

ПРИМЕНЕНИЕ СТЕРЖНЕВЫХ ОБРАТНЫХ ТОКОПРОВОДОВ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВАКУУМНОГО ДИОДА

© 2013 г. Э. Н. Абдуллин, А. В. Морозов

*Институт сильноточной электроники СО РАН
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 10.07.2012 г.
После доработки 20.08.2012 г.

Приведены результаты физического моделирования и численных расчетов магнитного поля мощного вакуумного диода с большим поперечным сечением электронного пучка в отсутствие и при установке в диоде обратных токопроводов в виде стержней. Показано, что применение стержней позволяет уменьшить индукцию магнитного поля на краю пучка, при этом поле в центральной части диода возрастает. Установлено, что распределение магнитного поля в межэлектродном промежутке катод–анод в присутствии стержней зависит от величины зазора между обратной стороной катода и стенками вакуумной камеры. Найдено расположение стержней, обеспечивающее двукратное снижение индукции магнитного поля на краю катода при приемлемом росте индукции в центральной части.

DOI: 10.7868/S0032816213030166

ВВЕДЕНИЕ

Современные электронные ускорители на основе вакуумных диодов со взрывоэмиссионными катодами позволяют получать электронные пучки с энергией электронов 500–600 кэВ, током до 10^5 – 10^6 А, поперечным сечением ≥ 1 м². Областями применения ускорителей являются возбуждение мощных газовых лазеров, защита окружающей среды, технология.

Одним из наиболее важных факторов, оказывающих влияние на формирование электронного пучка, является магнитное поле вакуумного диода. Ввиду большого поперечного сечения пучка собственные магнитные поля пучка оказываются большими. Наличие таких магнитных полей приводит к искривлению электронных траекторий, увеличению потерь энергии на ребрах опорной структуры и в фольге окна, через которое выводится электронный пучок. Дополнительный вклад в искривление электронных траекторий могут давать магнитные поля токов, протекающих по электродам вакуумного диода.

Для уменьшения влияния магнитного поля на формирование пучка используют секционирование диода — деление диода на ряд магнитно-экранированных друг от друга диодов с приемлемой величиной магнитного поля. Такое деление может быть достигнуто в результате непосредственной замены электронного ускорителя ускорителями с меньшими электронными токами [1].

Распространенным вариантом секционирования является установка в диоде обратных токопроводов в виде пластин, осуществляющих маг-

нитное экранирование частей диода друг относительно друга [2]. Недостатком секционирования является необходимость обеспечения значительных межэлектродных зазоров между катодами и заземленными корпусами ускорителей или пластинами обратного тока, организации подведения тока к катодам магнитно-экранированных диодов, что связано со значительными изменениями конструкции, увеличением размеров диода.

Другим вариантом снижения магнитного поля может быть размещение обратных токопроводов в виде пластин небольшого размера или стержней непосредственно в диоде. Деления диода в этом случае не происходит, а уменьшение магнитного поля достигается за счет перераспределения токов, уменьшения токов, протекающих через края катода. Важным достоинством этого варианта является то, что установка стержней не требует существенных изменений конфигурации и размеров диода.

В данной работе приводятся результаты исследования эффективности снижения магнитного поля мощного вакуумного диода с большим поперечным сечением пучка при размещении в диоде обратных токопроводов в виде стержней. Представлены результаты физического моделирования, а также численных расчетов магнитного поля. Предложен вариант размещения стержней обратного тока для уменьшения магнитного поля электронного диода установки [3].

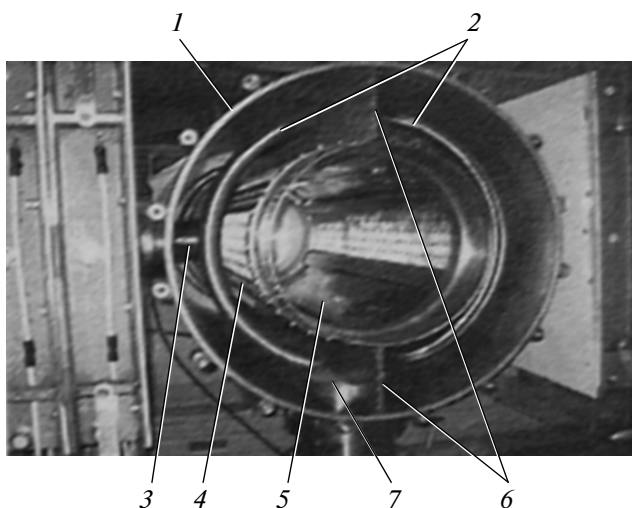


Рис. 1. Устройство диода. 1 – вакуумная камера; 2 – катоды магнитно-экранированных вакуумных диодов; 3 – токоввод; 4 – фольговое окно; 5 – кювета; 6 – пластины; 7 – патрубки насосов.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДИОДА

Устройство электронного диода проиллюстрировано рис. 1, заимствованным из [3]. Электронный диод предназначен для получения радиально сходящегося электронного пучка, используемого для возбуждения газовой смеси. Электронный диод размещен в вакуумной камере 1 диаметром 740 и длиной 1440 мм и образован двумя магнит-

но-экранированными друг от друга вакуумными диодами.

