адиабатической пушке / А.Л. Гольденберг, М.И. Петелин // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1973. – Т. 16, № 1. – С. 141-149.
12. W. Herrmannsfeldt, "EGUN: An electron optics and gun design program," Stanford Linear Accelerator Center, Stanford, CA, Tech. Rep. SLAC-0331 UC-28, 1988.
13. Кулешов А. Н. Формирование электронных потоков с криволинейным движением для приборов типа ЛСЭ и МЦР / А. Н. Кулешов, Б. П. Ефимов // Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. / НАН Украины. Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова. – Харьков. – 2008. – Т.13, Спец. выпуск. – С.301-314.