

УДК 537.533

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ МОДУЛЯЦИИ ПУЧКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ ОБОРУДОВАНИИ ДЛЯ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Л. Б. Розенфельд, А. М. Филачев

Научно-исследовательский институт электронной и ионной оптики, Москва, Россия

Дан анализ достоинств и недостатков различных систем модуляции электронного пучка в прецизионном электронно-лучевом оборудовании для размерной обработки. Оценено влияние импульсной модуляции электронной пушки на стабильность технологических характеристик пучка и показано, что использование в технологическом оборудовании метода бланкирования электронного пучка позволяет стабилизировать форму и угельную мощность обрабатываемого импульса тока. Приведены формулы для инженерного расчета основных элементов системы бланкирования и даны рекомендации по ее конструированию. Показано, что метод бланкирования может быть применен в технологических установках средней мощности при использовании двухкоординатной отклоняющей системы и водоохлаждаемой ограничивающей диафрагмы.

Известно, что прецизионное сверление и резка твердых материалов с помощью электронного пучка производятся, как правило, в импульсном режиме [1]. При этом длительность импульса тока варьируется в пределах от долей микросекунды до десятков и сотен микросекунд.

Формирование импульсов тока традиционно осуществляется путем подачи положительных импульсов на управляющий электрод трехэлектродной электронной пушки (ЭП), запертой отрицательным напряжением.

Возможна также модуляция тока пучка путем подачи на ЭП импульсного ускоряющего напряжения, однако на практике этот метод не используется вследствие технических трудностей, возникающих при разработке модулятора с требуемыми для прецизионного электронно-лучевого оборудования характеристиками.

Существует метод модуляции электронного пучка, не применяемый в сравнительно мощном оборудовании для размерной обработки, но используется в маломощных электронно-оптических приборах (электронных литографах, стробоскопических растровых электронных микроскопах и др.). Это так называемый метод бланкирования, при котором электронная пушка работает в режиме постоянного тока, а модуляция пучка осуществляется путем отклонения пучка на перехватывающую диафрагму (рисунки).

Цель настоящей работы — сравнение преимуществ и недостатков указанных методов модуляции пучка, а также оценка предельной мощности, при которой может быть использован метод бланкирования.

Рассмотрим особенности модуляции с помощью управляющего электрода.

Основные достоинства метода, обеспечившие ему широкое распространение, — высокий КПД вследствие импульсного режима работы и сравнительно малая мощность управляющего сигнала.

Однако этот метод обладает и рядом существенных недостатков.

1. Так как в технологических электронно-лучевых установках (ЭЛУ) обычно заземлен анод, то модулятор (электронная схема формирования импульсов напряжения, управляющих током ЭП) оказывается под высоким потенциалом (50–150 кВ), что существенно усложняет его конструкцию и затрудняет управление им от ЭВМ.

2. Конструктивные трудности, возникающие при размещении модулятора в баке высоковольтного источника питания ЭП. Импульсы от модулятора к управ-

ляющему электроду ЭП передаются по высоковольтному кабелю питания пушки, высокочастотные свойства которого изготовителем не нормированы, а кабель нагружен на несогласованную (емкостную) нагрузку. Это приводит к искажению формы сигнала на управляющем электроде ЭП и, следовательно, к неконтролируемому искажению формы импульса тока ЭП.

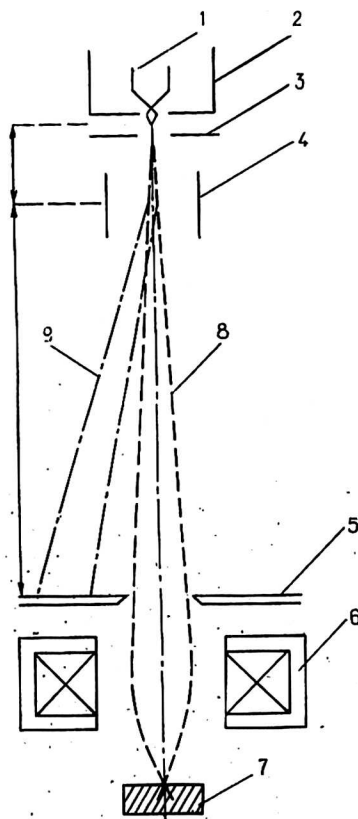


Схема системы бланкирования:

