

## Импульсный 3 мм магнетрон с большим сроком службы

А. Е. Моисеенко, В. Д. Науменко, А. Н. Суворов, А. Р. Сыров

*Радиоастрономический институт НАН Украины,  
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4  
E-mail: naumenko@rian.kharkov.ua*

*Статья поступила в редакцию 24 июня 2003 г.*

Разработан магнетрон на длину волны 3 мм с ресурсом долговечности, превышающим 6000 ч. Магнетрон имеет платиновый вторичноэмиссионный катод, осмированный стартовый термокатод и работает в режиме пространственной гармоники. Миниатюрный магниторазрядный насос, включенный в состав прибора, обеспечивает высокий вакуум, что также способствует получению высокой долговечности.

Розроблено магнетрон на довжину хвилі 3 мм із ресурсом довговічності, що перевищує 6000 год. Магнетрон має платиновий вторинноемісійний катод, осмований стартовий термокатод і працює у режимі просторової гармоніки. Мініатюрний магніторозрядний насос, включений до складу приладу, забезпечує високий вакуум, що також сприяє отриманню високої довговічності.

### 1. Введение

Одним из направлений освоения коротковолновой части миллиметрового диапазона является разработка РЛС малого радиуса действия. В этом диапазоне можно сравнительно просто обеспечить пространственное разрешение целей. При создании РЛС одной из основных проблем является выбор источника электромагнитных колебаний. В работе [1] кратко описан передатчик для РЛС с высоким разрешением, в котором используется разработанный нами ранее магнетрон. Минимальная длительность импульса, требуемая для работы этого передатчика, составляет 10 нс при частоте повторения 40 кГц. Номинальная длительность импульса равняется 20 нс при частоте повторения от 3 до 30 кГц. Естественным требованием при таких длительностях импульса является малая величина дрожания фронта. Кроме того, магнетрон должен иметь высокую надежность и долговечность не менее 6000 ч.

В настоящей работе описаны некоторые этапы разработки этого магнетрона, основные, конструктивные и технологические решения, использованные при его создании, а также его выходные и эксплуатационные характеристики.

Основные проблемы при разработке этого прибора связаны со следующими обстоятельствами. Срок службы 6000 ч в трехмиллиметровом диапазоне радиоволн до сих пор не достигнут ни на одном из разработанных ранее магнетронов. Наиболее близкий по параметрам магнетрон MG-5294 фирмы EEV имеет долговечность 750 ч [2]. При этом максимальный коэффициент заполнения для него не превышает 0.05 %, при требуемом значении 0.067 %.

Как известно, надежность и долговечность магнетрона в основном определяется удельной нагрузкой его электродов по рассеиваемой мощности. В магнетроне коллектором всех отработавших электронов служит резонаторная система. При переходе в коротковол-



новую часть миллиметрового диапазона размеры ее становятся настолько малыми, что импульсный нагрев превышает допустимый. При этом срок службы магнетрона катастрофически сокращается.

Еще более сложная ситуация имеет место при выборе типа катода. Из-за наличия обратного подогрева часто не удается обеспечить приемлемый температурный режим катода, что также приводит к значительному сокращению его долговечности. В данном случае магнетрон должен работать с переменной частотой повторения. По этой причине поддержание постоянной температуры катода становится особенно затруднительным.

Именно эти два обстоятельства порождают основные трудности при разработке магнетронов миллиметрового диапазона с большим сроком службы. Действительно, площадь поверхности анода 3-мм диапазона, описанного в работе [3], составляет всего  $4 \text{ мм}^2$ , при рассеиваемой импульсной мощности свыше 100 кВт. Если учесть, что зазор между анодом и катодом составлял всего 0.2 мм при рабочем напряжении около 13 кВ, то становится понятным, почему долговечность такого прибора совершенно недостаточна для практического применения. Чтобы увеличить долговечность анода, необходимо либо использовать для его защиты тугоплавкие металлы, либо увеличивать размеры. Первый путь требует применения весьма сложных технологических процессов для изготовления мелкоструктурных замедляющих систем с защитными накладками на ламелях. К тому же в этом случае не решается ряд других проблем, характерных для приборов такого типа. К ним, в частности, относятся недостаточная электрическая прочность, большие магнитные поля, исключительно высокие требования к точности изготовления. С другой стороны, увеличить площадь поверхности анода в магнетронах классического типа тоже очень трудно. В самом деле, увеличить диаметр анода, сохраняя неизменным анодное напряжение, можно только увеличивая число резонаторов, однако при этом возникают непреодолимые трудности в обеспечении устойчивой работы магнетрона на выбранном типе колебаний.