Катоды 2 вакуумных диодов изготовлены из листов нержавеющей стали с размерами 1100×770 мм и имеют форму части боковой поверхности цилиндра $\varnothing 568$ мм. Функции токовводов выполняют вакуумные коаксиалы 3 с диаметрами внутреннего и внешнего проводников соответственно 140 и 200 мм. Каждый катод содержит три эмитирующие поверхности с размерами 1100×160 мм, расположенные напротив фольговых окон 4 вдоль оси кюветы 5, являющейся анодом. Кювета устанавливается соосно с вакуумной камерой с помощью магнитоизолирующих пластин 6. Диаметр кюветы 450 мм, длина активной области 1.1 м. Величина межэлектродного зазора катод–анод 50 мм. Расстояние между тыльной поверхностью катода и стенкой вакуумной камеры ~ 90 мм. При напряжении 500 кэВ ток электронного пучка каждого магнитно-экранированного диода составляет 110 кА, длительность импульса тока пучка по основанию равна ~ 350 нс.

Моделирование позволяет с помощью прямых измерений магнитного поля на модели при малых уровнях тока получить надежные данные о магнитном поле в реальном диоде. Устройство модели, положения датчика индукции магнитного поля, а также результаты измерений магнитного поля в отсутствие и при наличии стержней в диоде представлены ниже соответственно на рис. 2 и 3.

Конструкция модели с точки зрения конфигурации создаваемых магнитных полей в целом со-

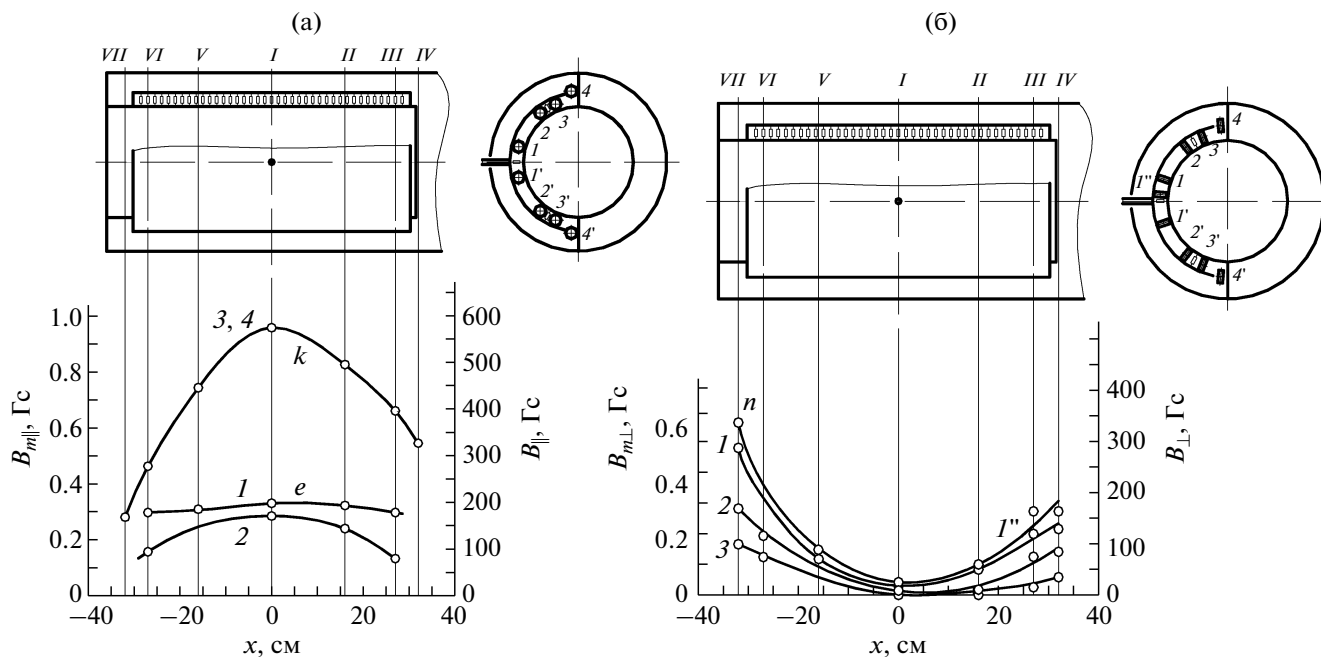


Рис. 2. Схема эксперимента и результаты измерений распределения $B_{m\parallel}$ - (а) и $B_{m\perp}$ -компоненты (б) магнитного поля в направлении вдоль оси кюветы. Расположение демпферных сопротивлений показано тонкими линиями.

ответствовала устройству диода. Электроды модели в форме цилиндров, замещающих вакуумную камеру и кювету, а также катод и магнитоизолирующие пластины изготавливались из листов нержавеющей стали и алюминия толщиной 1.5 мм (рис. 2 и 3). Цилиндры могли соединяться с боковым фланцем, изготовленным из стали толщиной 10 мм. Второй боковой фланец отсутствовал.

