

Электронные и ионные пучки

УДК 536.52

Анализ влияния теплового режима и термоупругих перемещений электродов электронной пушки на токовые и электронно-оптические характеристики электронного пучка

А. С. Старков, О. В. Пахомов

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, С.-Петербург, Россия

Приведены результаты моделирования методом конечных элементов теплообмена излучением и термоупругих перемещений для модулирующего электрода электронной пушки. Из результатов проведенного исследования следует, что причиной долговременной расфокусировки и изменений качества изображения могут служить как изгиб, так и тепловое расширение электродов. Представлены расчетные данные по изменению токовых характеристик электронного пучка в процессе тепловой деформации модулирующего электрода.

Из практики экспериментальных исследований цветных кинескопов хорошо известно, что после включения их параметры меняются в течение длительного времени (порядка десятков минут). Изменение параметров электронной пушки обычно связывают с термодформацией маски кинескопа, которая нагревается электронным пучком [1]. Однако этот вид тепловых деформаций не может объяснить наблюдаемые нами в экспериментах расфокусировку и изменение токов электронных лучей. Из результатов полевого электродинамического анализа известно [2], что наиболее сильно влияет на величину тока и фокусирующие свойства эмиссионной электронно-оптической системы изменение расстояния между катодом и модулирующим электродом d_{kt} . Изменение величины d_{kt} может быть обусловлено как термодформацией катодного узла, так и тепловым изгибом модулирующего электрода. Однако, во-первых, в конструкциях современных кинескопов предусматривается тепловая компенсация тепловых уходов катодного узла, во-вторых, время разогрева катодного узла до рабочей температуры (время готовности) составляет примерно 10 с, что не может объяснить долговременного изменения токов эмиссионной системы. Поэтому наиболее вероятной причиной процесса релаксации для расфокусировки является нагрев модулирующего электрода и его тепловая деформация. Результатам исследования данного явления с помощью компьютерного моделирования и посвящена настоящая статья.

Для анализа динамики расфокусировки кинескопа из-за релаксации термоупругих перемещений модулирующего электрода нами было выполнено компьютерное моделирование тепловой облученности, разогрева и перемещений электрода методом конечных элементов. Упрощенная оценка в установившемся режиме для температуры модулирующего электрода и его

теплового изгиба может быть сделана с помощью уравнения теплового баланса

$$Q_s = q_1 + q_2 + q_3, \quad (1)$$

где Q_s — мощность теплового излучения, падающая на электрод от катодного узла;

q_1 — мощность, отводимая от электрода в керамический держатель;

q_2 — мощность, отводимая от электрода через электрический ввод;

q_3 — мощность, отводимая от электрода путем его излучения.

Для расчета по (1) керамический держатель и электрический ввод будем учитывать с помощью тепловых сопротивлений Rt_1 и Rt_2 согласно известной методике [3]. Таким образом, получим

$$\begin{aligned} q_1 &= (T_{e1} - T_k) / Rt_1; \\ q_2 &= (T_{e1} - T_w) / Rt_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где T_{e1} — температура керамического держателя ($T_{e1} = 300$ K);

Rt_2 — тепловое сопротивление электрода "металл-диэлектрик";

T_w — температура электрического ввода ($T_w = T_k$).

Величина термического сопротивления Rt_1 может быть оценена по методике расчета электрической емкости [3], когда вместо диэлектрической проницаемости используется теплопроводность керамики, равная 0,001 Вт/(м·К) [3]—[5]. Данные такого расчета дают нам оценку величины Rt_1 от 100 до 1000 Вт/К. Мощность q_3 , излучаемую электродом с двух сторон в окружающее пространство, найдем из выражения

$$q_3 = 2S\delta \varepsilon ((T_{e1})^4 - (T_0)^4), \quad (3)$$

где δ — постоянная Стефана-Больцмана;

ε — коэффициент излучения поверхности электрода;

S — площадь поверхности электрода;
 T_0 — температура окружающей среды.

При стандартных значениях мощности накала катодного узла 2 Вт величина мощности Q_s , подводимой к электроду за счет излучения, составляет 1,4 Вт. Тогда из выражений (1)–(3) получим, что средняя температура электрода в установившемся состоянии будет составлять 830 К.