- 1 — катод; 2 — управляющий электрод; 3 — анод;
- 4 — отклоняющая система бланкирования; 5 — ограничивающая диафрагма; 6 — формирующая линза;
- 7 — обрабатываемое изделие; 8 — неотклоненный пучок электронов; 9 — отклоненный пучок электронов

3. Импульсный режим работы вызывает специфическую нестабильность высокого напряжения, вызванную переходными процессами, а также тем, что стабилизатор высокого напряжения ЭП при резких изменениях тока пушки не успевает стабилизировать мгновенное значение напряжения. Это связано с трудностью создания стабилизатора высокого напряжения с временем срабатывания отрицательной обратной связи менее 1 мкс. Кроме того, делитель цепи обратной связи стабилизатора высокого напряжения конструктивно размещен достаточно далеко от ЭП. Вследствие этого внутреннее сопротивление источника высокого напряжения во время импульса определяется не параметрами стабилизатора, а величинами паразитных индуктивностей и емкостей системы питания, а также параметрами высоковольтного кабеля. Поэтому на практике стабилизируется среднее значение ускоряющего напряжения (а не его мгновенное значение), и разность потенциалов между анодом и катодом зависит от тока ЭП и частоты повторения импульсов и изменяется во время импульса и в промежутках между импульсами.

4. Практическая невозможность введения в схему электропитания стабилизатора тока электронного пучка.

Оценим влияние различных факторов на технологические параметры пучка — амплитуду и форму импульса тока, энергию в импульсе, удельную мощность.

Модуляционные характеристики электронных пушек, используемых в технологических установках, нелинейны и в первом приближении их можно аппроксимировать следующим полиномом [2]:

$$I = C(U_M - U_3)^k, \quad (1)$$

где I — ток пучка;

C — константа, определяемая конструкцией ЭП;

U_M — разность потенциалов между катодом и управляющим электродом ЭП;

U_3 — потенциал запирающего ЭП;

k — величина, находящаяся в пределах 2,5—3,5.

Из (1) нетрудно оценить влияние нестабильности напряжения на модуляторе на стабильность тока ЭП:

$$\Delta I/I \approx k \Delta U_M / (U_M - U_3) - k \Delta U_3 / (U_M - U_3). \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что относительная нестабильность тока пучка определяется отношением абсолютных значений нестабильностей модулирующего и запирающего напряжений к разности значений постоянного запирающего напряжения и амплитуды импульсного напряжения.

Учтем, что

$$U_3 = -U_a/\mu; \quad (3)$$

$$U_M = U_{CM} + U_{ИМП}, \quad (4)$$

где U_a — ускоряющее напряжение;

μ — коэффициент усиления триодной ЭП;

U_{CM} — величина постоянного напряжения смещения;

$U_{ИМП}$ — величина импульсного отпирающего напряжения.

С учетом (3,4) получаем

$$\Delta U_3 = \Delta U_a/\mu; \quad (5)$$

$$\Delta U_M = \Delta U_{CM} + \Delta U_{ИМП}; \quad (6)$$

$$U_M - U_3 = U_{CM} + U_{ИМП} + U_a/\mu.$$

Из выражений (2 — 6) могут быть получены выражения для оценки влияния различных факторов на стабильность тока пучка при подаче модулирующего напряжения на управляющий электрод пушки:

$$\Delta I/I = (k/(1 - U_3/U_M)) (\Delta U_M/U_M); \quad (7)$$

$$\Delta I/I = (k U_{CM}/(U_M - U_3)) (\Delta U_{CM}/U_{CM}); \quad (8)$$

$$\Delta I/I = (k U_{ИМП}/(U_M - U_3)) (\Delta U_{ИМП}/U_{ИМП}); \quad (9)$$

$$\Delta I/I = -(k/(U_M/U_3 - 1)) (\Delta U_3/U_3). \quad (10)$$

Из (7—10) следует, что нестабильность тока ЭП во всех случаях значительно (примерно на порядок) превышает нестабильность соответствующего напряжения питания пушки, что заставляет предъявлять жесткие требования к используемым источникам электропитания, а также к воспроизводимости формы (и особенно вершины) импульса.

Нестабильность ускоряющего напряжения влияет на процесс обработки несколькими путями.

Во-первых, нестабильность ускоряющего напряжения изменяет запирающее напряжение и, следовательно, ток зонда, положение и размер кроссовера.