Эксперименты проводились с одним магнитно-экранированным диодом. Ось симметрии катода параллельна оси x кюветы. Отсчет расстояний вдоль x производился от плоскости симметрии катода, проходящей через ось токоввода, перпендикулярной оси камеры. Размеры электродов модели составляли приблизительно 0.52 от размеров реального диода (уменьшены в 1.92 раза). Исключениями являлись длина наружного цилиндра, а также диаметры токоввода и отверстия в наружном цилиндре, составлявшие ~ 0.6 и $0.04-0.07$ от размеров в диоде.

Ток эмитирующих частей катода моделировали токком сопротивлений МЛТ-1-51 Ом. Сопротивления, соответствующие трем эмитирующим частям, располагали в три ряда вдоль образующих катода. Число сопротивлений в ряду 39, длина ряда 570 мм, расстояние между рядами сопротивлений, измеренное вдоль поверхности катода, 160 мм.

Обратными токопроводами являлись 8 стержней $\varnothing 6$ или $\varnothing 10$ мм, соединяющих кювету с камерой (рис. 3). Стержни устанавливались по осям отверстий $\varnothing 12$ или $\varnothing 60$ мм в катоде на одинаковых расстояниях от рядов сопротивлений симметрично относительно плоскости симметрии катода, проходящей через токоввод и перпендикулярной оси кюветы. Расстояния от плоскости симметрии до стержней составляли 90 и 190 мм или 90 и 220 мм.

Импульс напряжения к катоду амплитудой 7.5 кВ подавался от кабельного генератора. Амплитуда тока модели составляла 95 А, длительность импульса тока – 800 нс.

Датчиком магнитного поля служила катушка индуктивности с обмоткой $\varnothing 25/20$ мм и длиной 5 мм, содержащей 125 витков, нагруженная на сопротивление 5 кОм. Чувствительность датчика 82 мГс/В. В зависимости от ориентации оси катушки измеряли параллельную ($B_{m\parallel}$) или перпендикулярную ($B_{m\perp}$) оси кюветы компоненту индукции магнитного поля.

Катушку устанавливали между катодом и анодом в положениях $I-3$, $I'-3'$ и I'' в плоскостях $I-VII$, I'' , III' , V' , VI' , перпендикулярных оси кюветы, а также в плоскости катода в положениях $4, 4'$ и в плоскостях IV, VII (рис. 2 и 3). В последнем случае полученные данные использовались для расчета циркуляции вектора напряженности магнитного поля по замкнутому контуру вокруг катода и соответственно полного тока, проходящего

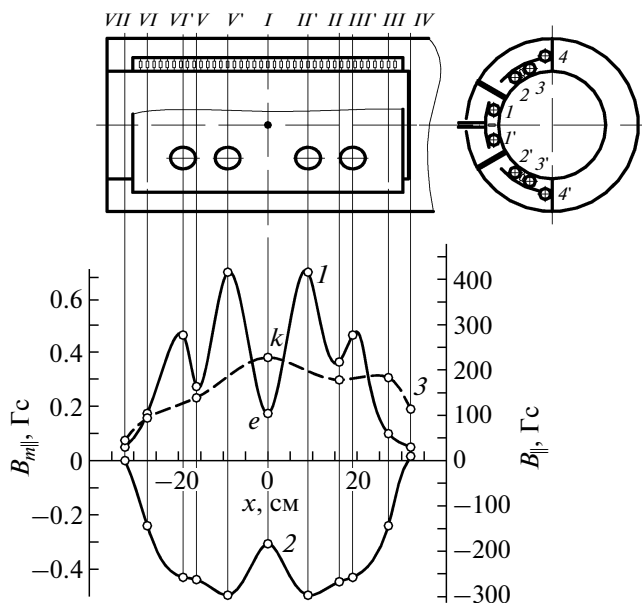


Рис. 3. Устройство модели, схема и результаты измерений $B_{m\parallel}$ -компоненты магнитного поля в присутствии стержней в диоде. Расположение стержней в отверстиях в катоде показано на виде сбоку.

через контур. Точками e, k, n обозначены положения катушки $I-1, I-4, VII-I''$, близкие к точкам пересечения краев эмитирующих поверхностей с плоскостями симметрии в реальном диоде.

В соответствии с законом полного тока

$$\oint H dl = I \tag{1}$$

напряженность H или индукция магнитного поля увеличивается пропорционально с ростом тока I и уменьшается обратно пропорционально с увеличением линейных размеров l . В этой связи значения параллельных и перпендикулярных оси кюветы компонент магнитного поля диода B_{\parallel} или B_{\perp} оценивали по результатам измерений с помощью соотношений

$$\begin{aligned} B_{\parallel} &= B_{m\parallel} (I/I_m) / (d/d_m), \\ B_{\perp} &= B_{m\perp} (I/I_m) / (d/d_m), \end{aligned} \tag{2}$$

где I, I_m, d, d_m – значения токов и расстояний между соответствующими точками в диоде и на модели. С учетом увеличения размеров электродов при переходе от модели к диоду в 1.92 раза и роста тока с 95 А до 110 кА получим

$$B_{\parallel}, B_{\perp} \approx 600 (B_{m\parallel}, B_{m\perp}). \tag{3}$$

Величину токов обратных токопроводов получали, вычитая из тока генератора значение полного тока, соответствующее циркуляции вектора напряженности магнитного поля по замкнутому контуру, охватывающему поперечное сечение катода, а также по результатам непосредственных

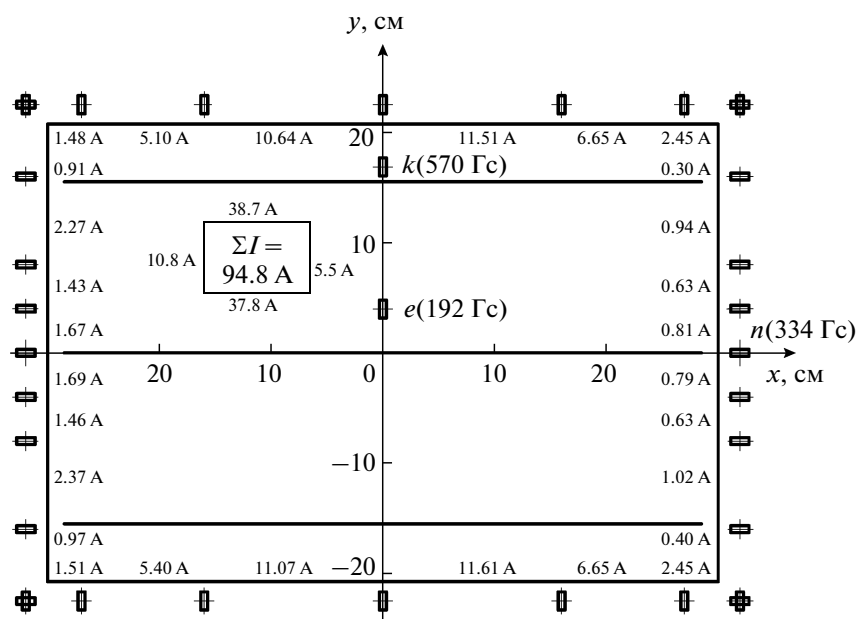


Рис. 4. Распределение тока, поступающего на эмитирующую сторону, по периметру катода в отсутствие стержней.

измерений токов стержней с помощью пояса Роговского.

Измерения показали, что в отсутствие обратных токопроводов магнитное поле в диоде достаточно велико. Индукция $B_{m\parallel}$ вблизи середины центрального ряда сопротивлений в характерной точке e (положение датчика $I-I$ на рис. 2а), соответствующей точке вблизи края центральной эмитирующей части в реальном диоде, составляет 0.32 Гс, что после пересчета по формуле (3) приводит к индукции в диоде $B_{\parallel} = 192 \text{ Гс}$. Индукция уменьшается по мере приближения к крайнему ряду сопротивлений. Наибольшие значения индукции наблюдаются в точке k на краю катода при положении датчика $I-4$. Компонента индукции $B_{m\parallel}$ составляет 0.95 Гс, что соответствует индукции на краю катода или электронного пучка в реальном диоде $B_{\parallel} = 570 \text{ Гс}$.

Значения компоненты индукции $B_{m\perp}$ в межэлектродном промежутке относительно невелики (рис. 2б). Наибольшее значение $B_{m\perp}$ наблюдается вблизи конца центрального ряда сопротивлений (точка n , положение датчика $VII-I''$) и составляет 0.56 Гс, что соответствует $B_{\perp} = 334 \text{ Гс}$ в диоде.

Поступление тока от токоввода на эмитирующую сторону происходит в основном через длинные стороны катода. В соответствии с законом полного тока поверхностная плотность тока в проводнике численно равна напряженности магнитного поля над поверхностью проводника [4], в связи с чем большие значения напряженности поля на краю катода свидетельствуют о большой поверхностной плотности тока.

На рис. 4 показана развертка катода модели с указанием мест расположения датчика при измерении индукции на периферии катода. Здесь же нанесены значения токов, протекающих через участки катода между соседними положениями датчика, полученные при расчете циркуляции вектора напряженности магнитного поля по контуру, охватывающему поперечное сечение катода.

Для справки в рамке приведено значение полного тока по данным расчета, по краям рамки приведены значения токов, поступающих через соответствующие стороны катода, а также жирными линиями при $y = 0$ и $y = \pm 16 \text{ см}$ обозначены положения рядов сопротивлений, показаны положения датчика e, k, n из рис. 2 с рассчитанными для диода значениями индукции.

Из приведенных данных видно, что доля тока, поступающего к эмитирующим частям через длинные стороны катода в направлении, перпендикулярном оси кюветы, составляет $\sim 80\%$. Доля тока, поступающего со стороны бокового фланца, уменьшается приблизительно на 20%, если между фланцем и кюветой нет электрического контакта. Суммарный ток, охватываемый контуром, по результатам расчета составляет 94.8 А и соответствует току кабельного генератора.

