

УДК 621.311.62

*В.О. ОСКИРКО, А.П. ПАВЛОВ, В.А. СЕМЕНОВ, С.В. РАБОТКИН, А.Н. ЗАХАРОВ***МИНИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГИИ ДУГИ В ПРОЦЕССЕ HIPIMS***

Высокая плотность мощности в процессах HIPIMS увеличивает вероятность образования дуг на мишени и усложняет задачу подавления дуги относительно традиционных режимов магнетронного распыления на постоянном и среднечастотном токе. Выходная индуктивность запасает большое количество остаточной энергии, которая передается в дугу после выключения управляющего транзистора и может вызвать образование микрокапель. Сравниваются HIPIMS-источники питания с точки зрения количества энергии, передаваемой в дугу. Показано, что при времени реакции источника питания менее 1 мкс энергия дуги практически полностью состоит из остаточной энергии, запасаемой в выходной индуктивности источника питания и кабеля. В зависимости от параметров схемы и настройки системы защиты обнаружение дуги по напряжению позволяет в 1.5–2 раза снизить энергию горения дуги относительно детектирования по току. Чтобы снизить энергию дуги до меньших значений, требуется снижение остаточной энергии. Продемонстрировано, что схема с топологией однотактного прямоходового мостового преобразователя обеспечивает рекуперацию остаточной энергии, что в конкретных экспериментальных условиях позволило в 4 раза снизить энергию дуги с 175 до 42 мДж.

Ключевые слова: HIPIMS, HPPMS, источник электропитания, электрическая дуга, подавление дуги.

Введение

Магнетронное распыление импульсами высокой мощности (High Power Impulse Magnetron Sputtering, HIPIMS) является новой технологией ионизированного физического осаждения покрытий из паровой фазы (IPVD) [1], способной обеспечивать высокую плотность ионного воздействия на растущее покрытие.

Одной из проблем HIPIMS является образование электрических дуг, провоцируемых локальными неоднородностями распределения электрического поля и диэлектрическими включениями на поверхности мишени магнетронной распылительной системы (MPS) [2]. Переход магнетронного разряда в дугу сопровождается образованием катодных пятен на поверхности мишени и микрокапель в потоке распыленного вещества, которые попадают на подложку и образуют дефекты в покрытии. Повышение плотности мощности на мишени MPS увеличивает вероятность возникновения дуг относительно традиционных режимов магнетронного распыления на постоянном (DC) и среднечастотном токе (MF).

Для предотвращения образования дефектов в покрытии в случае возникновения дуги необходимо ограничивать её энергию и время существования. Большая величина разрядного тока в HIPIMS усложняет решение этой задачи. Стандартные способы подавления дуги основываются на быстром детектировании дуги и прерывании подачи электроэнергии в нагрузку путем размыкания ключа [3–6]. При высоком токе в HIPIMS индуктивность источника и кабеля запасает большое количество энергии, которой достаточно для поддержания дуги после размыкания ключа, разогрева катодного пятна и образования микрокапель. Чтобы уменьшить энергию дуги, необходимо не только увеличивать скорость реакции источника питания, но и уменьшать величину остаточной энергии, запасаемой в выходной индуктивности.

В данной работе рассматриваются два формирователя выходных импульсов (ФВИ), работающих в составе HIPIMS-источников питания. Описывается принцип действия схем и проводится их сравнение с точки зрения энергии, передаваемой в дугу. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитать энергию дуги в различных режимах обнаружения, установлена взаимосвязь энергии дуги с такими параметрами источника питания, как величина выходной индуктивности и время задержки реакции источника питания.

Устройство и принцип действия источника питания HIPIMS

В процессах HIPIMS используются специализированные источники питания, способные постепенно накапливать электроэнергию и передавать её в нагрузку в течение коротких промежутков

* Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 18-42-703005.

времени, т.е. длительности импульса. Задачей формирования выходных импульсов высокой мощности непосредственно занимается блок ФВИ, располагающийся в выходной части источника.

