

РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ГИРОТРОН НА ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКЕ ЦИКЛОТРОННОЙ ЧАСТОТЫ

Е.В. Иляков, Ю.К. Калынов, И.С. Кулагин, Ю.Д. Гром, В.Н. Мануилов, А.С. Шевченко

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты расчета и экспериментального исследования гиротрона, работающего на третьей гармонике циклотронной частоты. В качестве селективного элемента использованы связанные резонаторы с трансформацией мод. Импульсная выходная мощность излучения гиротрона достигала 0.8 МВт на частоте 80 ГГц при КПД около 14%. Мощность генерации ограничивалась СВЧ пробоем в первой секции резонатора.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ГИРОТРОН, ЦИКЛОТРОННЫЕ ГАРМОНИКИ, СЕЛЕКТИВНОСТЬ

RELATIVISTIC GYROTRON AT THE THIRD HARMONIC OF CYCLOTRON FREQUENCY

E.V. Ilyakov, Yu.K. Kalynov, I.S. Kulagin, Yu.D. Grom, V.N. Manuilov, A.S. Shevchenko

ABSTRACT

The results of the calculation and experimental study of a gyrotron operating at the third harmonic of the cyclotron frequency are presented. As a selective element, coupled resonators with mode transformation are used. The pulsed output power of the gyrotron radiation reached 0.8 MW at a frequency of 80 GHz with an efficiency of about 14%. The radiation power was limited by the microwave breakdown in the first section of the resonator.

KEYWORDS

RELATIVISTIC GYROTRON, CYCLOTRON HARMONICS, SELECTIVITY

ВВЕДЕНИЕ

Оптимистичный прогноз в освоении больших мощностей в миллиметровом диапазоне длин волн основывается на свойстве гирорезонансных приборов работать с развитыми в поперечном сечении электродинамическими системами, что упрощает решение проблем электропрочности приборов и формирования пучков с большими токами. Гиротроны миллиметрового диапазона длин волн являются самыми эффективными источниками мощного сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения как в области слабoreлятивистского диапазона энергий электронов менее 100 кэВ (максимальная мощность $2 \div 2.2$ МВт [1 - 3]), так и для более мощных гиротронов с энергией умеренного релятивизма $200 \div 500$ кэВ, где при длинах волн $3 \div 10$ мм получена мощность $2.5 \div 12$ МВт [4, 5].

Дальнейшее продвижение релятивистских гиротронов, работающих на основном циклотронном резонансе, в направлении увеличения частоты излучения требует соответствующего увеличения индукции магнитного поля, что ведет к усложнению и удорожанию магнитной системы. Этого предлагается избежать путём перехода к работе гиротрона на гармониках циклотронной частоты. Основным препятствием на пути использования высоких гармоник является паразитное возбуждение низших гармоник.

Задачу обеспечения селективной работы гиротрона на третьей циклотронной гармонике предлагается решать применением электродинамических методов селекции колебаний. Одним из таких методов является использование связанных резонаторов с трансформацией мод (СРТМ) хорошо известных из ранних работ [6, 7].

Структура СРТМ содержит два открытых резонатора круглого поперечного сечения с разными диаметрами и с совпадающими парциальными частотами на модах ТЕ типа, имеющих одинаковые азимутальные и разные радиальные индексы. В нерегулярной части соединяющей резонаторы имеет место взаимное преобразование мод, обуславливающее связь между резонаторами. При слабой связи резонаторы возбуждаются раздельно, и электромагнитное поле нормальных колебаний локализуется в одном из них. Связанные колебания возникают, когда разность частот парциальных колебаний не превышает величины $\Delta\omega < \omega/Q_{\min}$, где Q_{\min} – наименьшая из дифракционных добротностей отдельных резонаторов. Благодаря значительно большей разности частот в парах мешающих колебаний спектр сильно связанных мод в полосе циклотронного резонанса оказывается существенно разреженным, что вместе с меньшей протяженностью поля несвязанных паразитных мод позволяет получить повышенную селекцию по поперечному индексу.