Влияние изменения ускоряющего напряжения на ток может быть оценено по формуле (10) с учетом того, что в соответствии с (3) $\Delta U_a/U_a = \Delta U_3/U_3$.

Изменения положения и размера кроссовера зависят от конструкции и режима конкретной ЭП и поэтому не могут быть оценены в общем виде, хотя в первом приближении для некоторых конфигураций электродов электронных пушек могут быть использованы результаты, полученные в работе [2].

Характер влияния этих факторов очевиден — изменение положения кроссовера нарушает фокусировку пучка на обрабатываемое изделие и увеличивает размер пятна на поверхности изделия; изменение размера кроссовера также изменяет размер пятна. Всякое изменение размера пятна изменяет удельную мощность обрабатывающего электронного пучка, что влияет на результат обработки. Изменение тока описывается следующей формулой:

$$\Delta I/I = - (k/(U_M/U_3 - 1)) (\Delta U_a/U_a). \quad (11)$$

Изменение плотности тока в кроссовере J_c описывается формулой:

$$\Delta J_c/J_c = \Delta I/I - 2 \Delta R_c/R_c, \quad (12)$$

где R_c — радиус кроссовера.

В результате изменения ускоряющего напряжения и тока зонда изменяется энергия обрабатывающего импульса

$$W = IU, \quad (13)$$

влияющая на режим обработки изделия.

Нестабильность энергии импульса определяется следующей величиной

$$\Delta W/W = \Delta I/I = \Delta U/U. \quad (14)$$

При этом изменение удельной поверхности мощности обработки (P_s) определяется выражением

$$\Delta P_s/P_s = \Delta U/U + \Delta J/J, \quad (15)$$

где $J = J_c/M^2$ — плотность тока на изделии,

M — увеличение линзы.

Учитывая дефокусировку пучка при изменении положения кроссовера на величину Δa , выражение (15) можно преобразовать к виду:

$$\Delta P_s/P_s = \Delta U_a/U_a + \Delta J_c/J_c + 2F^2 \alpha_2 \Delta a ((a - F)^2 R_c M), \quad (16)$$

где a — расстояние от кроссовера до линзы,

F — фокусное расстояние линзы,

α_2 — апертурный угол в плоскости изображения.

Соответственно, для изменения удельной объемной мощности (в первом приближении) можно получить выражение:

$$\Delta P_v/P_v = \Delta P_s/P_s + A \Delta U/U, \text{ где } 0,5 \leq A \leq 1. \quad (17)$$

Во-вторых, нестабильность ускоряющего напряжения изменяет (вследствие влияния хроматической aberrации формирующей линзы) размер зонда на мишени

$$\Delta R/R = C_{\text{хр}} \alpha_2 \Delta U/(UR), \quad (18)$$

где $C_{\text{хр}}$ — коэффициент хроматической aberrации линзы, а следовательно, изменяет удельную мощность и режим обработки.

В-третьих, нестабильность ускоряющего напряжения снижает точность позиционирования пучка вследствие хроматической aberrации отклоняющей системы (ОС). При этом относительная ошибка позиционирования пучка определяется выражением

$$\Delta X/X = -0,5 \Delta U/U. \quad (19)$$

Из выражения (19) следует, что абсолютная ошибка позиционирования растет с ростом поля отклонения. Например, при изменении ускоряющего напряжения на 0,1 % и величине отклонения 100 мм смещение пучка на изделии достигает 50 мкм, что недопустимо при прецизионной обработке (например, при нанесении художественных изображений).

Следствием влияния всех перечисленных выше факторов являются разные (при одинаковых командах, поступающих от ЭВМ) форма и энергия импульсов тока (особенно коротких) в пределах одной серии импульсов обработки изделия, а также разные форма и энергия на разных технологических установках. Поэтому при использовании импульсной модуляции ЭП затруднителен перенос технологии с одной установки на другую.

Анализ способа модуляции пучка методом бланкирования показывает, что этот метод также имеет существенные недостатки:

низкий КПД вследствие непрерывного режима работы ЭП;

необходимость рассеяния достаточно большой мощности на ограничивающей диафрагме;

необходимость в момент прохождения импульса обеспечить нулевое значение тока в магнитной отклоняющей системе (ОС) или напряжения на пластинах электростатической ОС;

смещение мнимого изображения катода в случае, если положение центра бланкирующей отклоняющей системы не совпадает с положением кроссовера.

