

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 537.563.2

РАЗРАБОТКА БЛОКА ПИТАНИЯ МАГНЕТРОНА ДЛЯ ЭЦР
ИОННОГО ИСТОЧНИКА С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2.46 ГГц

© 2025 г. М. С. Дмитриев^а, *, М. В. Дьяконов^а, С. А. Туманов^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: msdmitriyev@mephi.ru

Поступила в редакцию 26.06.2023 г.

После доработки 26.06.2023 г.

Принята к публикации 04.07.2023 г.

Представлена блок-схема источника питания магнетрона. Разработана принципиальная схема силового модуля блока питания. Выполнен расчет силовой и высоковольтной частей. Произведена сборка макета блока питания магнетрона и проведены его испытания.

Ключевые слова: ионный источник, электронно-циклотронный резонанс, блок питания магнетрона, магнетрон, повышающий трансформатор

DOI: 10.56304/S2079562924050099

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее простым и дешевым источником СВЧ питания для ЭЦР источников ионов, работающих на частоте 2.46 ГГц, является магнетрон. В настоящее время в качестве источника питания маломощных магнетронов применяются схемы с высоковольтным трансформатором или инверторным блоком питания. При этом низкие частоты преобразования приводят к увеличению габаритов источников питания, а в случае трансформаторных блоков к этому недостатку добавляются ещё проблемы с регулированием мощности при работе блока питания в непрерывном режиме.

Блок питания магнетрона для ионного источника должен выдавать стабильное напряжение в несколько киловольт. Из-за малой инерционности плазмы важно, чтобы питание, поступающее на магнетрон, обладало малыми пульсациями, а блок питания, работая в непрерывном режиме, имел возможность плавной регулировки выдаваем-

мой мощности. В связи с этим была поставлена задача создания соответствующего высоковольтного блока питания.

1. РАЗРАБОТКА СХЕМЫ БЛОКА ПИТАНИЯ МАГНЕТРОНА

На рис. 1 представлена общая схема блока питания магнетрона. Она состоит из регулируемого выпрямителя, модуля управления, силового модуля, высоковольтной части блока питания и магнетрона.

Очень важной задачей при разработке силовой схемы является подбор затворных резисторов (рис. 2). От номинала затворного резистора сильно зависит скорость переходных процессов. В нашем случае оптимальные значения затворных резисторов составили $R = 15 \text{ Ом}$. При этом зависимость напряжения на затворах от времени имеет вид, представленный на рис. 3.

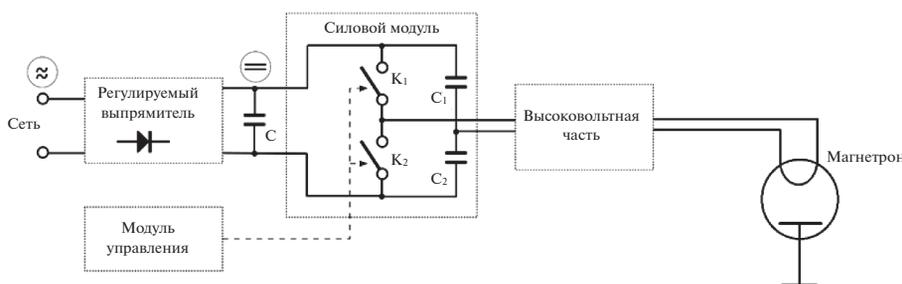


Рис. 1. Схема блока питания магнетрона.

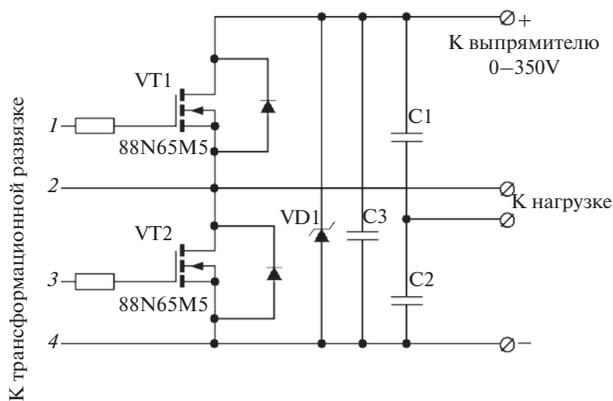


Рис. 2. Схема силового модуля.