В работе представлен релятивистский (280 кэВ) гиротрон работающий на третьей циклотронной гармонике с частотой генерации 80 ГГц. Селективная генерация на рабочей моде обеспечивалась за счет применения электродинамической системы типа СРТМ.

1. ВЫБОР РАБОЧЕЙ МОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РАСЧЕТА

Выбор рабочей пары мод СРТМ обуславливается рядом факторов (возможности электронно-оптической системы по возбуждению рабочей моды резонатора; необходимость обеспечения фазовой группировки пучка под действием рабочей моды во входной секции СРТМ; для гиротрона мегаваттного уровня мощности важна устойчивость моды к СВЧ пробую на стенке резонатора).

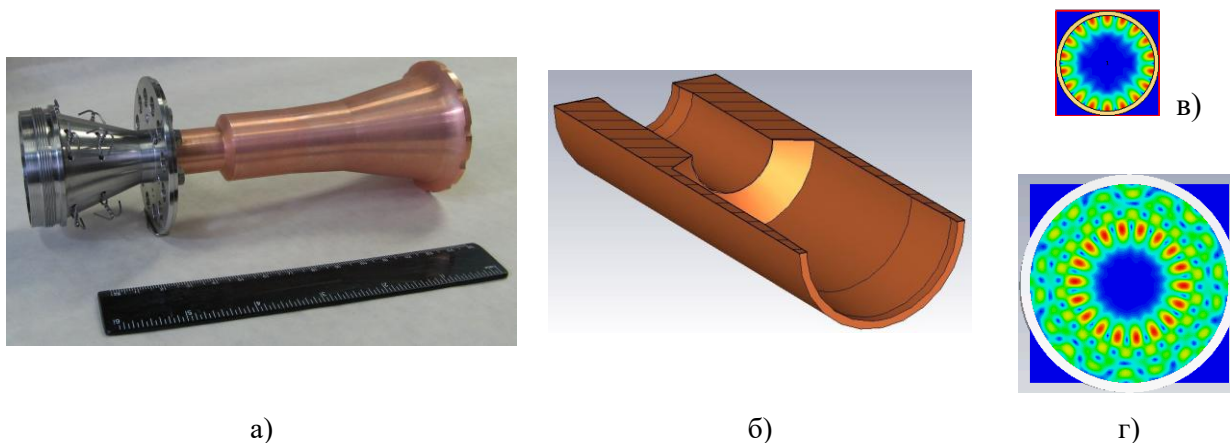


Рис. 1. Фото резонатора гиротрона (а); его сечение (б) и структуры поля рабочих мод ТЕ9.1 (в) и ТЕ9.3 (г)

В гиротроне использовалась электронная пушка и магнитная система, формирующие электронный пучок с энергией электронов 280 кэВ током до 50 А и средним радиусом электронного пучка 4,5 мм. Возможности магнитной системы позволяют обеспечить частоту генерации на третьей циклотронной гармонике 80 ГГц. С учетом указанных условий и сравнительно редкого спектра наиболее подходящим типом колебаний для входной секции СРТМ оказалась мода ТЕ9.1 (см. рис. 1 и спектр на рис. 2).

Ввиду проектной установки на получение выходной мощности излучения мегаваттного уровня, в качестве второй моды рабочей пары колебаний СРТМ была выбрана мода TE9.3 (см. рис. 1 и спектр на рис. 3). В процессе моделирования электронно-волнового взаимодействия в гиротроне с СРТМ при условии среднего питч-фактора электронов 1,3 были определены параметры резонатора (рис. 1). Длина и диаметр входной секции составили 22 мм и 12,78 мм соответственно. Длина выходной секции составила 26 мм, а диаметр 22,67 мм. Длина связывающего перехода составила 3 мм.