Однако способ бланкирования обладает (по сравнению с традиционным способом модуляции) также рядом существенных достоинств:

непрерывный режим работы ЭП обеспечивает стабильность высокого напряжения. Внутреннее сопротивление источника высокого напряжения мало, емкость кабеля, паразитные емкости и индуктивности на форму импульса не влияют;

в высоковольтном источнике при модуляции пучка отсутствуют переходные процессы, что повышает электрическую прочность ЭП и самого источника питания;

при непрерывном режиме легко реализуется система контроля и стабилизации тока пучка за счет изменения постоянного напряжения на модулирующем электроде. Это обеспечивает стабильность амплитуды импульса тока на уровне стабильности тока ЭП;

форма импульса тока зависит от быстрого действия ОС и практически не зависит от стабильности амплитуды импульсов, подаваемых на ОС бланкирования.

Одновременно обеспечивается:

стабильность энергии в импульсе;

независимость параметров импульса тока от конструктивных особенностей электронно-лучевой установки и ЭП;

стабильность технологического режима;

возможность воспроизведения отработанной технологии на установке любой конструкции.

Все элементы системы бланкирования низкопотенциальны, что существенно упрощает конструкцию системы модуляции, повышает ее надежность и упрощает связь системы модуляции с управляющей ЭВМ.

Основные вопросы, которые необходимо решить при создании системы бланкирования:

определение положения ОС и диафрагмы;

определение тепловой нагрузки на диафрагму и пути ее снижения;

определение требований к системе отклонения пучка.

Оптимальное положение ОС бланкирования (ОСБ) соответствует совпадению центра отклонения с кроссовером. В этом случае при бланкировании пучка не происходит смещения мнимого изображения кроссовера с оптической оси системы.

В многолинзовых системах обеспечить оптимальное положение ОСБ обычно нетрудно. В реальных однолинзовых технологических установках удовлетворить этому требованию, как правило, не удастся из-за принципиальных трудностей (в короткофокусных ЭП кроссовер размещается либо в ускоряющем промежутке, либо непосредственно за анодом). Если расстояние между кроссовером и центром отклонения равно l , и угол отклонения равен α , то смещение мнимого изображения кроссовера равно

$$s = \alpha l, \quad (20)$$

а смещение изображения в плоскости обработки равно

$$S = sM, \quad (21)$$

где M – увеличение формирующей линзы (обычно $M < 1$).

Очевидно, что по мере отклонения пучка плотность тока на мишени падает вследствие перехвата пучка ограничивающей диафрагмой. Практически при разумной конструкции смещение пучка в плоскости обработки не превышает диаметра пучка. Чтобы смещающийся пучок не производил несанкционированную обработку изделия в установках для размерной обработки, достаточно удовлетворить следующему требованию: время уменьшения (или возрастания) плотности тока при бланкировании пучка должно быть значительно меньше длительности импульса обработки. Это достаточно просто осуществляется при высокой скорости отклонения пучка. Действительно, если ОСБ отклоняет за время τ пучок на расстояние, равное N диаметрам диафрагмы, то длительность фронта тока будет равна τ/N , так как ток на обрабатываемую деталь прекратится после отклонения пучка на диаметр диафрагмы.

В системе бланкирования диафрагму, перехватывающую электронный пучок при его отклонении, целесообразно размещать там, где диаметр R_{Π} пучка максимален. Это дает следующие преимущества:

снижается плотность тока в плоскости диафрагмы и, соответственно, удельная нагрузка на диафрагму, что повышает ее долговечность;

диаметр ограничивающий диафрагмы при этом максимален, что упрощает ее изготовление;

большое расстояние между кроссовером и плоскостью диафрагмы упрощает размещение ОСБ и снижает требования к величине угла отклонения, что особенно существенно при отклонении электронов с большой энергией.

Тепловой режим ограничивающей диафрагмы определяется следующими факторами: полной мощностью P , выделяемой электронным пучком на диафрагме, и со скоростью отвода тепла от диафрагмы; удельной поверхностной мощностью P_s (мощностью, приходящейся на единицу площади диафрагмы) и удельной объемной мощностью $P_v = P_s / d$, где d — длина пробега электрона в материале мишени. Значения P_s и P_v должны быть меньше критических для материала диафрагмы значений, при которых возможно плавление или испарение материала диафрагмы.

