

УДК 621.385.632

## НЕТРАДИЦИОННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ<sup>1</sup>

Ю. Н. Пчельников<sup>1</sup>, А. Ю. Мирошниченко<sup>2</sup>, Н. А. Акафьева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Scientific Application International Corporation, MCLEAN, VA, 22102, USA

<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Получена 13 июня 2013 г.

**Аннотация.** В работе рассматриваются свойства замедленных (поверхностных) волн, которые во многом определяются частотой электромагнитных колебаний, конфигурацией и конструкцией замедляющих систем, а также типом возбуждаемой волны. При этом замедление и рабочая частота определяют распределение энергии электрического и магнитного поля внутри обрабатываемого объекта или на его поверхности. Эти свойства позволяют использовать замедленные волны при измерениях и контроле технологических процессов, при термообработке различных материалов и продуктов, генерации холодной и горячей плазмы, а также для медицинских целей (ВЧ и СВЧ физиотерапия, стерилизация медицинских отходов, коагуляция, диагностика).

**Ключевые слова:** замедляющая система, взаимодействие, импедансный проводник, электромагнитная волна, термообработка материалов, физиотерапия.

**Abstract.** In this paper we consider the properties of slow (surface) waves, which are mostly determined by the frequency of electromagnetic waves, the configuration and design of slow-wave structures, as well as by the type of the excited wave. The slowing down as well as the operating frequency determine the energy distribution of

---

<sup>1</sup> Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.В37.21.0909 «Исследование физических процессов в мощных многолучевых СВЧ электровакуумных приборах с электродинамическими системами, выполненными на основе многомодовых резонаторов»

the electric and magnetic fields inside the object or on its surface. These properties allow using slow-waves for measurements and control of manufacturing processes, for thermal treatment of a variety of materials and products that generate cold and hot plasma, as well as for medical purposes (RF and Microwave physical therapy, sterilization of medical waste, coagulation, diagnostics).

**Keywords:** slow-wave structure, interaction, impedance conductor, electromagnetic wave, thermal treatment, physiotherapy.

## **Введение**

Нетрадиционное применение систем возникло в начале 70-х годов прошлого столетия с разработки датчика сплошности криогенных жидкостей на цилиндрической спирали, помещённой в диафрагмированный волновод [1, 2]. Затем были датчики для контроля радиозащитных покрытий, датчик для жидкого водорода в системе охлаждения ядерного реактора Такомак и другие устройства, позволявшие называть эту тематику «Применение замедляющих систем (ЗС) в оборонных целях».

С началом «перестройки» это направление было трансформировано к «Мирному применению ЗС», вылившемуся в новые методы измерений и контроля процессов напыления и других технологических процессов [3-11], микроминиатюризацию пассивных элементов и антенн [12-14], ВЧ и СВЧ термообработку [15-17], генерацию плазмы, обнаружению скрытых объектов [18], физиотерапию и диагностику, и другие применения в медицине [19].

Несмотря на большой ожидаемый эффект, реализация этих работ прекратилась с развалом СССР, а достаточно широкое внедрение в США оказалось невозможным не только из-за затянувшегося кризиса, но и из-за практически полного отсутствия в гражданских отраслях специалистов по физике и электродинамике ЗС. Остановился выпуск датчиков для контроля толщины металлизации и проводимости полупроводниковых подложек, датчиков для обнаружения коррозии и трещин в газо- и нефтепроводах [20]. Остановился уже начавшийся выпуск излучателей для физиотерапии.

Ниже на конкретных примерах будет продемонстрировано лишь одно из многих направлений новой области ВЧ и СВЧ техники, «Нетрадиционное применение замедляющих систем», применение ЗС в медицинских целях.

## 1. Определения

Нетрадиционное применение ЗС оказалось возможным благодаря ряду замечательных особенностей замедленных волн, определяемым как замедлением электромагнитной волны, так и конфигурацией самих замедляющих систем.

Замедленные электромагнитные волны часто называют поверхностными волнами, имея в виду поверхностный характер их распределения. Хотя замедление можно осуществлять с помощью диэлектриков и магнетиков, на практике используются в основном ЗС, образованные металлическими проводниками. Вызывается замедление в основном за счёт увеличения пути, проходимого волной вдоль проводников, образующих ЗС. Как правило, один из них, т.н. импедансный проводник имеет сложную конфигурацию, такую как меандр или цилиндрическая спираль (см. рис. 1), а другой, экранный проводник, имеет, как правило, простую конфигурацию (пластина, цилиндр и т.д.).