Мощность, рассеиваемая на катоде магнетрона за счет обратной бомбардировки, составляет примерно 10 % от мощности, поступающей в анодную цепь. При работе с большими коэффициентами заполнения эта мощность становится сравнимой с мощностью накала катода и даже может превысить ее. Это приводит к перегреву катода и, следовательно, к сокращению его долговечности. В магнетроне, описанном в [3], был применен вторично-эмиссионный молибденовый катод с двумя кольцевыми канавками, заполненными смесью никелевого порошка с двойным карбонатом. Несмотря на это, максимальный коэффициент заполнения, при котором катод еще может работать без перегрева, составляет всего 0.0125 %.

## 2. Магнетроны на пространственной гармонике и особенности их работы

Как известно, передача энергии электронного потока высокочастотному полю в магнетроне становится возможной, если анодное напряжение превышает значения, определяемые соотношением:

$$U_a = 4.04 \cdot 10^{-7} (r_a / 2\gamma\lambda)^2,$$

где  $r_a$  – радиус анода,  $\lambda$  – длина волны,  $\gamma = n + mN$ ,  $N$  – число резонаторов,  $n$  – номер вида колебаний,  $m$  – номер пространственной гармоники.

Классические магнетроны работают на основной гармонике  $\pi$ -колебаний, т. е. при  $n = N/2$  и  $m = 0$ . Зависимость произведения  $\gamma\lambda$  от  $n$  для 24-резонаторного блока на основной гармонике показан на рис. 1. Видно, что вблизи  $\pi$ -колебаний при переходе от одного вида колебаний к соседнему наблюдается малое изменение  $\gamma\lambda$ . В этом случае магнетрон будет иметь очень узкие по напряжению зоны генерации на каждом из этих видов, а при определенных условиях будет генерировать разные частоты на разных импульсах и даже в пределах одного импульса. Иными словами, будет иметь место так называемая интерфе-



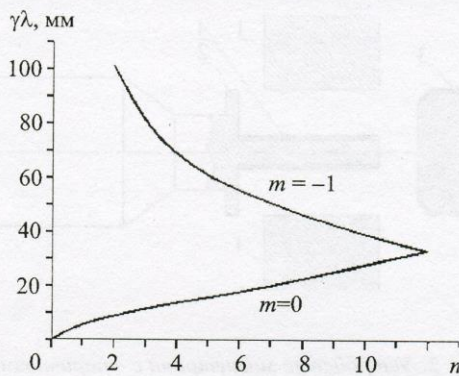


Рис. 1. Зависимость замедления от номера вида колебаний для основной и 1-й гармоник

рения видов колебаний. Чтобы устранить это явление, в классических магнетронах, работающих на волнах короче 3 см, используются разнорезонаторные аноды. Однако при работе на основной гармонике величины  $\gamma\lambda$  оказываются слишком низкими, и для сохранения приемлемых значений рабочих напряжений и электронного КПД приходится уменьшать диаметр анода.

Существует, однако, другой путь. В качестве рабочей гармоники можно выбрать пространственную гармонику с  $m = -1$ . Зависимость  $\gamma\lambda$  от  $n$  для этой гармоники показана на рис. 1. Здесь можно получить существенно большее значение  $\gamma\lambda$ , выбирая в качестве рабочего вид с номером  $n = N/4$  или один из соседних с ним. В то же время здесь имеется достаточно большое разделение между видами по  $\gamma\lambda$ , что обеспечивает стабильную генерацию на выбранном виде колебаний. Экспериментальное исследование работы таких магнетронов в миллиметровом диапазоне волн, выполненное И. Д. Трутнем с сотрудниками, [4] показало, что виды колебаний разделены по магнитному полю и даже при достаточно большом числе резонаторов всегда находятся режимы, где магнетрон стабильно генерирует колебания одной частоты. При этом оказалось возможным построить экспериментальные образцы магнетронов вплоть до частот 240 ГГц. На длинах волн 4 мм и короче

были получены мощности, значительно превосходящие полученные с помощью приборов классического типа.

