

## Литература

1. T. Cizmar, Optical traps generated by non-traditional beams, Ph.D. thesis, Masaryk University in Brno (2006). – Режим доступа: <https://is.muni.cz/th/r5vi5/disertace.pdf>. – Дата доступа: 30.09.2020

**А. Л. Барахоев**  
(БГУИР, Минск)

Науч. рук. **С. В. Бордусов**, д-р техн. наук, профессор

### **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОТОКА ОЗОНА-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ НА ПРОФИЛЬ НАГРЕВА ОБРАБАТЫВАЕМОГО ОБЪЕКТА**

Для проведения и анализа результатов экспериментов по удалению в условиях атмосферного давления с поверхности кремниевых пластин фоторезистивных маскирующих покрытий в потоке озон-воздушной смеси, а именно для оценки её влияния на температуру поверхности обрабатываемой нагреваемой кремниевой пластины, произведено моделирование процессов теплообмена внутри исследовательского стенда в программном пакете ANSYS Fluent.

Область моделирования разбита на три части: пластина, нагреватель и воздушный объём экспериментальной камеры. Материалом газового промежутка выбран воздух, пластины – монокристаллический кремний, нагревателя – керамика из оксида алюминия  $Al_2O_3$  с чистотой 95%.

Свойства используемых материалов взяты из справочников [1, 2] и приведены в таблице 1. При моделировании натуральной конвекции значение плотности воздуха определялось с помощью уравнения несжимаемого идеального газа.

Таблица 1 – Свойства используемых материалов

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К)	Теплопроводность, В/(м·К)
Оксид алюминия керамика 95%	3650	780	27
Кремний	2719	871	202,4
Воздух	1,2041	1006,43	0,0242

Выбор размеров и форм тел и поверхностей обуславливался необходимостью упрощения построения расчётной сетки для объёмов,

участвующих в моделировании, при относительном сохранении их формы. Построенная расчётная сетка состоит из 48994 вершин и 42195 элементов. Вид тел, участвующих в моделировании и их расчётная сетка показаны на рисунке 1.

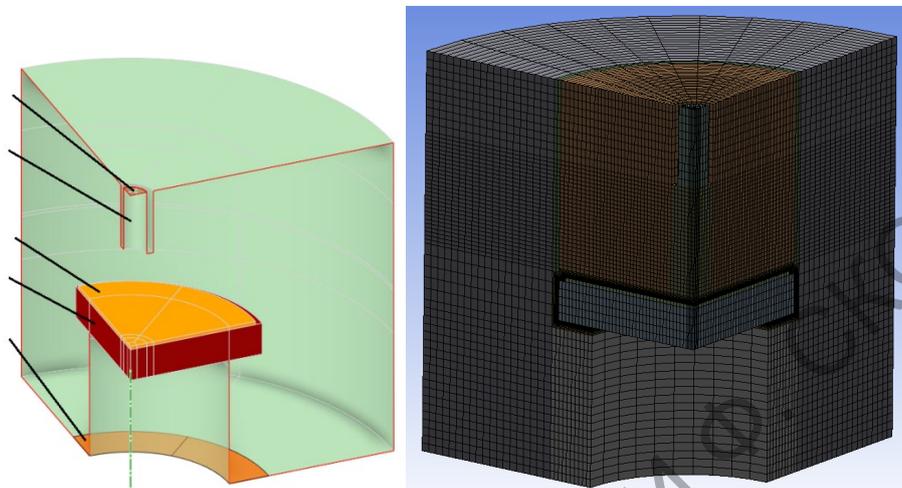


Рисунок 1 – Формы моделируемых тел и расчётная сетка:

1 – впускное отверстие, 2 – сопло подачи озono-воздушной смеси, 3 – пластина, 4 – нагреватель, 5 – выпускное отверстие

Внутреннее тепловыделение нагревателя принято равным  $1,5 \text{ МВт/м}^3$ . Продолжительность моделируемых процессов  $T_{\text{мод}} = 600$  секунд с шагом в 10 секунд. Температура потока озono-воздушной смеси принималась равной  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Распределение температуры вдоль радиуса пластины и внутри объёма моделирования в момент времени  $t_{\text{мод}} = 600$  в присутствии потока озono-воздушной смеси со скоростью  $1 \text{ м/с}$ , что соответствует расходу в  $4,71 \text{ л/мин}$  при диаметре сопла  $1 \text{ см}$ , показаны на рисунке 2.