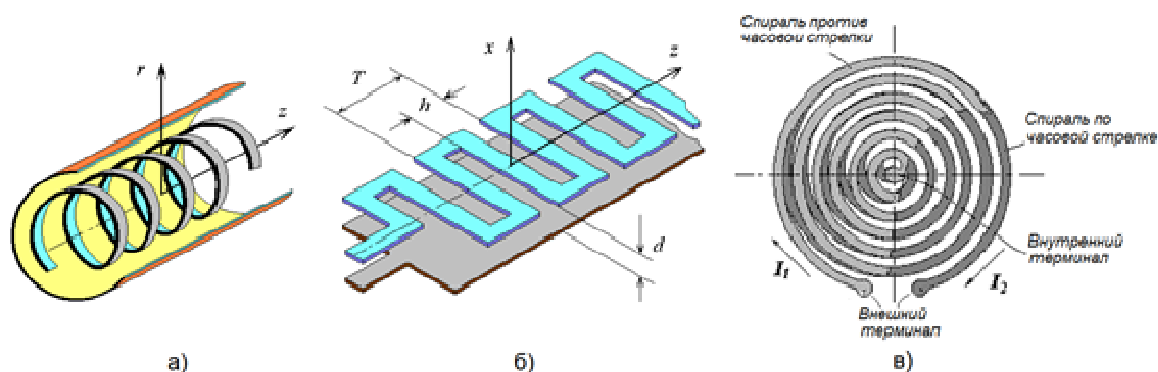


Рис. 1. Замедляющие системы: а - цилиндрическая спираль в экране; б - меандр-линия; в - арифметические спирали с противоположными направлениями намотки.

В целом, ЗС является периодической последовательностью проводящих элементов, соединённых друг с другом в направлении распространения волны.

Основными геометрическими параметрами, определяющими ЗС, являются период  $T$ , ширина  $H$  или периметр  $2\pi b$ , где  $b$  – радиус импедансного проводника цилиндрической формы. Во многих случаях существенным является также расстояние между импедансным и экранным проводниками или радиус  $d$  экранного проводника. В т.н. связанных ЗС оба проводника импедансные, а для обеспечения максимальной связи их конфигурации являются, как правило, зеркальными отображениями друг друга, развёрнутыми на  $180^\circ$  (рис. 2в).

Напомним, что, как и в случае быстрых волн в волноводах, зависимость всех компонент поля замедленной волны от продольной координаты  $z$  в направлении распространения и времени  $t$  характеризуется так называемым волновым множителем  $\exp(j\omega t - j\beta z)$ , где  $\omega$  – угловая частота,  $\beta$  – комплексная величина, действительная часть которой  $\beta_0$  называется фазовой постоянной, а мнимая часть,  $\alpha_0$  – постоянной затухания

$$\operatorname{Re} \beta = \beta_0 = \frac{\omega}{v_p}, \quad \alpha_0 = \operatorname{Im} \beta \quad (1)$$

где  $v_p$  – фазовая скорость замедленной волны. Отношение скорости света  $c$  к фазовой скорости  $v_p$  называется замедлением.

$$N = \frac{c}{v_p} = \frac{\beta}{k}, \quad k = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} . \quad (2)$$

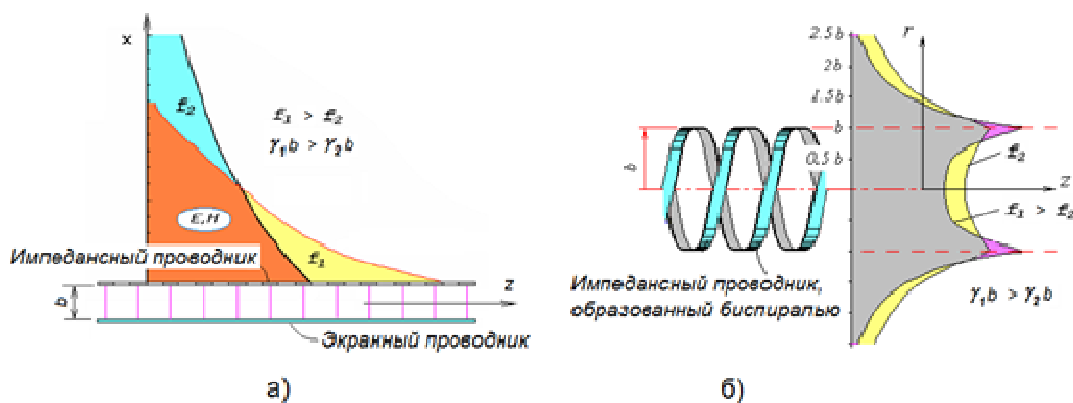


Рис. 2. Распределение поля около поверхностей импедансных проводников:  
 а - плоский проводник; б - цилиндрический проводник (двухзаходная спираль).