Не останавливаясь на подробном анализе всех особенностей работы магнетронов в режиме пространственной гармоники, укажем основные их преимущества перед приборами классического типа:

- большой, в 2÷3 раза, диаметр анода и катода;
- меньшее в 3÷4 раза, требуемое магнитное поле;
- меньшая радиальная длина ламелей;
- менее жесткие допуски на размеры резонаторной системы;
- отсутствие необходимости принимать специальные меры для улучшения разделения видов колебаний.

Наряду с преимуществами магнетроны этого типа имеют недостатки. В частности, они отличаются несколько меньшими (примерно в 1.3 раза) значениями КПД. Дело в том, что поле гармоники с  $m = -1$  по направлению к катоду спадает быстрее, чем поле основной гармоники. По этой причине для достаточно эффективного взаимодействия приходится выбирать для рабочего режима значения магнитного поля, близкие к критическим. Однако в этом случае анодный ток достигает больших значений вследствие нарушения условия отсечки Хэлла.

Второй недостаток таких магнетронов обусловлен тем обстоятельством, что в симметричном анодном блоке все виды колебаний, кроме видов с номерами  $n = 0$  и  $n = N/2$ , являются двукратно вырожденными. Это означает, что для каждого из этих видов существует два равноправных распределения высокочастотного поля, сдвинутых по фазе на  $90^\circ$ . Из-за неточности геометрии анодного блока и наличия вывода энергии резонансные частоты для этих распределений несколько отличаются, образуя частотный дублет. Две составляющие дублета имеют различную связь с нагрузкой и, соответственно, разную добротность. Высказывалось предположение [5], что в этих условиях работа магнетрона будет происходить на слабо нагруженной составляющей дублета, и мощность в нагруз-



ку поступать не будет. На самом деле оказалось [4], что почти всегда в работающем магнетроне возникает распределение поля, обеспечивающее эффективный вывод генерируемой мощности.

Таким образом, использование режима взаимодействия с пространственной гармоникой создает хорошие предпосылки для уменьшения удельной нагрузки анода и, следовательно, увеличения долговечности магнетрона.

### 3. Магнетроны с охлаждаемым вторичноэмиссионным катодом

Наличие обратной бомбардировки имеет и свою положительную сторону, в виде интенсивной вторичной эмиссии с катода [6]. Более того, оказывается, что при определенных условиях этот процесс может быть самоподдерживающимся и магнетрон может работать только за счет вторичной эмиссии. Катод при этом может быть совершенно холодным. В импульсных магнетронах необходимо возбуждать вторичную эмиссию в начале каждого импульса напряжения. Обычно для этой цели используется вспомогательный термокатод, который размещается таким образом, чтобы он в наименьшей степени подвергался разогреву обратной бомбардировкой. Такая схема построения магнетрона создает хорошие условия для отвода мощности, рассеиваемой на катоде, поскольку в этом случае появляется возможность применить один из способов эффективного охлаждения, например жидкостное.

Рассмотрим более подробно устройство такого магнетрона, показанное на рис. 2. Здесь 1 – анодный блок, 2 – kern основного катода, 3 – вторичный эмиттер, 4 – вспомогательный катод. Магнетроны такого типа были исследованы Джепсеном и Мюллером в сантиметровом диапазоне длин волн [7]. Оказалось, что в случае использования в качестве вторичного эмиттера платины или другого чистого металла не всегда удается получить необходимый для работы прибора ток. В результате, задача отвода мощности обратной бомбардировки решалась ценой значительного снижения выходной мощности, что как правило не приемлемо.

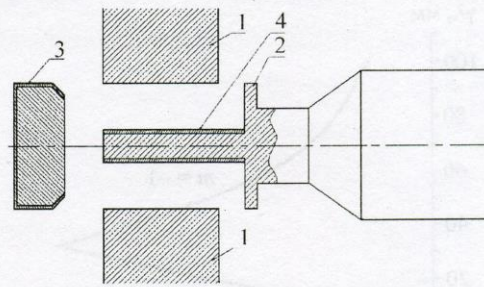


Рис. 2. Устройство магнетрона с вторичноэмиссионным катодом

Более успешными оказались попытки использовать такую схему построения магнетрона в миллиметровом диапазоне длин волн. Исследования, проведенные под руководством И. М. Вигдорчика [8], показали, что при использовании платинового катода в магнетронах на пространственной гармонике можно получить практически такие же мощности, как и с термокатадами. Мощность обратной бомбардировки катода при этом легко отводилась с использованием водяного охлаждения даже при коэффициенте заполнения около 0.3 %.

