

УДК 621.311.62

В.О. Оскирко, В.Д. Семенов, А.П. Павлов

Исследование формирователя биполярных импульсов для питания магнетронных распылительных систем

Описан алгоритм управления транзисторами формирователя ассиметричных биполярных импульсов повышенной частоты для питания магнетронных распылительных систем (МРС), обеспечивающий регулировку частоты и длительности импульсов и предотвращающий переход схемы в небезопасный режим работы. Экспериментально показано, что источник питания (ИП) на основе формирователя ассиметричных импульсов повышенной частоты (ФБИ) позволяет повысить стабильность и скорость процессов реактивного магнетронного напыления покрытий сложного химического состава.

Ключевые слова: реактивное магнетронное распыление, биполярный источник питания.

Необходимость получения тонких пленок сложного состава стимулировала разработку технологий магнетронного распыления в среде реакционных газов. Такой способ получения покрытия называется реакционным или реактивным магнетронным распылением (РМР).

Образование покрытия при реактивном распылении происходит в результате осаждения продуктов химической реакции между химически-активным газом и распыленными атомами материала мишени магнетрона. Устойчивость процесса распыления во многом зависит от проводящих свойств самого покрытия, так как поверхность мишени на границе зоны распыления и за её пределами также покрывается продуктами химической реакции. Если продукты химической реакции обладают плохой проводимостью или являются диэлектриком, то процесс распыления становится неустойчивым, снижается скорость распыления, увеличивается частота возникновения электрических пробоев.

Одним из способов решения проблем РМР является применение импульсных источников питания повышенной частоты для питания магнетронных распылительных систем (МРС) [1–3]. Так для питания МРС используются разнообразные униполярные и биполярные источники питания (ИП) с частотой следования импульсов от 10 до 350 кГц.

В работе [4, 5] была предложена схема источника питания на основе формирователя биполярных импульсов (ФБИ). Упрощенная схема ФБИ и МРС изображена на рис. 1. Формирователь имеет топологию однотактного прямоходового мостового преобразователя (ОПМП, в зарубежной литературе – double-ended forward converter, two-switch forward converter) [6]. Формирование выходных биполярных импульсов осуществляется с помощью магнитосвязанных дросселей. В работе [4] подробно рассмотрен принцип действия формирователя. Целью настоящей работы являются исследование режимов работы ФБИ, в зависимости от характера изменения тока в дросселе L_1 , создание алгоритма управления силовыми ключами, адаптированного под нелинейный характер МРС, а также исследование возможности предотвращения ФБИ дуговых пробоев, увеличения скорости осаждения покрытий и управления энергией горения дуги в процессах РМР.

