

ЭЛЕКТРОНИКА  
И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.384.6

РЕЗОНАТОРЫ ДЛЯ БЛОКА ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ  
ПЕРЕХОДОВ В ПОЛЯРИЗОВАННЫХ АТОМАХ  
ВОДОРОДА И ДЕЙТЕРИЯ<sup>1</sup>

©2024 г. В. В. Парамонов<sup>а,\*</sup>, А. С. Белов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт ядерных исследований Российской академии наук

Россия, 117312, Москва, пр. 60-летия Октября, 7а

\*e-mail: paramono@inr.ru

Поступила в редакцию 05.04.2024 г.

После доработки 13.05.2024 г.

Принята к публикации 24.05.2024 г.

Компактные СВЧ-резонаторы предназначены для генерации магнитного ВЧ-поля, индуцирующего ВЧ-переходы между спиновыми состояниями атомов водорода и дейтерия в источниках поляризованных ионов. Резонаторы работают на частоте порядка 380 МГц для поляризованных атомов дейтерия, либо на частоте порядка 1480 МГц для поляризованных атомов водорода. В обоих случаях обеспечивается единая плоскость поляризации частиц. Формируется однородное распределение магнитного ВЧ-поля с минимальной паразитной, перпендикулярной к плоскости поляризации, составляющей. Рассмотрены варианты технической реализации резонаторов.

**Ключевые слова:** поляризованные атомы, спиновые состояния, СВЧ-резонаторы

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Ускоренные пучки поляризованных протонов и дейтронов используются в исследованиях фундаментальных свойств материи. Эффективность проводимых дорогостоящих экспериментов существенно определяется как интенсивностью, так и степенью поляризации пучков. Пучки с высокой степенью поляризации получаются с использованием пространственного разделения атомов различных состояний сверхтонкой структуры (ССС) при прохождении магнитов с неоднородным полем и возбуждением переходов между СССР при прохождении блока ВЧ-переходов (БВЧП).

---

<sup>1</sup> Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц "RuPAC'23", Новосибирск.

Частицы пропускаются через статическое магнитное поле, имеющее градиент вдоль оси пучка. В этом поле размещается резонатор, создающий совпадающее по направлению с внешним магнитное ВЧ-поле с частотой, соответствующей разности энергий между спиновыми состояниями. Эффективность адиабатических ВЧ-переходов близка к единице [1].

## 2. ТРЕБОВАНИЯ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Резонатор БВЧП должен обеспечивать возбуждение ВЧ-колебаний с частотой порядка 1480 МГц при работе с атомами водорода и порядка 380 МГц при работе с атомами дейтерия. Длины волн этих колебаний равны примерно 20 см и 79 см соответственно. Резонатор помещается между профилированными полюсами электромагнита, создающего стационарное магнитное поле, и должен иметь весьма малые размеры, по наибольшему измерению существенно меньше четверти длины волны. Естественным решением, позволяющим реализовать резонансную систему в ограниченном объеме и с поперечной составляющей магнитного поля  $H_x$ , является использование в резонаторе отрезков двухпроводной линии, в дальнейшем вибраторов, закрепленных одним концом на корпусе резонатора, с разомкнутыми вторыми концами. Для понижения частоты колебаний на разомкнутых концах вибраторов предусматривается сильная емкостная нагрузка. Одно из таких устройств, используемое в источнике поляризованных дейтронов [2], схематично показано на рис. 1. Вибраторы выполнены из отрезков плоской линии и в качестве рабочего используется противофазное колебание.

**Рис. 1.** Схема одномодового резонатора БВЧП [2]

В источниках поляризованных ионов с атомарным пучком могут поочередно генерироваться пучки поляризованных протонов и дейтронов. Для переключения режима работы источника с одномодовым резонатором БВЧП необходима смена этого блока. Для упрощения и сокращения длительности процедуры переключения предложен двухмодовый резонатор [3], показанный на рис. 2. В этой конструкции резонатор содержит две колебательные системы, каждая из которых образована парой цилиндрических вибраторов с укорачивающими емкостями. Для обеих пар вибраторов в качестве укорачивающей емкости используются сосредоточенные элементы – конденсаторы. Для обоих колебаний, как низкочастотного с частотой возбуждения около 380 МГц, так и высокочастотного с частотой порядка 1480 МГц, магнитное поле ВЧ-колебаний имеет как параллельную  $H_x$ , так и перпендикулярную  $H_y$  составляющие по отношению к внешнему магнитному полю. Для достижения максимальной степени

поляризации ионов следует обеспечить параллельность магнитного ВЧ-поля стационарному внешнему магнитному полю. Цилиндрическая форма вибраторов ведет к зависимости величины составляющих магнитных полей ВЧ-колебаний от расстояния до оси пучка.