В целях снижения тепловой нагрузки на диафрагму для отклонения электронного пучка в системе бланкирования целесообразно использовать двухкоординатную отклоняющую систему, на которую подаются переменные напряжения, сдвинутые по фазе на 90° . При этом пятно на ограничивающей диафрагме будет перемещаться по окружности с угловой частотой, равной угловой частоте приложенного к ОСБ переменного напряжения. Пусть радиус этой окружности R_6 и радиус пучка $R_{\text{п}}$. Очевидно, что при этом выделяемая на диафрагме мощностью распределится по кольцу с внутренним диаметром, равным $(R_6 - R_{\text{п}})$ и наружным диаметром $(R_6 + R_{\text{п}})$, где соответствующие радиусы определяются соотношениями:

$$R_{\text{п}} = \text{tg}(\alpha_{\text{п}}) L_1; \quad (22)$$

$$R_6 = \text{tg}(\alpha_0) L_2, \quad (23)$$

где $\alpha_{\text{п}}$ — апертурный угол пучка;

L_1 — расстояние от кроссовера до диафрагмы;

α_0 — угол отклонения пучка в ОСБ;

L_2 — расстояние от центра отклонения до диафрагмы.

Площадь кольца, описываемого пучком, равна

$$S = 4 \pi R_6 R_{\text{п}}, \quad (24)$$

а площадь сечения пучка равна

$$s = \pi R_{\text{п}}^2. \quad (25)$$

Отношение S/s определяет, во сколько раз снижается воздействующая на диафрагму средняя удельная мощность за счет круговой развертки пучка:

$$S / s = 4 R_6 / R_{\text{п}}. \quad (26)$$

Из (22—26) видно, что при прочих равных условиях выигрыш тем больше, чем угол отклонения пучка в ОСБ. Практически легко реализуется выигрыш более чем на порядок.

Задача о предельной температуре нагрева диафрагмы в случае неподвижного пучка легко решается традиционными методами, и в настоящей работе не рассматривается. Для расчета теплового режима диафрагмы в случае вращающегося

пучка можно использовать методы, применяемые для расчета рентгеновских трубок с вращающимся анодом. Однако с достаточной для практических целей точностью оценка максимальной температуры и диапазона ее изменения может быть проведена сравнительно просто.

Так как диаметр пучка в плоскости диафрагмы на несколько порядков превышает толщину слоя d , в котором выделяется тепло, то для оценки температуры поверхности диафрагмы можно использовать достаточно простое решение тепловой задачи для полубесконечности тела. Используя решение, полученное в работе [3], можно показать, что, если в поверхностном слое (толщиной d) тела выделяется энергия с удельной объемной плотностью P_v за время t приращение температуры поверхности ΔT описывается выражением

$$\Delta T = \frac{\alpha P_v t}{K} [1 - 4\Phi_2(1 / 2\sqrt{\alpha t})], \quad (27)$$

где
$$\Phi_2(x) = [(1 + 2x^2)(1 - \operatorname{erf}(x)) - 2x \exp(-x^2) / \sqrt{\pi}] / 4; \quad (28)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\varepsilon^2} d\varepsilon - \text{функция ошибок}; \quad (29)$$

$$P_v = P_s / d = P / (\pi R_n^2 d); \quad (30)$$

K — коэффициент теплопроводности;
 $\alpha = K/c \rho$ — коэффициент температуропроводности;
 c — удельная теплоемкость материала диафрагмы;
 ρ — плотность материала.

Значения функций $\operatorname{erf}(x)$ и $(\Phi)_2(x)$ табулированы [3]. При значениях аргумента функции $\Phi_2 x = d / (2\sqrt{\alpha t}) > 1,5$ значение произведения $4\Phi_2(x) < 0,008$.

Это позволяет пренебречь этим членом в формуле (27) и за счет этого упростить формулу при больших значениях аргумента при сохранении приемлемой для практических задач точности:

$$\Delta T = \frac{\alpha P_s t}{d K}. \quad (31)$$

Формула (31) пригодна для малых длительностей воздействия пучка и соответствует адиабатическому процессу нагрева.