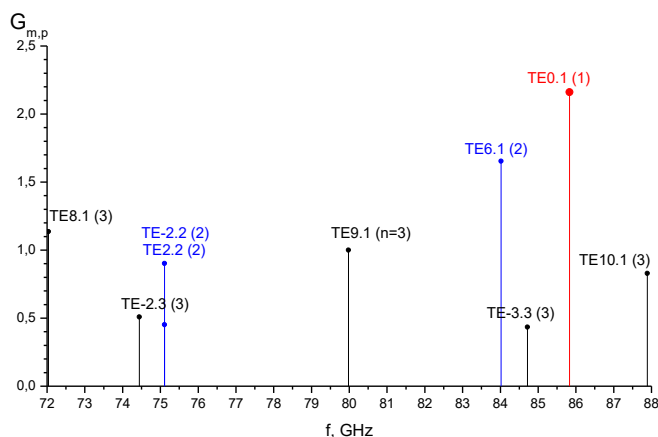


Рис. 2. Расчетный спектр возможных мод для входной секции резонатора. По вертикали отложен фактор возбуждения. В скобках указан номер циклотронной гармоники (свой цвет для каждого номера)

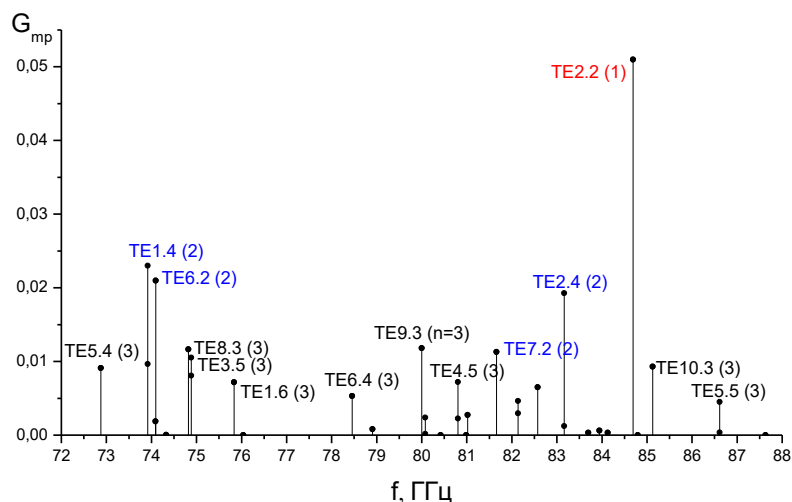


Рис. 3. Расчетный спектр возможных мод выходной секции резонатора. Обозначения такие же, как на рис. 2

Согласно расчету, при рабочем токе 50 А электронный КПД в такой электродинамической системе может достигать 17%, что с учетом омических потерь дает полный КПД 14.5% и мощность выходного излучения около 2 МВт.

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА И УСЛОВИЯ ЕГО ПРОВЕДЕНИЯ

Эксперименты проводились на сильноточном микросекундном электронном ускорителе «Сатурн-Д» с термоэмиссионным инжектором электронов, работающего в режиме разовых импульсов [8]. Специальная неадиабатическая магнетронно-инжекторная пушка позволяла за счёт сокращения времени вывода электронов в область высоких

потенциалов увеличить рабочий ток до 50% от ленгмюровского тока пушки и формировать интенсивный квазиламинарный винтовой электронный пучок с высоким питч-фактором и малым разбросом по поперечным скоростям [9]. Для рассматриваемого гиротрона расчет формирования электронного пучка был проведен в рамках моноскоростной модели, при которой не учитываются шероховатости эмиттера и тепловые скорости электронов, эмитированных нагретым термокатодом. При энергии электронов 280 кэВ, диаметре пучка 9 мм, величине магнитного поля 1,40 Тл и токе 50 А расчетный питч-фактор составлял 1,34 при разбросе электронов по поперечным скоростям 7,8%.

Схема эксперимента приведена на рис. 4. Для предотвращения паразитной генерации во входной части канала транспортировки, которая может нарушать нормальную работу прибора, в том числе приводить к развитию СВЧ и высоковольтных пробоев в электронной пушке, во входном конусе размещались СВЧ поглотители (4 на рис. 4). В исследованиях релятивистского гиротрона 8-миллиметрового диапазона длин волн применение таких поглотителей позволило повысить ток транспортировки, питч-фактор электронного пучка и, соответственно, мощность выходного излучения гиротрона [10]. Выходной тракт гиротрона 1, 2 заканчивался выходным переходом 3, необходимым для предотвращения развития паразитной генерации в выходной части однородного магнитного поля, и вакуумным СВЧ окном из фторопласта, обеспечивающего малую величину отражений в широком диапазоне частот. Соленоид магнитного поля 7 имел два дополнительных участка намотки, позволяющих создать показанную на рис. 4 область магнитного поля с однородностью не хуже 0,5 %.