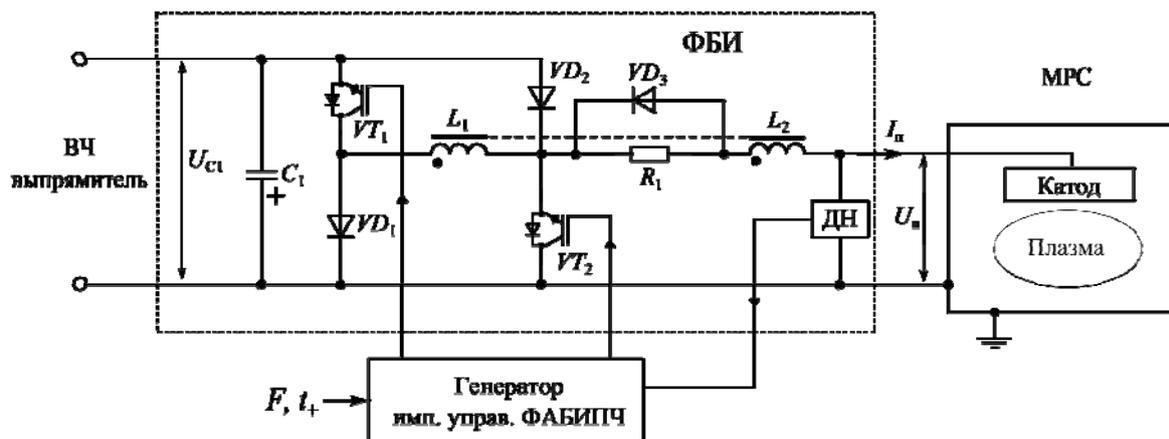


Рис. 1. Схема ФБИ

Режимы работы ФБИ. Алгоритм управления транзисторами. ФБИ работает в режиме непрерывного тока в дросселе L_1 . На рис. 2 приведены эпюры импульсов управления транзисторами, а также импульсов тока и напряжения на различных участках цепи ФБИ в установившемся режиме, когда результирующее приращение тока в L_1 равняется нулю.

При рассмотрении последовательности управления транзисторами ФБИ примем, что период формирования импульсов начинается в момент включения транзистора VT_2 . Транзистор VT_2 находится в открытом состоянии на интервале времени t_{VT2on} . Транзистор VT_1 включается спустя время задержки $t_{VT1delay}$ относительно начала периода. На интервале t_{VT1on} транзистор VT_1 находится в открытом состоянии. Выключение VT_1 происходит одновременно с VT_2 .

Период формирования выходных импульсов можно разделить на два основных интервала: положительный импульс t_+ и отрицательный импульс t_- . В свою очередь отрицательный импульс состоит из начального интервала t_{1-} и основного интервал t_{2-} . В процессе формирования выходных импульсов в дросселе L_1 протекает непрерывный ток. В течение периода величина тока в L_1 изменяется, как показано на эпюре (см. рис. 2).

В течение положительного импульса транзисторы VT_1 и VT_2 находятся в открытом состоянии, а к L_1 прикладывается напряжение накопительной емкости U_{C1} . В результате в L_1 увеличивается ток с постоянной скоростью:

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{U_{C1}}{L_1}. \quad (1)$$

На начальном интервале отрицательного импульса, после того, как транзисторы VT_1 и VT_2 выключаются, формирование выходного отрицательного импульса осуществляется за счет энергии, запасенной в L_1 . В течение заданного интервала ток в L_1 спадает. Скорость уменьшения тока зависит от сопротивления нагрузки.

Поскольку в течение положительного импульса происходит снижение концентрации плазмы в разрядном, в течение времени $t_{вп}$ происходит её восстановление. По мере восстановления концентрации растет проводимость нагрузки и увеличивается выходной ток формирователя. На выходе ФБИ формируется отрицательное напряжение увеличенной амплитуды, способствующее восстановлению плазмы:

$$U_{н-}^I = (1+k)U_{C1}. \quad (2)$$

Напряжение, формируемое дросселем L_1 , ограничивается на уровне U_{C1} , при этом, часть тока, разогнанного в дросселе, протекает через обратный диод VD_2 в накопительную емкость. Скорость спада тока во время восстановления концентрации плазмы может быть определена с помощью выражения (1).

После того, как выходной ток становится равным току дросселя L_1 , напряжение на выходе ФБИ спадает до $U_{н-}$. Тогда, скорость дальнейшего уменьшения тока в L_1 равняется:

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{U_{н-}}{L_1(k+1)}, \quad (3)$$

где $k = 0,3$ – отношение количества витков дросселя L_2 к количеству витков дросселя L_1 .

На рис. 2 показан частный случай, когда спад тока на интервале t_{1-} превышает его рост на интервале t_+ . Разница компенсируется в течение основного интервала отрицательного импульса t_{2-} , поскольку к дросселю L_1 прикладывается часть напряжения накопительной емкости C_1 . Наиболее предпочтительный режим работы ФБИ обеспечивается в том случае, когда изменения тока на интервалах t_+ и t_{1-} равны. В этом случае, на интервале t_{2-} к нагрузке прикладывается все напряжение накопительной емкости. Оба режима являются режимами нормальной работы ФБИ.

