

12

Газовыделение диэлектрического покрытия анода и его влияние на характеристики ионного диода с изоляцией электронного потока радиальным магнитным полем

© В.С. Лопатин, А.В. Степанов[¶], Г.Е. Ремнев, В.И. Шаманин, А.Е. Вересов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
[¶] E-mail: Stepanovav@mail.ru

Поступило в Редакцию 26 мая 2016 г.

Генерация ионного пучка ионным диодом сопровождается выделением газа из поверхности диэлектрического покрытия анода. Величина импульсного давления газа в вакуумной камере зависит от типа используемого диэлектрика и может достигать $6 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$ mm Hg. Установлена величина предельного давления в вакуумной камере, при которой параметры ионного пучка остаются постоянными. Представлены характеристики тока ионного пучка в диапазоне давлений в вакуумной камере $2 \cdot 10^{-4} - 1.3 \cdot 10^{-3}$ mm Hg.

Мощные ионные пучки (МИП) легких ионов (H^+ , C^{n+}) нашли свое применение в ряде прикладных исследований [1,2]. Для генерации данных пучков, как правило, используют ионные диоды с магнитной изоляцией электронного потока радиальным магнитным полем (ионный V_r -диод), поскольку эффективность их работы достигает 60–80% [3]. В качестве источника плазмы в подобных диодах используют водородосодержащие диэлектрики, которые наносятся на поверхность анода. В процессе образования плазмы диэлектрик подвергается бомбардировке электронами, эмитируемыми с кромок катодов. В результате заряд электронов накапливается и происходит электрический пробой приповерхностного слоя диэлектрика [4], вследствие чего образуются дендриты в материале диэлектрика. Электрический пробой вдоль поверхности анода за счет заряжения поверхности диэлектрика электронами согласуется с моделью [5]. Исследования показали [6], что при использовании эпоксидной смолы в качестве анодного диэлектрика

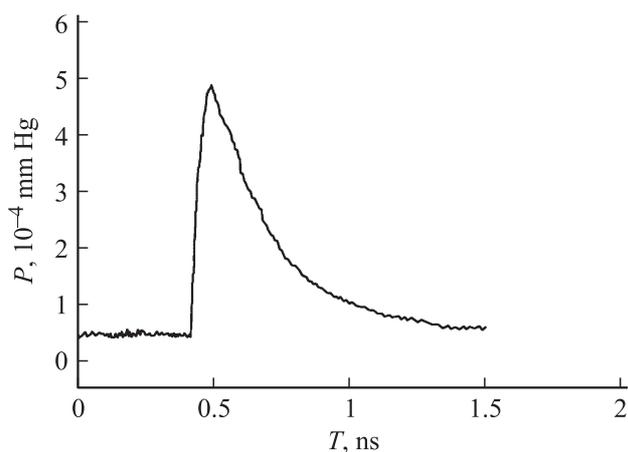


Рис. 1. Импульс давления газа в вакуумной камере при генерации МИП. Диэлектрическое покрытие анода — эпоксидная смола.

дендриты проникают на глубину $90\text{--}225\ \mu\text{m}$. На концах дендриты окружены пузырьками, в которых, как предполагают авторы, находится газ, содержащийся в диэлектрике. Пузырьки газа обнаружены на глубине до $90\ \mu\text{m}$. Также пузырьки могут образоваться и в процессе изготовления диэлектрического покрытия. В этом случае пузырьки могут находиться на произвольной глубине. Электрический пробой приповерхностного слоя диэлектрика может привести к выбросу газа с поверхности диэлектрика, из каналов дендритов и пузырьков, в объем вакуумной камеры. В результате рост давления газа в вакуумной камере может нарушить режим работы V_r -диода.

Цель данной работы — исследовать выделение газа в зависимости от типа диэлектрического покрытия анода и количественное изменение давления в объеме вакуумной камеры. Также необходимо установить влияние изменения давления газа в вакуумной камере на параметры ионного V_r -диода.

