

(Институт ядерной физики, Алматы, Республика Казахстан)

УЛЬТРАТОНКАЯ ФОЛЬГА ИЗ БЕРИЛЛИЯ

Аннотация

Описаны условия формирования ультратонкой бериллиевой фольги магнетронным осаждением бериллия на подложку из стали, которую затем растворяют, оставляя свободную фольгу. Прочность и газопроницаемость такой фольги сильно зависят от стабильности разряда в магнетронном распылителе. Поэтому разработан источник питания с возможностью надежного ограничения тока магнетрона в случае, когда нарушается стабильность разряда.

Источник питания магнетрона изготовлен по схеме тиристорного широтно-импульсного регулятора мощности. Формирователь импульсов управления содержит детектор нуля сети с накопительным конденсатором и пороговым элементом. Выпрямитель для питания нагрузки непосредственно от сети выполнен по схеме удвоения напряжения. К выпрямителю добавлена секция утроения напряжения, которая дополнительно стабилизирует разряд в магнетроне.

Разработанный бестрансформаторный источник питания показал свою эффективность при формировании однородных тонкопленочных материалов и позволил изготовить прочные и герметичные бериллиевые окна толщиной от 8 до 12 мкм и диаметром от 5 до 7 мм для мягкого рентгеновского излучения.

Ключевые слова: бериллиевое окно, газопроницаемость, прочность, магнетронный распылитель, регулятор мощности, ограничитель тока.

Кілт сөздер: бериллийлік терезе, газөткізгіштілік, беріктік, магнетронды тозаңдатқыш, қуатты реттегіш, ток шектегіш.

Keywords: beryllium window, gas permeability, strength, magnetron sputtering gun, power regulator, current limiter.

Бериллиевую фольгу толщиной до 50 мкм получают методами пластической обработки металлов, которые при дальнейшем уменьшении толщины фольги оказываются неэффективными [1]. Представляет интерес формирование ультратонкой бериллиевой фольги ионно-плазменным методом посредством увеличения толщины осаждаемого тонкопленочного покрытия из бериллия. Предпочтительным является

использование метода магнетронного осаждения, который обеспечивает высокую производительность, поддерживает в покрытиях высокую химическую чистоту распыляемого материала, а также удобен в управлении параметрами процесса [2].

Уменьшение толщины бериллиевой фольги повышает требования к устойчивости и равно-мерности процесса распыления бериллия в плазме низкого давления. Установлено, что срыв в дугу разряда в магнетроне повреждает не только поверхность мишени, но также нарушает однородность фольги, приводит к появлению на ней локальных микроповреждений структуры, которые уменьшают прочность фольги и увеличивают ее газопроницаемость. Очевидно, что для получения ультратонкой фольги из хрупкого металла, каким является бериллий, необходимо максимально ограничить ток разряда в магнетроне в случае его перехода в дуговой разряд. Такую возможность предоставляет бестрансформаторное питание магнетронного распылителя постоянного тока (МР) от сети переменного тока [3], в котором, однако, необходимо повысить устойчивость формирования импульсов управления, а также усилить функцию ограничения тока в нагрузке. Для этой цели разработан специальный источник питания МР.

Источник питания МР изготовлен по бестрансформаторной схеме тиристорного широтно-импульсного регулятора мощности, включенного в сеть переменного тока напряжением 220 В. Формирователь импульсов управления оптосимистором содержит детектор нуля сети с накопительным конденсатором и пороговым элементом, который открывает ключ, пропускающий импульсы управления на оптосимистор. Выпрямитель для питания МР непосредственно от сети выполнен по схеме удвоения напряжения, к которой добавлены элементы по схеме утроения напряжения. Дополнительная секция поддерживает слабый ток повышенного напряжения для устойчивости разряда в МР в момент его включения, а также при пониженном давлении газа в вакуумной камере. Источник питания МР при возможности резкого нарастания тока ограничивает его среднюю величину и создает токовую паузу, которая защищает формируемую фольгу от повреждений.

Схема источника питания МР приведена на рисунке 1. Формирователь импульсов управления оптосимистором выполнен на транзисторах T_1 , T_2 , пороговом элементе M_1 и питается от понижающего (до 12 В $\times 2$) сетевого трансформатора Tp . Наличие средней точки во вторичной обмотке трансформатора Tp позволяет выделить импульсы сети частотой 100 Гц для синхронизации частоты напряжения, которое генерирует детектор нуля сети, выполненный на транзисторе T_1 . Накопительный конденсатор C_3 детектора нуля сети заряжается стабилизированным стабилитроном D_0 напряжением и разряжается через транзистор T_1 в моменты его открывания.