Если величина спада тока в L_1 на интервале t_+ превышает спад на интервале t_{1-} , схема переходит в режим неконтролируемого увеличения тока в дросселе, опасного для элементов ФБИ. Для предотвращения перехода в небезопасный режим необходимо выполнение следующего условия:

$$U_{L1,1} \leq U_{L1,2}t_{вп} + U_{L1,3}(t_{1-} - t_{вп}). \quad (4)$$

Введем дополнительный параметр d , устанавливающий зависимость между интервалами t_+ и t_{1-} ,

$$t_{1-} = t_+ + d. \quad (5)$$

Учитывая, что $U_{L1,3} \approx U_{C1}/(1+k)$, выражение (4) преобразуется

$$U_{C1}t_+ \leq U_{C1}t_{\text{вп}} + \frac{U_{C1}(t_+ + d - t_{\text{вп}})}{(1+k)}, \quad (6)$$

$$d \geq k(t_+ - t_{\text{вп}}). \quad (7)$$

Максимальная длительность положительного импульса достигает 10 мкс, а время восстановления плазмы при использовании ФБИ составляет приблизительно 3 мкс [4]. Следовательно, для предотвращения перехода схемы в режим неконтролируемого увеличения тока в дросселе параметр d должен быть не менее 2 мкс. Поскольку увеличение параметра d влечет за собой снижение выходного напряжения на основном интервале отрицательного импульса и увеличения напряжения $U_{L1,4}$, прикладываемого к дросселю во время основного интервала отрицательного импульса, следует принять параметр d , равным граничному значению (2 мкс). Стоит отметить, что условие (7) справедливо в тех случаях, когда время восстановления плазмы $t_{\text{вп}}$ меньше длительности начального интервала отрицательного импульса.