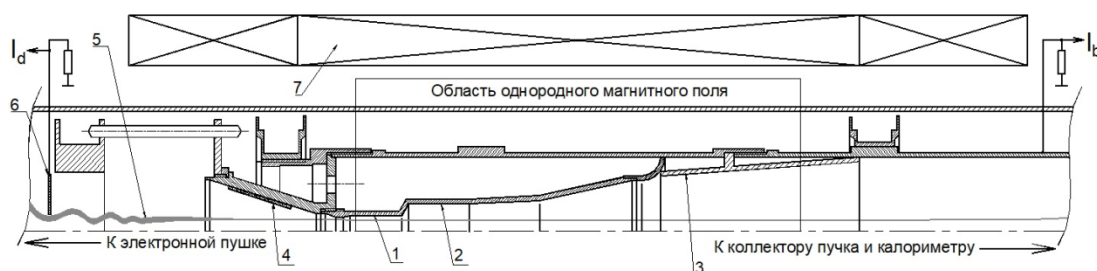


Рис. 4. Схема эксперимента: 1 – входная секция резонатора; 2 – выходная секция; 3 – выходной переход; 4 – СВЧ поглотители; 5 – электронный пучок; 6 – диафрагма; 7 – соленоид магнитного поля

Согласно предыдущим экспериментам, на фронтах высоковольтного импульса могут возбуждаться паразитные моды, имеющие преимущество по стартовым условиям над рабочей модой, которые могут продолжить свое существование и при номинальных параметрах пучка. Чтобы этого избежать, следует воспользоваться ламинарностью формируемого пучка и установить (в точке минимального отклонения пучка от оси при номинальном напряжении) диафрагму 6, которая будет пропускать пучок только с номинальными параметрами [11]. Также (согласно [9]), на диафрагме будут осаждаться электроны с наибольшей поперечной скоростью, адиабатически отражающиеся в нарастающем магнитном поле, то есть будет сохраняться высокое качество электронного пучка по разбросу скоростей и питч-фактору в широком диапазоне токов.

Ток электронного пучка I_b измерялся с помощью шунта, соединенного с резонатором и выходным волноводным трактом (коллектором электронов), гальванически изолированными от анода. Для контроля прохождения электронного пучка через

диафрагму, измерялся ток диафрагмы I_d . Мощность излучения в эксперименте измерялась с помощью импульсного твердотельного калориметра, аналогичного [12], но с большей входной апертурой (300 мм). Частота излучения определялась набором запредельных волноводов и гетеродинным методом.

С целью предотвращения развития СВЧ пробоя резонатор гиротрона изготавливался из бескислородной меди и поддерживался во время работы СВЧ прибора при температуре 500°C для устранения адсорбированных молекул [13]. При такой температуре проводимость бескислородной меди уменьшается примерно в три раза до 19.7 См/мкм , что существенно уменьшает искажения импульсного магнитного поля, транспортирующего электронный пучок, и несколько увеличивает омические потери СВЧ излучения в резонаторе. С повышением температуры линейные размеры секций увеличиваются на 0.86% по сравнению с расчетными. Однако резонансные частоты секций смещаются при этом в одну сторону, и рассогласования секций резонатора не происходит.

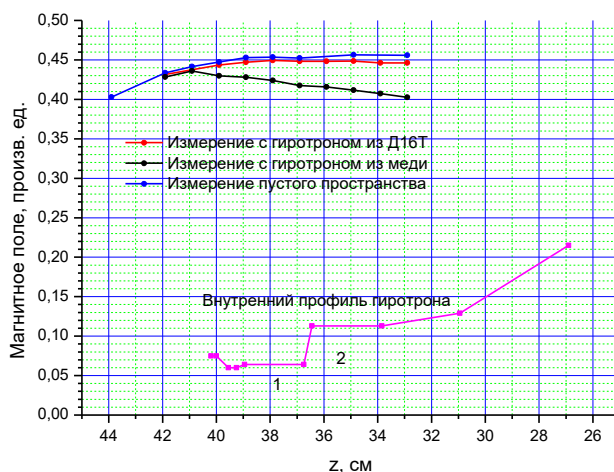


Рис. 5. Измерения магнитного поля при комнатной температуре: в гиротроне из меди, из Д16Т и в пустом пространстве взаимодействия – в зависимости от продольной координаты. Показано расположение внутреннего профиля гиротрона: 1 – входная секция; 2 – выходная секция резонатора

