

А.А. АГАДЖАНИЯН, А.А. АХУМЯН, Т.В. ЗАКАРЯН, А.К. МЕЛИКЯН,
Н.Г. ПОГОСЯН

**СИСТЕМА ДВУМЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И МОНИТОРИНГА
ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Разработана и исследована система для двумерного мониторинга действующего значения индукции переменного магнитного поля в горизонтальной плоскости камеры плазменной обработки. Для увеличения скорости измерений был использован метод параллельных измерений датчиками с чувствительностью к переменному магнитному полю порядка $1.8 \cdot 10^{-8} \text{ Т}$. Измерения в камере травления позволяют производить мониторинг однородности электромагнитного поля и корректировать ее положением высокочастотного (ВЧ) излучателя.

Ключевые слова: плазменная обработка материалов, индукция магнитного поля, двумерная визуализация, переменное магнитное поле.

Введение. Для травления и нанесения различных материалов на подложку, очистки и модификации их поверхностей используется относительно новый метод плазменной обработки полупроводниковых материалов. Плазменная обработка применяется в производстве микроэлектронных приборов, микромеханике и других областях нанотехнологии [1]. Данный метод был впервые внедрен в процесс производства полупроводниковых приборов в восьмидесятых годах, после чего были поэтапно разработаны более целенаправленные и избирательные методы плазменной обработки. Применение плазмы в процессе производства интегральных схем резко уменьшило уровень загрязнения окружающей среды. Плазмохимическое травление обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами травления (например, фотолитографическим). Однако на практике данный метод не может быть использован во всех случаях. Плазма и явления, связанные с ее поведением при различных условиях, имеют значительно сложную структуру и в настоящее время полностью не объясняются в рамках существующих моделей.

Плазма, используемая для обработки полупроводниковых материалов, возбуждается под воздействием ВЧ сигналов с частотой от единиц до нескольких десятков мегагерц в специальных вакуумных камерах, наполненных инертными газами. В настоящее время получили распространение методы создания плазмы как с ёмкостными, так и с индуктивными связями. При разработке систем возбуждения для использования в процессе плазменной обработки полупроводниковых материалов необходимо решить две основные задачи: согласование комплексных

сопротивлений ВЧ излучателя и плазмы для обеспечения максимальной передачи энергии от генератора к плазме, а также создание однородного поля в камере. Первая задача решается измерением магнитных и электрических компонент электромагнитного поля, а также временного фазового сдвига между последними и, при необходимости, дальнейшей корректировки с помощью специальных согласующих цепей и алгоритмов адаптивного согласования. С целью же создания максимально однородного электромагнитного поля во всем объеме камеры травления применяются разнообразные системы возбуждения, которые, по существу, представляют собой ВЧ антенны.

Целью настоящей работы является создание и исследование системы для двумерного мониторинга действующего значения напряженности переменного магнитного поля в горизонтальной плоскости камеры плазменной обработки.

Метод измерения. Измерение переменного магнитного потока в камере травления сводится к измерению потока магнитного поля в различных точках исследуемой поверхности и может быть произведено с помощью единого датчика, передвигающегося с помощью подвижного механизма по исследуемой поверхности. Процесс измерения в определенных точках исследуемой плоскости выполняется поочередно для всех точек исследуемой поверхности, далее посредством специальных методов цифровой обработки выполняется реконструкция полной картины распределения потока магнитного поля.

Очевидно, что разрешающую способность измерения потока магнитного поля в исследуемой поверхности можно увеличить, лишь уменьшив размер шага перемещения подвижного механизма, и поэтому измерительные системы, основанные на данном методе, не отличаются высокой производительностью с точки зрения скорости измерения.

С целью увеличения скорости измерения можно использовать метод, основанный на параллельных измерениях [2,3]. Разрешающая способность таких измерительных систем зависит от количества датчиков, которые фиксируются в определенных точках плоскости исследования. Матрица датчиков подключается к многоканальной системе сбора данных, которая при каждом такте измеряет показания всех датчиков, расположенных в плоскости исследования.

