

УДК 51-74

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ИОНИЗАЦИИ И КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

*Барковская К.Н., Талиш Н.В.*

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

*Научный руководитель: Мадвейко С.И. – к.т.н., заведующий кафедрой электронной техники и технологии*

**Аннотация.** Проведено математическое моделирование зависимости потенциала ионизации газа от концентрации электронов и зависимости парциальных концентраций электронов от потенциала ионизации.

**Ключевые слова:** плазма, ионизация, метод Райзера.

**Введение.** Плазма имеет широкое распространение при производстве изделий микроэлектроники. Плазменные технологии позволяют проводить точную обработку материалов, создавать тонкие пленки, очищать поверхности и создавать сложные микроструктуры. В результате получают более качественные и функциональные полупроводниковые устройства, что способствует развитию современной электроники [1]. Знания о свойствах и характеристиках плазмы позволяют задавать режимы технологических процессов, а также разрабатывать наиболее эффективное оборудование плазменной технологии для обработки полупроводниковых материалов. Естественный способ описать плазму, проведя расчёт движения всех её частиц, не реализуем на практике даже с помощью мощной вычислительной техники в силу коллективного характера взаимодействия частиц. Однако многие важные свойства плазмы можно понять на основе анализа движения отдельных частиц [2].

**Основная часть.** Проведено математическое моделирование зависимости потенциала ионизации газа от концентрации электронов и зависимости парциальных концентраций электронов от потенциала ионизации. Для выполнения данной задачи использовался метод Райзера. Особенностью улучшенного метода Райзера является то, что данный метод позволяет вычислять значения степеней ионизации и термодинамических функций, обладая при этом низкой вычислительной сложностью [3].

Моделируемая плазма является низкотемпературной ( $T \leq 10^5$  K) неравновесной газоразрядной плазмой, следовательно, значение концентрации электронов составляет  $n_e = 10^9 - 10^{12}$  см<sup>-3</sup>. Температура плазмы в плазматроне составляет  $T = 6000 - 7000$  K. Рабочий объём составляет  $V = 9000$  см<sup>3</sup>. Для формирования плазмы используется воздух, в состав которого входят азот N (78%), кислород O (21%) и аргон Ar (1%).

На рисунке 1 представлена полученная зависимость потенциала ионизации от концентрации электронов.

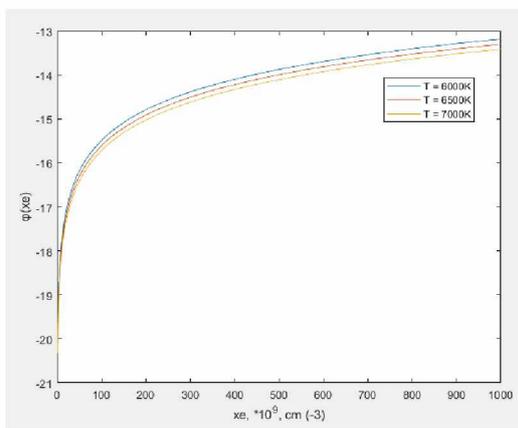
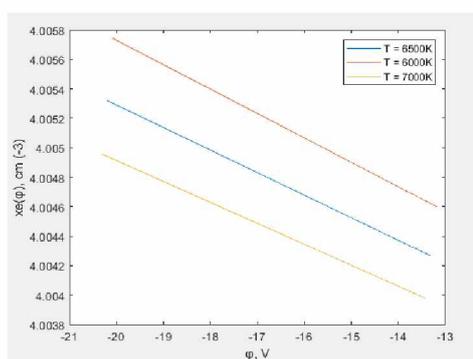
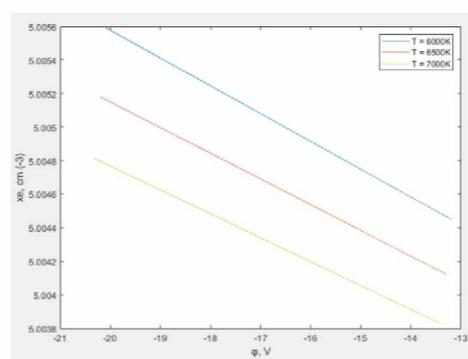


Рисунок 1 – Зависимость потенциала ионизации от концентрации электронов

На рисунках 2 и 3 представлены зависимости парциальных концентраций от потенциала ионизации.