Для адекватной работы СРТМ важно согласовать не только резонансные частоты, но и циклотронные частоты электронов взаимодействующих с СВЧ полем в секциях резонатора. В связи с этим особую важность приобретает настройка профиля магнитного поля вдоль СРТМ. Расчеты диктуют весьма строгую однородность магнитного поля, но при использовании импульсного питания соленоидов и при нерегулярном профиле СРТМ, распределение токов Фуко может нарушить условия работы прибора [14] (см. рис. 5). Учитывая, что в процессе работы электродинамическая система гиротрона разогревается до 500°C , для измерения магнитного поля была изготовлена копия резонатора из дюралюминия марки Д16Т, которая при комнатной температуре имеет ту же проводимость, что и разогретая медь. На рис. 5 показано, насколько токи Фуко изменяют магнитное поле резонатора из меди, однако повышение температуры до 500°C устанавливает поле почти на уровне пустого пространства взаимодействия.

Требования к профилю магнитного поля и результаты его измерений (рис. 5) показали, что для согласования циклотронных частот в секциях СРТМ резонатор гиротрона следует передвинуть в сторону катода в крайнюю часть области с однородным

магнитным полем. Для заполнения образовавшегося пустого пространства в остальной части однородной области устанавливался дополнительный выходной переход 3.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИРОТРОНА

В эксперименте была получена генерация на комбинации связанных рабочих мод TE9.1 - TE9.3. Возбуждение связанных колебаний подтверждалось измерением частоты излучения, а также измерением выходной мощности, стартового тока и эффективности генерации. Частота излучения измерялась путем прохождения сигнала на регистрирующий детектор через волноводный фильтр с частотой отсечки 75 ГГц и затем уточнялась гетеродинным методом. Измеренная частота излучения составила 79,33 ГГц (длина волны около 3,8 мм), что соответствует генерации на третьей циклотронной гармонике. Минимальный стартовый ток (около 3 А) при возбуждении связанных колебаний был существенно меньше стартового тока отдельной секции резонатора. Максимальная достигнутая мощность составила около 0,8 МВт. Дальнейшее повышение мощности было ограничено СВЧ пробоем, который, по всей видимости, происходил на стенке входной секции резонатора. Согласно расчету напряженность электрического поля моды TE9.1 на стенке первой секции резонатора при мощности около 0,8 МВт превышала 90 кВ/см, что и приводило к пробое. Следует отметить, что в выходной секции, согласно структуре моды TE9.3, напряженность электрического поля не превышала 30 кВ/см. Попытка избежать СВЧ пробоя методом химической полировки внутренней поверхности резонатора не привела к ожидаемому результату.

Характерный СВЧ импульс при генерации на третьей циклотронной гармонике показан на рис. 6. На фоне высоковольтного импульса U и тока I , прошедшего через диафрагму показан импульс с СВЧ детектора после прохождения излучения через волноводный фильтр с частотой отсечки 75 ГГц, а также сигнал с СВЧ детектора без фильтра чувствительного к излучению на частотах диапазона 25-60 ГГц. К указанному диапазону частот относятся ближайšie паразитные моды обеих секций СРТМ. Отсутствие на осциллограмме видимых сигналов из указанного диапазона частот свидетельствует об эффективной селекции связанных колебаний в СРТМ, что позволило реализовать устойчивую одномодовую генерацию на третьей циклотронной гармонике.