Значения ларморовского радиуса r_L и угла α влета электронов в фольгу можно найти из соотношений

$$r_L = \frac{mc}{qB} \sqrt{\gamma^2 - 1}, \quad (4)$$

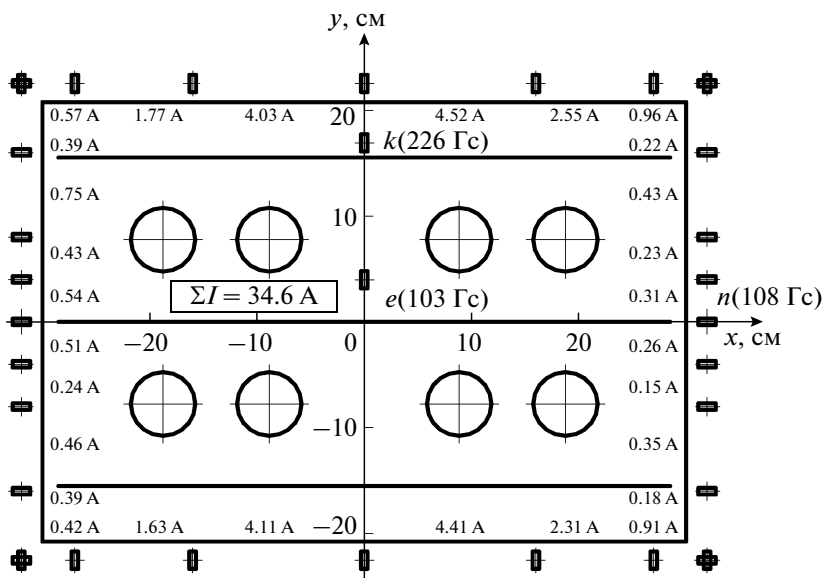


Рис. 5. Распределение тока по периметру катода при наличии стержней в диоде.

$$\alpha = \arcsin \frac{d}{r_L}, \quad (5)$$

где q и m – заряд и масса покоя электрона, c – скорость света, γ – релятивистский фактор, d – межэлектродный зазор. Угол α отсчитывается от нормали к поверхности электродов.

Для электронов с энергией 500 кэВ при $B = 570$ Гс (в точке k на краю катода) найдем, что $r_L = 5.1$ см и практически равен межэлектродному зазору, в связи с чем возможны значительные потери энергии при вводе электронного пучка через фольговые окна в кювету. При $B = 334$ Гс (в точке n) получим $r_L = 8.6$ см, $\alpha = 36^\circ$. Заметим, что в реальном диоде углы влета электронов в фольгу на краях катода могут уменьшаться под действием электрического поля.

Установка стержней обратного тока в межэлектродном промежутке приводит к значительному уменьшению тока, протекающего через края катода, и соответственно уменьшению магнитного поля. Распределения магнитных полей в диоде и токов на развертке катода, полученные при использовании стержней, установленных на расстояниях 90 и 190 мм от плоскости симметрии катода, приведены на рис. 3 и 5.

По сравнению с распределением на рис. 2а и 4 магнитное поле на краю центрального ряда сопротивлений (в точке e) уменьшается до 0.17 Гс (103 Гс в диоде). Магнитное поле на краю катода (точка k) равно 0.37 Гс (226 Гс в диоде). Магнитное поле на конце центрального ряда сопротивлений составляет 0.18 Гс и соответствует 108 Гс в реальном диоде. Появляются области с высокой индукцией вблизи центрального ряда сопротивле-

ний, обусловленные протеканием тока стержней, однако они достаточно компактны.

Полный ток, протекающий через контур, охватывающий поперечное сечение катода, равен 32 А, что меньше тока генератора 95 А и соответствует току, поступающему на эмитирующую поверхность через края катода. Недостающие 63 А тока катода поступают на эмитирующую поверхность через отверстия в катоде и возвращаются по стержням в виде обратного тока. Распределение обратного тока между средними и крайними стержнями неравномерно. Ток средних стержней составляет 41.4 А, ток крайних соответственно 21.6 А.

Величина тока стержней слабо зависит от диаметра стержней. Уменьшение диаметра стержней с 10 до 6 мм приводит к уменьшению тока стержней в пределах 10% на 3–4 А. Увеличение расстояния между крайними стержнями с 380 до 440 мм приводит к уменьшению тока стержней приблизительно на ту же величину.

Эксперименты показали, что значительный вклад в распределение магнитного поля в межэлектродном зазоре вносит магнитное поле токоввода, возникающее с тыльной стороны катода в промежутке между обратной поверхностью катода и боковой поверхностью наружного цилиндра. Установка стержней обратного тока приводит к появлению замкнутых контуров на периферии диода, образованных стержнями, поверхностью электродов, магнитоизолирующими пластинами диода.

Изменение магнитного потока токоввода наряду с изменением магнитных потоков в межэлектродном промежутке приводит к появлению

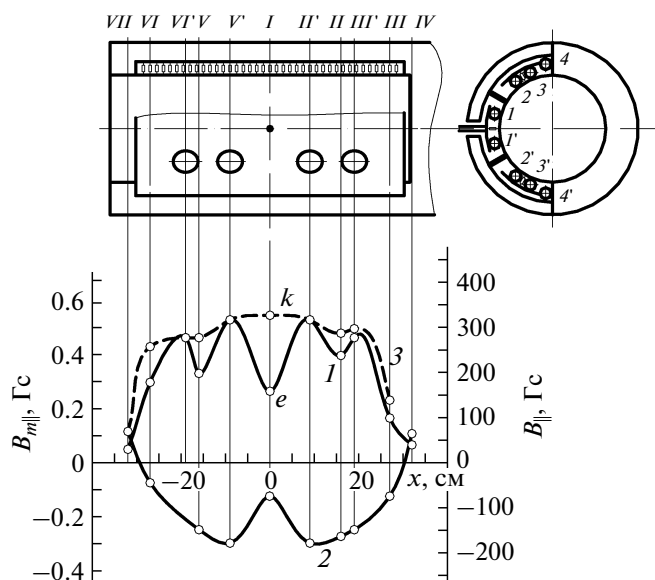


Рис. 6. Схема и результаты измерений B_{\parallel} -компоненты магнитного поля в диоде со стержнями при малой величине зазора между обратной стороной катода и стенками.