Благодаря замедлению, поле замедленной волны концентрируется около поверхности импедансного проводника (рис. 2). При этом спадание поля от поверхности характеризуется т.н. поперечной постоянной  $\gamma$ , которая при представляющих практический интерес замедлениях (больших трёх) приблизительно равна фазовой постоянной  $\beta$ . В случае плоской поверхности интенсивность поля пропорциональна  $\exp(-\gamma x)$ , где  $x$  - расстояние от импедансной поверхности. В случае цилиндрического проводника, распределение определяется модифицированными функциями Бесселя от аргумента  $\gamma r$ , где  $r$  - радиальная координата.

## 2. Основные особенности замедленных волн

Благодаря концентрации поля около поверхности импедансного проводника электромагнитная волна распространяется вдоль ЗС без излучения даже в отсутствие второго, экранного проводника. При этом к концентрации энергии в поперечном направлении добавляется пропорциональная замедлению концентрация в продольном направлении.

Так как фазовая постоянная  $\beta$  пропорциональна произведению замедления  $N$  и частоты  $f$ , то можно получить одно и то же распределение энергии при разных размерах отрезка ЗС (нагреватель, чувствительный элемент и т.д.) и разных частотах.

Как правило, замедленные волны являются гибридными, т.е. представлены суммой двух волн, Е- и Н-типа с одинаковой фазовой скоростью, но разной зависимостью от граничных условий, что сопровождается разным распределением полей в поперечном направлении. При этом энергия электрического поля  $W_e$  сосредоточена в основном в волне Е-типа, а магнитного поля  $W_m$  - в волне Н-типа

$$\frac{W_e^e}{W_m^e} = \frac{W_m^m}{W_e^m} = N^2. \quad (3)$$

Таким образом, можно воздействовать на нагреваемый объект преимущественно электрическим или магнитным полем, обеспечивая разную глубину воздействия.

Положительные особенности ЗС многократно увеличиваются при замене экранного проводника вторым импедансным проводником с зеркальной по отношению к первому проводнику конфигурацией. При противофазном возбуждении такой ЗС поле волны Е-типа сосредотачивается между импедансными проводниками, а поле волны магнитного типа – снаружи (рис. 3а). При синфазном возбуждении картина обратная (рис. 3б). При противофазном возбуждении замедление больше, а при синфазном меньше замедления в одном импедансном проводнике с изотропно-проводящим экраном.

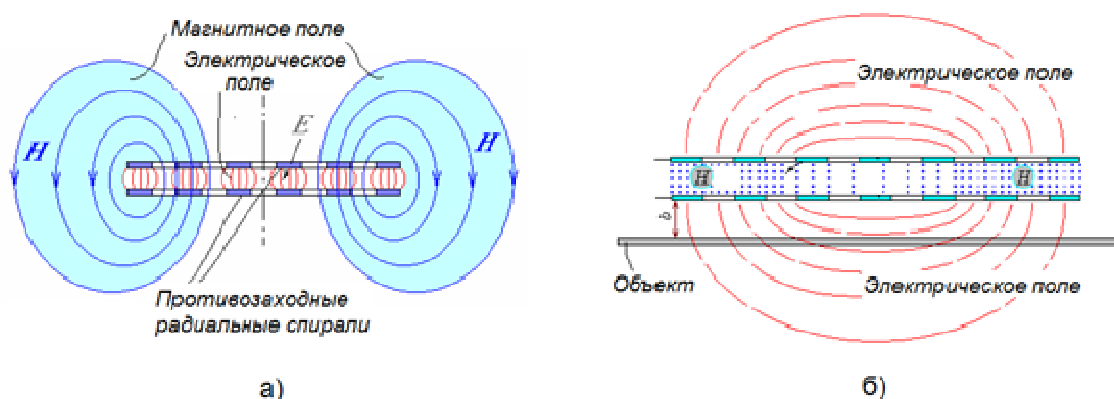


Рис. 3. Разделение полей в связанных радиальных спиралях:  
а - противофазное возбуждение; б - синфазное возбуждение

Связанные ЗС, такие как цилиндрические, арифметические или логарифмические спирали, меандры, позволяют создавать электроды с заданным распределением электрического и магнитного поля. Так, при противофазном возбуждении волны в связанных спиралях (рис. 4) снаружи спиралей концентрируется в основном магнитное поле, хорошо проникающее в объекты с относительно большой проводимостью, например в высокотемпературную плазму или тело человека. При этом благодаря существенному увеличению замедления, концентрация энергии магнитного поля оказывается очень большой. Отметим, что, несмотря на относительно

малый зазор между импедансными проводниками, обеспечивающим указанный эффект, волновое сопротивление остаётся достаточно большим. Так, в случае цилиндрических спиралей при замедлении равном квадрату т.н. геометрического замедления, волновое сопротивление оказывается близким к его стандартному значению, 50 Ом.

