

ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК УГЛЕРОДНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ

МАСЛОВ А. И., ДМИТРИЕВ Г. К., ЧИСТЯКОВ Ю. Д.

Описана конструкция импульсного электродугового ускорителя углеродной плазмы торцевого типа, обеспечивающего получение высокопрочных алмазоподобных покрытий на режущем инструменте и деталях технологической оснастки. Измерена средняя энергия ионов углерода, которая изменяется в зависимости от режимов работы источника в интервале 40–80 эВ. Средняя скорость конденсации 15 мкм/ч. Измерены пространственные характеристики импульсного потока плазмы, исследована зависимость стабильности технологических параметров процесса осаждения от ресурса работы источника.

Применение в электронной технике углеродных (алмазоподобных) покрытий, обладающих уникальными свойствами [1–3], ограничено тем, что отсутствуют высокопроизводительные и надежные в работе источники углеродной плазмы. В работах [1, 4, 5] описаны плазменные устройства и исследованы характеристики углеродной плазмы и свойства алмазоподобных покрытий на металлических и диэлектрических подложках. Сообщалось о плазменном источнике с сепаратором, позволяющем получать стационарные потоки углеродной плазмы, очищенные от макрочастиц, комплексов и нейтральных атомов [6].

Определенными технологическими преимуществами обладают импульсные плазменные ускорители (и.п.у), позволяющие генерировать углеродную плазму с энергетическими характеристиками, обеспечивающими образование алмазоподобных конденсатов без дополнительных ускоряющих систем и сепарации плазменного потока [7]. В данной работе приведены результаты исследований источника углеродной плазмы с и.п.у., применяемого для нанесения износостойких углеродных покрытий на рабочие поверхности инструмента, детали технологической оснастки и на изделия электронной техники.

Схема установки изображена на рис. 1. Ускоритель, расположенный в вакуумной камере 1, состоит из цилиндрического катода 2 диаметром 30 мм, изготовленного из графита МПГ-6, аксиально расположенного графитового анода 3 с отверстием $\phi 110$ мм и устройства поджига 4 кольцевого типа, которое обеспечивает надежное возбуждение сильноточной вакуумной дуги на рабочем торце катода. На аноде расположен импульсный соленоид 5, предназначенный для фокусировки плазменного потока. Соленоид включен последовательно в цепь основного разряда, так что магнитное поле возбуждается в нем в момент прохождения тока через и.п.у. Основной накопитель H емкостью 2000 мкФ заряжается с помощью выпрямителя B и индуктивно-ем-

костного преобразователя ИЕП. Система управления СУМ позволяет регулировать напряжение зарядки накопителя в диапазоне 100–500 В и частоту следования разрядных импульсов 0,1–35 Гц. Инициирование основного разряда осуществляется с помощью блока поджига БП, управляемого СУМ. Энергетические затраты на поджиг основного разряда 10 Дж.

Углеродные покрытия наносились на полированные металлические, кремниевые, ситаловые и стеклянные подложки при давлении в вакуумной камере $p \sim 1 \cdot 10^{-3}$ Па. Температура подложки 6 поддерживалась в интервале 50–150 °С. Температура измерялась с помощью медно-константановой термопары 7. Тепловые нагрузки на подложке регулировались изменением частоты следования разрядных импульсов.

Для измерения средней энергии ионов углерода за время разрядного импульса использовался крутильный маятник 8, подвешивавшийся на вольфрамовой проволоке $\phi 0,16$ мм.

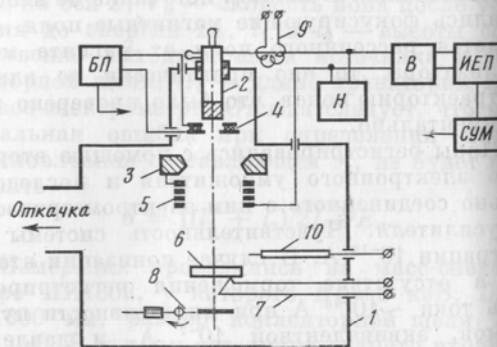


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с и.п.у. 1 — вакуумная камера, 2 — катод, 3 — анод, 4 — узел поджига, 5 — фокусирующий соленоид, 6 — подложкодержатель, 7 — термопара, 8 — крутильный маятник, 9 — пояс Роговского, 10 — электрический зонд. H — накопитель, B — выпрямитель, ИЕП — индуктивно-емкостной преобразователь, СУМ — система управления, БП — блок поджига