На рис. 1 представлены два варианта ФВИ. ФВИ-1 построен на основе управляющего транзистора VT_1 и обратного диода VD_1 (рис. 1, а) [9]. Помимо коммутации емкости с нагрузкой VT_1 ограничивает максимальную величину выходного тока. С помощью датчика (А) система управления (СУ) отслеживает величину тока в транзисторе и выключает его, если происходит превышение порогового значения. Таким образом, обеспечивается защита транзистора от перегрузки по току и осуществляется прерывание дуги. В случае возникновения дуги происходит быстрое увеличение выходного тока. Поскольку система обладает задержкой реакции, скорость роста выходного тока необходимо ограничивать на безопасном уровне. Эту функцию в схеме выполняет собственная индуктивность формирователя L_1 и индуктивность кабеля L_k .

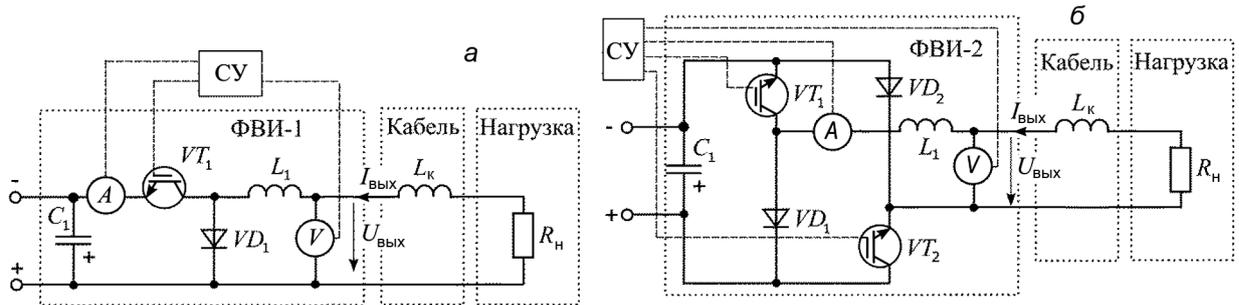


Рис. 1. Схемы источников питания на основе формирователя импульсов с одним транзистором с обратным диодом (а) и формирователя импульсов с топологией двухтранзисторного прямоходового однотактного преобразователя (б)

Для защиты транзистора от перенапряжения используется обратный диод VD_1 , через который протекает ток L_1 и L_k , когда транзистор переходит в запертое состояние. Напряжение на VT_1 в этом случае ограничивается на уровне напряжения накопительной емкости U_{C1} , но вся остаточная энергия L_1 и L_k переходит в нагрузку.

На рис. 1, б представлен другой вариант формирователя – ФВИ-2 [7, 8]. Он обладает топологией однотактного прямоходового мостового преобразователя. В отличие от предыдущей схемы ФВИ-2 позволяет рекуперировать энергию выходной индуктивности обратно в C_1 после завершения импульса. В состав ФВИ-2 входит два транзистора VT_1 и VT_2 , работающих синхронно, и два обратных диода VD_1 и VD_2 . Формирование импульсов происходит при замыкании транзисторов. После выключения транзисторов индуктивности L_1 и L_k формируют напряжение, опирающееся на диоды VD_1 и VD_2 . В результате энергия, запасенная в L_1 и L_k , рекуперирована обратно в накопительную емкость C_1 .

На рис. 2, а приведены эпюры тока и напряжения на выходе формирователей в нормальном режиме (без дуг). Большое влияние на форму выходных импульсов напряжения и тока оказывает суммарная величина выходной индуктивности $L_{\text{ВЫХ}} = L_1 + L_k$. Увеличение $L_{\text{ВЫХ}}$ приводит к росту длительности фронта $t_{\text{ф}}$ и спада $t_{\text{сп}}$ импульса тока.

Подавление электрической дуги в НРІМС

На рис. 2, б, в представлены эпюры тока и напряжения на выходе ФВИ-1 и ФВИ-2 в случае возникновения дуги в режиме детектирования по току. Общую энергию дуги можно определить, как сумму энергий, передаваемых на различных интервалах. Если принять, что в процессе горения дуги параметры $L_{\text{ВЫХ}}$, U_{C1} , $U_{\text{ВЫХ}}$, $U_{\text{ДУГ}}$ остаются неизменными, и пренебречь потерями мощности в схеме, энергию дуги в режиме детектирования по току можно определить следующим образом:

$$E_{\text{ФВИ1}(I)} = \frac{U_{\text{ДУГ}} L_{\text{ВЫХ}}}{2} \left(\frac{I_{\text{ДЕТ}}^2 - I_0^2}{U_{C1} - U_{\text{ДУГ}}} \right) + t_{\text{ЗАД}} U_{\text{ДУГ}} \left(I_{\text{ДЕТ}} + \frac{U_{C1} - U_{\text{ДУГ}}}{2L_{\text{ВЫХ}}} t_{\text{ЗАД}} \right) + \frac{L_{\text{ВЫХ}}}{2} \left(I_{\text{ДЕТ}} + \frac{U_{C1} - U_{\text{ДУГ}}}{L_{\text{ВЫХ}}} t_{\text{ЗАД}} \right)^2; \quad (1)$$

$$E_{\text{ФВИ2}(I)} = \frac{U_{\text{ДУГ}} L_{\text{ВЫХ}}}{2} \left(\frac{I_{\text{ДЕТ}}^2 - I_0^2}{U_{C1} - U_{\text{ДУГ}}} \right) + t_{\text{ЗАД}} U_{\text{ДУГ}} \left(I_{\text{ДЕТ}} + \frac{U_{C1} - U_{\text{ДУГ}}}{2L_{\text{ВЫХ}}} t_{\text{ЗАД}} \right) + \frac{L_{\text{ВЫХ}} U_{\text{ДУГ}}}{2(U_{C1} + U_{\text{ДУГ}})} \left(I_{\text{ДЕТ}} + \frac{U_{C1} - U_{\text{ДУГ}}}{L_{\text{ВЫХ}}} t_{\text{ЗАД}} \right)^2. \quad (2)$$

Как известно, источником информации для обнаружения дуги может быть выходное напряжение, поскольку образование дуги сопровождается резким падением выходного напряжения. Общая энергия дуги в этом случае равна:

$$E_{\text{ФВИ}(U)} = E_4 + E_5 = \left(I_0 + \frac{U_{C1} - U_{\text{дуг}}}{2L_{\text{ВЫХ}}} t_{\text{зад}} \right) U_{\text{дуг}} t_{\text{зад}} + \frac{L_{\text{ВЫХ}}}{2} \left(I_0 + \frac{U_{C1} - U_{\text{дуг}}}{L_{\text{ВЫХ}}} t_{\text{зад}} \right)^2; \quad (3)$$

$$E_{\text{ФВИ}(I)} = E_4 + E_7 = \left(I_0 + \frac{U_{C1} - U_{\text{дуг}}}{2L_{\text{ВЫХ}}} t_{\text{зад}} \right) U_{\text{дуг}} t_{\text{зад}} + \frac{L_{\text{ВЫХ}} U_{\text{дуг}}}{2(U_{C1} + U_{\text{дуг}})} \left(I_0 + \frac{U_{C1} - U_{\text{дуг}}}{L_{\text{ВЫХ}}} t_{\text{зад}} \right)^2. \quad (4)$$