а)



б)

Рисунок 2 – Зависимость парциальной концентрации электронов азота (а) и кислорода (б) от потенциала ионизации

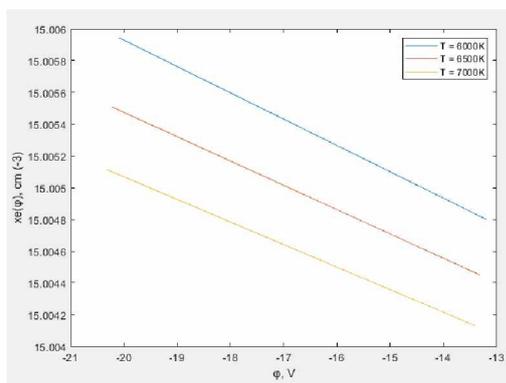


Рисунок 3 – Зависимость парциальной концентрации электронов аргона от потенциала ионизации

Результаты моделирования показали:

1. Зависимость потенциала ионизации от концентрации электронов имеет вид логарифмической функции: при увеличении концентрации электронов растёт потенциал. Значение потенциала выше при более низких значениях температуры.

2. Зависимость парциальной концентрации электронов от потенциала ионизации имеет линейный вид: при увеличении потенциала ионизации парциальная концентрация электронов снижается.

3. Самая высокая парциальная концентрация электронов наблюдается у аргона, а самая низкая – у азота. При высоких температурах наблюдаются более низкие значения парциальных концентраций, чем при низких значениях температур.

Это связано с тем, что чем больше электронов входит в состав газа, тем выше прочность их связей между собой и необходимо затратить больше энергии для разрыва этих связей. В данном случае под энергией подразумевается температура нагрева воздуха, используемого для формирования плазмы. При более высоких температурах наблюдается уменьшение количества электронов в составе молекул, составляющих воздух.

**Заключение.** С помощью метода Райзера описаны зависимости потенциала ионизации газа от концентрации электронов и зависимости парциальных концентраций электронов от потенциала ионизации. Однако в полученных моделях грубо описаны концентрации ионов. Полученные данные в дальнейшем используются для решения уравнения баланса, в результате чего получают значение степени ионизации. Степень ионизации характеризует необходимое количество энергии для перехода газа в состояние плазмы.

#### **Список литературы**

1. PECVD плазмохимия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sntech.ru/technologies/pecvd-plasma-chemistry>. Дата доступа: 29.03.2024.
2. ПЛАЗМА. Большая российская энциклопедия – электронная версия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://old.bigenc.ru/physics/text/3142638>. Дата доступа: 29.01.2024.
3. А. А. Белов. Метод сверхбыстрого расчета состава и термодинамики многокомпонентной плазмы / А. А. Белов, В. С. Димаков, И. А. Козлитин // Математическое моделирование. – 2020. – Том 32, № 12, 95–102.

UDC 51-74

## **MATH MODELING OF IONIZATION POTENTIAL AND ELECTRON CONCENTRATION OF LOW TEMPERATURE PLASMA**

*Barkouskaya K.M., Talish N.V.*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

*Madveika S.I. – Cand. Of Sci., associate professor, Head of the Department of Electronic Technique and Technology*

**Annotation.** Math modeling of relationship between ionization potential and electron concentration and relationship between partial electron concentration and ionization potential have been carried out.

**Keywords:** plasma, ionization, Raizer's method