Распределение температуры вдоль радиуса пластины и внутри объёма моделирования в момент времени  $t_{\text{мод}} = 600$  в отсутствии потока озono-воздушной показаны на рисунке 3.

Результаты моделирования позволяют объяснить экспериментальные данные, полученные в [3, 4], в частности касающиеся неравномерности удаления фоторезистивных маскирующих покрытий с поверхности обрабатываемой пластины при различных условиях подачи в зону обработки озono-воздушной смеси, вызывающей локальное охлаждение обрабатываемой поверхности. Поэтому с использованием программного пакета ANSYS Fluent для оценки охлаждения поверхности обрабатываемой пластины появляется возможность более достоверно оценивать и прогнозировать результаты экспериментов.

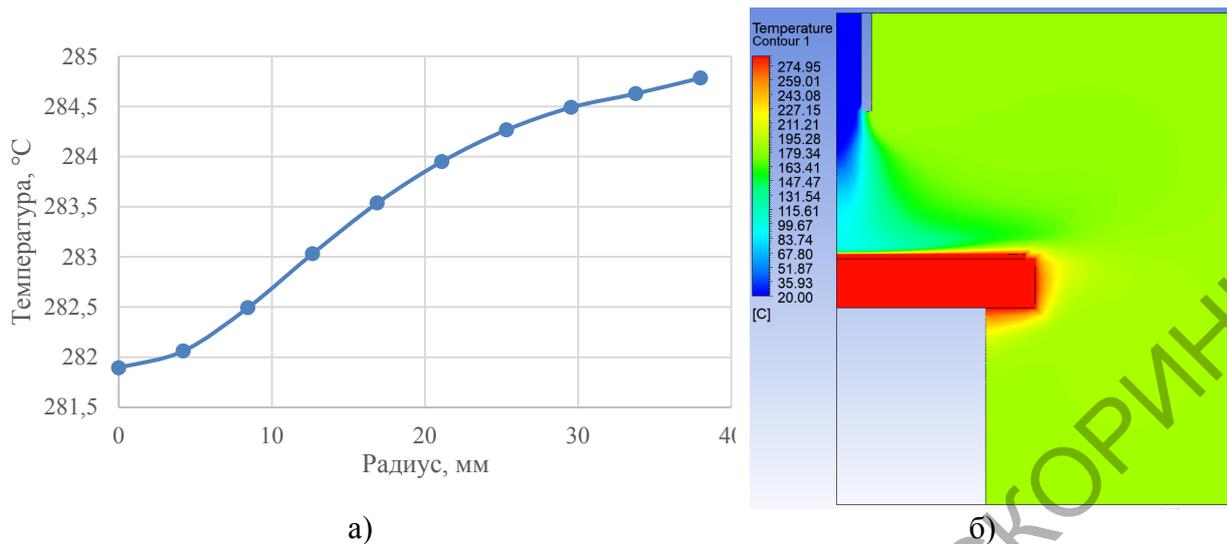


Рисунок 2 – Распределение температуры вдоль радиуса пластины (а) и внутри объёма моделирования (б) в присутствии потока озono-воздушной смеси