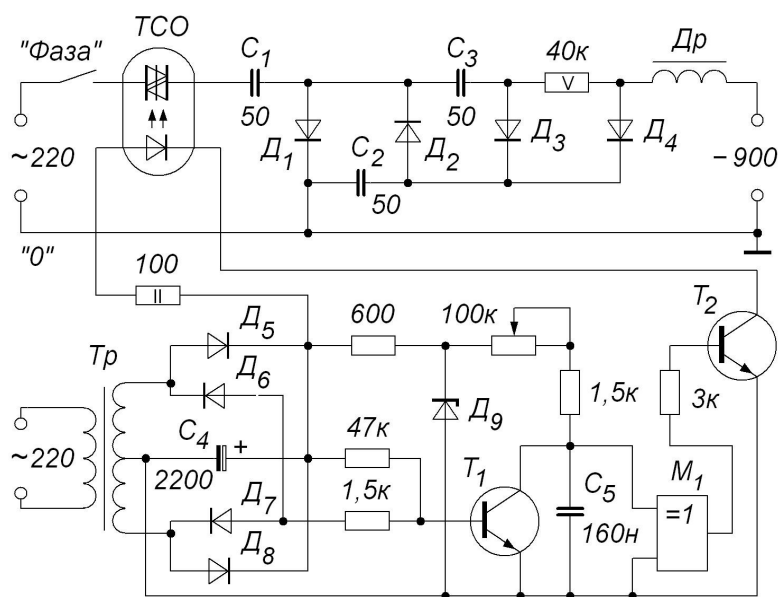


Рисунок 1 – Принципиальная схема источника питания МР.

$ТСО$ – ТСО142-40-12; $D_1 \div D_4$ – КД202Д; $D_5 \div D_8$ – КД226; D_9 – Д814Г; T_1 – КТ315Б; T_2 – КТ815;

M_1 – К561ЛП2; $C_1 \div C_3$ – К75-17 -1000 В; Tr – 12 В \times 2; Dr – 1 УБИ-40/220-В

Отрицательные импульсы сети частотой 100 Гц через делитель поступают на базу транзистора T_1 и закрывают его, при этом конденсатор C_5 заряжается. При переходе сетевого напряжения через нуль транзистор T_1 открывается на короткое время. Через открытый транзистор T_1 конденсатор C_5 быстро разряжается. Нарастание величины отрицательного импульса сети закрывает транзистор T_1 и конденсатор C_5 заряжается.

При увеличении напряжения на конденсаторе C_5 до величины переключения (≈ 6 В) срабатывает пороговый элемент M_1 , в качестве которого использован логический элемент «исключающее ИЛИ». Сигнал с выхода M_1 поступает на базу транзистора T_2 , который открывается и пропускает импульс, отпирающий оптосимистор $ТСО$. В момент перехода сетевого напряжения через нуль $ТСО$ закрывается. Время зарядки конденсатора C_5 стабилизированным напряжением задает длительность импульсов управления оптосимистором и среднее значение тока в нагрузке. Переменным резистором регулируют величину времени зарядки C_5 и момент отпирания оптосимистора.

Оптосимистор $ТСО$ включен непосредственно в сеть переменного тока напряжением 220 В с заземленной нейтралью. Напряжение с него подано на выпрямитель, выполненный по схеме удвоения напряжения на диодах D_1 и D_2 . Конденсаторы C_1 и C_2 являются промежуточными накопителями энергии соответственно в положительном и отрицательном полупериодах напряжения сети, а также ограничителями тока, потребляемого из сети. Пульсации тока в нагрузке дополнительно ограничивает дроссель Dr , в качестве которого использован дроссель пускорегулирующего аппарата от сетевой газоразрядной лампы. К схеме удвоения через разделительный диод D_4 добавлена секция

выпрямителя D_3-C_3 , которая удерживает сетевое напряжение. Добавочное напряжение этой секции с балластным резистором поддерживает слабый ток повышенного напряжения в МР, который обеспечивает устойчивость разряда, но практически не увеличивает мощность разряда в МР.