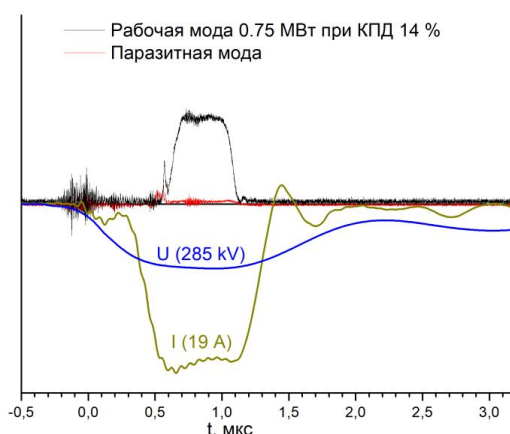


Рис. 6. Осциллограммы генерации гиротрона со связанными секциями резонатора при напряжении электронного пучка 285 кВ и токе 19 А. Мощность генерации составляет 0,75 МВт при КПД 14 %

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В гиротроне на релятивистском электронном пучке на третьей циклотронной гармонике реализовано мощное излучение мегаваттного уровня на длине волны 3,8 мм с достаточно высокой эффективностью около 14 %, что свидетельствует об эффективности электродинамической селекции колебаний за счет использования СРТМ. Получено излучение мощностью до 0,8 МВт. Мощность генерации была ограничена СВЧ пробоем во входной секции резонатора. Получение более мощной генерации потребует поиска более электропрочной пары рабочих мод.

Работа выполнена при поддержке Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», тема № 0030-2021-0027.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rzesnicki T., Piosczyk B., Kern S., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. Vol.38, No.6. P.1141 (2010).
2. Thumm M. // IEEE Trans. Plasma Sci. Vol.42, No.3. P.590 (2014)
3. Гольденберг А.Л., Денисов Г.Г., Запевалов В.Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. Т.39, №6. С.635 (1996)
4. Зайцев Н.И., Завольский Н.А., Запевалов В.Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. Т.46, №10. С.914 (2003)
5. Bratman V.L., Botvinik I.E., Grom Yu.D., et al. // Proc. SPIE of 16th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. May 23-30, 1994. Moscow - St. Petersburg, Russia. SPIE 2259. P. 538 (1994).
6. Авт. свид. 661664 СССР. Открытый резонатор. Оpubл. в Б.И., 1979. № 17. С.240/ Павельев В.Г., Цимринг Ш.Е.
7. Малыгин С.А. // Радиотехника и электроника. № 2. С.334 (1986).
8. Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кораблев Г.С. и др. // Приборы и техника эксперимента. № 3. С.138 (1995).
9. Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кулагин И.С. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. Т.47, №5-6. С.453 (2004).
10. Завольский Н.А., Иляков Е.В., Кулагин И.С. // XV Научно-технич. конф. «Вакуумная наука и техника». Материалы конференции, 5-12 октября 2008, Дагомыс, Краснодарский край. С.96 (2008).
11. Завольский Н.А., Иляков Е.В., Калынов Ю.К. и др. // Труды XXIII Научно-технич. конф. «Вакуумная наука и техника», сентябрь 2016, Судак, Крым, Россия. С.29 (2016).
12. Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Ковнеристый Ю.К. и др. // Приборы и техника эксперимента. №2. С.153 (1992).
13. Pyakov E.V., Korablyov G.S., Kulagin I.S., Zaitsev N.I. // IEEE Trans. Plasma Sci. V.26, No.3. P.332 (1998).
14. Мануилов В. Н., Лихтерова П.Д., Иляков Е. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 65, №5–6. С. 465 (2022).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Иляков Евгений Викторович – кандидат физико-математических наук. Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород. E-mail: ilyakov@ipfran.ru

Калынов Юрий Константинович – кандидат физико-математических наук. Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород. E-mail: kalynov@ipfran.ru

Кулагин Игорь Станиславович – кандидат физико-математических наук. ORCID: 0000-0002-1216-6580. Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород. E-mail: ikulagin@ipfran.ru

Гром Юрий Дмитриевич – Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород. E-mail: grom@ipfran.ru

Мануилов Владимир Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-7962-5254. Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского. г. Нижний Новгород. E-mail: mavnik1@yandex.ru

Шевченко Александр Сергеевич – Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород.