

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра **общей физики**

Тепловая оптимизация приборов вакуумной

микросэлектроники повышенной мощности

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 252 группы

Направление 03.04.02. «Физика»

код и наименование направления (специальности)

физического факультета

наименование факультета, института, колледжа

Пшеничного Александра Александровича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент

С.В Овчинников

Зав. кафедрой

д. ф.-м. н., профессор

А.А. Игнатьев

Саратов 2017

Структура работы:

ВВЕДЕНИЕ

Глава 1 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНОДА

Глава 2 НЕСТАЦИОНАРНЫЙ РАЗОГРЕВ АНОДНОГО БЛОКА

С ТОРЦЕВЫМ АНОДОМ И ВОЗМОЖНОСТЬЮ ОРЕБРЕНИЯ

Глава 3 ТЕПЛОВЫЙ ПОТОК, РАССЕЙВАЕМЫЙ БАЛЛОНОМ

КОРПУСА ВАКУУМНОГО УСТРОЙСТВА

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Список использованных источников из 14 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы.

Отмечено, что в основе работы миниатюрных вакуумных электронных приборов и вакуумных интегральных схем лежит автоэлектронная или термоэлектронная эмиссия. Эти новые приборы обладают сверхвысоким быстродействием (субпикосекундным), высокой устойчивостью к радиации, слабой чувствительностью к температуре и весьма большим КПД. Приборы вакуумной микроэлектроники могут быть использованы как усилители и генераторы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн.

Однако в учебной монографии не отмечена еще одна очень важная проблема. Разработчики в ряде случаев стремятся снять с микровакуумной лампы, несмотря на ее миниатюрность, достаточно высокую мощность. Следовательно, каким бы ни было предназначение устройства, его анодный узел будет испытывать большую тепловую нагрузку, и естественно возникает проблема отвода тепла.

Целью настоящей выпускной квалификационной работы является разработка простой оценочной методики для предварительного анализа теплового режима микроанодов пластинчатого типа и определение на этой основе возможных путей повышения эффективности отвода тепла от микроанода для увеличения полезной мощности устройства.

В первой главе описана теплофизическая модель и приведены результаты оценочного теплофизического анализа для двух микровакуумных устройств: микрогенератора рентгеновского диапазона длин волн и визуализатора рентгеновского излучения.

Теплофизическая модель анодной части устройства представлена на рис. 1.1.

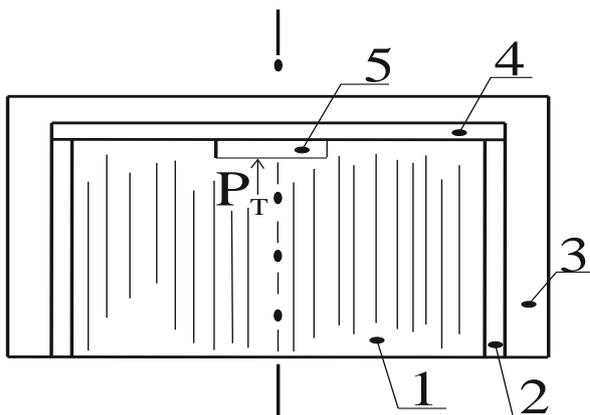


Рис. 1.1 – Представление теплофизической модели анодного блока с дополнительной металлической оболочкой

На этом рисунке приняты следующие обозначения:

- 1- Область расположения микроканального элемента
- 2- боковая поверхность вакуумного баллона (стекло)
- 3- металлическая стаканообразная оболочка
- 4- тонкая изолирующая прослойка, изолирующая анодную пластину от металлической оболочки
- 5- анодная пластина

С катодного узла устройства (на рис. 1.1 не показан) через микроканальный элемент 1 на сильно локализованный участок анода 5 попадает электронный поток, выделяющий в этом элементе тепловую мощность P_T . Поскольку эквивалентные теплоемкость и теплопроводность микроканального элемента пренебрежимо малы по сравнению с материалом анода, то в процессе рассеяния тепловой энергии микроканальный элемент практически не участвует.

Анод устройства представляет собой тонкий металлический диск, закрывающий микроканальный элемент (рис 1.1). Радиус дискообразного анода обозначен через R , а его толщина через δ . Анод изолирован от металлической оболочки изолирующей пластиной 4, фактически представляющей собой крышку вакуумного баллона 2 устройства.

Рабочая зона анода, воспринимающая тепловую мощность P_T от электронного пучка, расположена в центральной области диска и имеет радиус r_0 . Эта тепловая мощность аккумулируется в диске анода и путем теплопроводности передается через пластинку 4 в металлическую оболочку 3. Далее тепловой поток рассеивается в окружающую среду конвекцией и излучением.

