

УДК 533.9.924+621.793.18

## ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

*Пивоварчик С.С.*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Научный руководитель: Завадский С.М. – канд.техн.наук, доцент*

**Аннотация.** Приводятся сведения о разработанной конструкции электростатического зонда и результаты измерения разработанным зондом энергетических характеристик ионного источника на основе торцевого холловского ускорителя. На основе результатов измерений сделан вывод о пригодности применения данного ионного источника при производстве изделий микроэлектроники.

**Ключевые слова.** Ионный источник, ион, энергия иона, плотность ионного тока.

**Введение.** В настоящее время источники ионов находят все большее применение в технологическом оборудовании нанесения тонкопленочных слоев металлов, полупроводников и диэлектриков [1]. Для предварительной ионной очистки в таких процессах используются ионные источники на основе ускорителей с анодным слоем (УАС) с энергией ионов 300 – 1500 эВ при плотности ионного тока до 50 мкА/см<sup>2</sup> и ионные источники на основе торцевого холловского ускорителя (ТХУ) [2] с энергией ионов до не более 150 эВ и плотностью ионного тока до 1,5 мА/см<sup>2</sup>. Высокоэнергетичная ионная бомбардировка может приводить к появлению дефектов кристаллической решетки полупроводника, ионному распылению и как следствие изменению стехиометрического состава поверхностных слоев. Также из-за нескомпенсированности ионного пучка УАС на поверхности диэлектрических пленок образуется положительный заряд, который может стать источником возникновения электрического пробоя диэлектрика. Особенно это актуально при обработке полупроводниковых пластин со сформированными структурами металл – оксид – полупроводник (МОП). С этой точки зрения наиболее перспективными являются ионные источники на основе торцевого холловского ускорителя (ТХУ) [2]. Данные ионные источники обеспечивают “мягкую” низкоэнергетичную ионную бомбардировку больших площадей с плотностью ионного тока до 1.5 мА/см<sup>2</sup>. Однако разрядные и эмиссионные характеристики ТХУ сильно зависят от интенсивности и конфигурации магнитного поля в разрядной зоне [3]. С этой точки зрения актуальным представляется задача контролирования параметров ионных пучков. Таким образом, целью работы было разработка и исследование системы на основе шестиэлектродного электростатического зонда для контроля энергетических характеристик ионных пучков.

**Основная часть.** Для измерения энергии ионов был разработан шестиэлектродный электростатический зонд, конструкция которого представлена на рисунке 1.

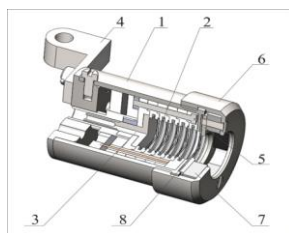


Рисунок 1 – Расположение функциональных элементов шестиэлектродного электростатического зонда ENPR.412-01

Корпус зонда поз. 1 выполнен из нержавеющей стали. Внутри корпуса расположены сеточный сепаратор поз. 2 и коллектора ионов поз. 3. На задней крышке зонда имеется кронштейн для крепления зонда поз. 4. Для работы зонда при различной интенсивности ионных потоков зонд снабжен входным аттенюатором поз. 5. Аттенюатор представляет собой набор диафрагм с отверстиями от 6 до 16 мм, которые фиксируются крепежной гайкой поз. 6. Аттенюатор позволяет путем уменьшения диаметра отверстия диафрагмы изменять чувствительность зонда. Для сепарации потоков высокоэнергетичных электронов используется магнитная система поз. 7, которая крепится на гайке аттенюатора. Гайка аттенюатор также фиксирует первую экранирующую сетку сепаратора поз. 8.

На рисунке 2 приводится упрощенная схема разработанного зонда (а) и распределение потенциалов на его сетках (б).

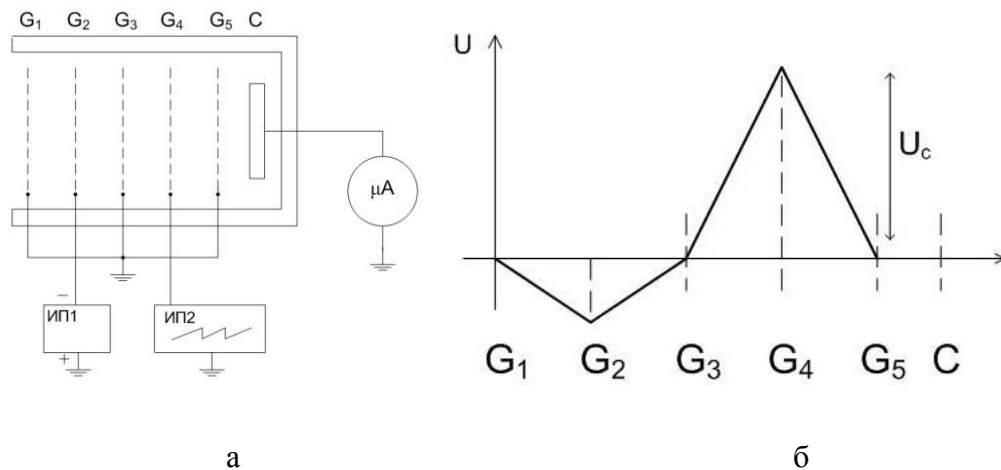


Рисунок 2 – Упрощенная схема шестиэлектродного электростатического зонда ENPR.412-01 (а) и распределение потенциалов на сетках зонда (б)