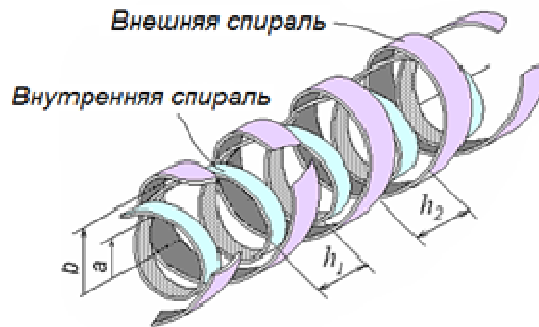


Рис. 4. Связанные спирали

ЗС являются периодическими структурами и распределение возбуждаемого в них поля, в частности в продольном направлении, отличается от гармонического, искажаясь проводниками. В представляющих практический интерес случаях нетрадиционного применения ЗС, т.е. на относительно низких частотах, волны Е- и Н-типа представлены, в основном, либо нулевой, либо суммой  $\pm 1$  пространственных гармоник. При этом Е- и Н-волны могут быть представлены либо одной и той же, либо разными пространственными гармониками. Так, Е-волна в меандр-линии представлена в основном нулевой пространственной гармоникой, а благодаря периодическому изменению направления тока в поперечных проводниках, Н-волна представлена суммой  $\pm 1$  гармоник (рис. 5а). При синфазном возбуждении двухзаходной спирали обе волны представлены нулевой пространственной гармоникой (рис. 5б), а при противофазном возбуждении они представлены суммой первых гармоник (рис. 5в).

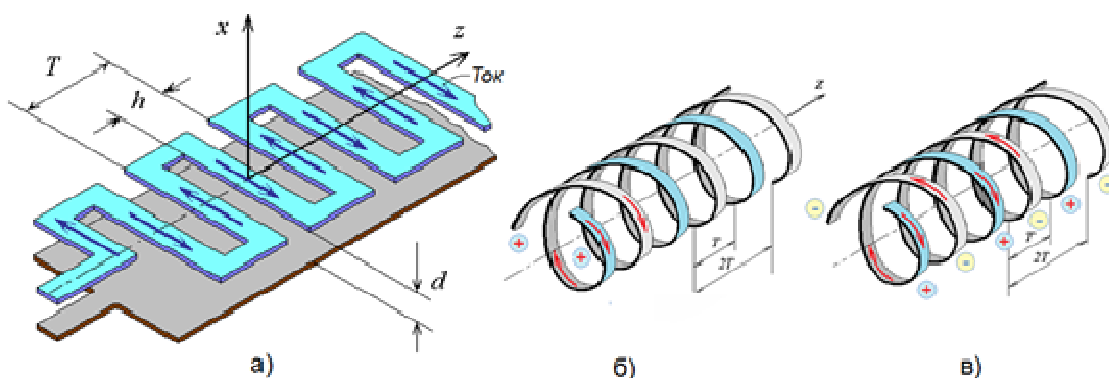


Рис. 5. Направление токов: а - в меандер-линии; б - в биспирали при синфазном её возбуждении; в - в биспирали при противофазном возбуждении.

Благодаря противоположным потенциалам соседних поперечных проводников или противоположным направлениям токов в них, поле Е-волны или, соответственно, Н-волны, значительно сильнее, чем в случае нулевой пространственной гармоники прижимается к поверхности ЗС. При этом область концентрации поля порядка одной шестой периода ЗС и практически не зависит от частоты [21]. Это позволяет существенно увеличить чувствительность измерений тонких слоев и покрытий и, при необходимости, поверхностный нагрев различных объектов, пользуясь для этих целей относительно низкими частотами.

Наряду с концентрацией энергии поля в контролируемом или обрабатываемом объекте, при фазовой скорости волны в ЗС меньшей скорости света в прилегающем объекте, происходит интенсивное излучение электромагнитного поля в этот объект, т.е. излучение в электродинамически плотную среду (рис. 6).