**Рис. 2.** Двухмодовый резонатор для БВЧП [3].

### 3. РАЗРАБОТАННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

#### 3.1. Варианты конструкции резонатора БВЧП

Необходимо сохранить малые размеры резонаторов, поэтому все рассмотренные ниже варианты вписаны в корпус одномодового прямоугольного резонатора, показанного на рис. 1. Длина резонаторов по оси пучка равна 40 мм. Радиус апертуры – внутренний радиус приосевых частей вибраторов – равен 13.5 мм.

Все рассмотренные конструкции симметричны относительно плоскостей  $x=0$  и  $y=0$ . Симметрия относительно плоскости  $x=0$ , обеспечивая параллельность составляющей  $H_x$  ВЧ-колебаний внешнему стационарному магнитному полю, определяет единую плоскость поляризации при использовании БВЧП как для протонов, так и дейтронов. Симметрия относительно плоскости  $y=0$  обеспечивает равенство частот вибраторов в колебательных системах, однородность распределения компоненты  $H_x$  и минимальную величину компоненты  $H_y$  ВЧ-полей рабочих противофазных колебаний в апертуре резонаторов.

В заданных размерах двухмодовый резонатор с двумя колебательными системами схематично показан на рис. 3. Каждая система образована из двух вибраторов, сформированных их отрезков полосковой линии. Для обеспечения частоты колебаний около 380 МГц без применения сосредоточенных элементов нужны относительно длинные вибраторы. Для их размещения приходится использовать все возможное пространство и обеспечивать сильную емкостную нагрузку на разомкнутых концах. Для вибраторов более компактной высокочастотной системы вибраторы низкочастотной служат как заземление. Распределения составляющих  $H_x$  колебаний на оси резонатора показаны на рис. 4.

**Рис. 3.** Первый вариант разработанного двухмодового резонатора

**Рис. 4.** Распределения компоненты  $H_x$  на оси резонатора для высокочастотного (1) и низкочастотного (2) колебаний

Прилегающие к области прохождения пучка части поверхностей для обеих систем выполнены в виде вогнутых цилиндрических сегментов (рис. 5). По сравнению с

плоской прилегающей поверхностью вибраторов в одномодовом резонаторе (рис. 1 [1]) и, особенно, с цилиндрической поверхностью в известном двухмодовом резонаторе (рис. 2 [2]), такая конфигурация позволяет получить существенно более равномерное распределение составляющей  $H_x$  в апертуре резонатора. Однородность этого распределения во всей апертуре резонатора можно оценить по приведенным на рис. 6 поверхностям уровня величины  $|(H_x(x,y,z) - H_x(0,0,z))/H_x(0,0,z)| \%$ . Плоскости  $z=-10$  мм и  $z=10$  мм соответствуют максимальным величинам компоненты  $H_x$  для низкочастотного и высокочастотного колебаний соответственно (см. рис. 4). Из приведенных на рис. 6 поверхностей уровня видно, что относительная неоднородность распределения  $H_x(x,y,z)$  не более 10% для обоих колебаний обеспечивается в области не менее половины радиуса апертуры.

**Рис. 5.** Форма приосевых частей вибраторов

**Рис. 6.** Контуры линий уровня относительной неоднородности распределения составляющей  $H_x$  магнитных ВЧ-полей

### 3.2. Диэлектрические вставки

Для обеспечения нужной емкостной нагрузки вибраторов низкочастотной системы необходимо с высокой точностью обеспечивать при изготовлении и поддерживать при эксплуатации малое расстояние между вибраторами и корпусом резонатора. Необходимость этого устраняется введением в конструкцию пластин из СВЧ-диэлектрика с малым тангенсом угла диэлектрических потерь. Модификация изображенного на рис. 3 резонатора с двумя колебательными системами при введении пластин диэлектрика показана на рис. 7а для диэлектрика с относительной проницаемостью  $\epsilon=2.7$ .