Энергетический спектр заряженных частиц определяется путем измерения тормозной характеристики с помощью электростатического зонда, который состоит из коллектора и селектора частиц. Селектор частиц представляет собой электростатическую систему, состоящую из пяти сеточных электродов. Шестой сплошной электрод является коллектором ионов. Селектор частиц обеспечивает экранирование плазмы от возмущающего потенциала зонда, разделение ионной и электронной компоненты, устранение влияния вторичной электронной эмиссии сеток и коллектора и селекцию частиц по энергии. Параметры сеточных электродов подобраны так, чтобы обеспечить регистрацию пучков с концентрацией до  $10^{11} \text{ см}^{-3}$ .

Зонд работает следующим образом: часть пучка заряженных частиц, вырезанная входной диафрагмой, попадает в зонд. Сетка G1 служит для экранирования полей электростатического анализатора от внешнего пространства. Сетка G2 обеспечивает разделение ионной и электронной компоненты. Для этого на сетку G2 подается отрицательный DC потенциал. Под действием электрического поля электроны отклоняются от своего прямолинейного движения и не попадают на коллектор зонда. Сетка G4 служит для сепарации ионов по энергиям. Сепарация ионов осуществляется путем подачи отталкивающего положительного потенциала  $U_{G4}$  к сетке G4. При определенном потенциале сетки G4 только ионы, у которых энергия выше, чем  $eU(G4)$ , могут преодолеть электростатический барьер. Для получения тормозной характеристики на сетку подается пилообразное высокое напряжение 0 – 300 В или 0 – 1500 В. Ионы не преодолевшие барьер попадают на заземленную сетку G3. Преодолевшие электростатический барьер ионы попадают на коллектор ионов С, что обеспечивает ток коллектора  $I_{col}$ . Вторичные электроны, выбитые из коллектора под действием ионной бомбардировки, попадают на сетку G5.

Тормозная характеристика представляет собой зависимость ионного тока коллектора  $I_{col(E)}$  от потенциала задерживающей сетки  $U(G4)$ . Связь между тормозной характеристикой и дифференциальной функцией распределения ионов по энергиям  $f(E)$  [2] описывается выражением:

$$f(E) = \frac{I_{col}(E)/I_{col}^{max}(E)}{dE} \quad (1)$$

где  $I_{col}(E)$  – тормозная характеристика,  $I_{col}^{max}$  – максимальный ток коллектора.

Эксперименты проводились на вакуумной установке для исследований разрядных и эмиссионных характеристик ионного источника на базе вакуумного поста ВУ-2МП схематично представлена на рисунке 4. Ионный источник устанавливался на днище вакуумной камеры и запитывался от блока питания постоянного тока (300 В, 9.0 А). Для компенсации пространственного заряда ионного пучка использовался накальный компенсатор (катод), который представлял собой проволоку из торрированного вольфрама диаметром 0.5 мм, свитую в виде спирали диаметром 10 мм и шагом 5 мм. Питание компенсатора осуществлялось от источника постоянного тока (30 В, 25.0 А).

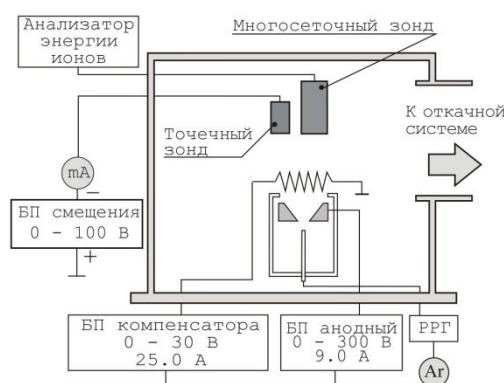


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки для исследования разрядных и эмиссионных характеристик ионного источника

Для измерения плотности ионного тока применялся точечный зонд СР-002 на основе цилиндра Фарадея. Зонд располагался на оси ионного источника на расстоянии 170 мм от анода ионного источника. Для измерения ионного тока на зонд подавалось отрицательное смещение, достаточное для отсекания потока электронов  $U_b = -30$  В. Энергетический спектр ионов определялся методом измерения тормозных характеристик с помощью разработанного многосеточного электростатического зонда.

В ходе экспериментов камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления  $10^{-3}$  Па. В газораспределительную систему ионного источника подавался Argon, поток которого изменялся в пределах 3 – 30 мл/мин. и контролировался автоматическим регулятором расхода газа РРГ-1. Измерения разрядных характеристик и плотности ионного тока ионного источника производились после начальной приработки ионного источника.