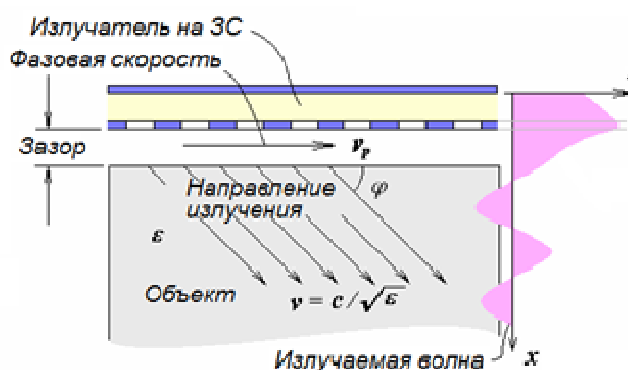


Рис. 6. Излучение из ЗС в электродинамически плотную среду



Излучение из ЗС происходит при наличии небольшого зазора между импедансным проводником и объектом, на относительно малой длине ЗС и в полосе частот, превышающей октаву [22]. Излучение происходит под углом  $\varphi$  к поверхности импедансного проводника, определяемым следующей формулой:

$$\cos \varphi = N / \sqrt{\varepsilon}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды.

### 3. Применение в медицине

Отмеченные выше особенности замедленных волн позволили предложить и разработать целый ряд устройств и технологий для применения в медицине [19, 22, 23]. Эффект концентрации электромагнитного поля в небольшом объеме тела, а также эффект излучения замедленной волны внутрь тела создают большие возможности для физиотерапии, коагуляции, стерилизации, диагностики, и т.д.

#### А. Электроды

Достоинство медицинских электродов на связанных ЗС в концентрации энергии в слое толщиной  $d$ , не превышающем одной шестой длины замедленной волны ( $d < \lambda / 2\pi N$ ), где  $\lambda$  - длина волны в свободном пространстве. Другое достоинство в том, что воздействие можно осуществлять как магнитным полем (магнитотерапия), так и электрическим полем, изменяя тип возбуждаемой волны (синфазный или противофазный).

Возбуждение в связанных ЗС интенсивного магнитного поля снаружи проводников позволяет создавать высокоэффективные электроды для магнитотерапии (рис. 7). При этом концентрация электрического поля между импедансными проводниками ЗС исключает повреждение жировых тканей тела человека при магнитотерапии и обеспечивает гораздо более глубокое воздействие магнитного поля.

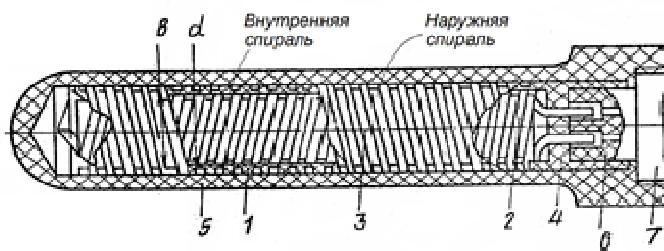


Рис. 7. Полостной электрод на противозаходных спиральных  
по А.с. СССР № SU1648502

При работе на первых пространственных гармониках, глубину проникновения поля можно ограничить значениями в сотни раз меньшими длины волны в свободном пространстве, например, обрабатывать кожу на частоте 40 МГц. На рис. 8 показан плоский электрод на двухзаходной спирали, возбуждаемой на противофазной волне. Обеспечивая на  $\pm 1$  гармониках замедление в десятки и сотни раз, такие электроды могут работать на относительно низких частотах, на которых поле проникает в обрабатываемый слой почти без помех.

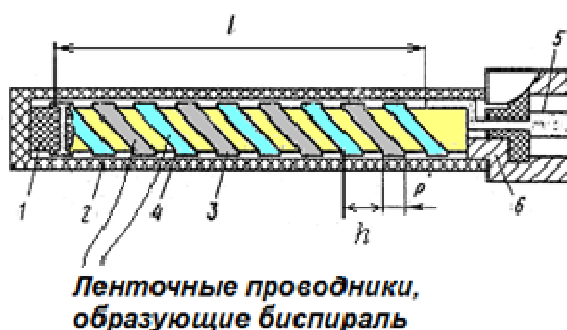


Рис. 8. Электрод для поверхностного нагрева.  
по А.с. СССР № SU1648504

Двухзаходная или многозаходная ленточная спираль большого диаметра (рис. 9) может служить для ВЧ прогрева переохлаждённого во время операции пациента.

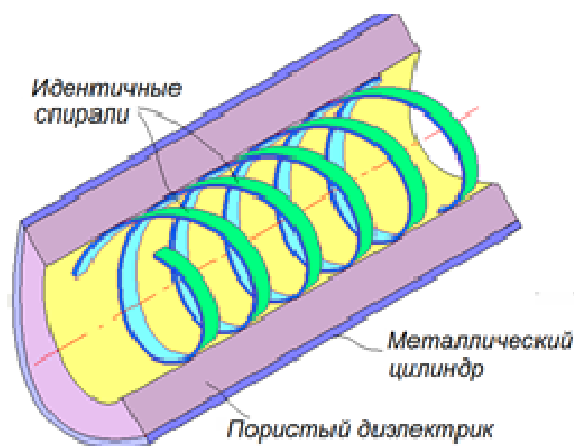


Рис. 9. Камера для ВЧ нагрева пациента.