**Рис. 7.** Резонаторы с пластинами диэлектрика с двумя одномодовыми колебательными системами (а) или одной двухмодовой (б)

Введение пластин диэлектрика дает дополнительную степень свободы и позволяет реализовать двухмодовый режим только с одной колебательной системой из двух вибраторов (рис. 7б). Для вибратора с одним заземленным и вторым разомкнутым концами отношение частот первого обертона и основного колебания равно примерно 3/1. Это меньше отношения частот 1480 МГц/380 МГц  $\sim 3.89$  для работы с атомами водорода и дейтерия. Но частота первого обертона существенно менее чувствительна к величине емкостной нагрузки на открытом конце. Введение пластин диэлектрика на разомкнутом конце увеличивает разделение частот первого обертона и основного колебания. Длина вибратора выбирается для частоты первого обертона немного выше

1480 МГц. Выбором размеров и места расположения пластин диэлектрика на разомкнутом конце достигается частота первого противофазного обертона 1480 МГц и частота основного противофазного колебания 380 МГц. Распределения составляющих  $H_x$ , настроенных таким образом колебаний показаны на рис. 8.

**Рис. 8.** Распределение компоненты  $H_x$  на оси резонатора для основного колебания

Для системы двухмодовых вибраторов (рис. 7б) достаточно одной ВЧ-петли ввода и одной сигнальной ВЧ-петли для возбуждения и диагностики обоих ВЧ-колебаний. Введение пластин СВЧ-диэлектрика у разомкнутых концов вибраторов не влияет на равномерность распределений  $H_x$  в апертуре резонатора и практически не приводит к снижению ВЧ-эффективности. Технические конструкции рассмотренных резонаторов дополняются четырьмя элементами подстройки частот, а также петлями ВЧ-ввода и сигнальной для двух колебательных систем (рис. 3).

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены варианты двухмодовых резонаторов для применения в блоке высокочастотных переходов источников поляризованных протонов и дейтронов. Заложенные в конструкцию резонаторов условия симметрии обеспечивают единую плоскость поляризации. Оптимизированной формой вибраторов в области пучка обеспечивается равномерное распределение рабочей составляющей магнитного ВЧ-поля при одновременной минимизации паразитной перпендикулярной составляющей. Таким образом обеспечивается возможность получения максимальной эффективности блока переходов. По габаритам рассматриваемые резонаторы не превышают известные аналоги, превосходя их по эффективности использования ВЧ-мощности.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

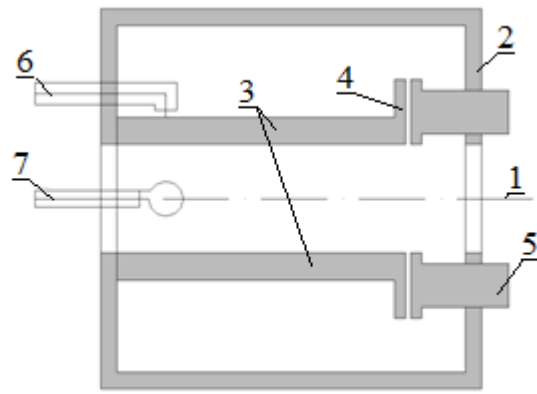
#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baumgarten C., Braun D., Court G. et al. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2002. V. 482. P. 606. [http://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)01738-7](http://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)01738-7)
2. Belov A.S., Donets D.E., Fimushkin V.V., Kovalenko A.D., Kutuzova L.V., Prokofichev Yu.V., Shutov V.B., Turbabin A.V., Zubets V.N. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 938. P. 012017. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/938/1/012017>

3. *Carassiti V., Ciullo G., Lenisa P., Nass A., Steffens E.* // Phys. Part. Nucl. 2014. V. 45. P. 283. <http://doi.org/10.1134/S1063779614010171>