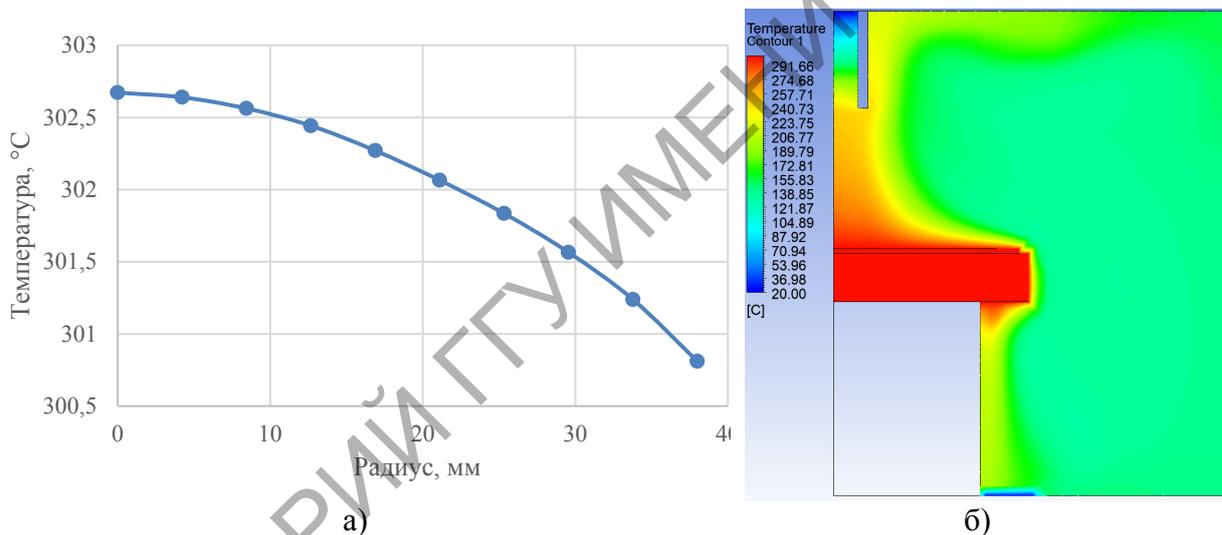


Рисунок 3 – Распределение температуры вдоль радиуса пластины (а) и внутри объёма моделирования (б) в отсутствии потока озono-воздушной смеси

## Литература

1. Innovacera: Alumina 95 [Электронный ресурс] // Xiamen Innovacera Advanced Materials Co., Ltd. – URL: <https://innovacera.com/materials/95-alumina> – Дата доступа: 19.03.2021.
2. Физические величины: Справочник. / А. П. Баби́чев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.; Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
3. Тихон О. И. Исследование влияния условий подачи озono-воздушной смеси на процесс удаления фоторезиста с поверхности

кремниевой пластины / О. И. Тихон, С. И. Мадвейко, С. В. Бордусов, А. Л. Барахоев, П. В. Камлач // Доклады БГУИР. – 2020. – № 6. – С. 57–65.

4. Gardner, W. L. Temperature and concentration effects on ozone ashing of photoresist / W. L. Gardner, A. P. Baddorf, W. M. Holber // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 1997. Vol.15, № 3. – P. 1409–1412.

**Е. Д. Головин**

(ГГУ имени Ф. Скорины, Гомель)

Науч. рук. **В. Н. Капшай**, канд. физ.-мат. наук, доцент

## **ГЕНЕРАЦИЯ СУММАРНОЙ ЧАСТОТЫ В НЕЛИНЕЙНОМ СФЕРИЧЕСКОМ СЛОЕ В ПРИБЛИЖЕНИИ ВКБ: НАПРЯЖЁННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ СУММАРНОЙ ЧАСТОТЫ**

**Введение.** Явление генерации суммарной частоты в поверхностных слоях малых centrosymmetric частиц, как и генерация второй гармоники, на сегодняшний день имеет важное значение. Данное явление используется при исследовании поверхностей и тонких слоев, нелинейных оптических свойств частиц. Также оно используется для исследования физических и химических процессов, происходящих на поверхностях частиц малых размеров. Явление генерации суммарной частоты описывается следующими моделями: нелинейной моделью Релея–Ганса–Дебая (РГД), нелинейной моделью Вентцеля–Крамерса–Бриллюэна (ВКБ) и нелинейной моделью на основе точного решения задачи Ми.

**Постановка задачи.** В данной работе теоретически получим формулу для вычисления напряженности поля суммарной частоты, генерируемого в нелинейном сферическом слое в приближении ВКБ. Пусть на сферическую диэлектрическую частицу радиуса  $a$ , покрытую нелинейным слоем толщиной  $d_0$ , падает две плоские электромагнитные волны с циклическими частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  и волновыми векторами  $\mathbf{k}^{(1)}$  и  $\mathbf{k}^{(2)}$ . Отношение показателя преломления частицы к показателю преломления среды на частоте  $\omega_1$  обозначим  $\eta_1$ , на частоте  $\omega_2$  –  $\eta_2$ .

Найдем выражения для векторов электрической напряженности обеих волн, падающих на поверхность сферической частицы, с учё-