## Б. Излучатели

Были разработаны и апробированы в лечебной практике малогабаритные излучатели (радиаторы) для внутренней и наружной терапии, показанные на рисунках 10 и 11. Параметры излучателей представлены в таблице.

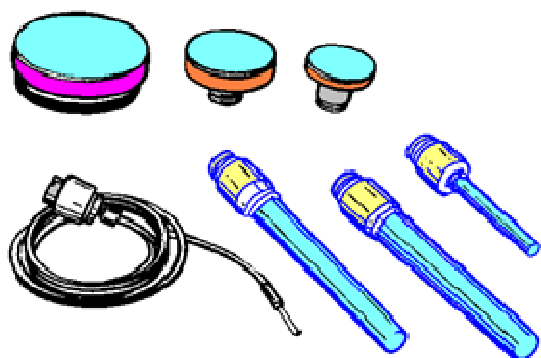


Рис. 10. Наружные и внутрисполостные излучатели по А.с. СССР № № 1266548, 1528509, 1553142, 1801512

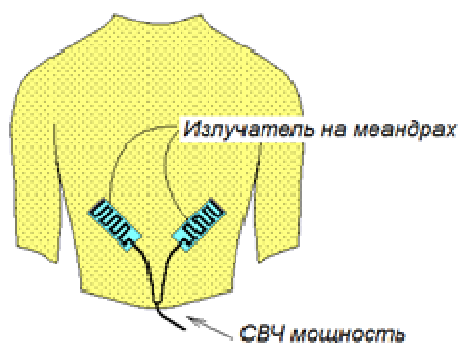


Рис. 11. Эластичные излучатели на меандрах по А.с. СССР №1648503

Параметры разработанных излучателей

Рабочая частота		2,4 ГГц		
КСВ в диапазоне 2÷4 ГГц		1,5÷1,8		
Тип излучателей		Наружные	Внутрисполостные	
Диаметр, мм	20	80	2	16
Масса, гр	≈ 35	≈ 80	≈ 30	≈ 160

## В. Коагулирующие скальпели

Концентрация поля около поверхности импедансного проводника позволяет создавать коагулирующие электроды: металлические скальпели с серпантинной щелью (рис. 12а) и диэлектрические, например из лейкосапфира, с металлизацией по обеим сторонам лезвия (рис. 12б). Такая металлизация может быть выполнена в виде штыревых гребёнок со сдвинутыми друг относительно друга на половину периода штырями, направленными к режущей кромке.

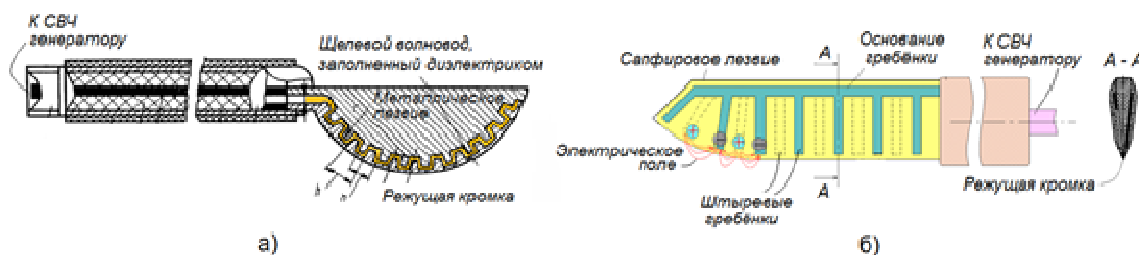


Рис. 12. Коагулирующие скальпели:

а - металлический по А.с. СССР № 1532007;

б - сапфировый по А.с. СССР № 1745218

В штыревых гребёнках, возбуждённых в противофазе, максимальная напряжённость СВЧ электрического поля возникает между концами штырей противоположащих гребёнок, т.е. на режущей кромке лезвия. Благодаря тому, что гребёнки сдвинуты друг относительно друга в продольном направлении, возникающее между концами штырей поле обладает достаточной интенсивностью в прилегающих к режущей кромке слоях ткани.

## Г. Передача сигнала в имплантированную часть искусственного уха

Благодаря большому замедлению противофазной волны в связанных ЗС, резонансный отрезок связанных ЗС в десятки и сотни раз меньше длины волны в свободном пространстве. При этом два, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга резонансных отрезка могут быть использованы для бесконтактной передачи ВЧ сигнала на частотах близких к их резонансной частоте.