Схема модуля управления представляет из себя самотактируемый генератор IR2153 с 2 драйверами MAX4420, сигналы с которых идут на трансформаторную развязку. IR2153 выдает импульсы с фиксированным dead-time, равным 1.2 мкс. Настройка частоты происходит за счет регулировки переменного резистора, соединенного с одним из выводов IR2153.

2. РАСЧЕТ СИЛОВОЙ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЧАСТЕЙ

Перед сборкой макета блока питания, с помощью программного пакета LTspice была рассчитана схема, включающая в себя силовую и высоковольтную части (рис. 4).

При этом на первичной обмотке повышающего трансформатора напряжение имеет вид, представленный на рис. 5а, а на вторичной обмотке –

на рис. 5б. Размах напряжения на первичной обмотке – составляет 300 В, после повышающего трансформатора размах соответствует 4.5 кВ, при этом коэффициент трансформации повышающего трансформатора $n = 15$. После повышающего трансформатора расположен выпрямитель с умножителем. Такая схема позволяет получить постоянное напряжение, которое вдвое превосходит амплитуду приходящего импульса. В выбранной схеме умножителя использовались конденсаторы по 1 мкф каждый. Полученное расчетное напряжение на нагрузке после указанной схемы составляет 4.5 кВ постоянного напряжения. Вид зависимости напряжения на нагрузке от времени представлен на рис. 5в. Из рисунка видно, что данное значение напряжения устанавливается за время, соответствующее $t = 0.5$ мс. Флуктуации уже установившегося напряжения составляют 4 В и не превышают 0.2% от общего значения.

В итоге в программном пакете LTspice был произведен расчет силовой и высоковольтной частей блока питания магнетрона. Выпрямленное напряжение на нагрузке составило 4.5 кВ, что с запасом достаточно для поставленной задачи.

3. СБОРКА МАКЕТА И ИСПЫТАНИЯ

Была произведена сборка макета блока питания магнетрона и проведены его испытания. Для этого был собран макет силового модуля, намотан повышающий трансформатор, собрана схема умножителя с выпрямителем. На рис. 6а представлен вид силового блока, на рис. 6б – вид повышающего трансформатора. Схема умножителя с выпрямителем состоит из двух конденсаторов емкостью $C = 1$ мкф каждый, а также двух диодных сборок, состоящих из последовательно соединённых 13 ди-

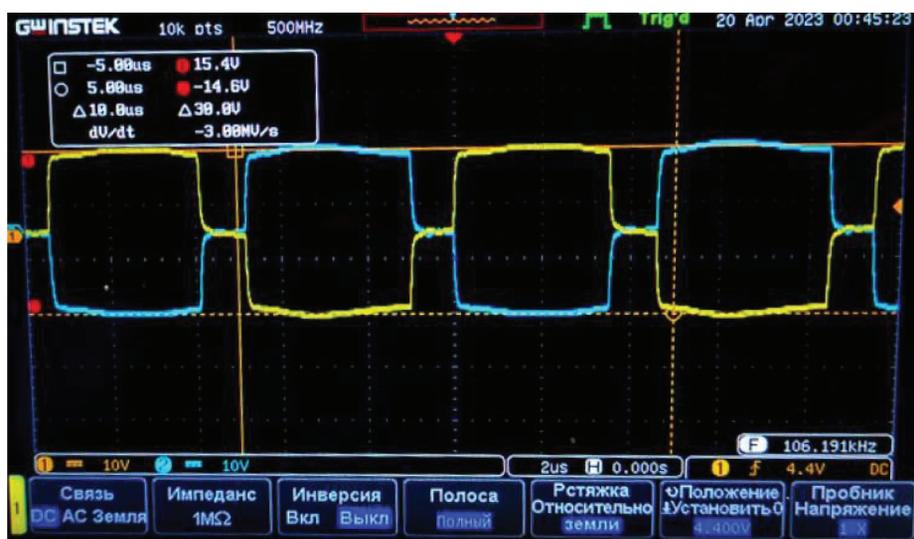


Рис. 3. Зависимость напряжения на затворах транзисторов от времени на частоте 100 кГц.