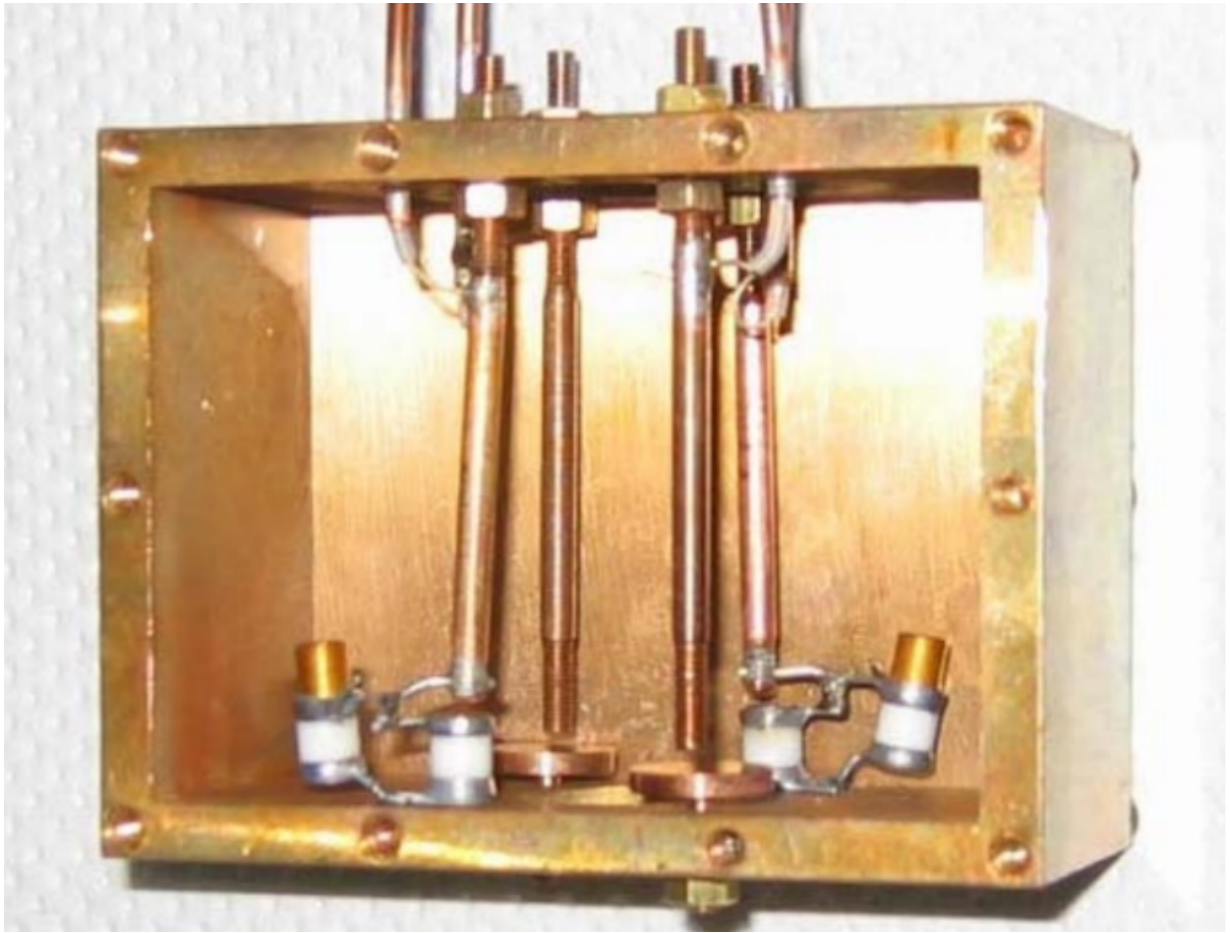
## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема одномодового резонатора БВЧП [2]: 1 – ось пучка, 2 – корпус резонатора, 3 – вибраторы, 4 – часть вибратора для емкостной нагрузки, 5 – элементы подстройки частоты, 6 – ВЧ-ввод, 7 – измерительная ВЧ-петля.
- Рис. 2.** Двухмодовый резонатор для БВЧП [3].
- Рис. 3.** Первый вариант разработанного двухмодового резонатора: а – резонатор в сборе, б – вибраторы колебательных систем: 1 – ось пучка, 2 – корпус резонатора, 3 – вибраторы низкочастотной системы, 4 – вибраторы высокочастотной системы.
- Рис. 4.** Распределения компоненты  $H_x$  на оси резонатора для высокочастотного (1), и низкочастотного (2) колебаний.
- Рис. 5.** Форма приосевых частей вибраторов: 1 – ось пучка, 2 – внутренняя часть поверхности вибраторов.
- Рис. 6.** Контуры линий уровня относительной неоднородности распределения составляющей  $H_x$  магнитных ВЧ-полей для низкочастотного (а,  $z=-10$  мм) и высокочастотного, (б,  $z=10$  мм) колебаний в апертуре резонатора.
- Рис. 7.** Резонаторы с пластинами диэлектрика с двумя одномодовыми колебательными системами (а) или одной двухмодовой (б): 1 – ось пучка, 2 – корпус резонатора, 3 – вибраторы низкочастотной системы, 4 – вибраторы высокочастотной системы, 5 – пластины диэлектрика, 6 – вибраторы двухмодовой системы.
- Рис. 8.** Распределение компоненты  $H_x$  на оси резонатора для основного колебания 1 и первого обертона 2 в системе двухмодовых вибраторов (см. рис. 7б).



