

УДК 621.317

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЯЕМОЙ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ «ХОЛОДНОЙ» ПЛАЗМЫ В РЕАКТОРЕ С ЕМКОСТНОЙ СВЯЗЬЮ

С.Т. САРГСЯН

Институт радиофизики и электроники НАН Армении, Аштарак, Армения

*e-mail: ssargsyan24@gmail.com

(Поступила в редакцию 9 января 2018 г.)

В настоящей статье рассмотрен плазменный реактор с емкостной связью, в котором ионизация молекул инертного газа осуществляется посредством радиочастотного излучения. Рассмотрена система управления и измерения электрических и оптических параметров плазмы. Приводится качественная оценка распределения энергии носителей заряда.

1. Введение

Низкотемпературная плазменная обработка материалов находит широкое применение в различных современных технологических процессах и все более вытесняет традиционные химические методы обработки. Благодаря таким преимуществам как возможность выборочной обработки, высокая пропускная и разрешающая способность, плазменная обработка материалов получила широкое применение особенно при производстве полупроводниковых приборов, ЖК экранов, микроэлектромеханики и др. Данный метод был впервые внедрен в процесс производства полупроводниковых приборов в 70-х годах, после чего были поэтапно разработаны более целенаправленные и избирательные методы плазменной обработки.

Учитывая, что плазма представляет собой сложную нелинейную систему [1–3], а также то, что современные системы контроля и управления имеют большую затратность, в исследованиях основной акцент ставится на разработку надежных и эффективных методов контроля и управления радиочастотной плазмой с относительно малыми материальными и энергетическими затратами.

На различных этапах плазменной обработки выполняются технологические процессы, в результате которых сложным образом меняется электрический импеданс камеры плазменной обработки в зависимости от концентраций и давлений газовых компонент в камере травления [4]. Более того, ситуация может

также еще более усугубиться возможными электрическими пробоями. В результате этого нарушается условие согласования между выходным сопротивлением генератора РЧ сигналов и входным сопротивлением камеры плазменной обработки. Несогласованность системы приводит к уменьшению передачи энергии и ухудшению управления процессом плазменной обработки.

Плазма, используемая для обработки полупроводниковых материалов, возбуждается под воздействием радиочастотных (РЧ) 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 емкостными, 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 РЧ 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 РЧ антенны.

2. Система мониторинга и управления параметров «холодной» плазмы в реакторе с емкостной связью

Экспериментальная система получения плазмы показана в Рис. 1. Система состоит из реактора с емкостной связью, который через микродозатор под соединён к емкости с инертным газом, а также к вакуумному насосу, обеспечивающему желаемую концентрацию молекул. Для измерения степени разрежения в реакторе используется ионизационно-термопарный вакуумметр ВИТ-2. В реакторе с емкостной связью одна из пластин заземлена, а другая подсоединена к радиочастотному генератору через согласующую цепь. Описание согласующей цепи приведено в [5,6]. Согласующая цепь представляет собой подстраиваемый емкостной Г-образный согласователь, а в качестве переключателей дискретных емкостей используются pin-диоды. Такая система имеет преимущество в плане быстродействия по сравнению с часто используемыми вакуумными и механически подстраиваемыми конденсаторами, но уступает им с точки зрения величины подводимой мощности. Для получения радиочастотного сигнала используется генератор АРЕХ 3013 (13.56 МГц) производства компании Advanced Energy. Ме-



Рис.1. Экспериментальная система получения плазмы.

тод оценки импеданса состоит в измерении векторов напряжений, пропорциональных току и напряжению РЧ сигнала на сенсоре [7].

Анализ векторов тока и напряжения происходит путем их прямой выборки с частотой, по крайней мере дважды превосходящей главную частоту генератора. Затем оцифрованный поток данных поступает в специально разработанную компьютерную систему, где фильтруется главная частота генератора и путем векторного анализа вычисляется импеданс реактора.