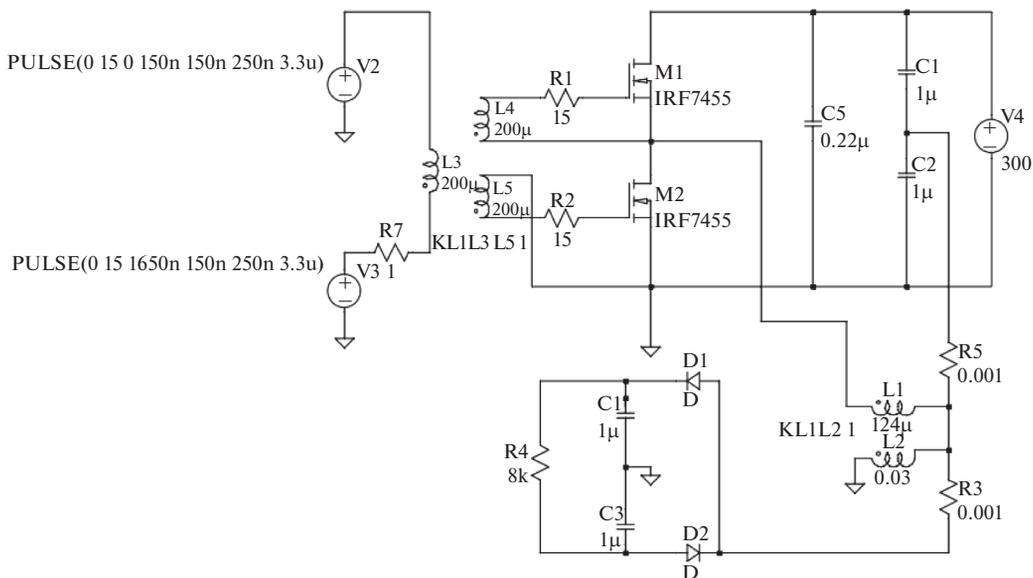


Рис. 4. Схема силового и высоковольтного модулей.

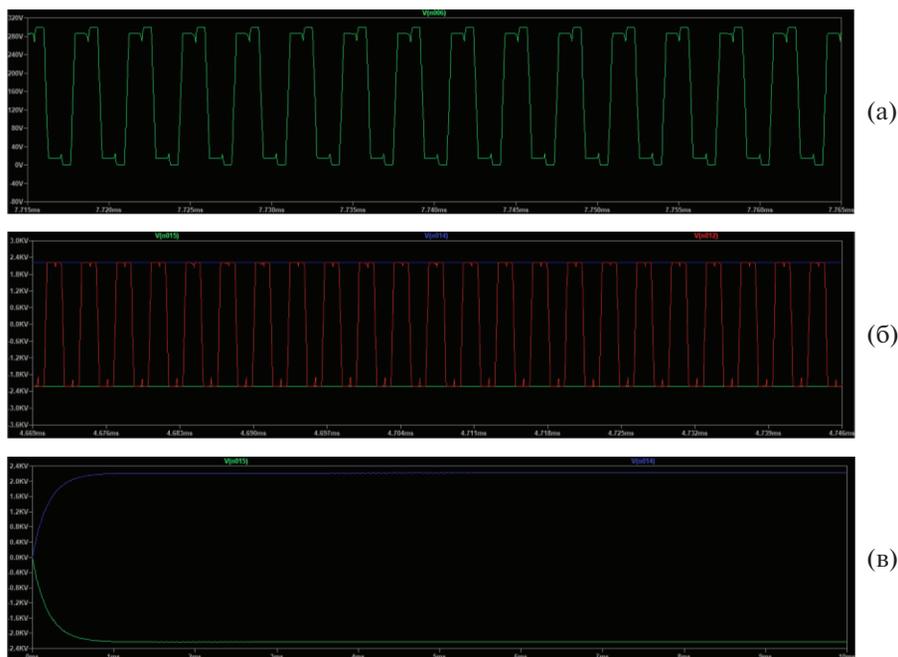


Рис. 5. Зависимость напряжения от времени: (а) на первичной обмотке повышающего трансформатора; (б) на вторичной обмотке повышающего трансформатора; (в) на нагрузке.

одов MUR860. При этом каждый отдельный диод рассчитан на напряжение 600 В.