Оценка времени разогрева электрода по формуле

$$t_{\min} = C_v M (T_{et} - T_{e0}) / Q_s,$$

где $C_v = 0,5$ Дж/кг·К — удельная теплоемкость;

$M = 0,5$ г — масса электрода;

$T_{et} = 830$ К;

$T_{e0} = 300$ К;

$Q_s = 1,4$ Вт — дает нам значение для времени разогрева $t_{\min} = 1,5$ мин, что (как показало компьютерное моделирование) является крайне заниженной оценкой, поскольку не учитывается нелинейный характер теплообмена излучением.

Тепловые перемещения электрода при разогреве обусловлены как деформацией изгиба, так и линейным расширением. Линейное тепловое перемещение L_t равно

$$L_t = b\alpha (T_0 - (T_{av} - T_0)(1 - \exp(-D t/b))), \quad (4)$$

где α — коэффициент теплового расширения;

D — коэффициент температуропроводности;

$b = 5$ мм — ширина электрода;

T_{av} — установившаяся средняя температура электрода.

По формуле (4) найдем для установившегося состояния $L = 20$ мкм. Изгиб электрода обусловлен градиентом температуры по толщине Θ , который приводит к изгибу его поверхности с радиусом кривизны R [6]. Величина радиуса R кривизны может быть определена из выражения

$$R = L_e^2 \Theta \alpha, \quad (5)$$

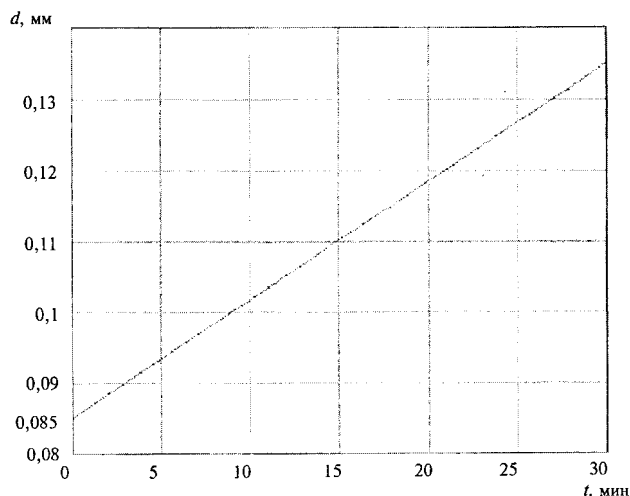
где Θ — градиент температуры по толщине электрода;

L_e — длина электрода.

Прогиб электрода может быть рассчитан по формуле (5), и при градиенте температуры 0,003 м·К составляет 3 мкм, или относительная деформация 0,003. Из представленного анализа следует, что при включении мощности мгновенно устанавливается градиент температуры по толщине электрода и происходит изгиб его поверхности. По мере роста средней температуры линейное тепловое расширение увеличивается, и примерно через 3 мин (как показал наш компьютерный анализ) именно оно начинает преобладать в процессе тепловой деформации электрода.

Компьютерное моделирование динамики характеристик электронной лучевой трубки проводилось в три этапа с помощью специально созданной программы, основанной на методе

конечных элементов [7]. На первом этапе методом Монте-Карло рассчитывалась облученность тепловым излучением всей оптико-электронной системы, на втором этапе решалась нелинейная задача теплопроводности для модулирующего электрода, и далее по найденному полю температур рассчитывались перемещения электрода в каждый момент времени. Результаты компьютерного моделирования показали, что средняя температура электрода составляет 850 К, а время выхода на режим по температуре — 35 мин. Среднее перемещение поверхности электрода составляет 50 мкм. Динамика перемещения представлена на рисунке. Компьютерное моделирование также показало сильную зависимость формы сформированной поверхности от вида заделки электрода в керамический держатель. В целях определения влияния термоупругих деформаций на электронно-оптические характеристики эмиссионной системы был проведен ее полный траекторный и полевой анализ [8] для трех положений модулирующего электрода d_{kt} : 0,085; 0,105; 0,135 мм. Для этих положений были определены токовые и электронно-оптические характеристики. В таблице представлены результаты расчетов тока эмиссионной системы для двух значений модулирующего напряжения — $U_m = 10$, $U_m = -30$ В и трех значений d_{kt} .