Исследования были выполнены на сильноточном ускорителе ТЭУ-500 [7] с частотой следования импульсов МИП $1\text{--}4\ \text{pps}$. Генерация МИП осуществлялась ионным V_r -диодом, конструкция которого описана в работе [8]. В данных исследованиях эмиссионная поверхность

Таблица 1. Давление и энергия МИП для различных анодных покрытий

Покрытие анода	Давление P , mm Hg	Энергия ионного пучка, J
Эпоксидная смола	$6 \cdot 10^{-4}$	90
Полиэтилен	$6 \cdot 10^{-4}$	86
	$5 \cdot 10^{-4}$ (отношение объемов 1:1)	86
Эпоксидная смола + $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	$1 \cdot 10^{-3}$ (отношение объемов 1:3)	□
Эпоксидная смола + мелкоизмельченное железо	$6 \cdot 10^{-4}$	24

анода диода содержала кольцевые канавки трапециевидальной формы, глубина и ширина которых составляет 1.5 и 3 mm соответственно. Канавки заполнялись диэлектриками на основе полиэтилена и эпоксидной смолы. Подробнее параметры ионного диода описаны в [9,10]. Изменение давление в вакуумной камере контролировалось ионизационным манометрическим преобразователем ПМИ-51, который был расположен на стенке вакуумной камеры над анодно-катодной областью ионного диода. В ходе исследований измерялась величина тока коллектора преобразователя ПМИ- 51, пропорциональная давлению в вакуумной камере. Коэффициент преобразования тока в давление соответствовал 1. Линейность показаний ПМИ-51 была установлена в диапазоне давлений $5 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-3}$ mm Hg.

Результаты исследований показали, что генерация МИП сопровождается скачкообразным повышением давления остаточных газов (рис. 1) в объеме вакуумной камеры. Скорость нарастания давления газов превышает скорость откачки объема вакуумной камеры. Основным источником газа является диэлектрическое покрытие анода. Распыление адсорбированного газа на металлических поверхностях V_r -диода и стенок вакуумной камеры при бомбардировке МИП и ускоренными электронами существенно не влияет на величину давления. Установлено, что амплитуда импульсного давления в вакуумной камере зависит от типа диэлектрического покрытия анода (табл. 1).

Для покрытий из полиэтилена или эпоксидной смолы амплитуда импульсного давления достигает $6 \cdot 10^{-4}$ mm Hg. Добавление в эпок-

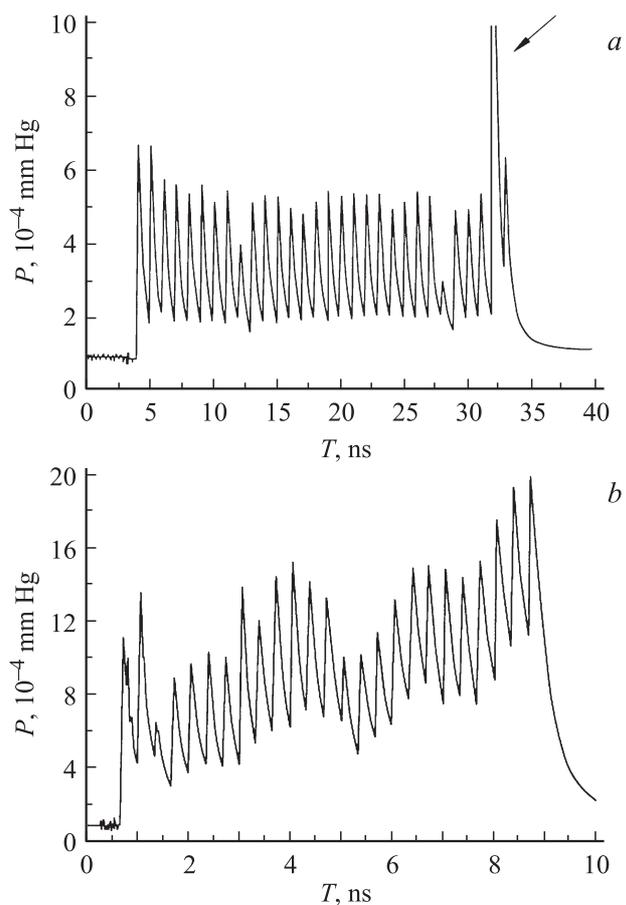


Рис. 2. Изменение давления остаточных газов в вакуумной камере: *a* — частота повторения 1 pps, диэлектрическое покрытие анода — полиэтилен; *b* — частота повторения 4 pps, диэлектрическое покрытие анода — эпоксидная смола.