Особо отметим следующее обстоятельство. Очевидно, что тепловой поток с поверхности анода частично будет рассеиваться в область микроканального элемента лучистым образом. Мы не стали задавать какие-то средние оптические и теплофизические характеристики области пространства, занятой микроканальным элементом, а загрузили задачу теплофизического анализа в сторону завышения температуры анода, предположив, что вся тепловая энергия рассеивается внешней поверхностью металлической оболочки.

Такая упрощенная теплофизическая модель показана на рис. 1.2.

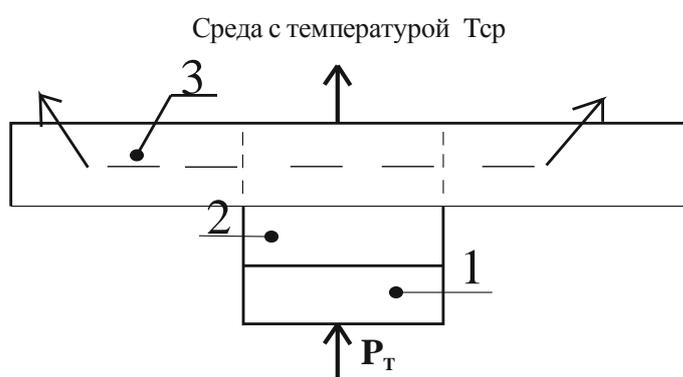


Рис. 1.2 – Упрощенная модель для расчета температуры анода.

- 1- Анод;
- 2- изолирующий слой (SiO_2);

3- теплорассеивающий диск

Тепловая мощность P_T поступает в локализованный круглый участок поверхности анода (тепловой источник) и теплопроводностью через стеклянную прослойку попадает в теплорассеивающий диск, площадь торцевой поверхности которого эквивалентна площади внешней поверхности стаканообразной металлической оболочки устройства. С этой поверхности тепловая мощность рассеивается в окружающую среду с температурой T_{CP} .

В силу малости толщин слоев модели, показанной на рис. 1.2, для вычисления температуры анода мы воспользуемся следующей формулой:

$$T_{ИСТ} = T_{CP} + P_T \cdot \left[\frac{1}{\pi r_0^2} \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) + \frac{1}{\lambda_3 b f} \cdot \frac{I_1(bR)K_0(br_0) + I_0(br_0)K_1(bR)}{I_1(bR)K_1(br_0) - I_1(br_0)K_1(bR)} \right]$$

где r_0 - радиус пятна теплового источника на поверхности анода,

R – внешний радиус теплорассеивающего диска,

δ_1, δ_2 и δ_3 - толщины анода, стеклянной прослойки и теплорассеивающего диска,

λ_1, λ_2 и λ_3 - теплопроводности, стеклянной прослойки и теплорассеивающего диска,

$$b = \sqrt{\frac{\alpha_{эфф}}{\lambda_3 \delta_3}}; \quad f = 2\pi r_0 \delta_3,$$

I_0 и I_1 - модифицированные функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков,

K_0 и K_1 - модифицированные функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков,

$\alpha_{эфф}$ - эффективный коэффициент теплоотдачи, включающий конвективную и лучистую составляющие.

Для проведения оценочных расчетов радиус диска-анода задавался равным 1,5 мм и 3,0 мм при радиусе теплового источника 0,5 мм и толщине диска-анода 0,5 мм. Коэффициент теплопроводности материала диска-анода (вольфрам) принимался равным $\lambda = 160$ Вт/(м·К). Толщину металлической (алюминиевой) оболочки задавали равной $\delta = 0,5$ мм, поскольку делать ее тоньше с теплофизической точки зрения нецелесообразно. Толщина стеклянной изолирующей прокладки выбиралась равной 0,25 мм. Теплопроводность алюминия принималась равной 220 Вт/(м·К) [7], а теплопроводность стеклянной изолирующей прокладки 1,76 Вт/(м·К) [13].

Как конвективная, так и лучистая теплоотдача зависит от температурного перепада между теплоотдающей поверхностью и окружающей средой – так называемый температурный напор ($T_S - T_{CP}$). В нестационарных задачах и задачах с локальным тепловыделением температура теплоотдающей поверхности не является постоянной величиной. Поэтому в инженерной практике принято определять условия теплообмена по средней температуре теплоотдающих поверхностей [8,10,13]. Средняя температура теплоотдающей поверхности анодной стаканообразной оболочки задавалась равной 310 К, 330 К, 350 К и далее с шагом 50 К до значения 600 К. Температура среды считалась неизменной и принималась равной 300 К.

Результаты числовых расчетов представлены в виде графиков, показанных на рис.1.3-1.5

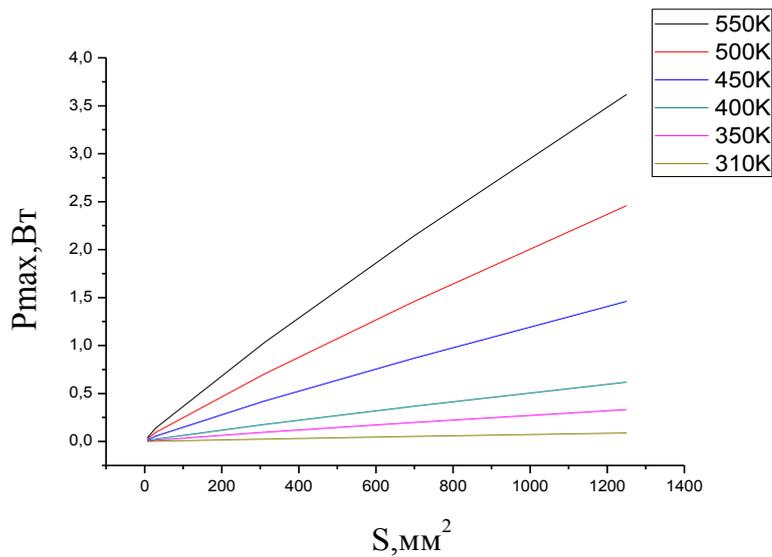


Рис.1.3.Зависимость мощности рассеяния от площади теплоотдающей при температуре теплоотдающей поверхности T_s от 310 до 550K

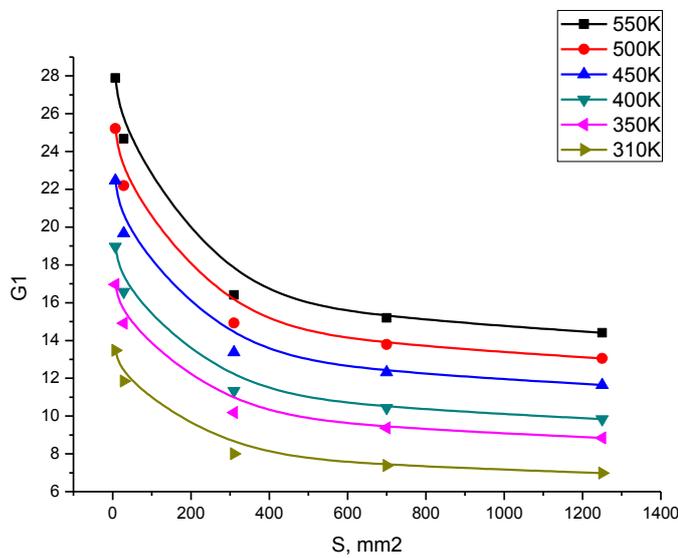


Рис.1.4.Зависимость коэффициента теплоотдачи от площади теплоотдающей поверхности при ее температуре T_s от 310K до 550 K

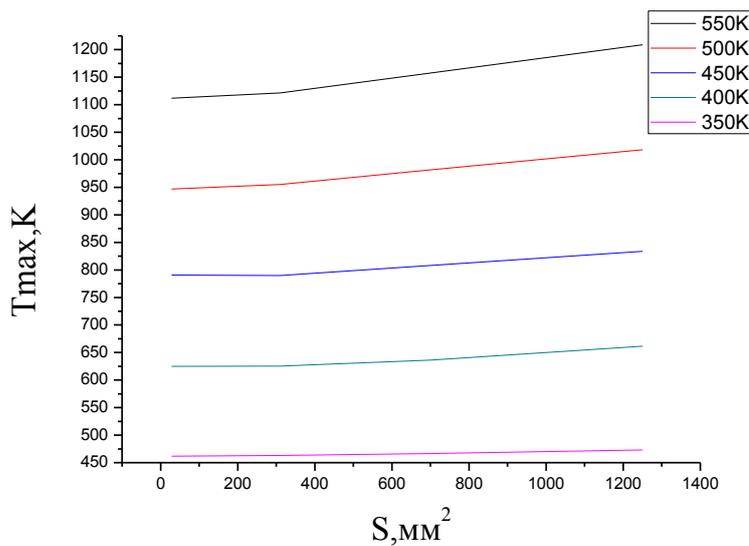


Рис.1.5.Максимальная температура в зависимости от площади теплорассеивающей поверхности при ее средней температуре T_s от 350 до 500 K

Во второй главе работы рассмотрена модель для расчета температуры при разогреве анодного блока устройства с торцевым анодом.