в замкнутых контурах индукционных токов, что и является основной причиной получения больших значений токов стержней, неравномерного распределения токов между средними и крайними стержнями.

На рис. 6 и 7 приведены распределения магнитных полей и токов на развертке катода в диоде со стержнями $\varnothing 10$ мм, установленными на расстояниях 90 и 190 мм от центральной плоскости,

полученные при сокращении расстояния между обратной стороной катода и стенками наружного цилиндра до 1–2 мм при сохранении длины межэлектродного зазора катод–анод 30 мм.

Практическое отсутствие магнитного потока, связанного с током токоввода, в этих условиях приводит к тому, что распределение магнитного поля в диоде становится более равномерным, ток стержней уменьшается и составляет 44.3 А. Магнитное поле в точке k на краю пучка увеличивается и равно 0.54 Гс (324 Гс для варианта диода). Магнитные поля в точках e и n равны соответственно 0.26 и 0.107 Гс. Видно, что влияние поля в межэлектродном промежутке является существенным, и это необходимо учитывать при размещении обратных токопроводов в реальном диоде.

2. РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Дополнительные данные о распределении магнитного поля сильноточного диода были получены также в результате численного решения двумерных уравнений Лапласа и Пуассона для векторного потенциала для области межэлектродного зазора катод–анод и промежутка между тыльной стороной катода и стенками вакуумной камеры. Расчеты проводились непосредственно для геометрии сильноточного диода установки [3]. Полученные данные сравнивались с результатами измерений магнитного поля на модели.

Использование двумерных уравнений обусловлено тем, что при малых межэлектродных зазорах и больших радиусах электродов изменения

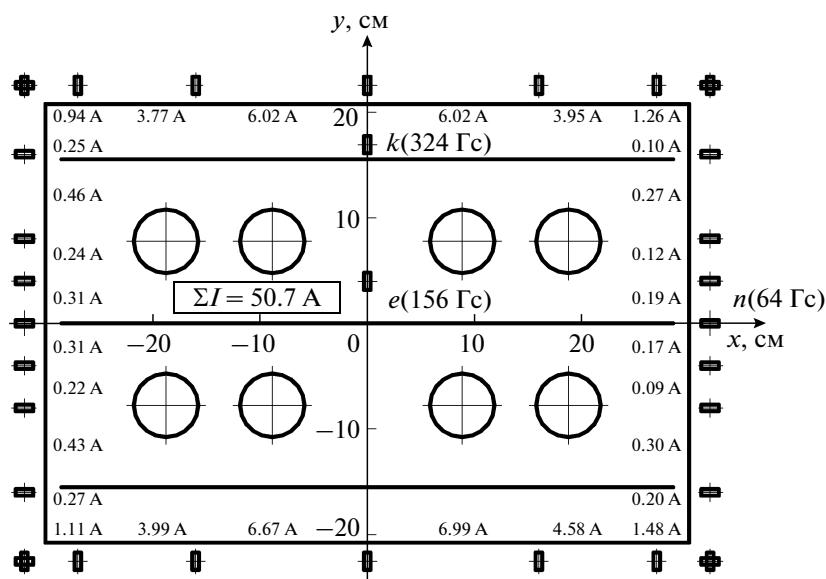


Рис. 7. Распределение тока по периметру катода в диоде со стержнями при малом зазоре между обратной стороной катода и стенками.

ми магнитного поля по радиусу в пределах длин зазоров можно пренебречь в сравнении с изменениями в поперечных направлениях. В этих условиях диод можно рассматривать как плоский, при этом задача расчета поля является двумерной. В двумерном случае магнитное поле описывается одной компонентой векторного потенциала $A_z = A(x, y)$, что упрощает решение задачи.

Расчет проводился методом конечных разностей для 1/4 части диода. Размеры ячейки сетки 0.5 или 1 см. Границами расчетной области с двух сторон являлись плоскости симметрии, проходящие через продольную и поперечную оси катода. С противоположных сторон границами служили стенки вакуумной камеры и боковых фланцев.

В качестве граничных условий использовались условия на плоскостях симметрии, границах пучков с отдельных эмитирующих поверхностей, значения векторного потенциала на стенках вакуумной камеры принимались равными нулю. Размеры эмитирующих поверхностей, расстояния между эмитирующими поверхностями, величины зазоров между катодом и стенками вакуумной камеры соответствовали размерам реальной установки. Плотность тока на эмитирующих участках катода выбиралась равной 20.8 А/см^2 , что соответствовало току катода 110 кА.