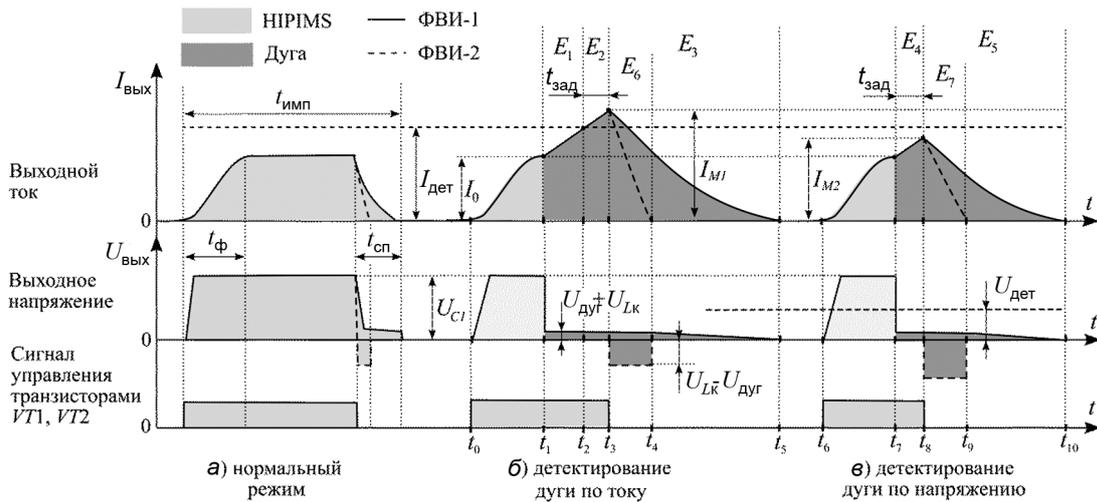


Рис. 2. Эпюры тока и напряжения на выходе формирователей импульсов в нормальном режиме (а) и при возникновении дуги (б, в)

Полученные зависимости показывают, что при малом времени реакции источника питания основной вклад вносит энергия, запасаемая в выходной индуктивности и передаваемая в нагрузку уже после выключения транзистора. Детектирование дуги по напряжению позволяет значительно снизить энергию дуги в среднем в 1.5–2 раза относительно режима детектирования по току. Особую роль играет рекуперация остаточной энергии в накопительную емкость, благодаря которой удается более чем в десять раз снизить энергию дуги в ФВИ-2, относительно ФВИ-1.

Для сравнения эффективности ФВИ-1 и ФВИ-2 были проведены эксперименты по подавлению дуги в процессе HIPIMS, в результате которых получены осциллограммы выходного тока и напряжения в момент возникновения дуги (см. рис. 3). Следует отметить, что реализованные на практике формирователи обладали отличными друг от друга параметрами, а именно, величиной

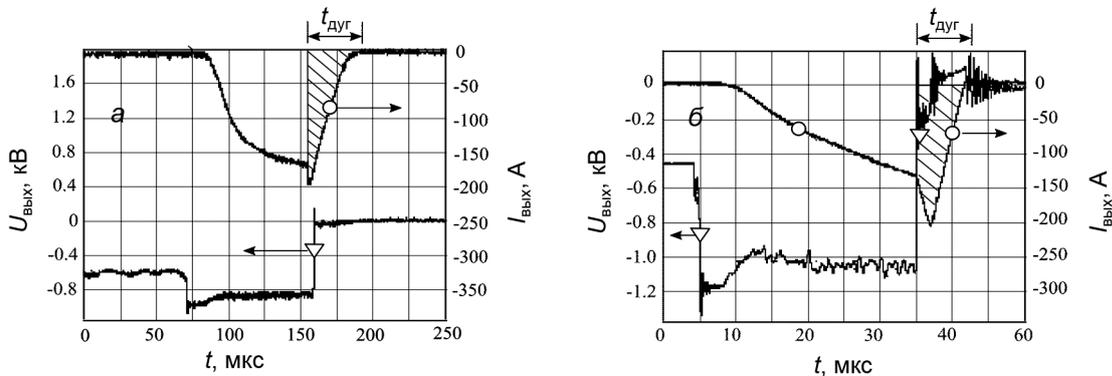


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения на выходе ФВИ-1 (а) и ФВИ-2 (б) при возникновении дуги

выходной индуктивности и временем задержки реакции. В таблице представлены основные параметры формирователя. Детектирование дуги в процессе эксперимента осуществлялось по току, при этом максимальная величина в обоих случаях составляла 200 А.

Время горения дуги в ФВИ-1 в данных условиях было приблизительно в шесть раз больше, чем в ФВИ-2. При этом расчетное количество энергии, передаваемой в дугу в ФВИ-1, приблизительно в четыре раза выше, чем в ФВИ-2, несмотря на значительно более высокую скорость реакции и величину выходной индуктивности.