Описание системы. Учитывая особенности, преимущества и недостатки методов, на которых основаны системы двумерного мониторинга напряженности переменного магнитного поля в камере травления, в разработанной системе используется метод параллельных измерений. Система состоит из матрицы датчиков магнитного поля, системы сбора данных и блока управления, обработки и визуализации результатов. Структурная схема системы приведена на рис. 1.

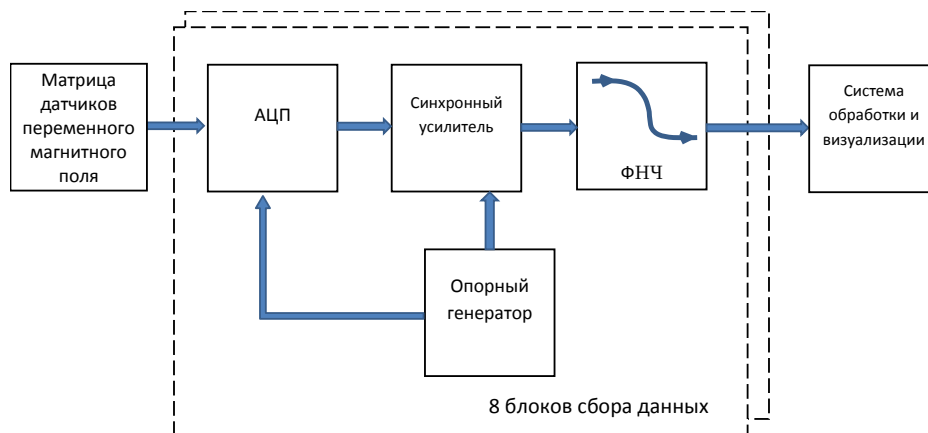


Рис. 1. Структурная схема системы двумерного мониторинга

Матрица датчиков магнитного поля. Для исследования и использования плазмы в различных целях, в том числе при производстве полупроводниковых приборов, необходимо измерить и исследовать параметры плазмы. Самыми главными параметрами плазмы являются температура, давление и однородность электромагнитного поля.

Существуют различные методы измерения переменного магнитного поля. Одним из эффективных является метод простого электрического контура. Принцип его работы основан на законе Фарадея, согласно которому для любого замкнутого контура индуцированная электродвижущая сила (ЭДС) пропорциональна скорости изменения магнитного потока, проходящего через этот контур:

$$V = -N \frac{d\Phi_B}{dt}, \quad (1)$$

где Φ_B – магнитный поток через контур, а N – количество витков контура.

Матрица датчиков магнитного поля реализована на платформе круглой формы с диаметром 500 мм, на которой расположены контурные датчики магнитного поля. Структура и расположение датчиков матрицы, реализованной на 4-слойной печатной плате и состоящей из 64 одноконтурных точечных элементов, приведены на рис. 2. Идентичность датчиков, однородность изолятора печатной платы и нулевой наклон плоскостей контуров относительно плоскости печатной платы обеспечивают идентичность измерений во всех исследуемых точках. Точность исполнения печатной платы составляет единицы микрометров.

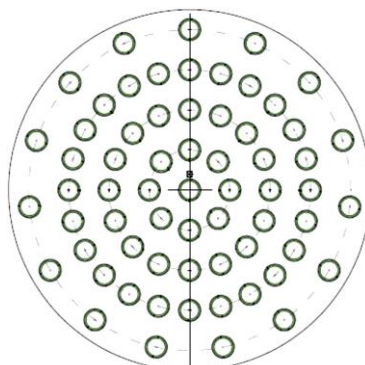


Рис. 2. Структура матрицы датчиков магнитного поля

Система сбора данных. Детектированные сигналы с помощью кабелей с малыми потерями передаются в блок сбора данных. Система сбора данных состоит из 8 блоков сбора данных. Один из блоков является управляющим и обеспечивает сигналом синхронизации всю систему. Остальные 7 блоков являются ведомыми. Каждый блок имеет 8 каналов аналогового входа. Количество блоков практически ограничивается нагрузочной способностью опорного генератора. В случае необходимости увеличения количества датчиков возможно параллельное подключение нового блока сбора данных. Каждая подсистема допускает подключение до 8 точечных датчиков. Структурная схема системы сбора данных приведена на рис. 1. Каждый блок имеет внутренний опорный тактовый генератор, синхронизированный с генератором управляющего блока сбора данных.

