

# Генератор на основе магнетрона для плазменных технологий

А.А. Куликов<sup>1</sup>, А.В. Прокопенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «НПП «Магратеп», Фрязино, Московская обл., Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

**Аннотация:** в работе рассмотрены источники микроволнового излучения на основе магнетронных генераторов с инверторными источниками анодного напряжения для применения в плазменных технологиях. Изучена возможность использования магнетрона с инверторным источником высоковольтного питания для работы в плазмотронах и ЭЦР источников ионов. Проведено исследование зависимости энергетических и частотных характеристик магнетронов от инверторных источников питания с возможностью регулировки СВЧ мощности.

**Ключевые слова:** магнетрон, источник питания, частотная характеристика, мощность, плазменные технологии

## 1. Введение

Одним из направлений применения микроволновой энергии является преобразование её в плазму. Области применения СВЧ плазмы достаточно обширны [1]. Положительным свойством применение СВЧ плазмы является: простота получения разрядов как высокого, так и низкого давления, чистота безэлектродной плазмы, химическая активность и высокая степень ионизации плазмы. В настоящее время эти качества и определяют области практического применения микроволновой плазмы. Микроволновая плазма активно используется в технологиях травления, очистки поверхности в микроэлектронике и получения мелкодисперсных наноматериалов [2, 3]. В России и за рубежом созданием СВЧ-плазмотронов для различных технологических процессов занимаются многочисленные коллективы. Область применения таких плазмотронов от сжигания угольной пыли до использования в сельском хозяйстве. В подавляющем большинстве в качестве источников микроволнового излучения используются доступные магнетроны с вольфрамовым катодом мощностью до 0,9 кВт на частоте 2450 МГц. Существуют работы, в которых доступные магнетроны модернизируют, добавляя водяную систему охлаждения, и увеличивают анодный ток магнетрона, используя трансформаторные источники питания от трехфазной сети переменного тока, что позволяет увеличить среднюю выходную мощность магнетрона [4] и лучше стабилизировать разряд.

Актуальным применением энергии электромагнитных колебаний является создание источников ионов на основе ЭЦР-разряда, которые применяются в ускорительной технике для получения ионов высокой зарядности и высоких импульсных токов. В настоящее время в России разрабатываются источники ионов на основе ЭЦР разряда для получения легких ионов и протонов. В работе [5] изучалась возможность использования бытового магнетрона для питания ЭЦР источников ионов с регулируемым трансформаторным источником высоковольтного анодного питания [5]. Генераторы для ЭЦР источников ионов должны выдавать микроволновое излучение в узкой полосе и иметь возможность регулировать мощность СВЧ питания от 0,1 до 0,8 кВт. Таким образом, создание инверторного источника анодного тока магнетрона для работы в непрерывном режиме в настоящее время является актуальной задачей.

## 2. Магнетронные генераторы с различными источниками питания

Магнетронные генераторы, применяемые в различных приборах и системах бытового, промышленного и научного назначения можно классифицировать по типу источника питания магнетрона. Источник питания будет определять режим работы магнетрона и характеристики СВЧ-излучения. Рассмотрим наиболее распространенные типы источников питания доступных магнетронов, применяемых в СВЧ-печах.

Наибольшее распространение получила схема трансформаторного источника питания с удвоением напряжения, типовая схема которого приведена на рисунке 1. Это объясняется простотой схемы и конструкции источника питания, доступностью и относительно невысокой стоимостью компонентов.

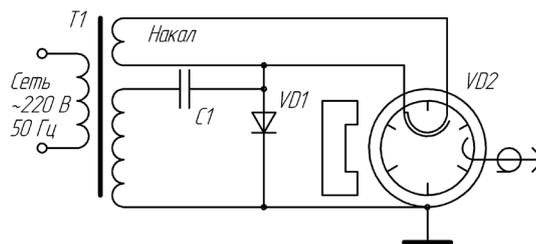


Рисунок 1. Типовая схема магнетронного генератора с трансформаторным источником питания с удвоением напряжения.

Режим работы магнетрона с таким источником питания – импульсный (один полупериод сетевого напряжения); форма импульса СВЧ-излучения близка к колоколообразной. За один рабочий импульс мощность СВЧ-излучения изменяется от 0 до максимального значения, при этом пиковая мощность превышает номинальную среднюю мощность магнетрона в 2-3 раза. Спектр СВЧ-излучения имеет выраженную основную частоту и незначительный уровень в полосе 40-60 МГц в зависимости от типа магнетрона. Регулировка выходной мощности такого генератора осуществляется регулированием времени работы (периодические включения и отключения источника питания). Возможно дискретное управление мощностью [4].