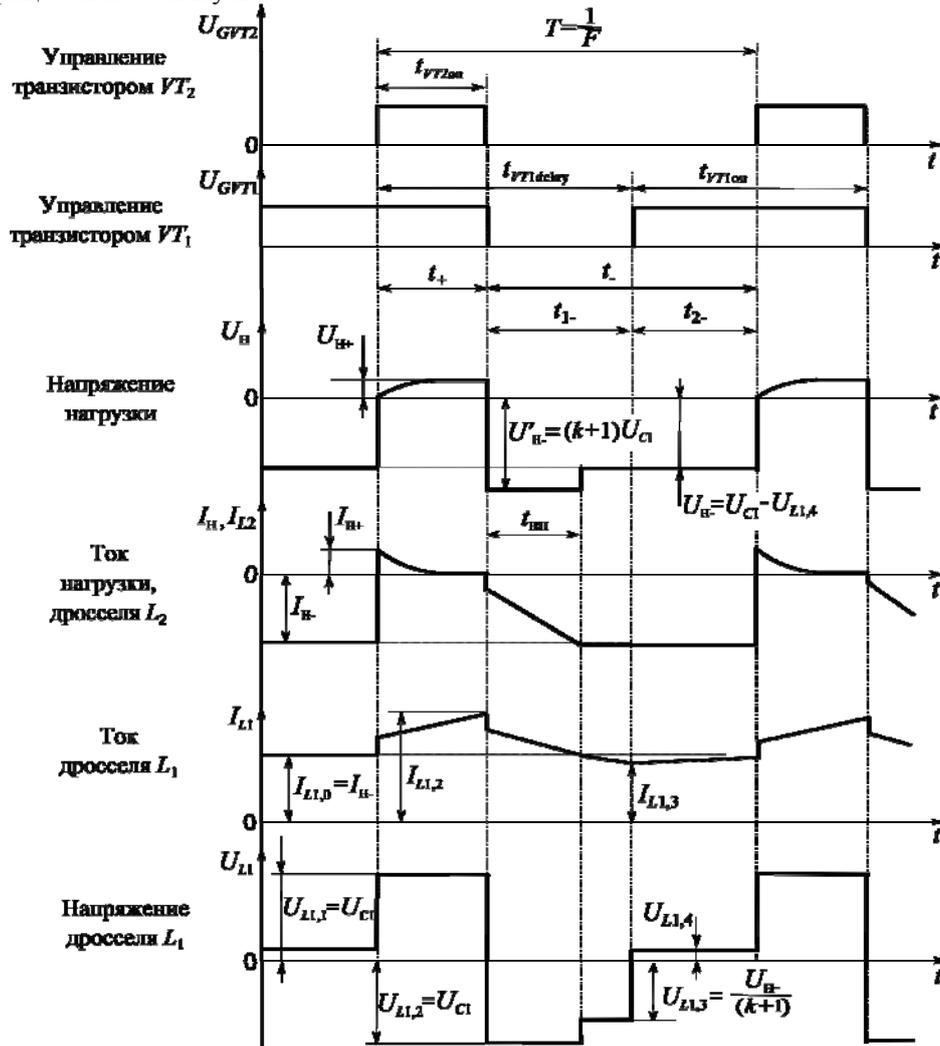


Рис. 2. Эюра импульсов управления транзисторами, тока и напряжения на выходе ФБИ и дросселе L_1

Далее приведены выражения, устанавливающие связь между интервалами периода формирования выходных импульсов (t_+ , t_1- , t_2-), сигналами управления силовыми транзисторами (t_{VT1on} , t_{VT2on} , $t_{VT1delay}$) и частотой формирования импульсов (F), согласно разработанному алгоритму управления. Длительность основного интервала отрицательного импульса:

$$t_{2-} = 1/F - t_1- - t_+ = 1/F - 2t_+ - d. \quad (8)$$

Длительность импульса управления транзистора VT_1 и задержка его включения, относительно момента включения транзистора VT_2 :

$$t_{VT1on} = t_+ + t_{2-} = 1/F - t_+ - d, \quad (9)$$

$$t_{VT1delay} = t_+ + t_1- = 2t_+ + d. \quad (10)$$

Длительность импульса управления транзистора VT_2 :

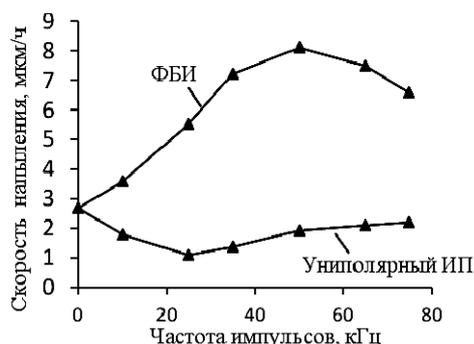
$$t_{VT2on} = t_+ \quad (11)$$

Разработанный алгоритм управления обеспечивает режим нормальной работы формирователя в диапазоне частоты формирования импульсов $F = 1 \div 75$ кГц и длительности положительных импульсов $t_+ = 3 \div 10$ мкс.

Исследование возможности предотвращения дуговых пробоев и увеличения скорости осаждения покрытий в процессах реактивного магнетронного распыления. Снижение скорости распыления в процессе РМР обусловлено образованием диэлектрической пленки на поверхности мишени магнетрона [7]. Дело в том, что образующееся химическое соединение обычно имеет значительно меньший коэффициент распыления, чем исходный материал [8]. Кроме того, накапливаемый на диэлектрике положительный заряд отталкивает ионы, бомбардирующие его поверхность, и снижает скорость распыления диэлектрических слоев. Применение биполярного импульсного питания, благодаря механизму перезарядки диэлектрических слоев, может позволить увеличить скорость распыления материала [3].

Исследование возможности увеличения скорости реактивного осаждения производилось на примере пленок YSZ (оксид циркония, стабилизированный иттрием). Кроме биполярного источника питания с ФБИ в экспериментах участвовал униполярный импульсный источник питания, описание которого приводится в работе [9].

Тонкие пленки YSZ электролита осаждались в реактивном режиме с использованием композитного $Zr_{0,86}Y_{0,14}$ катода диаметром 100 мм. Напыление производилось в атмосфере кислорода и аргона при рабочем давлении 0,2 Па. Расход аргона и кислорода поддерживались постоянными (6 и 3,6 л/ч). Напыление пленок производилось в режиме постоянного тока и в импульсном режиме на частоте до 75 кГц, длительность паузы и длительность положительного импульса была фиксированной (4 мкс). Напыление покрытий осуществлялось при постоянной выходной мощности 2 кВт в течение 10 мин. Толщина пленок измерялась с помощью атомно-силового микроскопа Solver P47.