На рис. 3 показана вольт-амперная характеристика магнетрона с вторичноэмиссионным катодом. Из рисунка видно, что при напряжениях близких к критическому, насту-

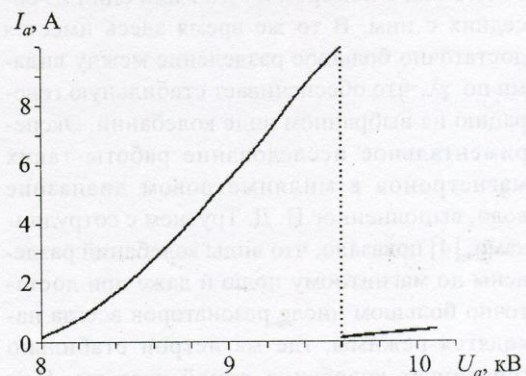


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика магнетрона с вторичноэмиссионным катодом



пает срыв анодного тока до значений, примерно равных уровню термоэмиссии. Наибольшие анодные токи достигаются непосредственно перед срывом. Отсюда следует, что получить высокий уровень мощности в таком магнетроне можно только в том случае, если рабочая точка выбрана достаточно близко к критическому напряжению. Но как раз такие режимы, как указывалось выше, являются типичными для магнетронов, работающих на пространственной гармонике. Невыполнение этого условия было, по всей вероятности, причиной неудачи при попытках использовать холодные катоды из чистых металлов в классических магнетронах сантиметрового диапазона. Как известно, эти приборы работают при магнитном поле, превышающем критическое значение в 1.5 и более раз. В этом случае максимальный анодный ток в несколько раз меньше, чем при магнитном поле, близком к критическому значению.

В работе [9] приводится простое соотношение для нахождения максимального анодного тока, который может быть получен в магнетроне с вторичноэмиссионным катодом:

$$I_{am} = 0.1(\delta_m - 1)I_L, \quad (1)$$

где  $\delta_m$  – коэффициент вторичной эмиссии материала катода, а  $I_L$  – ток Лэнгмюра для цилиндрического диода без магнитного поля. Это соотношение справедливо для коэффициентов вторичной эмиссии, лежащих в пределах  $1.25 \div 1.8$  и  $h_a / (r_a - r_c) \sim 4 \div 6$  ( $h_a, r_c$  – соответственно осевая длина анода и радиус катода). Оно позволяет оценивать величину максимального анодного тока с точностью примерно 30%. Интересно, что выражение (2) справедливо как для генерирующих магнетронов, так и для магнетронных диодов. При этом для магнетронов оно дает несколько завышенные значения, а для диодов заниженные. Это говорит о том, что процессы в пространстве взаимодействия магнетрона, работающего вблизи критического режима, мало отличаются от таковых в магнетронном диоде. Другими словами, вторичноэмиссионный ток в нашем случае обеспечивается

не столько электронами, попавшими в ускоряющую фазу высокочастотного поля резонаторной системы, сколько за счет электронов, получивших дополнительную энергию от колебаний объемного заряда.

Таким образом, использование охлаждаемого вторичноэмиссионного катода во многих случаях позволяет преодолеть трудности, связанные с рассеянием мощности обратной бомбардировки.

#### 4. Выбор конфигурации пространства взаимодействия магнетрона

Разработанные нами магнетроны на частоту 94 ГГц имеют конфигурацию пространства взаимодействия, показанную на рис. 2. Были приняты следующие основные размеры резонаторной системы:

- диаметр анода – 2.6 мм,
- число резонаторов – 24,
- толщина ламелей – 0.1 мм,
- высота анода – 3 мм.

В процессе разработки магнетрона были проведены исследования приборов, работающих на 4-м и 5-м видах колебаний. В первом случае диаметр основного катода равнялся 1.55 мм, а во втором – 1.5 мм. Эти параметры выбирались для обеспечения анодного напряжения не выше 10 кВ и возможно меньшей удельной нагрузки на анод и катод магнетрона.