сидную смолу медного купороса в объемном отношении 1:1 не сказывается на величине давления; увеличение объема медного купороса в покрытии до отношения 1:3 приводит к повышению давления газа до $1 \cdot 10^{-3}$ mm Hg. Использование мелкоизмельченного железа в покрытии

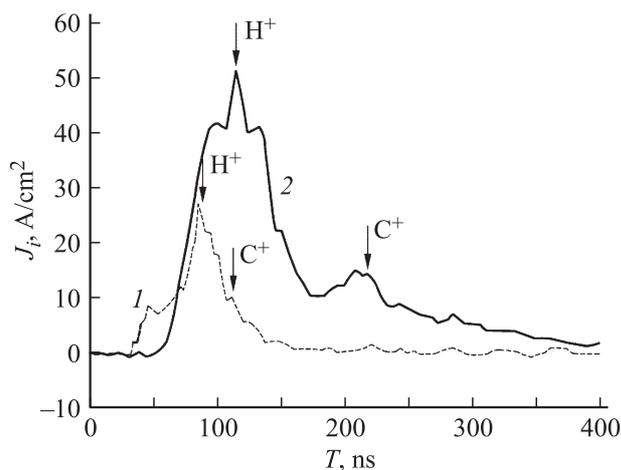


Рис. 3. Плотность тока ионного пучка при различном давлении остаточных газов в вакуумной камере $1.3 \cdot 10^{-3}$ mm Hg. Зависимость от поверхности анода 80 mm (1), от поверхности анода в фокальной плоскости 340 mm (2). Диэлектрическое покрытие анода — эпоксидная смола.

на основе эпоксидной смолы в объемном отношении 1:1 также не влияет на амплитуду импульсного давления газа. Однако добавка мелкоизмельченного железа приводит к снижению энергии ионного пучка в прямой зависимости от концентрации.

Результаты исследования изменения давления в вакуумной камере в серии импульсов МИП с частотой следования от 1–4 prps показаны на рис. 2. Для покрытий на основе полиэтилена и эпоксидной смолы в диапазоне частот 1–3 prps следования импульсов МИП (рис. 2, а) амплитуда давления в вакуумной камере достигает $6 \cdot 10^{-4}$ mm Hg. Среднее значение давления остается постоянным, и к моменту очередного импульса МИП давление в вакуумной камере составляет $2 \cdot 10^{-4}$ mm Hg. В некоторых сериях импульсов МИП наблюдается выход значительного объема газа, который сопровождается увеличением импульсного давления до $\gg 1 \cdot 10^{-3}$ mm Hg (пик давления показан стрелкой на рис. 2, а). Вероятно, это связано со вскрытием пузырьков воздуха, образованных на поверхности диэлектрика при изготовлении покрытия анода. Исследования анодного покрытия на основе эпоксидной смолы и

Таблица 2. Массовый состав ионного пучка

Покрывание анода	Сорт ионов	80 mm от анода	340 mm от анода
Полиэтилен	H ⁺	84%	75%
	C ⁺	16%	25%
Эпоксидная смола +CuSO ₄ · 5H ₂ O	H ⁺	87%	77.4%
	C ⁺	13%	22.6%

медного купороса в объемном соотношении 1 : 1 показали, что скорость откачки вакуумной камеры снижается, и в результате давление газов возрастает от импульса к импульсу.