Настройки и параметры процесса подавления дуги

Схема	U_{Cl} , В	I_{M1} , А	$I_{дет}$, А	I_0 , А	$L_{вых}$, мкГн	$t_{заль}$, нс	$t_{дуг}$, мкс	$E_{дуг}$, мДж
ФВИ-1	1000	200	180	160	10	200	35	175
ФВИ-2	1200		160	140	25	800	7	42

Заключение

Результаты расчетов показали, что в процессе подавления большая часть энергии передается в дугу уже после выключения управляющего транзистора в формирователе выходных импульсов. При малом времени реакции источника питания (менее 1 мкс) энергия дуги практически полностью состоит из остаточной энергии, запаасаемой в выходной индуктивности источника питания и кабеля. В зависимости от параметров схемы и настройки системы защиты детектирование дуги по напряжению позволяет в 1.5–2 раза снизить энергию горения дуги относительно детектирования по току. Чтобы снизить энергию дуги до меньших значений, требуется снижение остаточной энергии. Продемонстрировано, что схема ФВИ-2 с топологией одноконтурного прямоходового мостового преобразователя обеспечивает рекуперацию остаточной энергии в процессе HIPIMS, что в конкретных экспериментальных условиях позволило приблизительно в четыре раза снизить энергию дуги со 175 до 42 мДж.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kouznetsov V., Macák K., Schneider J., et al. // Surf. Coat. Technol. – 1999. – V. 122. – P. 290.
2. Anders A. // Thin Solid Films. – 2006. – V. 502. – P. 22–28.
3. Siefkes J., Harpold J., and Schatz D. // US Patent 5,009,764. – 1991.
4. Manley B. and Billings K. // US Patent 5,682,067. – 1997.
5. Teschner G. // US Patent 5,192,894. – 1993.
6. Zahringer G. and Wiedfmuth P., and Rettich T. // US Patent 6,621,674. – 2003.
7. Sochugov N.S., Oskirko V.O., and Spirin R.E. // Instruments and Experimental Techniques. – 2013. – V. 56(2). – P. 178–184.
8. Оскирко В.О., Павлов А.П., Соловьев А.А., Еньшин С.И., Семёнов В.А. // Патент на полезную модель РФ 152 232.У1. – 2014.

Институт сильноточной электроники СО РАН,
ООО «Прикладная электроника», г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 18.06.18.

Оскирко Владимир Олегович, к.т.н., науч. сотр., e-mail: oskirkovo@gmail.com;
Павлов Артем Павлович, директор ООО «Прикладная электроника», e-mail: tenzor85@gmail.ru;
Семенов Вячеслав Аркадьевич, инженер, e-mail: semenofvjacheslav@gmail.com;
Работкин Сергей Викторович, к.т.н., науч. сотр., e-mail: rabotkin@yandex.ru;
Захаров Александр Николаевич, к.т.н., науч. сотр., e-mail: zare17@yandex.ru.

V.O. OSKIRKO, A.P. PAVLOV, V.A. SEMENOV, S.V. RABOTKIN, A.N. ZAKHAROV

MINIMIZATION OF THE ARC ENERGY IN HIPIMS

The high power density in HIPIMS increases the probability of arcs on the target surface and complicates the arc suppression problem, compared to the conventional direct current and mid-frequency magnetron sputtering. The output inductance stores a large amount of residual energy, which is transferred to the arc after turning off the control transistor and can cause the formation of microdroplets. In this work the HIPIMS power supplies are compared, in terms of the amount of energy transferred to the arc. It is shown that if the response time of a power source is less than 1 μ s, the arc energy consists almost entirely of the residual energy stored in the output inductance of the power supply and the cable. Depending on the parameters of the scheme and the setting of the protection system, the detection of the arc by voltage makes it possible to reduce the arc burning energy by 1.5–2 times, with respect to the detection of the arc by current. To reduce the arc energy to lower values, the residual energy must be reduced. It was demonstrated that the scheme with the topology of a single-ended forward bridge converter provides for the recovery of residual energy, which under certain experimental conditions allowed to reduce the arc energy fourfold from 175 to 42 mJ.

Keywords: magnetron sputtering, HIPIMS, HPPMS, power supply, arc.