Блок сбора данных состоит из аналого-цифрового преобразователя (АЦП), опорного генератора и микропроцессора, на котором реализованы алгоритмы синхронного усиления и фильтра нижних частот.

Система обработки и визуализации данных. Система обработки и визуализации (СОВ) предназначена для сбора, цифровой обработки и представления графических результатов обработки, гистограмм и распределения в различных плоскостях сечения. СОВ реализована на персональном компьютере (ПК). Система сбора данных подключена к СОВ через многоканальный USB-разветвитель, что дает возможность подключения большого количества подсистем сбора данных к СОВ, используя только один USB -канал. Схема потока информации от блоков сбора данных к СОВ приведена на рис. 3.

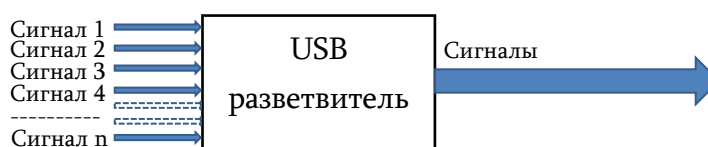


Рис. 3. Схема потока информации от блоков сбора данных к СОВ

Поток чередующихся сигналов всех блоков сбора данных поступает в СОВ. Программа обработки и визуализации накапливает результаты измерений от всех блоков сбора данных для текущего фрейма, и по его завершении выполняется обработка пакета данных. Количество датчиков на исследуемой плоскости равно 64. При таких условиях возможно получить информацию только в точках, где установлены контурные датчики. Увеличением количества датчиков можно увеличить разрешающую способность системы. Но из-за конструктивных ограничений существует максимальное возможное количество точечных датчиков. В таких случаях с целью увеличения виртуальной разрешаемой способности подобных систем используются специальные математические аппроксимирующие алгоритмы. В данной системе применяется метод кубической интерполяции. Программное обеспечение выполняет статистическую обработку результатов измерения для оценки однородности магнитного поля. При этом рассчитываются среднее значение, среднеквадратическое отклонение, минимальное и максимальное значения и нормированная гистограмма результатов измерения (рис. 4). С целью детального исследования результатов измерения исследуемая плоскость условно разделяется на 4 concentric rings (рис. 5), для каждого из которых по отдельности выполняется статистический анализ.

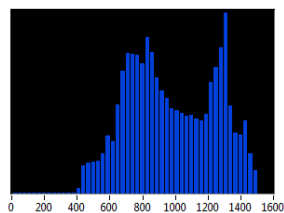


Рис. 4. Нормированная гистограмма результатов измерения

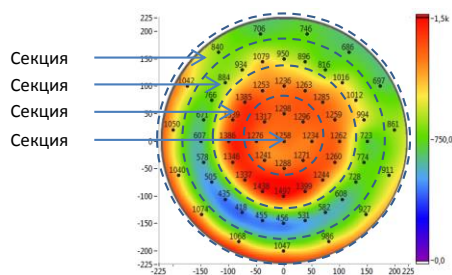


Рис. 5. Расположение секции в плоскости исследования

Программное обеспечение также дает возможность создания плоскости сечения для любого произвольного угла наклона. На рис. 6 приведены результаты сечения для 0, 90 и 180 градусов наклона.

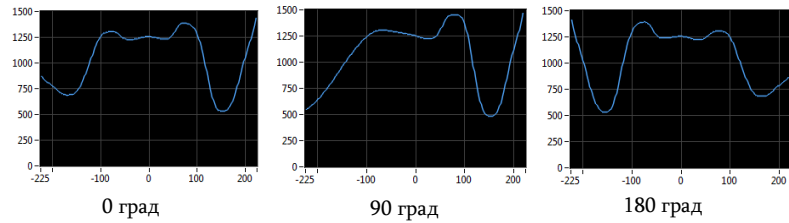


Рис. 6. Результаты сечения при разных углах наклона

Для визуализации профиля магнитного поля выполняется экспоненциальное усреднение во времени результатов измерений. На рис. 7 приведен вид графического интерфейса управляющего программного обеспечения.