Кроме того, необходимо отметить особенность начала работы генератора, когда в течение некоторого времени прогревается катод, анодное напряжение может в несколько раз превышать рабочее значение, что может привести к выходу из строя источника питания или магнетрона.

Также к существенным недостаткам рассматриваемого типа источников питания следует отнести отсутствие стабилизации выходных характеристик при изменении напряжения питающей сети, что особенно актуально для промышленных установок.

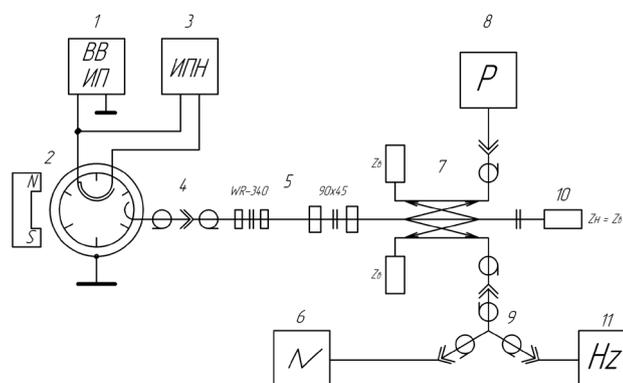
При использовании в магнетронном генераторе источника питания с преобразованием частоты, которые выпускаются фирмой Panasonic, можно обеспечить плавную регулировку мощности СВЧ-излучения в широком диапазоне, а также обеспечить её стабилизацию при изменении напряжения питающей сети. Однако за это приходится заплатить расширением спектра СВЧ-излучения до 60-80 МГц. Режим работы магнетрона импульсный – колоколообразная огибающая тока анода, обусловленная полупериодом сетевого напряжения, имеет высокочастотное заполнение. Для работы с этим типом источников питания у разных производителей есть специальные магнетроны, которые обычно дороже при сопоставимой мощности. Чтобы применять «неинверторный» магнетрон с данным типом источников питания необходимо использовать отдельный источник питания накала.

В рамках инициативы ОКР специалистами АО «НПП «Магратеп» был разработан магнетронный генератор непрерывного действия с на основе инверторного источника питания собственной разработки. Источник питания построен по схеме

квазирезонансного мостового преобразователя с фазовым регулированием с частотой преобразования 100 кГц. Так же для снижения уровня пульсаций выходной СВЧ-мощности разработан источник питания накала магнетрона постоянного тока с возможностью плавной регулировки напряжения от 0 до максимального значения. Благодаря возможности регулировки высокого напряжения и напряжения накала данный источник питания можно использовать с любым бытовым магнетроном мощностью до 1 кВт.

### 3. Исследование магнетрона с инверторным источником питания

Исследование работы разработанного источника питания проводилось с магнетроном 2М246 фирмы LG. Схема испытательного стенда приведена на рисунке 2. Для исследований использовался анализатор спектра Rohde&Schwarz HAMEG HMS-X и осциллограф Rohde&Schwarz RTO1044. На осциллограф также выводилась форма тока источника питания, снимаемая с резистивного датчика, сопротивлением 1 Ом. Значение тока высоковольтного источника питания измерялось встроенным миллиамперметром М42300 0-500 мА кл.1,5.



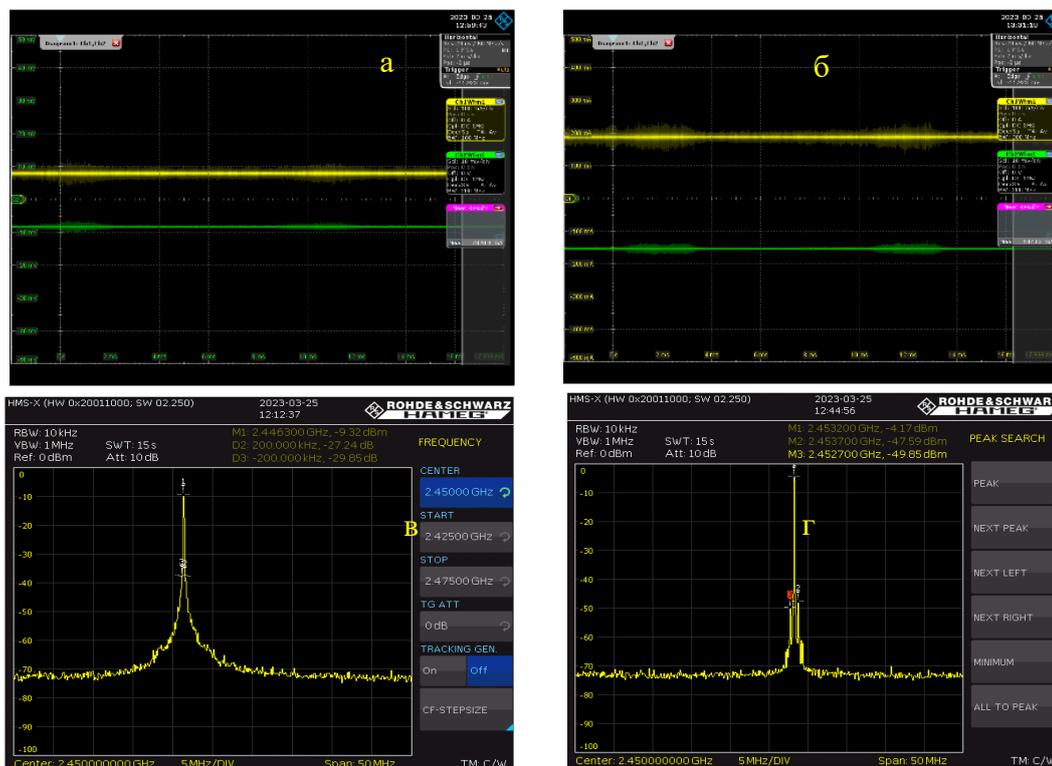
**Рисунок 2.** Схема испытательного стенда.