Наиболее важным достоинством источника питания является его способность ограничивать среднее значение тока в нагрузке и подавлять дуговой разряд в магнетроне. Ток дуги при ограниченной мощности, потребляемой из сети, быстро разряжает накопительные конденсаторы C_1 и C_2 до напряжения, которое ниже напряжения разряда в МР. Заряд конденсаторов C_1 и C_2 происходит в течение следующего периода переменного напряжения сети, образующаяся при этом токовая пауза длительностью не менее 20 мс надежно гасит дугу. Ограничение среднего значения тока дугового разряда в МР совместно с токовой паузой при заряде накопительных конденсаторов не допускают снижения качества формируемой фольги ограниченными по мощности и кратковременными дуговыми разрядами в МР.

Разработанный источник питания МР по бестрансформаторной схеме является самостоятельным устройством, несложен в изготовлении, удобен в эксплуатации. Он позволил надежно ограничить ток, установленный в МР, и защитить формируемую фольгу от повреждений дуговыми разрядами. Это существенно повысило однородность и прочность тонкопленочных материалов и дало возможность изготовить герметичные ультратонкие бериллиевые окна для детекторов мягкого рентгеновского излучения.

Бериллиевые окна толщиной 8, 10 и 12 мкм для мягкого рентгеновского излучения были изготовлены в два этапа. На первом этапе получили бериллиевые покрытия соответствующей толщины, осажденные магнетронным способом на полированные подложки из стали ст.3. У этого материала и у бериллия близкие коэффициенты термического расширения в интервале температуры от 20 до 200°C. В этом интервале изменяется температура подложки в процессе осаждения на нее бериллия, поэтому термические напряжения в бериллиевой фольге сведены к минимуму. На втором этапе подложку полностью растворяют в азотной кислоте, а свободную бериллиевую фольгу промывают в дистиллированной воде и обсушивают.

Для испытания фольги на герметичность были изготовлены 3 образца бериллиевой фольги толщиной 8, 10 и 12 мкм для рентгеновских окон с диаметрами соответственно 5, 6 и 7 мм. Толщина фольги определена тремя методиками: из взвешивания образца, с использованием микрометрического индикатора 2 МИГ с ценой деления 2 мкм, а также по измерению поперечного сечения сломанной фольги на его изображении, которое получено на электронном микроскопе. Образцы фольги закрепили клеем в специально изготовленных держателях, как показано на рисунке 2. В основании держателей фольг предварительно были проточки с диаметрами, соответствующими диаметрам окон. При откачивании воздуха из-под фольги к ней

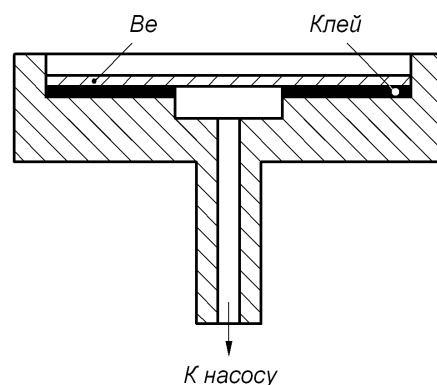


Рисунок 2 – Схема закрепления ультратонкой

прикладывалась внешняя нагрузка от перепада давления воздуха на фольгу с двух сторон.

бериллиевой фольги
на держателе

Было установлено, что при быстром нарастании перепада атмосферного давления со скоростью 0,3 Па/с ультратонкая бериллиевая фольга разрушается под воздействием резкого смещения фольги от начального броска давления. Медленное нарастание атмосферного давления на фольгу со скоростью 3 мПа/с все образцы фольги выдержали без разрушения. Закрытый фольгой вакуумный объем был откачан до остаточного давления 0,1 мПа и проверен на газопроницаемость с использованием гелиевого течеискателя ТИ1-14. Проверка показала отсутствие натекания и высокую герметичность рентгеновских окон из ультратонкой фольги.

Разработанный источник питания по безтрансформаторной схеме на примере изготовления ультратонкой бериллиевой фольги показал свою эффективность при формировании однородных тонкопленочных материалов. С его использованием приготовлены образцы бериллиевой фольги толщиной от 8 мкм до 12 мкм. Достигнутая прочность и герметичность бериллиевой фольги позволяет использовать ее в качестве окон диаметром от 5 до 7 мм для мягкого рентгеновского излучения. Все окна из ультратонкой бериллиевой фольги выдерживают нагрузку атмосферным давлением при медленном откачивании вакуумного объема.