3. Результаты и их обсуждение

Для получения плазмы в качестве инертного газа используется аргон (Ar). В начале вход газа в реактор закрыт. После включения вакуумного насоса через некоторое время в плазменный реактор с помощью микродозатора подается аргон до установления давления в 0.025 мм рт. ст. После включения РЧ генератора производится согласование импеданса при фиксированном давлении газа для разных входных мощностей. Результаты согласования импеданса показаны в Таблице 1, где P – мощность питающего генератора, Z – комплексный импеданс на входе согласующей цепи, а Γ – коэффициент отражения сигнала по напряжению.

Видно, что демонстрируемые системой результаты согласования импедансов являются удовлетворительными. Например, при входной мощности 200Вт коэффициент отражения по мощности составляет всего 0.0064, а при мощности 100 Вт – 0.0036.

Табл.1. Согласование импеданса плазменного реактора при разных входных мощностях ($p = 0.025$ мм рт. ст.)

P , Вт	Z , Ω	$ \Gamma $
100	$55-j9$	0.06
150	$62-j7$	0.12
200	$53-j7$	0.08

Проведено измерение зависимости импеданса плазмы от мощности питающего генератора при двух различных давлениях в реакторе. Согласование производилось при мощности РЧ генератора 100 Вт и далее оставлялось неизменным. Результаты показаны в таблицах 2 и 3.

Табл.2. Зависимость импеданса плазмы от мощности питающего генератора ($p = 0.025$ мм рт. ст.)

P , Вт	Z , Ω
100	$55-j9$
120	$60-j8$
140	$65-j9$
180	$72-j10$
200	$74-j10$

Табл.2. Зависимость импеданса плазмы от мощности питающего генератора ($p = 0.03$ мм рт. ст.)

P , Вт	Z , Ω
100	$52-j6$
120	$58-j5$
140	$62-j6$
180	$67-j7$
200	$70-j9$

Видно, что увеличение мощности питающего генератора приводит к увеличению действительной части импеданса. Это объясняется увеличением частоты столкновения носителей заряда и, следовательно, уменьшается длина свободного пробега, что и приводит к увеличению действительной части импеданса.

Параллельно с измерением электрических параметров также произведена

анализ оптических характеристик плазмы через оптически прозрачное окно реактора. Посредством спектрометра USB4000 (производства компании Ocean Optics) измерены оптические спектры плазмы для различных значений входной мощности в реакторе при фиксированном давлении газа.