Данные предыдущей главы настоящей работы могут быть использованы и при анализе импульсного выделения тепловой мощности с использованием теории регулярного режима нагрева и охлаждения. Регулярный тепловой режим наступает, когда температура всех точек тела начинает изменяться с одинаковой скоростью. Тогда в рамках линейной задачи теплопроводности температура источника тепла как реакция на выделение в нем тепловой мощности P_T может быть выражена следующим образом:

$$T_{\text{ИСТ}}(\tau) = T_{\text{СР}} + P_T \cdot R_{T\text{ИСТ}} \cdot [1 - \exp(-m \cdot \tau)], \quad (2.1)$$

где τ – текущее время, P_T – тепловая мощность, начинающаяся выделяться в момент времени $\tau = 0$ и не меняющаяся по величине в дальнейшем, m – темп нагрева-охлаждения тела, зависящий от интегральной теплоемкости тела, соотношения его объема и теплорассеивающей поверхности, внутреннего и внешнего тепловых сопротивлений, а именно:

$$m = \frac{T_S - T_{\text{СР}}}{\langle T_V \rangle - T_{\text{СР}}} \cdot \frac{\alpha \cdot \lambda \cdot S}{C \cdot (\lambda + \alpha \cdot \delta)}. \quad (2.2)$$

Здесь $\langle T_V \rangle$ – средняя по объему стационарная температура тела, C – полная теплоемкость тела, а остальные обозначения введены ранее.

Значения темпа нагрева-охлаждения для рассмотренной конструкции приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Темп охлаждения-нагрева моделей анода устройства с учетом теплорассеивающей оболочки

$\langle T_S \rangle, \text{К}$	$S, \text{мм}^2$	$m, \text{с}^{-1}$
1	2	3
310	7,1	0,11111
		0,01111

	28,3	0,098493
		0,009849
	310	0,006585
	700	0,006076
330	7,1	0,139672
		0,013967
	28,3	0,133928
		0,012393
	310	0,008379
	700	0,007706
1250	0,007276	
350	7,1	0,156223
		0,015622
	28,3	0,136541
		0,013654
	310	0,009325
	700	0,008578
1250	0,008099	
400	7,1	0,184964
		0,018496
	28,3	0,163492
		0,016349
	310	0,011111
	700	0,010101
1250	0,009583	
450	7,1	0,207613
		0,020761
	28,3	0,184438
		0,018444
	310	0,012288
	700	0,011342
1250	0,010741	

С помощью таблицы 2.1 можно оценить характерные длительности теплового воздействия при заданном уровне тепловой мощности и допустимом значении температуры источника тепла:

$$\tau = -\frac{1}{m} \cdot \ln \left(1 - \frac{T_{\text{ИСТ}}^* - T_{\text{СП}}}{P_T \cdot R_{T\text{ИСТ}}} \right), \quad (2.3)$$

где $T_{\text{ИСТ}}^*$ – допустимое значение температуры источника,

$R_{T\text{ИСТ}}$ – тепловое сопротивление анодного блока с учетом теплорассеивающих свойств поверхности теплоотдачи.

Тепловое сопротивление анодного блока можно определить по формуле (1.9):

$$R_{T_{\text{ИСТ}}} = \frac{T_{\text{ИСТ}} - T_{\text{СР}}}{P_T}.$$

Таким образом, в рассмотренных вариантах конструкции микровакуумного устройства значения тепловой мощности, выделяемой на аноде в статическом режиме, могут достигать одного ватта при использовании радиатора. В импульсном режиме с длительностью импульса в доли секунды возможно увеличение импульсной мощности.

В третьей главе работы представлена теплофизическая модель для расчета теплового потока, рассеиваемого баллоном корпуса вакуумного устройства, поступающего в баллон теплопроводностью со стороны нижнего основания.

Стенки баллона корпуса микровакуумного прибора могут разогреваться не только за счет лучистого теплового потока от горячего анода, но и за счет тепла, поступающего в стенки баллона через их основание, которое контактирует с катодным узлом устройства. Если катод работает на основе термоэлектронной эмиссии, то катодный узел разогреет. Следовательно, стенки баллона испытывают дополнительный нагрев, и нам необходимо знать дополнительную среднюю температуру стенок, обусловленную процессом теплопроводности, для определения результирующего лучистого теплового потока в системе анод – стенки вакуумированного баллона. Для этого рассмотрим следующую простую теплофизическую модель баллона, показанную на рис. 3.1.