На рис. 3 приведен график зависимости скорости осаждения покрытия от частоты формирования импульсов в униполярном и биполярном режимах питания. Под нулевой частотой на графике подразумевается режим постоянного тока.

Рис. 3 Зависимость скорости осаждения покрытия от частоты формирования импульсов питания

В режиме постоянного тока скорость осаждения покрытий составила 2,7 мкм/час. При использовании униполярного импульсного ИП скорость снижалась относительно режима постоянного тока. Минимальная скорость составила 1,1 мкм/час при частоте 35 кГц.

При использовании ФБИ обеспечивалась более высокая скорость осаждения покрытий, чем в режиме постоянного тока. При увеличении частоты биполярных импульсов до 50 кГц, скорость осаждения увеличилась в 3 раза до 8,1 мкм/час. Однако дальнейшее повышение частоты импульсов до 75 кГц привело к снижению скорости до 6,6 мкм/час. Уменьшение скорости напыления на высокой частоте обусловлено увеличением влияния времени восстановления плазмы на эффективность отрицательного импульса [10].

Рост скорости напыления в биполярном режиме свидетельствует об установлении режима «предпочтительного распыления» (preferential sputtering) [3]. Во время положительного импульса с поверхности диэлектрических слоев снимается накопленный положительный заряд, препятствующий травлению диэлектрика, и осуществляется перезарядка до отрицательного потенциала, равного амплитуде выходных положительных импульсов напряжения ФБИ. За счет отрицательного заряда, образовавшегося на поверхности слоя диэлектрика, к началу отрицательного импульса катод магнетрона бомбардируют ионы с большей энергией. В результате чего увеличивается скорость распыления диэлектрика. Наличие максимума скорости осаждения при частоте 50 кГц свидетельствует об установлении наиболее благоприятных условий в процессах перезарядки слоев диэлектрика.

Предотвращение дуговых пробоев в процессе реактивного магнетронного распыления. Причиной образования дуговых пробоев в процессе реактивного магнетронного распыления явля-

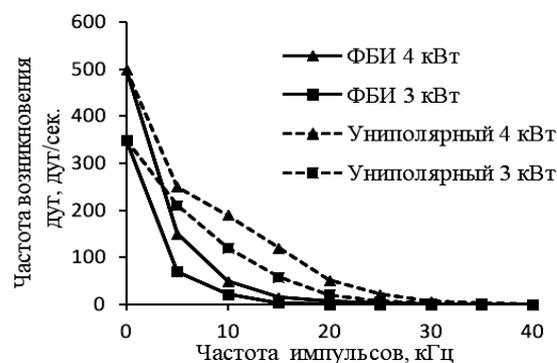
ется положительный заряд, накапливаемый на диэлектрике в процессе ионной бомбардировки поверхности мишени. Этот заряд создает сильное электрическое поле в диэлектрике. Когда напряженность поля в диэлектрике превышает пробивную напряженность, происходит микропробой слоя, перерастающий в дугу. Предотвращение образования микропробоев с помощью импульсных источников питания осуществляется при установлении равновесного состояния в процессах перезарядки диэлектрических слоев на поверхности мишени. То есть необходимо, чтобы заряд, накопленный в течение отрицательного импульса, успевал сниматься во время положительного импульса.

В работе [5] с помощью ФБИ удалось кардинально снизить частоту возникновения дуговых пробоев в процессе реактивного напыления YSZ пленок. В настоящей работе приведены результаты экспериментов по предотвращению дуговых пробоев в процессе напыления пленок SiO₂.

Пленки SiO₂ осаждались в реактивном режиме с использованием композитного Si_{0,95}Al_{0,05} катода размером 600×100×6 мм. Напыление производилось в атмосфере кислорода и аргона при рабочем давлении 0,2 Па. Расход аргона и кислорода поддерживался постоянным (10 и 2 л/ч). Напыление пленок производилось в режиме постоянного тока и в импульсном режиме на частоте от 5 до 75 кГц, длительность паузы униполярных импульсов и длительность положительного импульса была постоянной (4 мкс). Напыление покрытий осуществлялось при постоянной выходной мощности 3 и 4 кВт. Для подсчета количества дуг использовались счетчики, встроенные в ИП. Время подсчета дуговых пробоев изменялось от 1 мин до 1 ч.