На рис. 13а приведена схема устройства передачи сигнала в имплантированную часть искусственного уха, а на рис. 13б показано затухание сигнала при прохождении из внешнего резонатора в имплантированный под кожу резонатор. Каждый из резонаторов выполнен в виде логарифмических спиралей, напылённых на обе стороны диэлектрической пластины. Связь между резонаторами осуществляется на магнитном поле, благодаря чему потери при прохождении сигнала через кожу невелики. Аналогичное устройство может быть использовано для подзарядки аккумулятора кардиостимулятора.

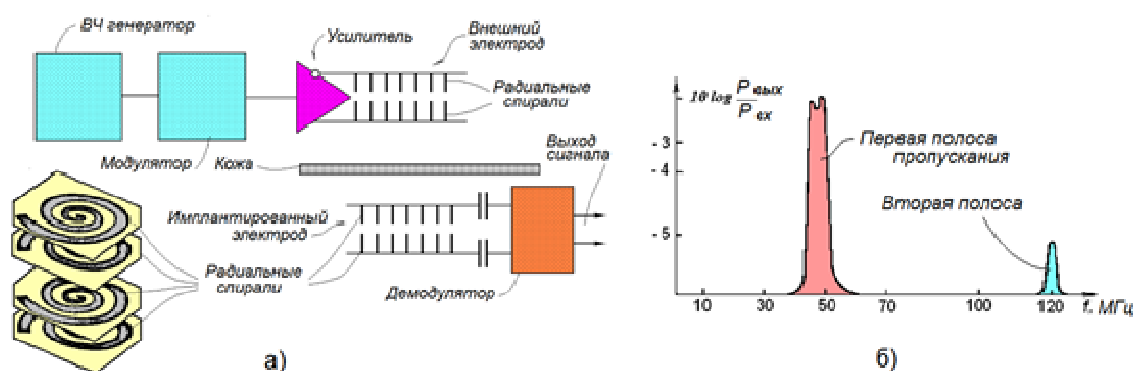


Рис. 13. Устройство для передачи сигнала в имплантированную часть искусственного уха по А.с. СССР № 1690749:  
 а - принципиальная схема; б - уровень сигнала, прошедшего в имплантированный электрод

## Заключение

Применение электродов и излучателей на замедляющих системах позволяет существенно увеличить эффективность и безопасность ВЧ и СВЧ физиотерапии и создавать новые методы лечения.

Рассмотренные выше особенности замедленных волн позволяют создавать новые технологии и устройства для измерений, контроля технологических процессов, термической обработки различных материалов и продуктов питания и т.д. Разработанные ранее и апробированные в клиниках излучатели для физиотерапии показали эффективность в работе и безопасность для обслуживающего персонала. Бесконтактная передача ВЧ энергии сквозь кожу с

относительно малыми потерями, не только облегчает создание и эксплуатацию искусственного уха, но также решает проблему питания кардиостимуляторов. Создание и практическое применение коагулирующего скальпеля в полевых условиях поможет сохранить жизни сотен и тысяч пострадавших при несчастных случаях и на полях сражений.

### **Литература**

1. А.с. № 525010. СССР. МПК<sup>6</sup> G01N21/12. Устройство для измерения сплошности потока жидкости / Ю.Н. Пчельников, И.А. Уваров, С.И. Рябцев, М.А. Лебедев. Заявка № 2184406, заяв. 24.10.1975, опуб. 15.08.1976. Бюл. № 30.
2. Пчельников Ю.Н., Уваров И.А., Рябцев С.И. Прибор для измерения сплошности потока жидкости / Измерительная Техника. 1979. № 5. С. 40.
3. А.с. № 1086485. СССР. МПК<sup>5</sup> H01P9/02. Перестраиваемая электромагнитная линия задержки / Ю.Н. Пчельников, П.А. Майсурадзе, А.В. Майбородин. Заявка № 3322416, заяв. 10.07.1981, опуб. 15.04.1984. Бюл. № 14.
4. А.с. № 1095119. СССР. МПК<sup>5</sup> G01R33/12. Устройство для измерения магнитной проницаемости на сверхвысоких частотах / Ю.Н. Пчельников, А.В. Овчинников, Л.М. Суслов, Р.М. Дымшиц. Заявка № 3491632, заяв. 15.09.1982, опуб. 30.05.1984. Бюл. № 20.
5. А.с. № 1113752. СССР. МПК<sup>5</sup> G01R27/04. Сверхвысокочастотный датчик для измерения погонного сопротивления микропровода / Ю.В. Косякин, Ю.Н. Пчельников, Л.М. Суслов. Заявка № 3573869, заяв. 15.03.1983, опуб. 15.09.1984. Бюл. № 34.
6. А.с. № 1116315. СССР. МПК<sup>5</sup> G01B15/02. Устройство для измерения толщины материалов / Ю.Н. Пчельников, М.А. Зима, П.А. Майсурадзе. Заявка № 3502594, заяв. 20.10.1982, опуб. 30.09.1984. Бюл. 36.
7. А.с. № 1626082. СССР. МПК<sup>5</sup> G01B7/14. Устройство для измерения расстояния до металлической поверхности / Ю.Н. Пчельников, Г.М. Федичкин,