Параметры для намотки подходящего нам трансформатора были определены с помощью программы ExcellentIT. В итоге, намотанный по заданным параметрам трансформатор имеет ко-

эффициент трансформации равный $n = 13$. Исходя из характеристик трансформатора, проводились испытания макета блока питания магнетрона на частоте 100 кГц. При этом в качестве регулируемого выпрямителя использовался ЛАТР, после которого стоял диодный мост.

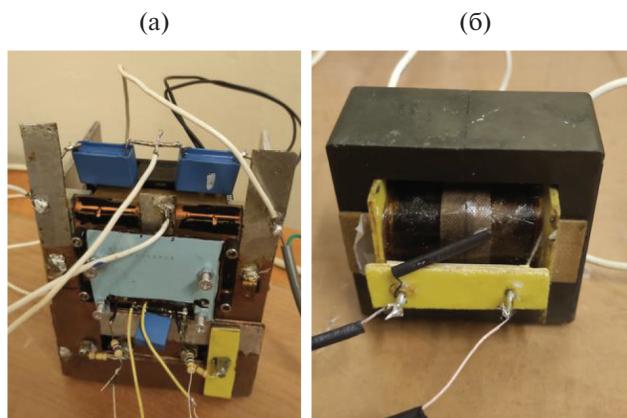


Рис. 6. Вид силового и высоковольтного модулей: (а) вид силового блока; (б) вид повышающего трансформатора.



Рис. 7. Зависимость напряжения от времени: (а) на первичной обмотке на холостом ходу; (б) половина максимального напряжения на холостом ходу.

Собранный макет был испытан на частоте 100 кГц на холостом ходу, а также с нагрузкой в виде магнетрона. В эксперименте на холостом ходу на первичной обмотке была получена зависимость напряжения от времени, представленная на рис. 7а. Сигналы представляют из себя прямоугольные импульсы с узкополосными выбросами. При подаче на полумост $U = 35$ В с выпрямителя, амплитуда импульсов составляет $U_a = 33.5$ В. Далее в ходе эксперимента было определено, что на холостом ходу данный макет блока питания может выдавать 7.8 кВ постоянного напряжения (рис. 7б).

Также проводились исследования с нагрузкой в виде магнетрона. При этом после повышающего трансформатора с выпрямителем и умножителем, было получено 3.9 кВ стабильного постоянного напряжения на магнетроне. Полученные значения подтверждают возможность использования данного макета блока питания для подачи высокого напряжения на магнетрон.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге разработана схема блока питания магнетрона. Произведен расчет ее силовой и высоковольтных частей. На основе данного расчета собран макет блока питания магнетрона. В результате испытаний было показано, что макет блока питания способен подавать 3.9 кВ стабильного постоянного напряжения на магнетрон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Дмитриев М.С., Дьяконов М.В., Туманов С.А. // Сб. науч. тр. VII Междунар. конф. "Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2021". 23–26 марта 2021 г., Москва. 2021. Москва: НИЯУ МИФИ. С. 427–428.
2. Кухтецкий С.В. Простой лабораторный инвертор для индукционного нагрева. 2010. Красноярск: Ин-т химии и химической технологии, СО РАН.

3. Дмитриев М.С., Дьяконов М.В., Туманов С.А. // Сб. науч. тр. VII Междунар. конф. "Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2021". 23–26 марта 2021 г., Москва. 2021. Москва: НИЯУ МИФИ. С. 392–393.
4. Дмитриев М.С., Дьяконов М.В., Туманов С.А. // Сб. науч. тр. VIII Междунар. конф. "Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2022". 22–25 марта 2022 г., Москва. 2022. Москва: НИЯУ МИФИ. С. 325.

Development of a Power Source of a Magnetron for an Electron Cyclotron Resonance Ion Source with a Working Frequency of 2.46 GHz

M. S. Dmitriev¹, *, M. V. Dyachkov¹, and S. A. Tumanov¹

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: msdmitriyev@mephi.ru

Received June 26, 2023; revised June 26, 2023; accepted July 04, 2023

Abstract—A block diagram of a power source of a magnetron has been presented. The circuit schematic of the energy unit of the power source has been developed. The power and high-voltage parts have been calculated. A power source prototype for the magnetron has been assembled and tested.

Keywords: ion source, electron cyclotron resonance, power source of a magnetron, magnetron, step-up transformer