На рис. 4 приведены зависимости частоты возникновения дуг от частоты формирования импульсов ФБИ и униполярного импульсного источника питания при мощности магнетронного разряда 3 и 4 кВт.

Рис. 4. Зависимость частоты возникновения дуг от частоты формирования биполярных и униполярных импульсов питания



Как показано на графике, повышение частоты биполярных импульсов приводит к более быстрому сокращению частоты образования дуг по сравнению с униполярным импульсным питанием, что указывает на более высокую скорость компенсации зарядов на поверхности диэлектриков. Увеличение мощности магнетронного разряда в обоих случаях приводит к росту частоты возникновения дуг, поскольку увеличивается плотность ионного тока на мишени, и напряженность поля в диэлектрике быстрее достигает пробивного значения. Средняя частота образования дуг в биполярном режиме в 4 раз ниже, чем в униполярном режиме. При максимальной частоте формирования биполярных импульсов ФБИ (75 кГц) и средней мощности магнетронного разряда 4 кВт частота возникновения дуг снизилась до 0,015 дуг/сек., что в 3×10^4 раз меньше, чем в режиме постоянного тока.

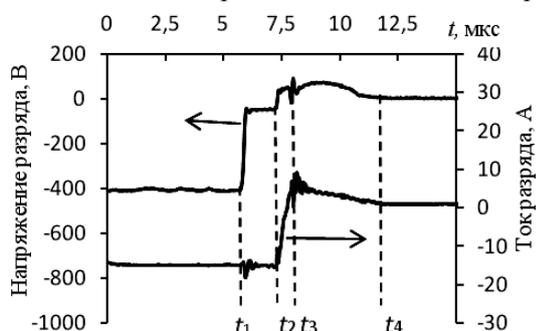
Управление энергией горения дуги. Использование ФБИ не может гарантировать исключение случайных дуг в процессе РМР. Образование дуговых пробоев отрицательно сказывается не только на стабильности процесса распыления, но и на качестве напыляемого покрытия. Во время горения дуги происходит выброс из горящего катодного пятна материала мишени в виде микрочастиц или микрокапель. Они оседают на подложке и образуют дефекты в растущей пленке [11, 12]. Образование микрокапель недопустимо для получения бездефектных покрытий.

Для предотвращения образования микрокапель необходимо ограничивать энергию горения дуги, которая зависит от времени существования и тока дугового разряда. Возникший дуговой разряд существует, пока его поддерживает ИП, поэтому качество напыляемого покрытия напрямую зависит от скорости реакции ИП. Для быстрого обнаружения и подавления дуг в генераторе импульсов управления ФБИ реализована система дугоподавления (СДП), детектирующая возникновение дуги по падению напряжения.

При работе с некоторыми материалами возникает необходимость увеличения энергии, передаваемой в дугу. Объясняется это тем, что дополнительная энергия, передаваемая в дугу, позволяет очистить поверхность мишени от островков диэлектрика, которые являются причиной часто образующихся микропробоев. Возможность регулирования энергии горения дуги позволяет устанавливать оптимальное значение для конкретного распыляемого материала и реактивного газа. Энергия, передаваемая ФБИ в дуговой разряд, определяется временем задержки реакции СДП после обнару-

жения дугового пробоя. Таким образом, энергией горения дуги можно управлять путем изменения времени задержки реакции СДП.

Эксперименты по определению минимального значения и диапазона регулирования энергии, передаваемой ФБИ в дуговой разряд, проводились при реактивном напылении SiO_2 в режиме постоянного тока. Средняя мощность магнетронного разряда составляла 6 кВт. Длительность задержки реакции системы дугоподавления регулировалась в диапазоне от 0 до 50 мкс.