Если подставить в соотношение (1) размеры пространства взаимодействия и значение анодного напряжения этого магнетрона, можно показать, что максимальный анодный ток должен составлять примерно 12 А. Это вполне согласуется с результатами экспериментов. В то же время необходимая мощность может быть получена при токе, не превышающем 6 А, при этом плотность потока мощности на аноде оказывается примерно в 5 раз меньше, чем в магнетроне, описанном в [3]. Импульсная добавка температуры на поверхности анода при этом не превышала 50 °С, тогда как безопасная температура импульсного нагрева поверхности медного электрода составляет около 110 °С [10].



## 5. Выбор типа стартового катода

Проблеме выбора типа и конструкции стартового катода уделялось особо пристальное внимание. Хотя этот катод расположен вне пространства взаимодействия, тем не менее он в определенной степени подвергается обратной бомбардировке. Мощность этого подогрева может составлять около 2 % от подводимой мощности. Она зависит от положения основного вторичноэмиссионного катода, степени равномерности магнитного поля, крутизны спада модулирующего импульса.

Эксперименты показали, что величина тока вспомогательного катода, необходимого для возбуждения вторичной эмиссии с основного катода, зависит от многих факторов. В частности, к ним относятся величина анодного напряжения и магнитного поля, крутизна фронта модулирующего импульса, конфигурация пространства взаимодействия и др. Однако при значениях инжектированного тока, составляющих  $1 \pm 2$  % от анодного, надежный запуск обеспечивается практически во всех случаях. При этом возбуждение вторичной эмиссии происходит уже на фронте модулирующего импульса.

Если в качестве стартового используется торцевой катод, расположенный на месте одного из концевых экранов, то плотность тока при этом составляет всего  $1 \pm 3$  А/см<sup>2</sup>. Существует достаточно много типов катодов, способных работать продолжительное время при такой плотности тока. Наиболее подходящими по комплексу параметров для наших целей являются импрегнированные катоды. Чаще всего применяются так называемые алюминатные катоды, для пропитки которых используется смесь окислов бария, кальция и алюминия в разных пропорциях. Иногда применяются также силикатные катоды, в которые кроме перечисленных выше окислов добавляется еще и окись кремния.

За последние десятилетия разработано две новые модификации импрегнированных катодов, отличающихся улучшенными характеристиками. Одна из модификаций связана с применением осмия, другая – скандия. В обоих случаях добавка может распределять-

ся во всем объеме катода или наноситься в виде тонкой пленки на поверхность катода. В последнем случае в состав пленки могут входить в различных комбинациях вольфрам и алюминий. По литературным данным рабочая температура при неизменной плотности тока у осмированных катодов примерно на 100°, а у скандатных на 200° ниже, чем у алюминатных катодов. Естественно ожидать от них большей долговечности [11].

Проведенные нами по ускоренной методике сравнительные испытания упомянутых выше четырех типов катодов на долговечность показали, что наилучшие характеристики имеют осмированные катоды. При температуре, превышающей рабочую температуру катода на 150 °С, долговечность этого катода в диоде превышала 1000 ч. Это позволяет надеяться, что при эксплуатации такого катода в магнетроне запаса активного вещества должно хватить, по крайней мере, на несколько десятков тысяч часов. Конструкция стартового катода показана на рис. 4. Вольфрамовая губка запрессовывалась в молибденовую чашечку. Этот эмиттер приваривался к V-образному подогревателю, являющемуся одновременно элементом крепления.

Известно, что долговечность импрегнированного катода в значительной мере опреде-

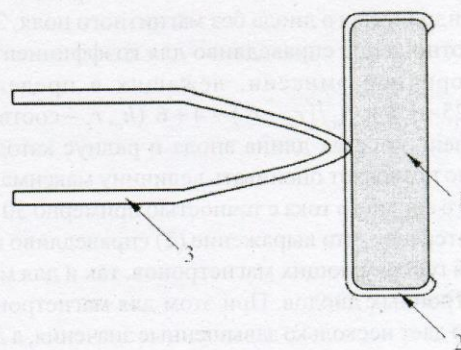


Рис. 4. Конструкция вспомогательного термокатада:

1 – пропитанная вольфрамовая губка, 2 – танталовая чашка, 3 – танталовый подогреватель



ляется вакуумным состоянием прибора, в котором он работает. Некоторые газы начинают отравлять катод уже при парциальном давлении около  $10^{-7}$  мм рт. ст. В связи с этим магнетрон был снабжен миниатюрным магнито-разрядным насосом.