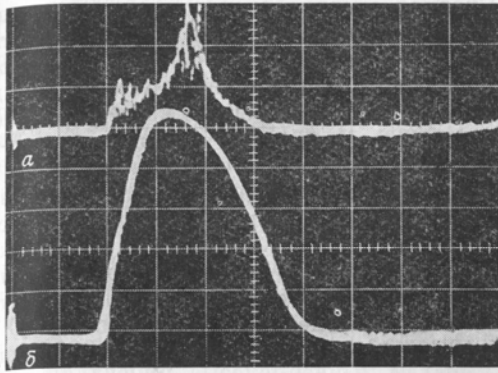


Рис. 2. Осциллограммы сигнала с электрического зонда (а) и разрядного тока (б). Временная развертка 100 мкс/деление. Напряжение на накопителе $U_H = 300$ В, фокусирующее поле $H_\Phi = 150$ Э

Воспринимающим элементом маятника служила кремниевая пластина, расположенная на расстоянии $r = 15$ см от оси вращения. Средняя скорость ионов углерода \bar{v}_i определялась по формуле

$$\bar{v}_i = \frac{2\pi CT}{Nr \sum m_i} \varphi_0, \quad (1)$$

где $C = 0,98$ г·см²/с² — постоянная маятника; T — период колебаний маятника; N — количество разрядных импульсов; m_i — масса, осаждаемая на воспринимающий элемент за один импульс; φ_0 — угол отклонения маятника.

Величина $\sum m_i$ измерялась путем взвешивания конденсата, полученного за достаточно большое число импульсов (~2000).

Средняя энергия ионов оценивалась по формуле

$$E_i = 0,5 m_i \bar{v}_i^2. \quad (2)$$

Средняя энергия ионов углерода определялась также с помощью калориметрических измерений.

Временные и амплитудные характеристики разрядного тока регистрировались поясом Роговского 9, плавающий потенциал плазмы — электрическим зондом 10.

На рис. 2, б приведена осциллограмма разрядного тока, полученная с помощью пояса Роговского. Длительность импульса равна 400 мкс, амплитуда тока достигает 3 кА. Напряженность фокусирующего магнитного поля в центре соленоида в максимуме разрядного тока 300 Э. Осциллограмма плавающего потенциала на электрическом зонде, помещенном в плазму, показана на рис. 2, а. Амплитуда сигнала изменяется от 10 до 30 В при изменении напряжения на накопителе от 100 до 400 В.

Зависимость средней энергии ионов углерода E_i от напряжения на накопителе U_H ,

определенная с помощью маятника и из калориметрических измерений, приведена на рис. 3. Различия в значениях средней энергии ионов объясняются различием способов определения среднего. Приведенные зависимости свидетельствуют о том, что в данном интервале напряжений на накопителе средняя энергия ионов достигает 40–80 эВ, что необходимо для формирования углеродных пленок с ярко выраженными алмазоподобными свойствами [4].

Были исследованы пространственные характеристики импульсного плазменного потока, генерируемого и.п.у. С этой целью определя-

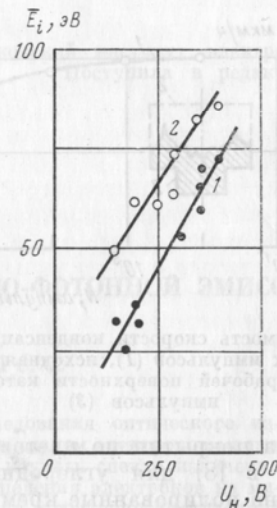


Рис. 3. Зависимость средней энергии ионов углерода от напряжения на накопителе: 1 — измерение с помощью крутильного маятника; 2 — калориметрические измерения. Подложка на расстоянии $L = 40$ см; $H_\Phi = 150$ Э