ки реакции системы дугоподавления регулировалась в диапазоне от 0 до 50 мкс.

На рис. 5 приведена осциллограмма выходного тока и напряжения ФБИ в случае возникновения дуги, при минимальной задержке реакции СДП (0 мкс).

Рис. 5. Осциллограмма выходного тока и напряжения ФБИ в случае возникновения дуги, при минимальной задержке реакции СДП

В момент времени t_1 (см. рис. 5) возникает дуговой пробой, который детектируется по падению напряжения с помощью датчика напряжения (ДН), расположенного на выходе формирователя (см. рис. 1). Время реакции СДП и ФБИ на дуговой пробой составляет приблизительно 1,5 мкс. В момент времени t_2 замыкаются транзисторы VT_2 и VT_1 (см. рис. 1). В результате с выхода ФБИ снимается отрицательное напряжение и начинается формирование положительного импульса, способствующего быстрому подавлению дугового разряда. Скорость изменения выходного тока на интервале t_2 – t_3 определяется индуктивностью кабелей, соединяющих ФБИ с МРС. К моменту времени t_3 выходной ток меняет полярность, и дуговой разряд гаснет. Далее, в течение интервала времени t_3 – t_4 протекает положительный электронный ток, после чего транзистор VT_1 закрывается и формируется

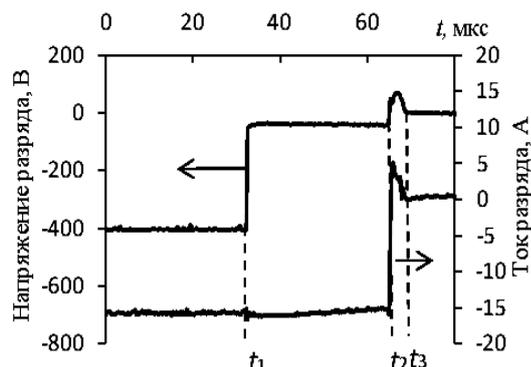


Рис. 6. Осциллограмма выходного тока и напряжения ФБИ в случае возникновения дуги, при задержке реакции СДП 50 мкс

длительная пауза, необходимая для остывания катодного пятна. Таким образом, минимальное время горения дуги составляет приблизительно 2 мкс. Энергия, передаваемая ФБИ в дуговой разряд, составляет приблизительно 1,2 мДж.

После обнаружения дугового пробоя в момент времени t_1 СДП размыкает транзистор VT_1 . За счет энергии, накопленной в L_1 , на выходе ФБИ продолжает протекать отрицательный ток. Скорость уменьшения тока зависит от напряжения горения дуги и падения напряжения на диодах VD_1 и VD_3 . В момент времени t_2 замыкаются транзисторы VT_1 и VT_2 , а на выходе ФБИ формируется положительный импульс, подавляющий дуговой разряд. Энергия горения дугового разряда в этом случае достигает 30 мДж. При изменении длительности задержки реакции СДП ФБИ от 0 до 50 мкс с шагом 1 мкс, энергия дугового разряда изменяется практически линейно от 1,2 до 30 мДж. Таким образом, СДП обеспечивает широкий диапазон и высокую точность регулирования энергии, передаваемой ИП в дуговой разряд.

Заключение. Предложенный в работе алгоритм управления транзисторами ФБИ предотвращает переход ФБИ из режима нормальной работы в режим неконтролируемого увеличения тока в дросселе и позволяет регулировать частоту и длительность биполярных импульсов.

Показано, что импульсное биполярное питание ФБИ позволяет увеличить скорость осаждения покрытий и снизить частоту возникновения дуг в процессе РМР, относительно униполярного импульсного питания и питания постоянного тока.

Путем регулирования задержки реакции системы дугоподавления ФБИ можно управлять энергией горения дуги, обеспечивая оптимальную величину для конкретного распыляемого материала и реактивного газа.