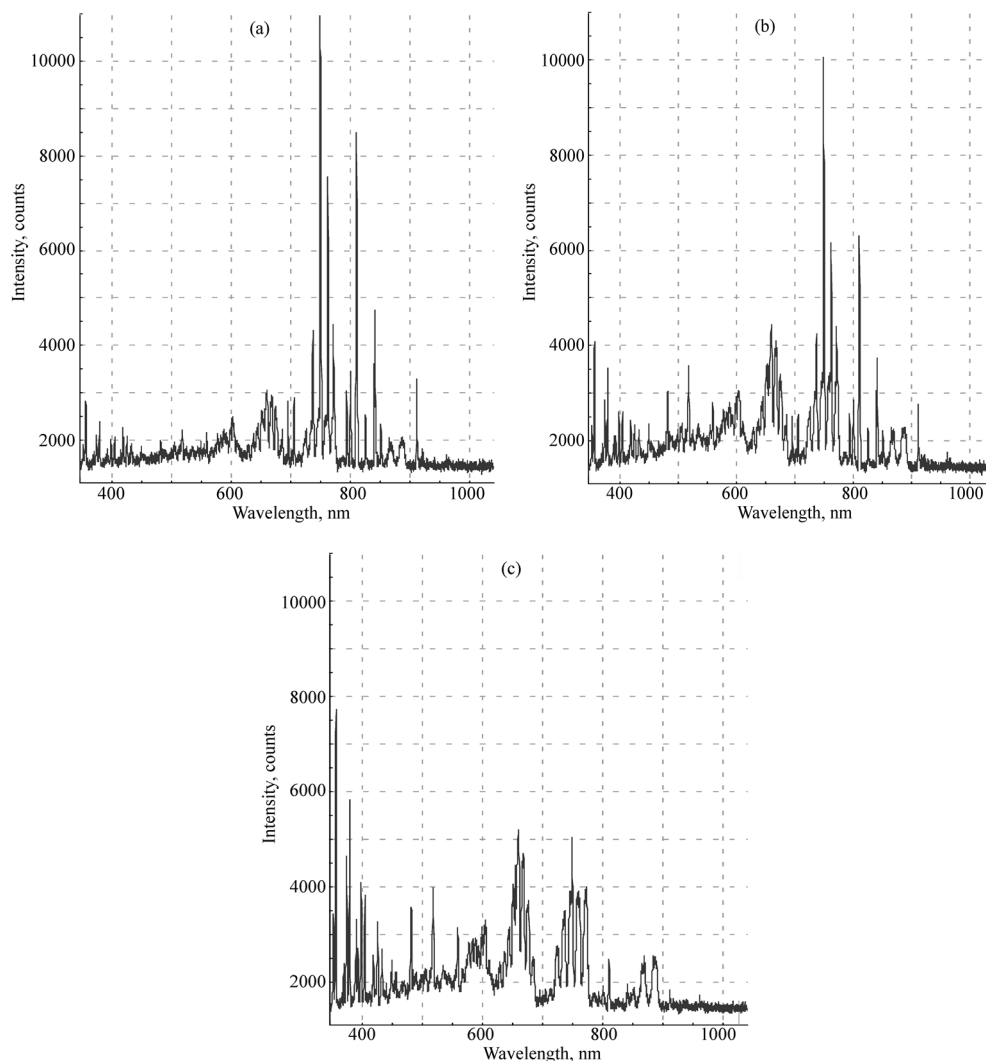


Рис.2. Оптический спектр плазмы при входной мощности (а) 100 Вт, (б) 200 Вт, (с) 250 Вт и давлении 0.04 мм рт.ст.

Из сопоставления оптических спектров, изображенных на рисунке 2, видно, что увеличение энергии питающего РЧ генератора приводит к преобладанию энергии носителей заряда, находящихся в оптическом спектре на более высоких энергетических уровнях.

4. Заключение

Показано, что в «холодной» плазме увеличение мощности питающего генератора приводит к перераспределению носителей заряда преимущественно в диапазон более коротких волн и одновременно к увеличению действительной части импеданса реактора. Можно предположить, что импеданс реактора косвенно характеризует температуру «холодной» плазмы.

Автор выражает благодарность сотрудникам Института радиофизики и электроники НАН Армении, а также факультета радиофизики Ереванского государственного университета за содействие в выполнении данной работы.

Настоящая работа выполнена при частичном финансировании Гранта 18А-2b20 Комитета по науке министерства образования и науки Армении.

ЛИТЕРАТУРА

1. **G. Lei, Z. Yuantao.** Plasma Science and Technology, **16**, 1009 (2013).
2. **G. Bacelli, J.V. Ringwood, P. Iordanov.** Proc. 4th Int. Conf. on Information in Control, Angers, France, 2007.
3. **D. Sudhir, M. Bandyopadhyay, et al.** Review of Scientific Instruments, **85**, 013510 (2014).
4. **H. Kakiuchi, H. Ohmi, K. Yasutake.** Journal of Vacuum Science & Technology A, **32**, 030801 (2013).
5. **А.А. Агаджанян, А.А. Ахумян, Т.В. Закарян, А.К. Меликян и др.** Физические основы приборостроения, **5**, 78 (2016).
6. **A.A. Aghajanyan, A.A. Hakhoumian, N.G. Poghosyan, T.N. Poghosyan, T.V. Zakaryan.** Armenian Journal of Physics, **8**, 44 (2015).
7. **A.A. Hakhoumian, H.K. Melikyan, N.G. Poghosyan, S.T. Sargsyan and T.V. Zakaryan.** Proceedings of NAS RA and NTUA, **71**, 146 (2018).

INVESTIGATION OF RF ORIGINATED ‘COLD’ PLASMA PARAMETERS IN CAPACITIVE COUPLED REACTOR

S.T. SARGSYAN

This article describes a capacitive coupled plasma reactor, where the inert gas molecules are ionized by the radio frequency radiation. The control and measurement system of electrical and optical parameters of the plasma is considered. A qualitative estimation of the energy distribution of charges is proposed.