Обратные токопроводы при проведении расчетов моделировались стержнями прямоугольного сечения $20 \times 20 \text{ мм}^2$. Стержни размещались между эмитирующими частями вдоль образующих катода симметрично относительно центральной плоскости. Число стержней, как и в модели, равно 8 на один магнитно-экранированный диод.

Для учета влияния магнитного потока тока токопровода на величину тока стержней выполнялись две группы вычислений: расчет поля для основного диодного промежутка при наличии стержней и промежутка между тыльной стороной катода и стенкой вакуумной камеры также со стержнями. Далее добивались равенства токов соответствующих стержней в зазорах, что достигалось изменением векторного потенциала стержней.

Решением считалось распределение поля в диоде, при котором токи соответствующих стержней в зазоре катод–анод и промежутке между катодом и стенками были равны или близки друг другу, а суммарный магнитный поток, связанный с изменениями векторных потенциалов стержней в межэлектродном промежутке и за катодом, был бы равен нулю. Равенство нулю магнитного потока в замкнутых контурах рассматривалось как показатель правильности решения, учитывающего наряду с магнитными полями тока диода магнитные поля индукционных токов.

Значения составляющих магнитной индукции B_x, B_y вдоль оси системы и в поперечном направле-

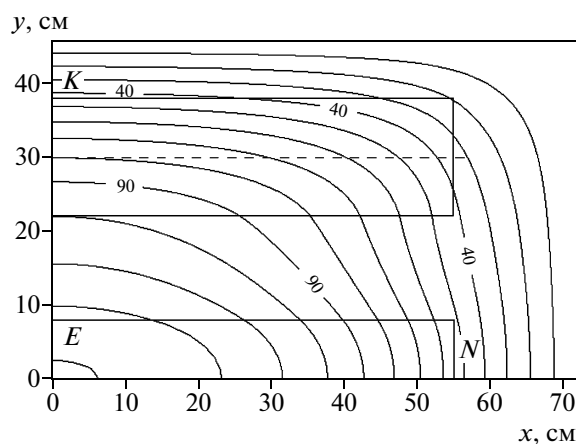


Рис. 8. Картина поля 1/4 магнитно-экранированного диода в отсутствие стержней (числа у кривых соответствуют значениям векторного потенциала в единицах $\text{Гс} \cdot \text{м}$).

нии рассчитывали из получаемых распределений векторного потенциала с помощью формул [4, 5]:

$$B_x = \partial A / \partial y, \quad B_y = -\partial A / \partial x. \quad (6)$$

Ток стержней рассчитывали с помощью закона полного тока (1).

Магнитные потоки Φ , связанные с током стержней, оценивали по формуле

$$\Phi = Ad. \quad (7)$$

Картина поля в отсутствие обратных токопроводов в диоде, построенная по результатам расчетов, показана на рис. 8. Кривые на рисунке являются силовыми линиями магнитного поля, числа у кривых соответствуют значениям векторного потенциала A в единицах $\text{Гс} \cdot \text{м}$. Для наглядности прямоугольниками обозначены границы 1/4-й центральной и половины боковой эмитирующих поверхностей. Точки $E[0, 8]$, $K[0, 38]$, $N[55, 0]$ лежат на пересечениях границ эмитирующих поверхностей с плоскостями или осями симметрии катода и приблизительно соответствуют точкам e, k, n модели.

Зависимости, иллюстрирующие изменения компонент магнитной индукции B_x, B_y вдоль координатных осей, показаны на рис. 9. В областях протекания тока магнитное поле возрастает по мере удаления от начала координат. Величина индукции на краю центральной эмитирующей части в точке E равна $B_x = 178 \text{ Гс}$. Максимальные значения индукции достигаются на краях катода. Значения индукции на краю катода в точках K и N на оси пучка равны соответственно $B_x = 523 \text{ Гс}$ и $B_y = 343 \text{ Гс}$.

Значения индукции в центральной части пучка (точки E и N) близки результатам измерений магнитного поля на модели. Причиной получения меньших, чем при измерениях, значений индукции на краю пучка (точка K) может быть не-

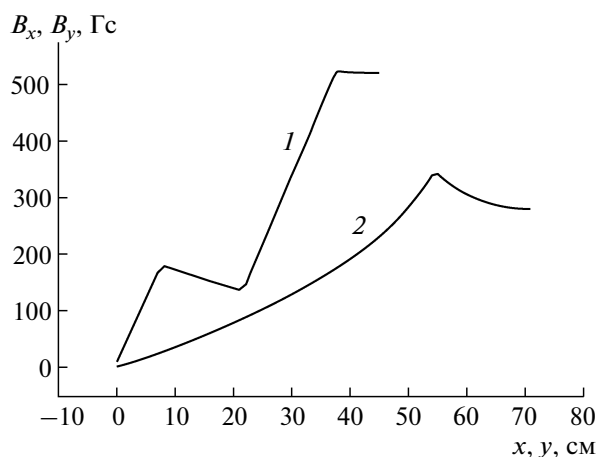


Рис. 9. Зависимости расчетных значений компонент индукции B_x (1) и B_y (2) от расстояния вдоль оси катода и в поперечном направлении.