Литература

1. Kelly P., Arnell R. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications // P. Kelly, R. Arnell. – Vacuum. – Pergamon Press Ltd. – 2000. – 56(3). – P. 159–172.
2. Scholl R.A. Power systems for reactive sputtering of insulating films / Surf Coatings Technol. – Lausanne: Elsevier Science SA. – 1997. – 93(1). – P. 7–13.
3. Sellers J. Asymmetric bipolar pulsed DC: the enabling technology for reactive PVD / Surf Coatings Technol. – Lausanne: Elsevier Science SA. – 1998. – № 98(1–3). – P. 1245–1250.
4. Оскирко В.О. Модульный биполярный источник питания для мощных ионно-плазменных установок / В.О. Оскирко, Н.С. Сочугов, А.П. Павлов // ПТЭ. – М.: МАИК. – 2014. – № 5. – 85 с.
5. Oskirko V.O. Bipolar power supply for reactive magnetron sputtering / V.O. Oskirko, A.A. Soloviev, A.P. Pavlov, I.V. Ionov, N.S. Sochugov. – 12-th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk, Russia, September 21–26, 2014. – 229 p.
6. Петров С. Однотактный прямоходовый мостовой конвертер: области применения и развития схемотехники // Силовая электроника. – СПб.: Лань. – 2009. – №5. – 74 с.
7. Takamura K. Influence of oxygen flow ratio on the oxidation of Ti target and the formation process of TiO₂ films by reactive sputtering / K. Takamura, Y. Abe, K. Sasaki // Vacuum. – Pergamon Press Ltd. 2004. – № 74(3–4). – P. 397–401.
8. Depla D. Discharge voltage measurements during reactive sputtering of oxides / D. Depla, J. Haemers, R. De Gryse // Thin Solid Films. – Lausanne: Elsevier Science SA. – 2006. – № 515(2). – P. 468–471.
9. Сочугов Н.С. Источник питания для магнетронных распылительных систем / Н.С. Сочугов В.О. Оскирко, Р.Е. Спиринов // ПТЭ. – М.: МАИК. – 2013. – № 2. С. 62–68.
10. Musil J. Pulsed dc magnetron discharge for high-rate sputtering of thin films // J. Vac. Sci. Technol. – AVS Amer Inst Physics. – 2000. – Vol. 19, №2. – P. 420–424.
11. PVD-Al₂O₃-coated cemented carbide cutting tools / M. Astrand, T.I. Selinder., F. Fietzke F., H. Klostermann // Surf Coatings Technol. – Lausanne: Elsevier Science SA. – 2004. – № 188–189(1–3). – P. 186–192.
12. A comparison of the characteristics of planar and cylindrical magnetrons operating in pulsed DC and AC modes / P.J. Kelly, G West, Y.N. Kok, J.W. Bradley, I Swindells, G.C.B Clarke // Surf Coatings Technol. – Lausanne: Elsevier Science SA. – 2007. – № 202(4–7). – P. 952–956.

Оскирко Владимир Олегович

Аспирант каф. промышленной электроники ТУСУРа,
инженер ЛПЭ ИСЭ СО РАН, тех. дир. ООО «Прикладная электроника»
Тел.: +7-923-422-11-00
Эл. почта: oskirkovo@gmail.com

Семенов Валерий Дмитриевич

Канд. техн. наук, профессор, зам. зав. каф. промышленной электроники по научной работе
Тел.: +7-913-821-22-92
Эл. почта: svd@ie.tusur.ru

Павлов Артем Павлович

Ст. преподаватель каф. радиоэлектроники и защиты информации
Инженер ИПЭ ИСЭ СО РАН, дир. ООО «Прикладная электроника»
Тел.: +7-923-409-69-46
Эл. почта: APELTom@yandex.ru

Oskirko V.O., Semenov V.D., Pavlov A.P.

The bipolar asymmetric pulse former for magnetron sputtering systems

The control algorithm for transistors of the bipolar asymmetric high frequency pulse former for magnetron sputtering systems is described. It allows to control frequency and pulse duration and prevent scheme operation in an unsafe mode. Experimentally shown that the use of a power supply based on the bipolar asymmetric pulse former increases film deposition rate and improves stability of reactive magnetron sputtering process.

Keywords: Reactive magnetron sputtering, bipolar power supply.