

09;10

Тепловые режимы работы релятивистских магнетронных генераторов

© И.И. Винтизенко

Физико-технический институт Томского политехнического университета
E-mail: vintizenko@tpu.ru

Поступило в Редакцию 10 февраля 2012 г.

Первые эксперименты с релятивистскими магнетронными генераторами (РМГ) при использовании сильноточных электронных ускорителей (СЭУ) позволили получить уровни мощности от сотен мегаватт до нескольких гигаватт при КПД 10–30%. По принципу действия такие генераторы идентичны классическим приборам, однако определение области рабочих режимов и расчет выходных параметров требуют учета релятивистских поправок в соответствующих формулах. Кроме того, высокое катод-анодное напряжение и большой ток приводят к появлению специфических эффектов, связанных с разрушением анодных блоков под действием теплового удара. Импульсно-периодический режим работы РМГ, представляющий наибольший практический интерес, предъявляет жесткие требования к ресурсу анодных блоков. В статье обосновывается выбор материала и конструкции анодного блока РМГ; приведен расчет предельных режимов работы РМГ в зависимости от плотности потока мощности электронного пучка и скважности импульсов, предложены меры по увеличению долговечности анодных блоков.

Анодный блок релятивистского магнетрона (рис. 1) нагревается от нескольких источников тепла: от лучеиспускания с поверхности катода, от электронной бомбардировки ламелей анодного блока и от циркуляции токов высокой частоты по поверхности резонаторов. Для ориентировочных расчетов нагревом ламелей за счет лучеиспускания и СВЧ-токами можно пренебрегать вследствие их малого влияния. В РМГ плотность мощности электронного пучка, осаждаемого на поверхность анодного блока, настолько значительна, что возможно развитие процессов испарения, эрозии и механических деформаций под действием теплового удара. При этом длительность импульса так мала, что рассеиваемая мощность на аноде не успевает не только отводиться

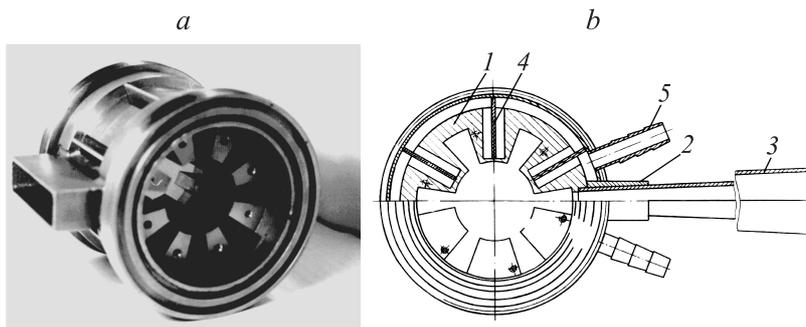


Рис. 1. Внешний вид анодного блока без кожуха водяного охлаждения и вывода мощности (*a*); чертеж анодного блока 6-резонаторного импульсно-периодического релятивистского магнетрона (*b*): 1 — анодный блок, 2 — прилив, 3 — волноводный вывод мощности, 4 — диафрагма, 5 — штуцер.

наружу, но даже распространиться на всю толщину анода, вызывая мгновенный импульсный разогрев.

Как в классическом, так и в релятивистском магнетронах электроны движутся по траекториям, близким к циклоидальным, и падают на поверхность анода под разными углами, определяемыми соотношением радиальной \dot{r} и тангенциальной $\dot{\phi}$ составляющей скорости вблизи анода $\operatorname{tg} \alpha = \dot{r} / \dot{\phi}$ и фазой циклотронного вращения [1]. Проще всего определить области осаждения электронов можно по следам эрозии ламелей, полученных в предельных по мощности режимах работы релятивистского магнетрона. Такие режимы реализовывались при экспериментах на СЭУ „Тонус-1“, и наблюдалась достаточно однородная по длине анодного блока эрозия углов ламелей. На углах ламелей суммируются тепловые потоки от электронов, падающих на цилиндрическую и боковую поверхности ламелей. Отметим, что на краях ламелей происходит усиление статического и высокочастотного электрических полей и увеличение плотности анодного тока. Для снижения данного эффекта применялось скругление радиусом 0.5 mm кромок ламелей анодных блоков релятивистских магнетронов, что составляет 3% ширины ламели. Дальнейшее увеличение радиуса скруглений приводит к перераспределению амплитуд пространственных гармоник различных

видов колебаний в пространстве взаимодействия и, как следствие, к снижению электронного КПД.

