

А. Н. ПОТЫЛКИН, С. М. ЗАВАДСКИЙ

**ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ИСТОЧНИКА
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЁМКОСТНОГО РАЗРЯДА
С НАЛОЖЕНИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ДЛЯ ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ И ПОЛИРОВКИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ
ДИАМЕТРОМ ДО 300 ММ**

Для создания высокоэффективной системы ионно-плазменной полировки исполнительных поверхностей прецизионных оптических деталей использован высокочастотный емкостной разряд с наложением магнитного поля. Для разработки такой системы проведены исследования в области моделирования источника плазмы высокочастотного емкостного разряда с магнитным полем.

Для ионно-плазменной обработки поверхности твердых тел применяется ряд систем. Наиболее простой конструкцией обладают диодные системы ионно-плазменного травления, основанные на емкостном разряде [1]. Однако такие системы обладают рядом недостатков: высокие рабочие давления, низкую плотность плазмы, высокие рабочие напряжения и низкий ток разряда. Кроме того в процессе ионного травления происходит изменение элементного состава и структуры поверхности твердого тела [2]. Особенно этот эффект проявляется при увеличении диаметра подложки до 200–300 мм. Все эти факторы резко ограничивают использование диодных систем для формообразования ионной полировки элементов оптических деталей.

Снижение рабочего давления и уменьшение рабочего напряжения ионно-плазменного устройства может быть достигнуто за счет увеличения плотности плазмы. Увеличение концентрации заряженных частиц приводит к увеличению проводимости разряда и плотности ионного тока. Наиболее эффективным методом, позволяющим увеличить степень ионизации рабочего газа, является использование магнитного поля. На основе предыдущих исследований [3] было установлено, что разряд в скрещенных $E \times H$ полях является эффективным источником заряженных частиц и может существовать при давлениях до 10^{-2} Па. При наложении арочного магнитного поля вследствие различной подвижности электронов вдоль и поперек магнитного поля наблюдается фокусировка электронов в магнитном поле и формирование так называемой магнитной ловушки. При этом плазма локализуется у распыляемой поверхности, имеет форму, близкую к тороидальной. Магнитное поле существенно увеличивает путь электронов от катода к аноду и препятствует уходу электронов на анод и другие части системы с положительным потенциалом, что повышает число ионизирующих столкновений электронов с атомами газа. Электроны могут перемещаться в ловушке в сторону анода только благодаря столкновениям с молекулами газа. При достаточном запасе энергии каждый электрон может сгенерировать несколько новых электрон-ионных пар, что обеспечивает поддержание высокоплотной плазмы даже при низком давлении.

С целью оценки возможности создания системы ионной полировки поверхности оптических деталей диаметром до 300 мм и толщиной до 25 мм проведены расчеты распределения магнитного поля и границы плазмы магнитной системы источника высокочастотного емкостного разряда с наложением магнитного поля. Ранее было установлено, что для DC магнетронных распылительных систем верхняя и боковые границы плазмы ограничены величиной горизонтальной составляющей индукции магнитного поля от 0,02 Тл и более [4]. Информации о проведении подобных исследований для ВЧ магнетронных распылительных систем в научной литературе не обнаружено, поэтому для верхней границы ловушки Z_0 было выбрано условие минимального значения вектора горизонтальной составляющей индукции магнитного поля $B_y > 0,02$ Тл.

На рисунке 1 представлена модель для расчета границы плазмы магнитной системы источника высокочастотного емкостного разряда с наложением магнитного поля.

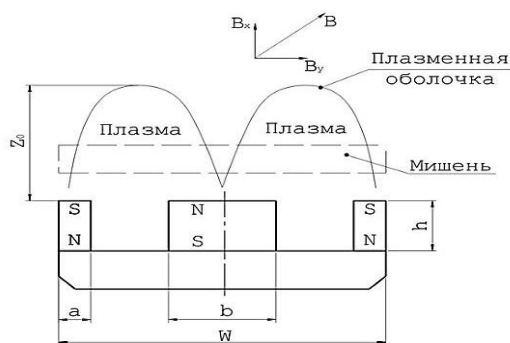


Рисунок 1 – Модель для расчёта границы плазмы магнитной системы источника высокочастотного ёмкостного разряда с наложением магнитного поля

Для данной конфигурации проведено моделирование границы плазмы протяженного участка магнитной системы при различной высоте и ширине магнитов. Материал магнитов Nd-Fe-B. Высота магнитов h изменялась от 10 до 30 мм (см. рисунок 1). Общая ширина магнитной системы W изменялась от 80 до 140 мм. При этом мы пытались формировать сбалансированную конфигурацию магнитного поля за счет увеличения ширины магнитов (a , b). Максимальная граница плазмы при постоянной высоте магнитов $h = 10$ мм была достигнута на ширине магнитной системы $W = 140$ мм и увеличилась до 62 мм (рисунок 2).