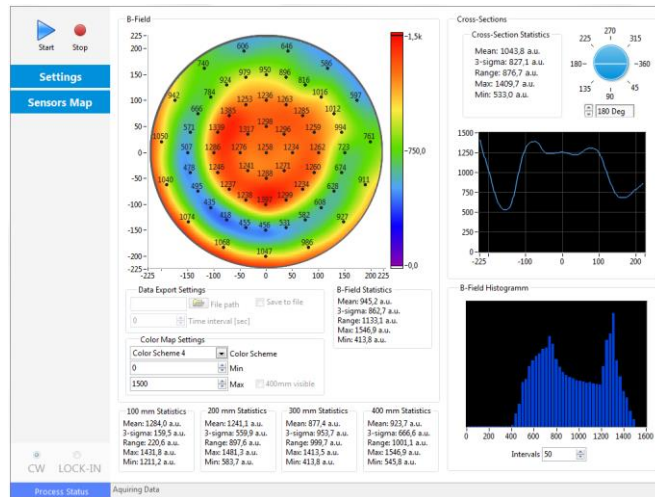


Рис. 7. Графический интерфейс управляющего программного обеспечения

Оценка чувствительности датчиков и результаты измерений. Как уже отмечалось, матрица датчиков состоит из 64 элементов, реализованных на многослойной плате с использованием фотолитографической технологии, что обеспечивает идентичность габаритных размеров датчиков. Согласно (1), при воздействии переменного магнитного поля индуцированная на свободных концах каждого датчика ЭДС равна

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt}, \quad (2)$$

где Φ_B – магнитный поток через контур, а N – количество витков контура, которое для данного датчика равно единице.

Поток переменного магнитного поля по контуру датчика равен

$$\Phi_B(t) = BA \cos \omega t, \quad (3)$$

где B – магнитная индукция; A – площадь датчика; ω – угловая частота.

Сигнал с каждого датчика поступает на детектор, на выходе которого напряжение пропорционально действующему значению (RMS) входного сигнала и равно

$$\varepsilon_{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} BA\omega. \quad (4)$$

Выходной сигнал детектора подается на вход АЦП с разрядностью 12 бит и динамическим диапазоном

$$\varepsilon_{RMSmax} = FSR_{ADC} = 3B, \quad (5)$$

где FSR_{ADC} – динамический диапазон АЦП;

$$B_{RMSmax} = \frac{\varepsilon_{RMSmax}}{2\pi Af}, \quad (6)$$

а f – частота сигнала ВЧ генератора.

На рис. 8 приведены геометрические размеры контура датчика магнитного поля, согласно которым площадь контура датчика равна

$$A \approx 4,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

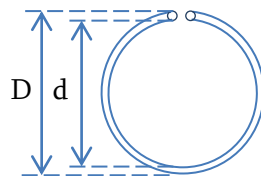


Рис. 8. Геометрические размеры контура датчика магнитного поля

Чувствительность измерительного тракта к действующему значению индукции магнитного поля при использовании 12 - разрядного АЦП равна

$$B_{RMS0} = \frac{B_{RMSmax}}{2^{12} - 1} \approx 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ Тл.}$$