При импульсном нагреве со скважностью более 10^3 нарастание температуры поверхности во времени описывается выражением

$$T(t, \tau) = T_{aver}(t) + T_{pul}(\tau), \quad (1)$$

где $T_{aver}(t)$ — среднее значение температуры поверхности, нагреваемой пакетом импульсов, $T_{pul}(\tau)$ — температурный скачок, обусловленный нагревом одиночным импульсом.

Для определения импульсной составляющей температуры поверхности необходимо учитывать особенности работы РМГ. Во-первых: за импульс, длительность которого составляет от нескольких сотых до нескольких десятых долей микросекунд, на рабочей поверхности анода РМГ выделяется энергия с плотностью порядка 10^7-10^8 W/cm². За столь короткое время тепло не успевает не только отводиться наружу, но даже распространиться на всю толщину анода, вызывая мгновенный импульсный разогрев — тепловой удар. Во-вторых, на тепловое состояние анода оказывает влияние не только плотность мощности падающего электронного потока, но и энергия электронов, с которой они достигают его поверхности. В РМГ энергия электронов достигает сотни keV, благодаря чему электроны проникают внутрь материала анода на глубину, сопоставимую с глубиной проникновения тепла, тем самым снижая температуру его поверхности. Это явление учитывается при помощи поправочного множителя $G(d/2\sqrt{a\tau})$, который называется функцией проникновения и зависит от соотношения глубин проникновения электронов d и теплового поля $\sqrt{a\tau}$ внутрь материала анода [2], a — коэффициент температуропроводности, τ — длительность импульса. Поправочный множитель выражается сложными формулами, однако для $(d/\sqrt{a\tau}) \geq 5$, соответствующего случаю релятивистского магнетрона, может быть принято: $G(d/2\sqrt{a\tau}) \approx 1.1(\sqrt{a\tau}/d)$.

Наибольшая идеализация при решении данной тепловой задачи заключается в том, что плотность мощности электронного потока принимается равномерно распределенной по рабочей поверхности анода. Таким образом, импульсная составляющая температуры рассчитывается по формуле для поверхностного теплового удара с учетом глубины

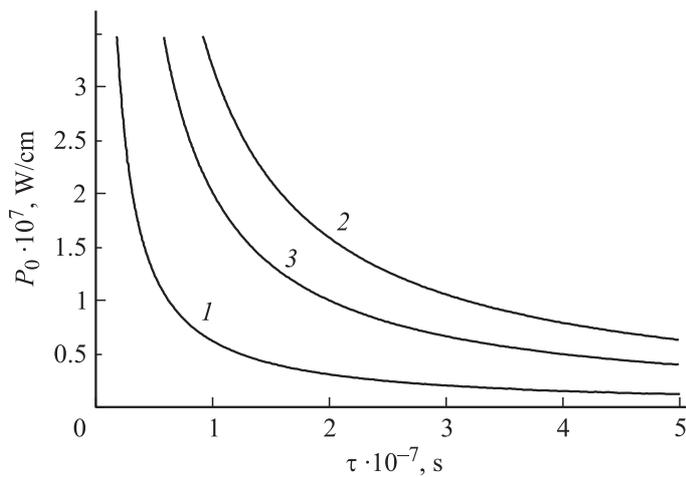


Рис. 2. Зависимость плотности мощности электронного пучка от длительности импульса при $T_{pul}(\tau) = \Delta T_s$: 1 — медь, 2 — молибден, 3 — сталь 12X18H10T.

проникновения электронов:

$$T_{pul}(\tau) = \frac{2P_0\sqrt{a\tau}}{\lambda_m\sqrt{\pi}} G\left(\frac{d}{2\sqrt{a\tau}}\right). \quad (2)$$

Здесь P_0 — поверхностная плотность импульсной мощности, λ_m — коэффициент теплопроводности материала анода.

Чтобы предотвратить преждевременное разрушение анода электронным потоком, амплитуда импульсной температуры на поверхности не должна превышать величины ΔT_s , т.е. $T_{pul}(\tau) < \Delta T_s$. Величина ΔT_s рассчитывается по формуле [3]

$$\Delta T_s = \frac{2\sigma_T}{\alpha_t E_m}, \quad (3)$$

где σ_T — предел текучести при растяжении, α_t — коэффициент линейного расширения, E_m — модуль упругости материала.

На рис. 2 представлена зависимость поверхностной плотности импульсной мощности электронного пучка от длительности импульса для меди, молибдена и стали 12X18H10T при условии $T_{pul}(\tau) = \Delta T_s$.