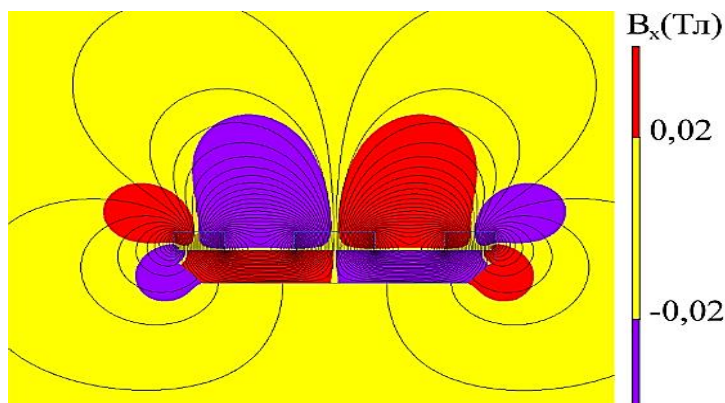


Рисунок 2 – Распределение магнитных полей магнитной системы $W = 140$ мм, $h = 10$ мм ($Z_0 = 62.0$ мм)

Также проведено моделирование границы плазмы при увеличении высоты магнитов. Расчеты показали, что увеличение высоты магнитов до 20 мм дает значительное увеличение протяженности плазмы, но дальнейшее увеличение толщины магнитов практически не увеличивало магнитное поле. При увеличении h до 30 мм Z_0 увеличилось только до 46,3 мм. При широкой магнитной системе $W = 140$ мм и $h = 20$ мм протяженность границы плазмы Z_0 удалось увеличить до 72 мм. На основе анализа полученных результатов моделирования сделаны следующие выводы: с разбросом параметров магнитов можно обеспечить протяженность границы плазмы примерно до 65 мм; с учетом стенок камеры, водоохлаждаемого фланца и границы плазмы толщина подложки не может превышать 35 мм.

Проведены расчеты магнитной системы с учетом закругленных участков. При расчетах использовались следующие исходные данные: высота магнитов $h = 25$ мм, радиус закругленного участка $R_{ms} = 70$ мм. Ширина центрального и бокового магнитов подбиралась из условия получения сбалансированной конфигурации магнитного поля при максимальной протяженности магнитной ловушки Z_0 . Было установлено, что на закругленных участках, по сравнению с прямолинейными участками магнитной системы, для получения сбалансированной конфигурации магнитного поля необходимо уменьшать ширину бокового магнита (a) и увеличивать диаметр центрального магнита (D_i). При ширине бокового магнита более 18 мм практически невозможно добиться сбалансированной конфигурации магнитного поля даже при больших диаметрах центрального магнита. Также при увеличении диаметра центрального магнита магнитное поле между центральным и боковыми магнитами все больше замыкается непосредственно между магнитами, что уменьшает высоту магнитной ловушки. Поэтому ширина бокового магнита была уменьшена до 15 мм. При увеличении радиуса центрального магнита конфигурация магнитного поля изменяется от несбалансированной II-го типа к сбалансированной. При этом происходит увеличение Z_0 (рисунок 3). При $D_i > 40$ мм конфигурация магнитной ловушки становится практически сбалансированной. В качестве оптимальной была выбрана конфигурация: $a = 15$ мм, $D_i = 45$ мм, $h = 25$ мм.

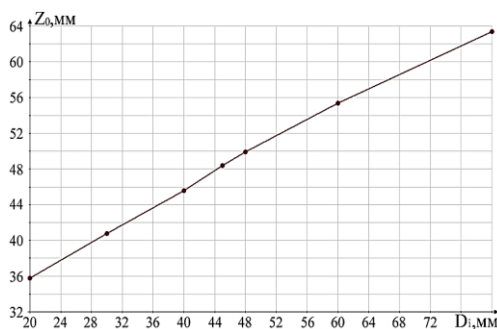


Рисунок 3 – Зависимость Z_0 от диаметра центрального магнита (на закругленном участке боковой магнит шириной $a = 15$ мм)

При данных размерах граница магнитной ловушки находится на расстоянии 48,4 мм от поверхности мишени. Увеличение ширины бокового магнита до 18 мм позволило увеличить Z_0 только до 50 мм (увеличение по сравнению с $a = 15$ мм только 1,5 мм). Это намного меньше, чем полученное ранее значение для прямолинейных участков, где Z_0 достигало 65–70 мм. Поэтому, если использовать ранее рассчитанные значения размеров магнитной системы для прямолинейного участка, где $a = 28$ мм, $b = 30$ мм $h = 20$ мм ($Z_0 > 70$ мм), происходит большое искажение магнитной ловушки при переходе от прямолинейного участка к закругленному.