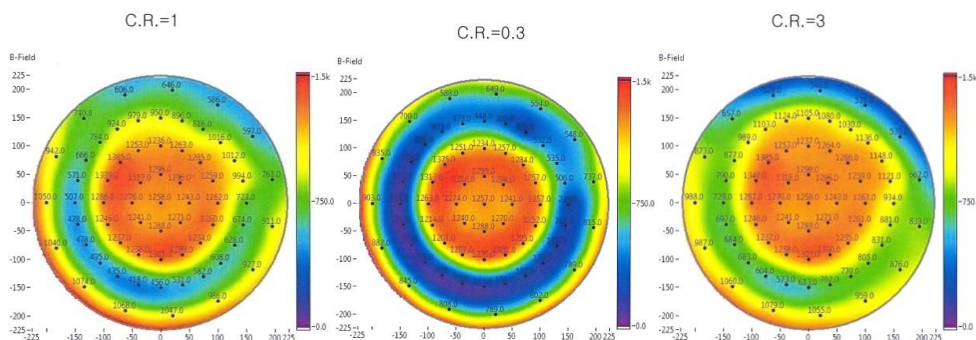


Рис. 9. Типичные результаты измерения при различных отношениях токов антенн

В заключение отметим, что ВЧ сигнал на излучатель в камере травления, состоящий из двух антенн, подается через разветвитель мощности, коэффициент деления которого (С.Р.) меняется от 0,3 до 3. Типичные результаты измерений при различных отношениях токов антенн представлены на рис. 9. Очевидно, что посредством геометрического перемещения излучателя, а также его формы можно добиться максимальной однородности электромагнитного поля в камере плазменной обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kakiuchi, Hiroaki.** Atmospheric-pressure low-temperature plasma processes for thin film deposition // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 2013. – 32, no 3. - P. 030801 - 030801-16.
2. **Black, D.C., Mayo, R.M.** High sensitivity, inductively coupled miniature magnetic probe array for detailed measurement of time varying magnetic field profiles in plasma flows // Review of Scientific Instruments. – 1996. – 67, no 4. - P.1508-1516.
3. **Kanamaru, Yuki.** Magnetic probe array with high sensitivity for fluctuating field // Review of Scientific Instruments. – 2007. – 78, no 3. - P. 036105

ИРФЭ НАН РА. Материал поступил в редакцию 06.10.2014.

**Ա.Ա. ԱՂԱԶԱՆՅԱՆ, Ա.Ա. ՀԱՌՈՒՄՅԱՆ, Տ.Վ. ԶԱՔԱՐՅԱՆ, Հ.Կ. ՄԵԼԻԿՅԱՆ,
Ն.Գ. ՊՈԴՈՍՅԱՆ**

**ՓՈՓՈԽԱԿԱՆ ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԴԱՇՏԻ ԵՐԿԶՈՓ ԱՐՏԱՊԱՏԿԵՐՄԱՆ ԵՎ ԴԻՏԱՐԿՄԱՆ
ՀԱՍՏԱԿԱՐԳ**

Մշակվել և հետազոտվել է պլազմային մշակման խցիկի մագնիսական դաշտի գործող արժեքի երկչափ դիտարկման համակարգ: Չափման արագագործությունը մեծացնելու նպատակով օգտագործվել է զուգահեռ չափումների մեթոդը: Մագնիսական տվիչների սեփական զգայնությունը կազմում է մոտավորապես $1.8 \cdot 10^{-8}$ Տ: Ներկայացված են կատարված տիպային չափումները, որոնք թույլ են տալիս դիտարկել մագնիսական դաշտի համասեռությունը պլազմային մշակման խցում:

Առանցքային բառեր. նյութերի պլազմային մշակում, մագնիսական դաշտի ինդուկցիա, երկչափ արտապատկերում, փոփոխական մագնիսական դաշտ:

**A.A. AGHAJANYAN, A.A. HAKHOUMIAN, T.V. ZAKARYAN, H.K. MELIKYAN,
N.G. POGHOSYAN**

**A TWO-DIMENSIONAL VISUALIZATION AND MONITORING SYSTEM FOR AN
ALTERNATING MAGNETIC FIELD**

A system for two-dimensional monitoring of the effective induction value of the alternating magnetic field in the horizontal plane of the plasma processing chamber is developed and investigated. In order to increase the measurement speed, the method of parallel measurement is used by sensors sensitive to the alternating magnetic field of the order $1.8 \cdot 10^{-8}$ T. The measurements in the plasma processing chamber allow to carry out monitoring of the uniformity of the electromagnetic field in the plasma processing chamber.

Keywords: plasma processing of materials, induction of magnetic field, two-dimensional visualization, monitoring, alternating magnetic field.