- 1 – исследуемый высоковольтный источник питания; 2 – магнетрон 2М246;
- 3 – источник питания накала магнетрона; 4 – коаксиально волноводный переход; 5 – волноводный переход с сечения WR-340 на отечественный 45x90 мм<sup>2</sup>;
- 6 – осциллограф с СВЧ-детектором; 7 – 2-х канальный направленный ответвитель; 8 – измеритель мощности МЗ-54; 9 – коаксиальный тройник;
- 10 – согласованная водяная нагрузка, 11 – анализатор спектра.

В результате проведенных измерений (рисунок 3а, 3б) подтвердили непрерывность выходного СВЧ-излучения и возможность плавной регулировки мощности в широком диапазоне. Благодаря работе магнетрона в режиме постоянного тока наблюдается значительное улучшение частотных характеристик (рисунок 3в, 3г), по сравнению с другими рассмотренными типами источников питания. В результате ширина полосы генерируемой СВЧ-мощности не превышает 2 МГц. Кроме того, отсутствие пульсаций СВЧ-мощности позволяет в значительной степени увеличить максимально допустимый КСВн генератора, что во многих случаях исключит необходимость применения защитных устройств различного типа (вентили, защитные выключатели и т.п.). Использование подобного источника питания в резонаторных плазменных устройствах позволит добиться более стабильного поджига и горения разряда.

Результаты аналогичных измерений при работе магнетрона от инверторного источника питания Panasonic составляют более 60 МГц. При измерениях использовался внешний источник питания накала для обеспечения работы магнетрона

с данным типом источника и исключения его влияния на частотные характеристики излучения.



**Рисунок 3.** Осциллограммы тока высоковольтного источника питания (жёлтый) и огибающей СВЧ (зелёный) (а, б) и спектрограммы СВЧ-излучения (в, г) при токах источника питания 100 мА и 240 мА соответственно.

#### 4. Заключение

В результате проведенных исследований установлено:

1. Параметры СВЧ-генераторов на магнетронах очень сильно зависят от типа применяемого высоковольтного источника питания.
2. Типовые источники питания бытовых магнетронов (трансформаторные и инверторные типа Panasonic) не могут применяться в установках, где требуется непрерывность излучения и узкая рабочая полоса излучения, например ЭЦР-источники ионов.
3. Разработанный инверторный источник питания магнетрона может эффективно применяться с резонаторными рабочими камерами в плазменных технологиях.

#### Список литературы

1. Лебедев, Ю.А. СВЧ плазма и ее применение Ю.А. Лебедев // Физика конденсированного состояния: тезисы докладов IV международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии, 2005 г., Россия, Иваново, 2005.
2. Яфаров, Р.К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий - М: Физматлит, 2009.
3. Gulyaev Yu.V., et. al. Decapsulation of polyelectrolyte nanocomposite microcapsules by pulsed microwave effect // Journal of Communications Technology and Electronics, 2015, Vol. 60, No. 11, pp. 1286–1290.
4. Тихонов В.Н., Иванов И.А, Крюков А.Е, Тихонов А.В. Бюджетные генераторы для микроволновых плазмотронов // Прикладная физика, 2015, № 5, С. 102-106.
5. Куликов А.А., Морозов А.О., Прокопенко А.В. Микроволновые генераторы для ионных источников // Лазерные, плазменные исследования и технологии. ЛАПЛАЗ-2022, 2022. С. 312.