Для уменьшения искажения магнитной ловушки при переходе от прямолинейного участка к закругленному было уменьшено магнитное поле на протяженном участке. Ширина бокового магнита a была уменьшена до 18 мм. При моделировании изменялась ширина центрального магнита с целью формирования сбалансированного магнитного поля и максимального значения Z_0 .

На основе анализа была выбрана конфигурация для прямолинейного участка $a = 18$ мм, $b = 12$ мм, $h = 25$ мм. При данных размерах граница магнитной ловушки находится на расстоянии 56,2 мм от поверхности мишени. Для упрощения конструкции магнитной системы для закругленного участка также предложено увеличить размер бокового магнита до $a = 18$ мм и $D_i = 48$ мм. При данных размерах граница магнитной ловушки находится на расстоянии 49,8 мм от поверхности мишени. На рисунке 4 представлена окончательная конфигурация магнитной системы⁵.

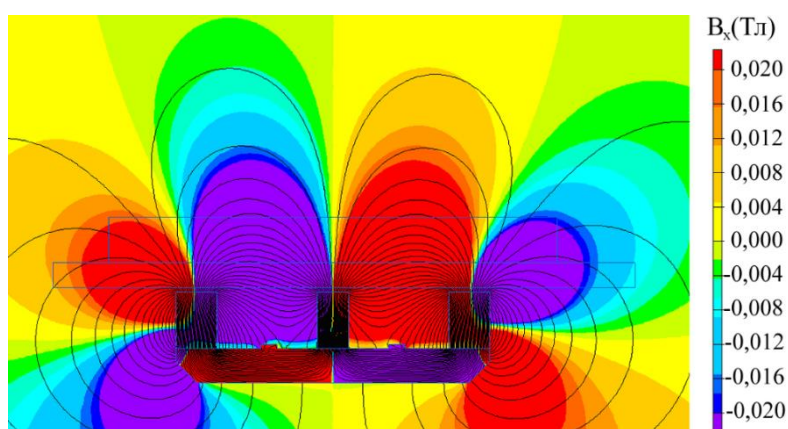


Рисунок 4 – Распределение индукции магнитного поля на прямолинейном участке магнитной системы протяженного магнетрона при $a = 18$ мм, $b = 14$ мм ($Z_0 = 58,2$ мм, $R_{sp} = 36,6$ мм)

Список литературы

1. Интегрированные технологии микро- и наноструктурированных слоев / А. П. Достанко [и др.] ; под общей ред. А. П. Достанко и В. Л. Ланина. – Минск : Беспринт, 2013. – 189 с.
2. Shinichi Tachi. Impact of plasma processing on integrated circuit technology migration: From 1 mm to 100 nm and beyond / Shinichi Tachi // Journal of Vacuum Science Technology. – 2003. – Vol. 21, № 5. – P. S131–S138.
3. Голосов, Д. А. Исследование характеристик магнетронных распылительных систем несбалансированного типа / Д. А. Голосов, И. В. Сवादковский, С. М. Завадский // Электронная обработка материалов. – 2002. – № 6. – С. 66–74.
4. Голосов, Д. А. Сквозное моделирование процессов нанесения покрытий при магнетронном распылении / Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2013. – № 4. – С. 75–82.

The article discusses methods for improving the characteristics of precision optical parts by ion polishing of the working surfaces. Simulation of a high-frequency capacitive discharge source with the application of a magnetic field and a system for ion polishing of precision optical parts have been carried out. The results obtained can be used to optimize and improve the processes and equipment for plasma polishing of the working surfaces of precision optical parts.

Потылкин Андрей Николаевич, магистрант 2 курса факультета компьютерного проектирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, potylkin.andrey@mail.ru.

Научный руководитель – *Завадский Сергей Михайлович*, кандидат технических наук, начальник Центра 2.1 НИЧ БГУИР, доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, szavad@bsuir.by.

⁵Исследования выполнены в рамках научного проекта № T25КИ-055 (№ W2421112) при финансовой поддержке БРФФИ и Национального фонда естественных наук Китая.