**Рис. 1**





**Рис. 2**

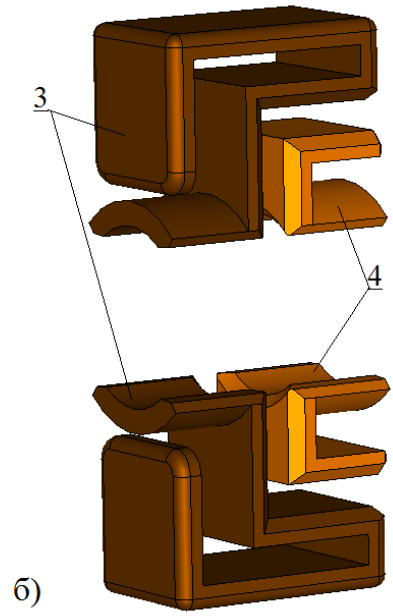
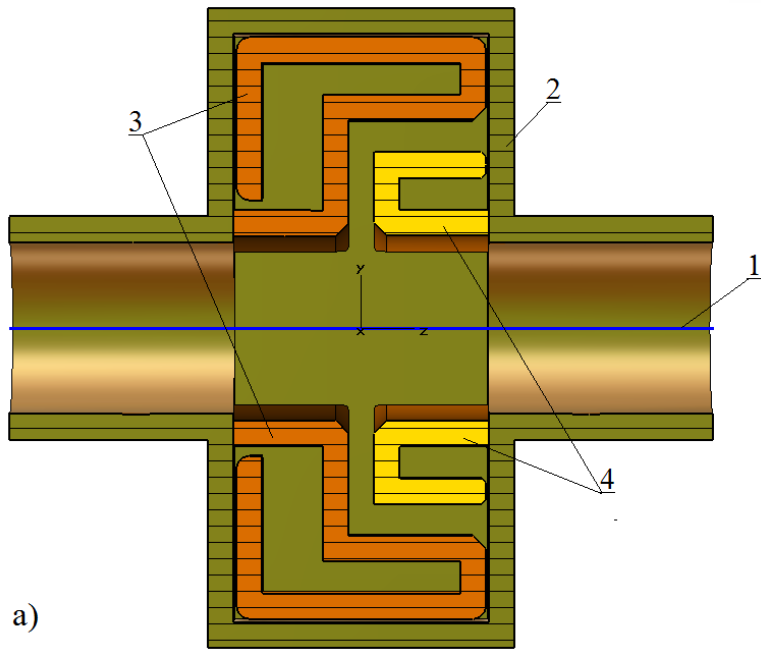
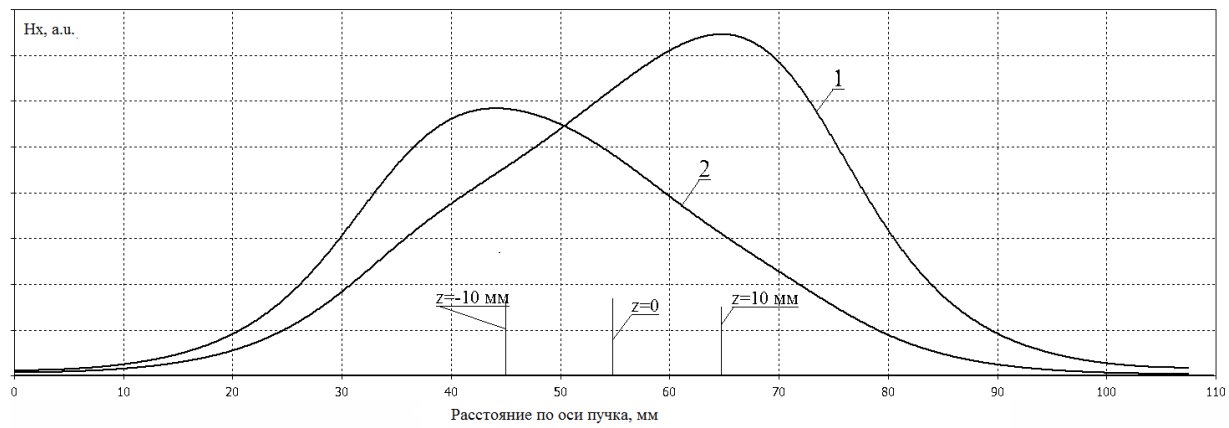