равномерное распределение по периметру катода тока, поступающего к эмитирующим поверхностям со стороны токоввода.

Применение стержней обратного тока, как и в случае модели, приводит к значительному уменьшению магнитного поля на краях катода, при этом поле в центральной части диода вблизи средних стержней может быть достаточно велико, что связано с большим током стержней. Величина тока стержней, а соответственно и величина магнитного поля в центральной части диода уменьшаются при удалении стержней от плоскости симметрии диода. Учитывая, что поля вблизи центрального ряда сопротивлений в модели при наличии стержней достаточно велики, рассмотрен вариант размещения в одном магнитно-экранированном диоде 8 стержней на расстояниях 23 и 42 см от центральной плоскости.

Картина поля в межэлектродном зазоре катод–анод при данном расположении стержней, рассчитанного по вышеописанной методике с учетом влияния на распределение поля в диоде поля токоввода, приведена на рис. 10. Значения токов крайних и средних стержней в диоде составляют 48.4 и 17.5 кА, при этом векторные потенциалы их равны соответственно -46 и -8 Гс·м.

Значения токов стержней в закатодном пространстве близки к значениям токов в диоде и составляют 49.3 и 15.1 кА, при этом их векторные потенциалы вдвое меньше по абсолютной величине и противоположны по знаку. Учитывая, что межэлектродный промежуток катод–анод приблизительно вдвое меньше расстояния между катодом и стенками, получим, что суммарные магнитные потоки в замкнутых контурах при данных значениях токов стержней, обусловленные нали-

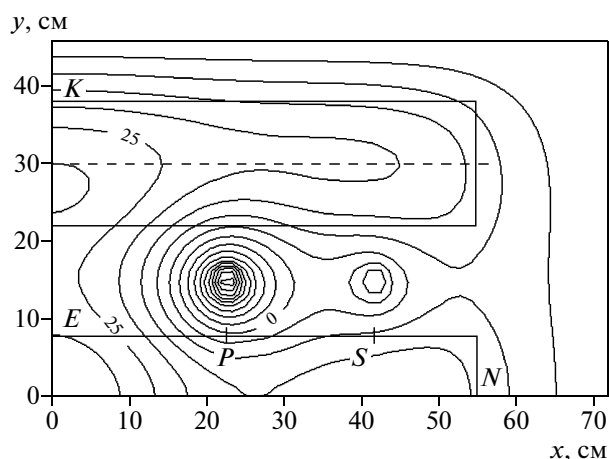


Рис. 10. Картина поля 1/4 магнитно-экранированного диода при наличии стержней (числа у кривых соответствуют значениям векторного потенциала в единицах Гс·м).

чием векторных потенциалов стержней, определенные в соответствии с (7), равны нулю.

Значения компонент индукции на краях центральной эмитирующей части катода в точках E и N равны соответственно $B_x = 102$ Гс и $B_y = 111$ Гс. Существуют области с повышенными значениями индукции вблизи стержней, однако они достаточно локализованы. Значения индукции на краю центральной эмитирующей части напротив стержней (в точках P [23, 8] и S [42, 8]) составляют 428 и 211 Гс, при уменьшении y до 6 см они снижаются соответственно до 300 и 160 Гс. Максимальное значение поля на краю катода в точке K [0, 38] равно 235 Гс и оказывается в два раза меньше индукции на краю пучка в отсутствие обратных токопроводов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты работы показывают, что размещение обратных токопроводов в виде стержней в сильноточном вакуумном диоде с большим поперечным сечением пучка может быть эффективным средством уменьшения индукции магнитного поля на краю катода. Предложен вариант использования стержневых обратных токопроводов для уменьшения магнитного поля на краю катода в электронном диоде установки [3].

Необходимо отметить, что условием успешного применения стержневых обратных токопроводов является обеспечение высокой электрической прочности зазоров между обратными токопроводами и катодом, предотвращение пробоев. При большом числе токопроводов появление даже небольших утечек в зазорах может привести к значительным потерям энергии электронного

пучка. Известными способами повышения электрической прочности межэлектродного промежутка в вакууме являются увеличение радиуса кривизны катода и расстояния между электродами, а также повышение качества обработки поверхности электродов [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абдуллин Э.Н., Бугаев С.П., Ефремов А.М. и др.* // ПТЭ. 1993. № 5. С. 138.
2. *Kovalchuk B.M., Abdullin E.N., Grishin D.M. et al.* // Laser and Particle Beams. 2003. V. 21. P. 219.
3. *Kharlov A.V., Kovalchuk B.M., Volkov S.N. et al.* // Proc. 16 Inter. Symposium on High Current Electronics. Russia, Tomsk: Institute of High Current Electronics SB RAS, 19–24 September, 2010. P. 7.
4. *Говорков В.А.* Электрические и магнитные поля. М.: Энергия, 1968.
5. *Бинс К., Лауренсон П.* Анализ и расчет электрических и магнитных полей / Пер. с англ. М.: Энергия, 1970.
6. *Сливков И.Н.* Процессы при высоком напряжении в вакууме. М.: Энергоатомиздат, 1986.