При вращении пучка по диафрагме время воздействия пучка на каждую точку может быть оценено по формуле:

$$t = 2R_n / V, \quad (32)$$

где V — линейная скорость перемещения пучка по диафрагме, определяемая R_6 частотой переменного напряжения (f), приложенного к ОСБ, или периодом t_0 :

$$V = R_6 2\pi f = R_6 2\pi / t_0. \quad (33)$$

С учетом (32, 33) выражение (31) преобразуется к виду:

$$\Delta T = \frac{\alpha P}{K \pi R_6 R_{\Pi} d} t_0 (1 - 4 \Phi_2(d / 2\sqrt{\alpha t_0})). \quad (34)$$

Введем безразмерную переменную

$$n = d / 2\sqrt{\alpha t_0} = d / 2\sqrt{\alpha / f}, \quad (35)$$

тогда выражение (34) можно преобразовать к виду:

$$\Delta T = \frac{d P}{K R_6 R_{\Pi}} F(n); \quad (36)$$

где

$$F(n) = \frac{1}{4\pi n^2} (1 - 4 \Phi_2(n)), \quad (37)$$

$F(n)$ — универсальная функция, пригодная для оценки колебаний температуры поверхности диафрагмы, облучаемой вращающимся пучком, при любых материалах и режимах. Рассчитанные значения этой функции приведены в таблице.

n	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60
$F(n)$	1,093	0,523	0,333	0,239	0,183	0,146	0,119	0,100	0,085	0,073	0,056
n	0,70	0,80	0,90	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	2,20	2,40
$F(n)$	0,044	0,035	0,029	0,024	0,017	0,013	0,010	0,008	0,006	0,005	0,004

Для практического использования универсальной функции задаемся допустимым значением ΔT и с помощью формулы (36) определяем требуемое значение функции $F(n)$. Затем по таблице определяется соответствующее значение n , по которому с помощью (35) определяется минимальная частота вращения пучка, обеспечивающая заданную величину колебания температуры поверхности.

В качестве примера была рассчитана величина пульсаций температуры в зависимости от частоты для медной диафрагмы при ускоряющем напряжении 50 кВ, $R_{\Pi} = 0,3$ см, $R_6 = 1,5$ см, $P = 500$ Вт. Расчет показал, что при уровне пульсаций 50 °С минимальная частота вращения пучка должна быть выше 10 кГц.

Из закона сохранения энергии и уравнения теплопроводности следует, что в установившемся режиме средняя температура поверхности $T_{\text{ср}}$ определяется формулой

$$T_{\text{ср}} = T_x + P R_T. \quad (38)$$

где R_T — тепловое сопротивление системы отвода тепла;

T_x — температура холодного конца системы теплоотвода.

Учитывая, что мощность, выделяемая на диафрагме в технологической установке, может варьироваться в пределах от сотен ватт до киловатт, представляется целесообразным использовать для охлаждения диафрагмы воду, а саму диафрагму выполнять из меди, обладающей из доступных конструкционных материалов наиболее высокими значениями коэффициентов тепло- и температуропроводности.

Используя полученные формулы, оценим предельную мощность, которую может рассеивать водоохлаждаемая медная диафрагма при круговой развертке пучка. Примем, для определенности, что плоская диафрагма имеет толщину 1 см, $R_{\Pi} = 0,3$

s и $R_6 = 1,5$ см. Чтобы исключить возможность вскипания воды на поверхности диафрагмы и снижения за счет образования пара теплопередач от диафрагмы к воде, температура контактирующей с водой поверхности диафрагмы не должна превышать 90—100 °С. При этом необходимо создание турбулентного потока охлаждающей воды в рекомендациях [4] это исключает возможность кипения. Согласно [4], удельная мощность, отдаваемая воде при турбулентном ее движении в щелевом зазоре, может быть рассчитана по формуле:

$$P_w = 4,19(T_x - T_B)\beta \quad (\text{Вт/см}^2), \quad (39)$$

где $\beta = 0,0239 A v^{0,8} / \delta^{0,2}$;

A — табулированная константа, зависящая от температуры воды (при температуре 30 °С $A = 0,139$);

v — скорость течения воды;

T_B — температура охлаждающей воды;

δ — ширина щели, по которой протекает вода.

При $v = 50$ см/с, $\delta = 0,2$ см и $(T_x - T_B) = 70^\circ\text{C}$ $P_w = 31$ Вт/см².

Пусть $S_x = 16$ см² — площадь диафрагмы, контактирующая с водой, тогда мощность, которая выделяется на диафрагме, не должна превышать 500 Вт.