Рис. 3



**Рис. 4**

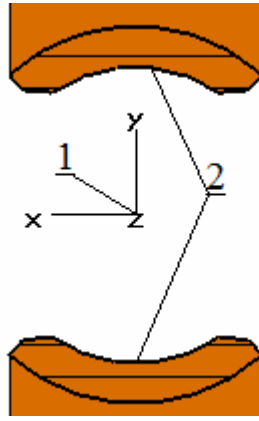


Рис. 5

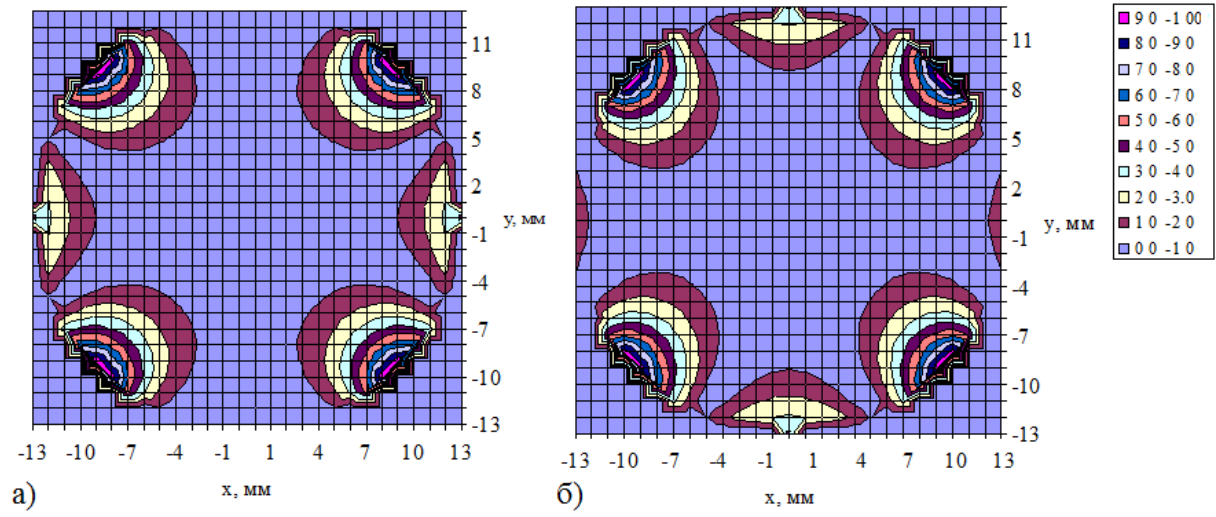


Рис. 6

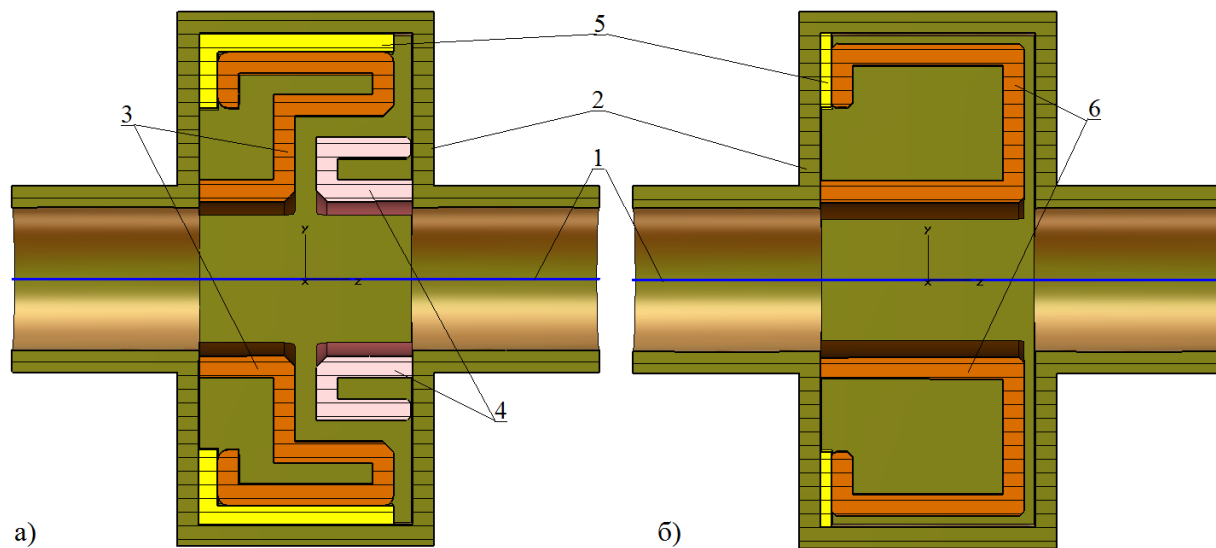
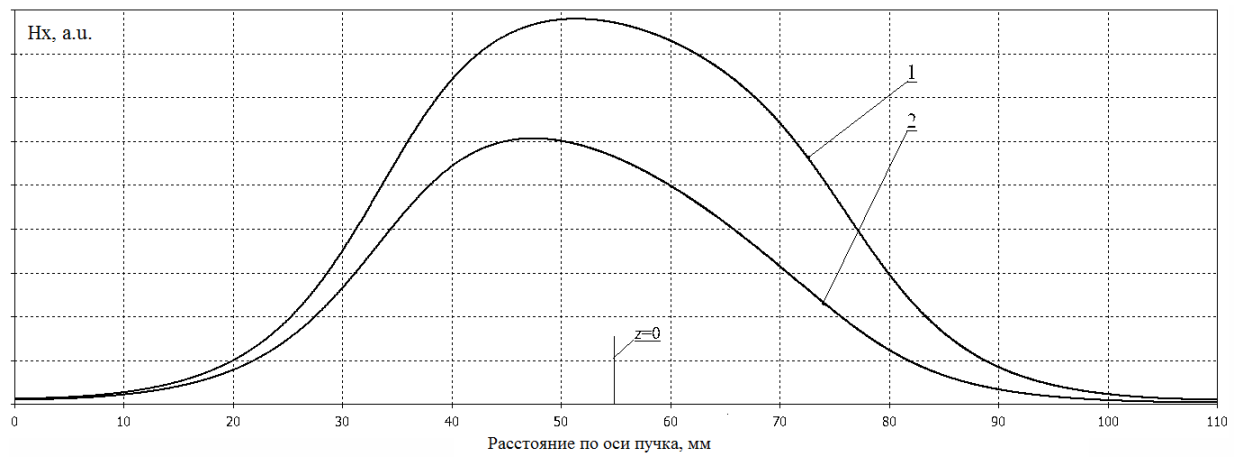


Рис. 7



**Рис. 8**

Для связи с авторами:

Парамонов Валентин Витальевич

E-mail: paramono@inr.ru

Белов Александр Степанович

E-mail: belov@inr.ru

Для переводчика:

## RF cavities for a unit of RF transitions in polarized hydrogen and deuterium atoms

V.V. Paramonov, A.S. Belov

*Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of  
117312, Prospekt 60-letiya Oktyabrya, 7a, Moscow, Russia*

*\*e-mail: paramono@inr.ru*

**Abstract** -Compact RF cavities are designed to generate a magnetic RF field that induces RF transitions between the spin states of hydrogen and deuterium atoms in sources of polarized ions. The cavities operate either at a frequency of about 380 MHz for polarized deuterium atoms, or at a frequency of ~1480 MHz for polarized hydrogen atoms. In both cases, a single plane of particle polarization is provided. A uniform distribution of the magnetic RF field is formed with minimal parasitic component, transverse to the plane of polarization. Options for technical implementation of cavities are considered.

**Keywords:** RF cavities, polarized ions, spin states

### СПИСОК СПЕЦИФИЧЕСКИХ ТЕРМИНОВ И ИХ ПРИНЯТЫЙ ПЕРЕВОД НА АНГЛИЙСКИЙ ЯЗЫК И СОКРАЩЕНИЙ

Высокочастотный - radio frequency - RF

Высокочастотный резонатор – RF cavity.

Двухмодовый резонатор – dual mode cavity