Динамика изменения расстояния d_{kt} между модулирующим электродом и катодами при тепловом разогреве

Изменение тока в эмиссионной системе при тепловом разогреве электрода

| Время, мин | Расстояние d_{kt} , мм | Ток I , мА | |
|------------|--------------------------|--------------|---------------|
| | | $U_m = 10$ В | $U_m = -30$ В |
| 0 | 0,085 | 2,3 | 1,1 |
| 15 | 0,105 | 1,7 | 0,8 |
| 30 | 0,135 | 1,3 | 0,5 |

Из таблицы видно, что смещение модулирующего электрода приводит к существенному изменению тока электронного луча, который формируется эмиссионной системой. Также было установлено, что при этом изменяется, хотя и

в меньшей степени, и положение кроссовера луча. В итоге все эти изменения характеристик могут служить причиной долговременных изменений качества изображения кинескопа (яркости, четкости) на временном интервале порядка десятков минут с момента включения до момента установления теплового режима электродов эмиссионной системы.

Авторы выражают признательность профессору С. И. Молоковскому за ценные обсуждения и поддержку данной работы.

Литература

1. Kim K. W., Kim N. W. Analysis of shadow mask thermal deformation an prediction of beam landing shifts for color CRT/ IEE Transaction Consumer Electronics. 1998. V. 44. № 2. May.
2. Moss H. Narrow angle electron guns and cathode ray tubes. — N. Y., 1968.
3. Иосель Ю. И., Качанов Э. С., Струминский М. Г. Расчет электрической емкости. — М.: Энергия, 1969.
4. Гребер Г., Эрк С. Основы учения о теплообмене. — М.: ОНТИ, 1936.
5. Галант М. Б. и др. Изготовление резонаторов и замедляющих систем электронных приборов. — М.: Сов. радио, 1969.
6. Тимошенко С. П. Пластинки и оболочки. — М.: Наука, 1966.
7. Сегерленд Л. Применение метода конечных элементов. — М.: Мир, 1979.
8. Молоковский С. И., Сушков А. Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. — М.: Энергоатомиздат, 1992.

Статья поступила в редакцию 26 мая 2004 г.

The analysis of influence of thermal mode and thermoelastic displacements of electron gun electrodes on the current and electron-optical characteristics of electronic beam

A. S. Starkov, O. V. Pakhomov

Sant-Petersburg State University of Refrigeration, Sant-Petersburg, Russia

The article contains results of modeling of heat exchange by radiation and thermoelastic displacements for modulating electrode of electronic gun. Modeling was performed using the finite element method. Results of performed research show that a reason of long-term defocusing and changes of the image quality can be both the bend and thermal extension of electrodes. Calculation data of change of current characteristics of electronic beam during thermal deformation of modulating electrode is also given.

УДК 621.384.6

Линейный электронный ускоритель на основе циклотронного резонанса

В. Н. Пашенцев

Московский инженерно-физический институт (Государственный университет), Москва, Россия

Рассмотрен линейный электронный ускоритель, работающий на E_{m1} волне. Электроны ускоряются в цилиндрическом волноводе, помещенном в соленоид. Частицы движутся по спиральным траекториям. Синхронизм между бегущей волной и электронами осуществляется на циклотронном резонансе. Для выполнения условия гирорезонанса по всей длине ускорителя магнитное поле увеличивается с ростом энергии электронов. Приведены параметры линейного ускорителя на энергию электронов 10 МэВ.

Линейные электронные ускорители на низкие энергии в диапазоне 5—15 МэВ широко применяются для радиационной обработки медицинского инструмента и в технологических установках для изменения свойств различных полимер-

ных материалов. В линейных ускорителях используют структуры с диафрагмированными волноводами, работающие на бегущей волне, или бипериодические структуры со стоячей волной. В ускоряющих структурах происходит за-