Оценим максимальную температуру поверхности диафрагмы, облучаемой электронным пучком. Тепловое сопротивление системы (за счет большой толщины стенки) можно оценить по формуле

$$R_T = \frac{2D}{K(S + S_x)}, \quad (40)$$

где S — площадь кольцевой зоны нагрева, рассчитываемая по формуле (24).

Из (38) следует, что средняя температура горячей поверхности диафрагмы в рассмотренном примере не превышает 160 °С. Из опыта разработки мощных генераторных водоохлаждаемых ламп [4] известно, что температура облучаемой электронами поверхности не должна превышать 500 °С. Полученное с помощью (3) значение почти в три раза ниже критического значения температуры, что гарантирует устойчивую работу диафрагмы в рассмотренном режиме. При этом, если ширина щели, по которой протекает вода, равна 2 см, то расход воды составит 20 см³/с, а нагреется она на 6 °С.

Проведенные оценки дают основания полагать, что при оптимизации системы теплоотвода диафрагмы, конструкции электронно-оптической системы и системы развертки пучка, мощность, рассеиваемая диафрагмой, может быть повышена более чем на порядок.

При заданном конструктивном расстоянии L_2 от центра отклонения до ограничивающей диафрагмы ОСБ должна обеспечивать отклонение пучка на угол, определяемый формулой (23). Могут быть использованы как магнитные, так и электростатические ОС, и выбор диктуется только конструктивными сложностями того или иного варианта и требованиями к длительности импульсов и крутизнам фронтов формируемых импульсов тока [5].

Следует отметить одну очень благоприятную для конструктора особенность системы бланкирования пучка: aberrации отклоняющей системы не влияют на формируемый импульс тока, так как при прохождении через диафрагму рабочего тока отклоняющее поле отсутствует. Поэтому в качестве отклоняющих систем

могут быть использованы простейшие конструкции ОС с высокой чувствительностью отклонения, хотя и обладающие высокими aberrациями.

Основным требованием, предъявляемым, к ОС, является их быстродействие, определяемое задаваемыми технологией длительностью импульсов тока и требуемой крутизной фронтов. Практически в технологических установках требуются фронты длительностью порядка микросекунды при длительности импульса от нескольких микросекунд до бесконечности (режим юстировки).

Известно, что в первом приближении угол отклонения пучка в однородном электростатическом поле плоского конденсатора определяется выражением:

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{v_1 l}{2U_a d_0}, \quad (41)$$

а в однородном магнитном поле:

$$\sin \alpha_0 = \frac{eBl}{mv}, \quad (42)$$

где v_1 — разность потенциалов, поданных на ОС;

l — протяженность поля вдоль оси установки;

d_0 — расстояние между пластинами ОС;

e, m, v — соответственно, заряд, масса и скорость электрона.

Из приведенных формул видно, что конструктивные требования, предъявляемые к ОС, достаточно противоречивы:

зазор (проходной диаметр) в ОС должен быть достаточно велик, чтобы отклоненный пучок не задевал край ОС, но увеличение зазора снижает напряженность отклоняющего поля, требует повышения возбуждения ОС;

увеличение протяженности поля увеличивает чувствительность отклонения, но при этом требует увеличения проходного диаметра и сдвигает центр отклонения ближе к диафрагме, что приводит к соответствующему снижению чувствительности.

Частотные характеристики ОС в значительной мере определяются резонансной частотой, определяемой для магнитных ОС индуктивностью и величиной паразитных емкостей (как междувитковых, так и образованных емкостью монтажа). Для электростатических ОС резонансная частота определяется суммарной емкостью ОС и емкостью монтажа и паразитной индуктивностью подводящих проводов, которая может быть достаточно малой. Поэтому электростатические ОС, как правило, более высокочастотны, нежели магнитные [5].

Наличие резонансных свойств у ОС приводит к тому, что при изменении их возбуждения (за время фронта импульса) в ОС возникают высокочастотные колебания, воздействующие на проходящий электронный пучок. Это воздействие особенно опасно, когда поле отклонения обращается в нуль, так как поле паразитных колебаний в этом случае может влиять на амплитуду тока, обрабатываемого изделия, а также изменять положение пучка на изделии. Для подавления влияния паразитных колебаний должны быть приняты конструктивные меры для снижения паразитных индуктивностей и емкостей, а емкость (соответственно — индуктивность) ОС должна быть минимизирована. Желательно, чтобы выполнялось условие $f_{\text{рез}} \gg 1/\tau$. Кроме того, для подавления паразитных колебаний должны быть приняты меры по снижению добротности паразитного контура с тем, чтобы сделать колебательный процесс аperiodическим и быстро затухающим, используя, например, результаты, полученные в работе [5]. Желательно также, чтобы источник импульсного напряжения, питающий ОС, вносил затухание в паразитный контур при нулевом уровне сигнала.