ЛИТЕРАТУРА

1 Тихинский, Г.Ф. Волокита Г.И. Фольги из бериллия для приборов и физических экспериментов // ПТЭ. – 1994. – № 5. – С. 191-195.

2 Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 328 с.

3 Кузьмичёв А.И. Бестрансформаторное и импульсно-модулированное питание магнетронных распылителей от сети переменного тока // ПТЭ. – 1997. – № 6. – С. 121-124.

REFERENCES

- 1 Tihinskij, G.F. Volokita G.I. *Pribory i tehnika jeksperimenta*, **1994**, 5, 191-195 (in Russ.).
- 2 Danilin B.S. *Primenenie nizkotemperaturnoj plazmy dlja nanesenija tonkih plenok*. M, Jenergoatomizdat, **1989**, 328 p. (in Russ.).
- 3 Kuz'michjov A.I. *Pribory i tehnika jeksperimenta*, **1997**, 6, 121-124 (in Russ.).

Резюме

В. Н. Лисицын, Ю. Ж. Тулеушев, А. Б. Асанов

(Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан Республикасы)

БЕРИЛЛИЙДЕН ЖАСАЛҒАН УЛЬТРАЖҰҚА ФОЛЬГА

Болаттан жасалған төсеніште бериллийді магнетрондық тұндырумен ультراجұқа бериллийлік фольганың қалыптасу шарты сипатталды, оны еркін фольганы қалдыра отырып, сонан соң ерітеді. Мұндай фольганың беріктігі және газөткізгіштілігі магнетрондық тозаңдатқыштағы разрядтың тұрақтылығынан өте тәуелді болады. Сондықтан разрядтың тұрақтылығы бұзылған жағдайда магнетронның тогын сенімді шектеу мүмкіндігі бар қоректендіру көзі жасалды.

Магнетронның қоректендіру көзі қуатты тиристорлық енді-импульстік реттегіш сұлбасы бойынша жа-салған. Басқару импульстерін құрастырғышында жинақтағыш конденсаторы және табалдырықтық элементі бар желінің нөл детекторы болады. Тікелей желіден жүктемені қоректенуге арналған түзеткіш кернеуді екі еселеу сұлбасы бойынша орындалған. Түзеткішке кернеуді үш еселеу секциясы қосылған, ол магнетронда қосымша разрядты тұрақтандырады.

Трансформаторсыз жасалған қоректендіру көзі біртекті жұқапленкалы материалдарды қалыптастыруда өзінің тиімділігін көрсетті және қалыңдығы 8-бен 12 мкм аралығындағы және мм диаметрі 5-пен 7 мм аралығындағы берік және герметикалық бериллийлік рентген терезелерін даярлауға мүмкіндік берді.

Кілт сөздер: бериллийлік терезе, газөткізгіштілік, беріктік, магнетронды тозаңдатқыш, қуатты реттегіш, ток шектегіш.

Summary

V. N. Lisitsyn, Yu. Zh. Tuleushev, A. B. Asanov

(Institute of Nuclear Physics, Almaty, Republic of Kazakhstan)

ULTRATHIN BERYLLIUM FOIL

The conditions are described for formation of ultra-thin beryllium foil by magnetron beryllium deposition on a steel substrate, which is further dissolved, leaving a loose foil. Strength and gas permeability of this foil strongly depend on stability of the discharge in the magnetron sputtering gun. Therefore, the power supply unit is designed to provide reliable magnetron current limitation in case of disturbance of discharge stability.

The power unit of the magnetron is designed according to the scheme of thyristor PWM power regulator. The control pulse shaper contains the network null detector with the reservoir capacity and the threshold element. The rectifier of load power supply directly from the network is configured according to voltage doubling circuit. The section of voltage tripling is added to the rectifier, which additionally stabilizes the discharge in the magnetron.

The designed no-transformer power supply unit has shown its effectiveness in formation of homogeneous thin film material and allowed us to produce strong and hermetic beryllium X-ray windows 8-12 mkm thick and 5-7 mm in diameter.

Keywords: beryllium window, gas permeability, strength, magnetron sputtering gun, power regulator, current limiter.

Поступила 07.07.2013 г.