Величины температур, рассчитанные по формуле (3), составляют 74, 485 и 192°С соответственно. При работе с пучками, параметры которых находятся выше приведенных на рис. 2 кривых, происходит разрушение поверхности анодного блока РМГ в одноимпульсном режиме.

Составляющая $T_{aver}(t)$ в формуле (1) может быть найдена при решении задачи о нагреве неограниченной пластины конечной толщины, одна из поверхностей которой нагревается тепловым потоком, мощность которого равна средней импульсной мощности электронного пучка, а другая принудительно охлаждается по закону Ньютона. Это решение для поверхности нагрева имеет вид

$$T_{aver}(t) = T_0 + \left\{ 1 + \frac{1}{Bi} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp\left(-\mu_n^2 \frac{at}{h^2}\right) \right\} \frac{P_0 h}{v \lambda_m}, \quad (4)$$

где T_0 — начальная температура анода, t — длительность пакета импульсов, $Bi = (\alpha/\lambda)h$ — критерий Био, зависит от толщины анода и от условий охлаждения (для водяного охлаждения $\alpha \sim 0.05-1 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$, для воздушного $\alpha \sim 10^{-3}-10^{-2} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$, α — коэффициент теплоотдачи, λ_m — коэффициент теплопроводности материала анода, h — толщина пластины, v — скважность импульсов, $A_n = \frac{2(\mu_n^2 + Bi^2)}{\mu_n^2(\mu_n^2 + Bi^2 + Bi)}$, μ_n — корни характеристического уравнения $\text{ctg} \mu_n = \frac{1}{Bi} \mu_n$. Как следует из выражения (4), $T_{aver}(t)$ определяется средним значением мощности электронного потока P_0/v и зависит от интенсивности теплоотвода с рабочей поверхности анода. Если $0.1 < Bi < 100$, то интенсивность теплоотвода определяется переносом тепла как внутри материала посредством теплопроводности, так и от поверхности материала к охлаждающей жидкости посредством теплопередачи. При $Bi < 0.1$ интенсивность теплоотвода определяется только теплопередачей.

Таким образом, уравнение для расчета температуры рабочей поверхности анода при высокой скважности импульсов будет иметь вид

$$T(t, \tau) = T_0 + \left\{ 1 + \frac{1}{Bi} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp\left(-\mu_n^2 \frac{at}{h^2}\right) \right\} \frac{P_0 h}{v \lambda_m} + \frac{2P_0 \sqrt{a\tau}}{\lambda_m \sqrt{\pi}} G\left(\frac{d}{2\sqrt{a\tau}}\right). \quad (5)$$

Очевидно, что нагрев в импульсно-периодическом режиме усугубляется наличием постоянной составляющей $T_{aver}(t)$, относительно которой происходят температурные скачки. Снижение данной составляющей возможно за счет интенсификации охлаждения, уменьшения толщины анода в местах осаждения электронов. Величина безопасной температуры, превышение которой приводит к разрушению поверхности анода, в этом случае с достаточной степенью точности может быть определена по температуре плавления T_{mel} [3]: $T_s = \frac{1}{3}T_{mel}$. Для рассматриваемых материалов рассчитанная безопасная температура составляет: для меди — 360°C , молибдена — 875°C и стали 12Х18Н10Т — $467\text{--}475^\circ\text{C}$. Это ниже температур, рекомендованных для использования данных материалов при непрерывном нагреве (медь — 500°C , молибден — 1700°C , сталь — 600°C).

Поскольку импульсная составляющая температуры, ограниченная условием $T_{pul}(\tau) \leq T_s$, не влияет на долговечность анода, очевидно, основной вклад в разрушение поверхности вносит постоянная составляющая температуры $T_{aver}(t)$, зависящая, как указывалось выше, от интенсивности теплоотвода. В нашем случае при $\alpha = 0.15 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ рассчитанные для меди, молибдена и стали критерии Bi имеют значения 0.01, 0.03 и 0.3 соответственно и указывают на то, что доля тепла, снимаемого с поверхности охлаждения, от тепла, подводимого через стенку, для стали в несколько десятков раз выше, чем для меди или молибдена.

На рис. 3 показаны зависимости температуры поверхности анода от длительности пакета импульсов при характерных для РМГ значениях $\tau = 10^{-7} \text{ s}$ и $P_0 = 0.5 \cdot 10^7 \text{ W}/\text{cm}^2$ для частот следования импульсов 100, 200, и 300 Hz. Из приведенных данных следует: медь не может быть применена при импульсно-периодической работе РМГ, использование молибдена ограничено частотой следования импульсов немного более 200 Hz. Опираясь на проведенные расчеты, а также принимая во внимание высокую технологичность, доступность и невысокую стоимость, использование нержавеющей стали для изготовления анодных блоков РМГ оказывается достаточно удачным решением.