Определенные трудности при разработке системы бланкирования связаны с созданием ОС, для которой при существующих комплектующих изделиях можно создать достаточно простое, надежное и недорогое электропитание.

Приемлемая конструкция электростатической ОС при $U_a = 50$ кВ требует напряжения сигнала в пределах 500—1000 В, что усложняет источник управления ОС.

Разработка магнитной ОС также требует определенного компромисса между электронно-оптическими, высокочастотными, конструктивными требованиями и возможностями создания источника электропитания с требуемыми параметрами. Согласно (42), угол отклонения прямо пропорционален значению магнитной индукции B и, следовательно, пропорционален ампер-виткам возбуждения ОС. Из этого следует, что для снижения тока возбуждения и упрощения источника питания целесообразно увеличивать число витков в ОСБ. Однако возможности увеличения угла отклонения за счет увеличения числа витков весьма ограничены, так как индуктивность ОСБ растет пропорционально квадрату числа витков, что снижает резонансную частоту ОСБ. Кроме того, из определения ЭДС самоиндукции следует, что при линейном нарастании тока на фронте импульса

$$\mathcal{E}_{ДС} = \frac{L I}{\tau_{\Phi}}, \quad (43)$$

где I — амплитуда импульса тока в ОС;

τ_{Φ} — длительность фронта импульса.

Очевидно, что максимальное значение тока определяется максимальным током, который может отдать источник питания при использовании существующих транзисторов. ЭДС также не может превышать постоянное напряжение U , подаваемое на выходные транзисторы источника питания ОС. Используя эти ограничения, можно при заданном ограничении длительности фронта импульса оценить по формуле (43) максимально допустимое значение индуктивности ОС. Например, при $I = 5$ А, $U = 60$ В и $\tau_{\Phi} = 1$ мкс индуктивность не должна превышать 12 мкГн.

Выводы

1. Проведен анализ особенностей работы электронной пушки прецизионного электронно-лучевого технологического оборудования в импульсном режиме. Получены формулы для оценки влияния различных факторов на стабильность технологических параметров электронного пучка.

2. Оценены достоинства и недостатки использования метода бланкирования электронного пучка в технологическом электронно-лучевом оборудовании. Показано, что метод бланкирования имеет существенные преимущества перед традиционным методом модуляции тока электронной пушки импульсным напряжением. Метод позволяет стандартизировать технологию размерной обработки на электронно-лучевых установках разных конструкций, обеспечивая стабильность амплитуды, формы и энергии обрабатываемых импульсов тока, а также стабильность удельной мощности в зоне обработки.

3. Показана возможность использования метода бланкирования в электронно-лучевом оборудовании средней мощности при использовании двухкоординатной отклоняющей системы и водоохлаждаемой ограничивающей диафрагмы.

4. Получены формулы для инженерного расчета основных элементов системы бланкирования.

Л и т е р а т у р а

1. Шиллер Э., Гайзинг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. — М.: Энергия, 1980.
2. Шерстнев Л. Г. Электронно-лучевые приборы. — М. — Л.: Энергия, 1966.
3. Карлслюу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. — М.: Наука, 1964.
4. Цорев Б. М. Расчет и конструирование электронных ламп. — М.: Госэнергоиздат, 1952.
5. Бонштедт Б. Э., Маркович М. Г. Фокусировка и отклонение пучков в электронно-лучевых приборах. — М. Сов. радио, 1967.

SOME PROBLEMS OF CONSTRUCTING BEAM MODULATION SYSTEMS FOR TECHNOLOGICAL ELECTRON BEAM MILLING DEVICES

L. B. Rosenfeld, A. M. Filachev

Research Institute for Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

The properties of different types electron beam modulation systems for impulse technological devices and their stability was discussed. There are recommendations for calculation and construction of blanking systems for precise technological middle power devices. The recommendations for calculation and construction of blanking systems for precise technological middle power devices are proposed.