- Р.М. Дымшиц, А.В. Фадеев. Заявка № 4664111, заяв. 21.03.1989, опуб. 07.02.1991. Бюл. № 5.
8. А.с. № 1627841. СССР. МПК<sup>5</sup> G01F1/34. Способ измерения массового расхода потока газа и устройство для его осуществления / Ю.Н. Пчельников, Г.М. Федичкин, Р.М. Дымшиц. Заявка № 4615237, заяв. 05.12.1988, опуб. 15.02.1991. Бюл. № 6.
9. А.с. № 1635001. СССР. МПК<sup>5</sup> G01B15/02. Способ измерения толщины металлического покрытия на диэлектрической подложке и чувствительный элемент для его осуществления / А.М. Амелянец, В.Н. Гуничев, Ю.Н. Пчельников, Г.М. Федичкин. Заявка № 4605962, заяв. 15.11.1988, опуб. 15.03.1991. Бюл. №10.
10. А.с. № 1647307. СССР. МПК<sup>5</sup> G01L9/10. Устройство для измерения давления / А.М. Амелянец, Ю.Н. Пчельников, Р.М. Дымшиц, М.А. Яворский. Заявка № 4656739, заяв. 28.02.1989, опуб. 07.05.1991. Бюл. №17.
11. Pchel'nikov Yu.N., Nyce D.S. Slow-Wave Structures Based Method of Measurements // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol. 51. 2002. P. 891-896.
12. Pchel'nikov Yu. N. Microminiaturization of passive elements with distributed parameters // International Vacuum Electronics Conference (IVEC), IEEE International Conference Publications. Monterey, California, USA. 2006. P.113.
13. Patent №6522222 B1. USA. Electromagnetic delay line with improved impedance conductor / Yu.N. Pchel'nikov, D.S. Nyce. Publ. 18.02.2003.
14. Патент № 2142182. РФ. МПК<sup>6</sup> H01Q7/08. Магнитная антенна / Ю.Н. Пчельников, В.В. Анненков, Р.М. Дымшиц, А.А. Елизаров. Заявка №95103677/09, заяв. 14.03.1995, опуб. 27.11.1999.
15. Пчельников Ю.Н. Использование замедляющих систем в устройствах для народного хозяйства // Электронная Техника, Серия СВЧ-техника. Вып. 6(450). 1992. С. 42.

16. Пчельников Ю.Н., Дзугаев В.К., Мицкис А.Ю. Высокочастотный нагрев полупроводящей поверхности с помощью замедляющей системы // Электронная Техника, Серия СВЧ-техника. Вып. 3(437). 1991. С. 52.
17. Пчельников Ю.Н., Елизаров А.А. Перспективы применения электромагнитного нагрева для обработки сельхозсырья и пищевых продуктов // Электронная Техника, Серия СВЧ-техника. Вып. 5-6(459-460). 1993. С. 47.
18. А.с. № 1739265. СССР. МПК<sup>5</sup> G01N22/02. Способ обнаружения неоднородностей и дефектов в диэлектрических материалах / Ю.Н. Пчельников, Л.М. Сулов, В.К. Дзугаев, Н.Е. Иванова. Заявка № 4774691, заяв. 27.12.1989, опуб. 07.06.1992. Бюл. №21.
19. Pchel'nikov Yu.N., Kholodnyi V.A., Medical Application of Surface Electromagnetic Waves // Bioelectrochemistry and Bioenergetics. 1998. № 47. P.283-290.
20. Pchel'nikov Yu. N., Sovlukov A.S., Eren H. Nondestructive monitoring of metal surfaces corrosion by radiofrequency methods // Proc. 18th IEEE Instr. and Measurement Technology Conf. Budapest, Hungary. 2001. P. 1314.
21. Пчельников Ю.Н., Особенности замедленных волн и возможности их нетрадиционного применения // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 4. С. 494.
22. Пчельников Ю.Н., Излучение замедленной электромагнитной волны в магнитодиэлектрик // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40. № 5. С. 532.
23. Pchel'nikov Yu. N. Medical application of slow-wave structures // International Vacuum Electronics Conference (IVEC), IEEE International Conference Publications. Monterey, California, USA. 2006. С. 389.