### 6. Основные характеристики и особенности работы

В табл. 1 приведены основные характеристики двух вариантов разработанного прибора.

Из этой таблицы легко увидеть, что первый вариант магнетрона имеет преимущество практически по всем параметрам, кроме дрожания фронта, которое оказывается значительно большим. В то же время существенное преимущество этого варианта магнетрона по импульсной нагрузке анода и анодному напряжению делает его более перспективным с точки зрения получения максимальной долговечности. Проводимые в настоящее время испытания таких приборов на долговечность показали, что их ресурс при выходной мощности около 1 кВт превышает 6000 ч. Этот резуль-

тат, по-видимому, является рекордным для магнетронов 3-мм диапазона радиоволн.

Нужно сказать, что использование осмированного катода в качестве стартового, кроме рекордной долговечности, принесло и некоторые неприятные результаты. Выяснилось, в частности, что его высокая эмиссионная способность, особенно высокий коэффициент вторичной эмиссии, способны, при определенных условиях, привести к отпирианию магнетрона при малых анодных напряжениях за счет возникновения продольных колебаний пространственного заряда.

### Заключение

Использование режима пространственной гармоник и холодных вторичноэмиссионных катодов позволяет создавать в коротковолновой части миллиметрового диапазона магнетроны с долговечностью в несколько тысяч часов. Такие приборы могут найти широкое применение в РЛС обзора летного поля и акваторий морских портов, в РЛС предупреждения столкновений, а также в системах наведения оружия.

### Литература

1. A. Belikov, K. Kozhyn, B. Trush, D. Vavriv, V. Volkov. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2002, 7, No. 4, pp. 413-414.
2. Проспект фирмы EEV.
3. Бернштейн, Кролл. Обычные импульсные магнетроны разнорезонаторного типа. В сб. "Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями". Москва, ИЛ, 1961, т. 2, с. 224-228.
4. И. Д. Трутень, И. Г. Крупаткин, О. Н. Баранов, Н. Н. Галушко, В. Е. Игнатов. *УФЖ*. 1975, 20, №7, с. 1170-1176.
5. Д. Фиск, Г. Хагструм, П. Гатман. *Магнетроны*. Перев. с англ., Москва, Сов. Радио, 1948, 258 с.
6. J. V. Collins (ed.), *Microwave Magnetrons*. N. Y., 1948, 806 pp.
7. R. L. Jepsen, M. W. Muller. *J. Appl. Phys.* 1951, 22, No. 1196, pp. 1196-1207.
8. И. М. Вигдорчик, В. Д. Науменко, В. П. Тимофеев. Доклады Академии Наук Украинской ССР, серия "А". 1975, №7, с. 633.

Таблица

Параметры	Вариант 1	Вариант 2
Номер вида колебаний	4	5
Диаметр катода, мм	1.5	1.55
Анодное напряжение, кВ	7.5÷8.5	8.5÷9.8
Анодный ток, А	4÷8	6÷10
Выходная мощность в импульсе, Вт	800÷2500	1000÷4000
Коэффициент полезного действия, %	3÷6	2÷4
Дрожание фронта, нс	3÷7	1÷3



9. И. М. Вигдорчик, В. П. Тимофеев. ЖТФ, 1974, XLIV, с. 221-223.
10. В. Ф. Коваленко. Теплофизические процессы и электровакуумные приборы. Москва, Сов. радио, 1975, 215 с.
11. А. В. Киселев. Обзоры по электронной технике. Сер. 1 СВЧ-техника, 1992, вып. 11, №1684.

### Long Life 3 mm Pulse Magnetron

**A. E. Moiseenko, V. D. Naumenko,  
A. N. Suvorov, A. R. Syrov**

A 3-mm magnetron with over than 6000 hour life was developed. The magnetron includes a platinum secondary-emission cathode, osmium starting thermionic cathode and operates the space harmonic mode. A miniature ion pump, being part of the device, provides high vacuum that also helps achieve high longevity.