Плотность ионного тока  $J_p$  была прямо пропорциональна току разряда и практически не зависела от потока рабочего газа и тока компенсатора. При токе разряда 7 А получена плотность ионного тока  $1.6$  мА/см<sup>2</sup> (рисунок 5а). При увеличении  $V$  выше 0.012 Тл на высоковольтных режимах работы ионного источника  $J_p$  резко снижалась и не превышала  $0.2$  мА/см<sup>2</sup>.

Методом дифференцирования тормозных характеристик исследованы энергетические спектры ионного пучка при различных напряжениях разряда (рисунок 5б). Установлено, что средняя энергия ионов составляла величину 0.6 – 0.85 от напряжения разряда. Степень моноэнергетичности ионов, которая оценивалась как отношение полосы энергетического

спектра по уровню 0.3 от максимума энергии ионов (рисунок 5б), находилась в диапазоне от 0.25 до 0.65 и уменьшалась при увеличении напряжения разряда. Значительная дисперсия энергии ионов при больших напряжениях разряда, по-видимому, связана с большим изменением потенциала в разрядной зоне ионного источника, где происходит ускорение ионов [4].

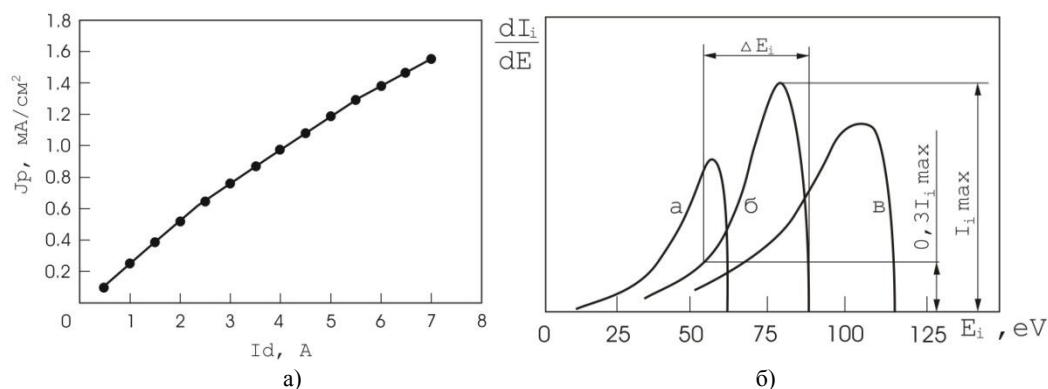


Рисунок 5 – Зависимость плотности ионного тока от тока разряда ионного источника ( $I_c = 14$  А,  $B = 0.011$  Тл) (а) и (б) энергетические спектры ионов, при различном напряжении разряда ионного источника: а – 85 В, б – 100 В, в – 125 В

**Заклучение.** Разработан шестиэлектродный электростатический зонд для измерения энергетических характеристик ионных пучков. Проведены исследования эмиссионных характеристик ионного источника на основе торцевого холловского ускорителя. Установлено, что данный источник обеспечивает низкоэнергетичную ионную бомбардировку с энергией ионов от 30 до 270 эВ при плотности ионного тока до 1.6 мА/см<sup>2</sup>, что делает его пригодным для проведения операций очистки при производстве изделий микроэлектроники.

### Список литературы

1. Anders, A. Plasma ion sources in large area coatings: A review / A. Anders // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – Vol. 200. – Issues 5–6. – P. 1893–1906.
2. Kaufman, H.R. End-Hall ion source / H.R. Kaufman, R.S. Robinson, R.I. Seddon // *J. Vac. Sci. Technol.* – 1987. – A 5. – P. 2081–2084.
3. Deli, Tang Effects of magnetic field gradient on ion beam current in cylindrical Hall ion source / Deli Tang, Jie Zhao, Lisheng Wang, Shihao Pu, Paul K. Chu // *Journal of applied physics*. – 2007. – Vol. 102. – P. 123305-1 – 123305-3.
4. Свадковский, И.В. Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий. – Мн.: Беспринт, 2002. – 214 с.

UDC 533.9.924+621.793.18

## MEASUREMENT OF PARAMETERS OF CHARGED PARTICLE BEAMS IN ION-PLASMA SYSTEMS USING THE METHOD OF MEASUREMENT OF BRAKING CHARACTERISTICS

Pivovarchik S.S.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus (style T-institution)

Zavadski S.M. – candidate of technical sciences

**Annotation.** Information on the developed design of the electrostatic probe and the results of measurement of the developed characteristics of the energy characteristics of the ion source on the basis of the end Hall accelerator are given. Based on the measurement results, a conclusion is made about the suitability of the use of this ion source in the manufacture of microelectronics products.

**Keywords.** Ion source, ion, ion energy, ion current density.