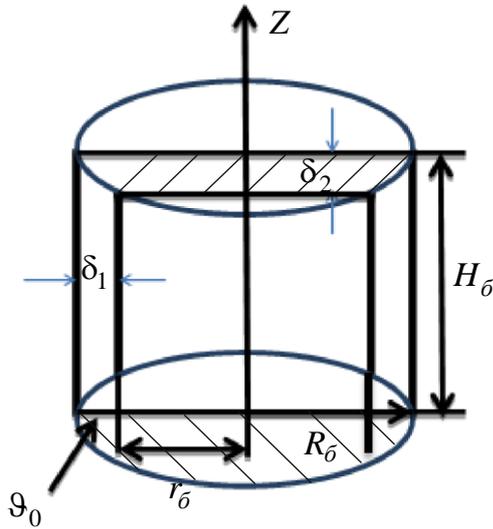


Рис. 3.1 – Представление баллона корпуса вакуумного устройства

$\delta_1 = R_\delta - r_\delta$ - толщина боковой стенки

δ_2 - толщина крышки

λ_1 – теплопроводность боковой стенки баллона

λ_2 – теплопроводность крышки баллона

Θ_0 – избыточная температура основания баллона

$\Theta_1(z)$ – избыточная температура боковой поверхности баллона

$\Theta_2(z)$ – избыточная температура крышки баллона

Тепловой поток, рассеиваемый баллоном ищется из условия:

$$P = -\lambda_{\delta 1} \pi (R_\delta^2 - r_\delta^2) \frac{d\Theta_1}{d\Theta_2} \Big|_{z=0};$$

Отсюда:
$$P = \lambda_{\delta 1} \pi (R_\delta^2 - r_\delta^2) m_1 \{1 - 2Be^{-2m_1 H_\delta}\} \Theta_0 \quad (3.1)$$

Тогда термосопротивление баллона корпуса: $R_{TB} = \frac{\Delta T}{P} = \frac{\Theta_0}{P} \Rightarrow$

$$R_{TB} = \{ \lambda_{\delta 1} \pi (R_\delta^2 - r_\delta^2) m_1 [1 - 2Be^{-2m_1 H_\delta}] \}^{-1} \quad (3.2)$$

В выражениях (3.1) - (3.2) входят величины α_1 и α_2 , значения которых зависят от температуры. Как уже отмечалось в главе 1, при инженерных расчётах для определения коэффициентов теплоотдачи используют среднюю температуру теплоотдающей поверхности. Вычислим среднюю температуру боковой поверхности $\bar{\Theta}_1$ и $\bar{\Theta}_2$:

$$\bar{\Theta}_1 = \frac{1}{H_\delta} \int_0^{H_\delta} \Theta_1(z) dz = \frac{\Theta_0}{H_\delta m_1} \{ B[e^{-m_1 H_\delta} - 2e^{-2m_1 H_\delta} + e^{-3m_1 H_\delta}] + 1 - e^{-m_1 H_\delta} \}, \quad (3.3)$$

$$\bar{\mathfrak{Q}}_2 = \frac{1}{\pi r_0^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \mathfrak{Q}_0(r) r dz = \frac{2\mathfrak{Q}_0 e^{-m_1 H_0}}{m_2 r_0} \{1 + B[1 - e^{-2m_1 H_0}]\} \frac{I_1(m_2 r_0)}{I_0(m_2 r_0)}. \quad (3.4)$$

В заключении приведены основные результаты работы:

- Проведенные оценки показывают связь между мощностью тепловыделения на аноде, его температурой и средней температурой теплоотдающей поверхности. Очевидно, что площадь теплоотдающей поверхности выгодно развивать, а диэлектрическую прослойку между анодом и металлической поверхностью делать, по возможности, с минимальной толщиной.
- В рассмотренных вариантах конструкции микровакуумного устройства значения тепловой мощности, выделяемой на аноде в статическом режиме, могут достигать одного ватта при использовании радиатора. В импульсном режиме с длительностью импульса в доли секунды возможно увеличение импульсной мощности.
- Выражения, полученные в главе 3 дают возможность рассчитать дополнительный нагрев стенок баллона при его контакте с нагретой поверхностью. Затем на основе принципа суперпозиции температурных полей можно уточнять значения результирующего лучистого теплового потока, полагая, что температура стенок обусловлена как лучистым нагревом, так и нагревом за счет процесса теплопроводности.