Это связано с содержанием в данном покрытии молекул воды, пары которой присутствуют и в составе продуктов газовой выделении. В серии импульсов МИП с частотой следования 4 pps давление в вакуумной камере равномерно возрастает (рис. 2, *b*), так как производительности вакуумного насоса недостаточно. Относительное изменение давления за один импульс приблизительно постоянно и составляет $6 \cdot 10^{-4}$ mm Hg. При уровне давления в вакуумной камере $2 \cdot 10^{-3}$ mm Hg диод сохраняет работоспособность. При дальнейшем увеличении давления $5 \cdot 10^{-3}$ mm Hg в анодно-катодном зазоре диода возникает электрический пробой.

Изменение давления остаточного газа в вакуумной камере влияет и на характеристики тока ионного пучка (рис. 3). В исследованиях с эпоксидной смолой в качестве покрытия анода показано, что с ростом давления остаточного газа к моменту очередного импульса МИП от $2 \cdot 10^{-4}$ до $1.3 \cdot 10^{-3}$ mm Hg незначительно увеличивается плотность ионного тока в фокальной плотности диода. Поскольку положительный заряд МИП частично компенсируется зарядом электронов, образованных в результате ионизации молекул остаточного газа ионами МИП, энергия МИП в данном диапазоне давлений оставалась неизменной.

Массовый состав МИП в диапазоне давлений от $2 \cdot 10^{-4}$ до $1.3 \cdot 10^{-3}$ mm Hg не меняется (табл. 2). Доля протонов в составе МИП при транспортировке уменьшается, что связано с неполной компенсацией заряда МИП.

Таким образом, выделение газа из диэлектрического покрытия анода связано с формированием плазмы в анодно-катодной области диода. Вследствие незавершенного электрического разряда в поверхностной

области анодного диэлектрика образуются дендриты [4]. Поскольку диэлектрик обладает низкой теплопроводностью, разогрев диэлектрика происходит на глубину развития дендритов. Вероятно, при разогреве канала дендрита выделяется газ и в канале создается повышенное давление. Газ выходит из канала дендрита длительное время, существенно больше длительности импульса ускоряющего напряжения. С ростом давления в вакуумной камере от импульса к импульсу незначительно увеличивается плотность ионного тока в фокальной плоскости, это происходит вследствие дополнительной нейтрализации заряда ионного пучка. Существует предельная величина давления остаточных газов в вакуумной камере, при которой не изменяются характеристики МИП и сохраняется работоспособность V_r -диода с диэлектрическим покрытием анода. Эта величина составляет $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ mm Hg для ускорителя ТЭУ-500.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФ (проект № 14-19-00439).

Список литературы

- [1] Иванов Ю.Ф., Опекунов М.С., Пузыревич А.Г., Ремнёв Г.Е. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 24. С. 60–65.
- [2] Ремнев Г.Е., Иванов Ю.Ф., Найден Е.П. и др. // ЖТФ. 2009. Т. 7. В. 4. С. 156–158.
- [3] Greenly J.B., Ueda M., Rondeau G.D., Hammer D.A. // J. Appl. Phys. 1988. V. 63. P. 1872–1876.
- [4] Sweeney M.A., Brandenburg J.E., Gerber R.A. et al. // Proc. Fifth International Conference on High Power Particle Beams. CONF-830911. San Francisco, 1984. P. 203.
- [5] Jacobs H., Freely J., Brand F.A. // Phys. Rev. 1952. V. 88. P. 492.
- [6] Johnson D.J., Quintenz J.P., Sweeney M.A. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57(3). P. 794–805.
- [7] Фурман Э.Г., Карпузов С.Б., Кондратьев Н.А. и др. // ПТЭ. 2004. В. 3. С. 130–134.
- [8] Lopatin V.S., Remnev G.E., Furman E.G. et al. // Instrum. Experim. Tech. 2004. V. 47(4). P. 484–488.
- [9] Furman E.G., Stepanov A.V., Furman N.Zh. // Tech. Phys. 2007. V. 77(5). P. 86–95.
- [10] Stepanov A.V., Remnev G.E. // Instrum. Experim. Tech. 2009. V. 52(4). P. 565–568.