Представленные выше расчеты теплового состояния поверхности анодных блоков релятивистских магнетронных генераторов носят оценочный характер. Известно, что в релятивистском магнетроне значительная часть анодного тока не достигает поверхности резонаторной системы из-за дрейфа в аксиальном направлении. Это приводит к

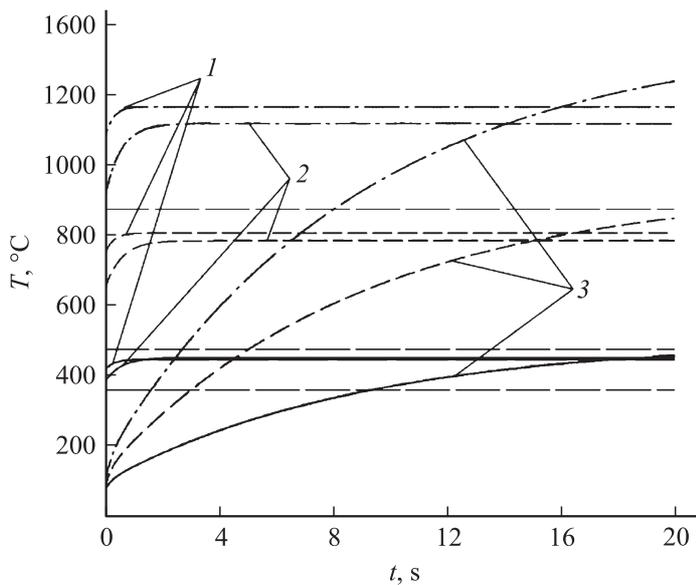


Рис. 3. Зависимость температуры поверхности анода от длительности пакета импульсов при $\tau = 10^{-7}$ s и $P_0 = 0.5 \cdot 10^7$ W/cm²: 1 — медь, 2 — молибден, 3 — сталь 12X18H10T. — — 100 Hz, - - - 200 Hz, - · - · - 300 Hz, — — — — T_s .

снижению КПД прибора, но и одновременно к ослаблению тепловой нагрузки анода. С другой стороны, при расчетах был введен ряд упрощений, таких как прямоугольная форма импульса, равномерное распределение потока мощности, не учитывались дополнительные источники нагрева. Также точно не определена функция проникновения электронов по глубине. Тем не менее расчеты находятся в удовлетворительном согласии с результатами экспериментальных исследований в части ресурса анодных блоков и позволяют выработать следующие рекомендации по конструированию анодных блоков РМГ. Предпочтение следует отдавать анодам РМГ с лопаточными резонаторами, имеющими большую боковую поверхность в сравнении с резонаторами типа щель или щель-отверстие. Кромки ламелей необходимо скруглять для снижения напряженностей электрических полей. Для изготовления

анодных блоков РМГ следует выбирать материалы, механические свойства которых позволяют выдерживать достаточно большие скачки импульсной температуры. Температура плавления материала должна быть высока для обеспечения возможно больших границ допустимых температур работы. Теплофизические свойства материала должны обеспечивать значение критерия Био в диапазоне 0.1–100. Необходимо применять охлаждение ламелей анодного блока. Охлаждение следует подводить как можно ближе к наиболее нагруженным в тепловом отношении частям анода, поэтому толщина ламели в области осаждения электронного пучка должна быть минимально возможной. Материал должен быть доступен и технологичен. Всем вышеперечисленным требованиям лучше всего удовлетворяет нержавеющая сталь, хотя и не является традиционным материалом для СВЧ-устройств. Для приборов, работающих в импульсно-периодическом режиме, допустимо применение анодных блоков с низким замедлением электромагнитной волны (несмотря на снижение электронного КПД). Это приводит к появлению больших значений энергии падающих электронов. Вследствие этого электроны проникают в глубь металла на большую величину, уменьшая температуру импульсного нагрева.

Список литературы

- [1] Винтизенко И.И. // Известия вузов. Физика. 2011. Т. 54. № 11/2. С. 200–204.
- [2] Эпштейн М.С. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1969. № 1. С. 66–81.
- [3] Коваленко В.Ф. Теплофизические процессы и электровакуумные приборы. М.: Сов. радио, 1975. 215 с.