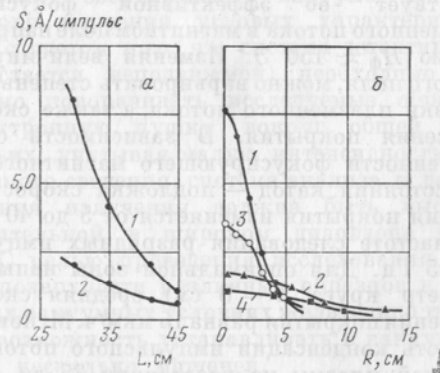


Рис. 4. а — зависимость скорости осаждения углеродного покрытия от расстояния (L) катод — подложка при H_Φ , равных: 1—150, 2—0 Э; б — радиальное распределение скорости конденсации при H_Φ , равных: 1, 3 — 150, 2, 4 — 0 Э, L , равных: 1, 2 — 30, 3, 4 — 35 см,

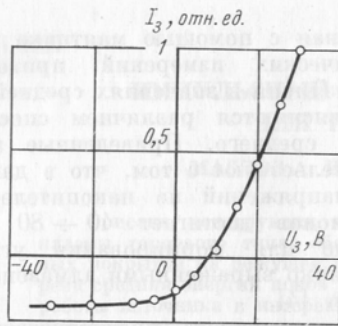


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика электрического зонда, помещенного на оси плазменного потока. $L = 35$ см, $U_H = 300$ В, $H_\Phi = 150$ Э

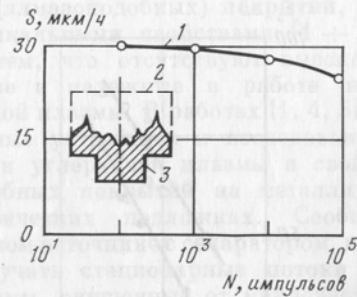


Рис. 6. Зависимость скорости конденсации от количества разрядных импульсов (N), исходная форма катода (2) и рельеф рабочей поверхности катода после 10^5 импульсов (3)

лась толщина покрытия по цветовой таблице, приведенной в [8] для углеродных пленок, осажденных на полированные кремниевые пластины. На рис. 4, а приведено изменение скорости осаждения углеродного покрытия по оси плазменного потока с удалением подложки от катода. Характер радиального распределения скорости осаждения (рис. 4, б) свидетельствует об эффективной фокусировке плазменного потока в магнитном поле напряженностью $H_\Phi \approx 150$ Э. Изменяя величину магнитного поля, можно варьировать степень фокусировки плазменного потока, а также скорость нанесения покрытия. В зависимости от напряженности фокусирующего магнитного поля и расстояния катод — подложка скорость нанесения покрытия изменяется от 5 до 40 мкм/ч при частоте следования разрядных импульсов $f = 15$ Гц. Для оптимальной зоны напыления (диаметр круга $d = 8$ см) средняя скорость нанесения покрытия равна 15 мкм/ч. Мгновенная скорость конденсации импульсного потока углеродной плазмы на расстоянии 35 см от катода равна $1 \cdot 10^4$ А/с, что существенно превышает скорость нанесения алмазоподобных пленок из стационарных потоков углеродной плазмы [5].

Средняя энергия электронов плазмы определялась по вольт-амперной характеристике одиночного электрического зонда, расположенного на оси плазменного ускорителя для различных расстояний его от катода. На рис. 5 представлена типичная зондовая вольт-амперная характеристика, обработка которой дает значение средней энергии электронов, равное $5 \div 6$ эВ, практически не зависящее от ускоряющего напряжения. Плотность ионного компонента плазменного потока, определенная по величине ионного тока насыщения электрического зонда, изменяется в пределах $2 \cdot 10^{12} \div 5 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$ в зависимости от ускоряющего напряжения, а степень ионизации плазмы достигает $80 \div 95\%$.

Одной из важнейших технологических характеристик электродугового источника плазмы является стабильность скорости нанесения покрытия. Нестабильность возникает из-за изменения геометрических размеров и формы катода при электрической эрозии его рабочей поверхности. На рис. 6 показана зависимость скорости нанесения покрытия от количества разрядных импульсов, произведенных без смены катода. Микрофотография поверхности углеродного покрытия на полированной кремниевой пластине приведена на рис. 7. Отсутствие отслаивания углеродной пленки в зоне, примыкающей к царпине, оставленной алмазным индентором при нагрузке 5 Н, свидетельствует о высокой адгезионной прочности углеродного конденсата.

Основные физико-механические свойства углеродных покрытий, полученных с помощью и.п.у., и результаты производственных испытаний упроченного инструмента и оснастки приведены в работе [3].

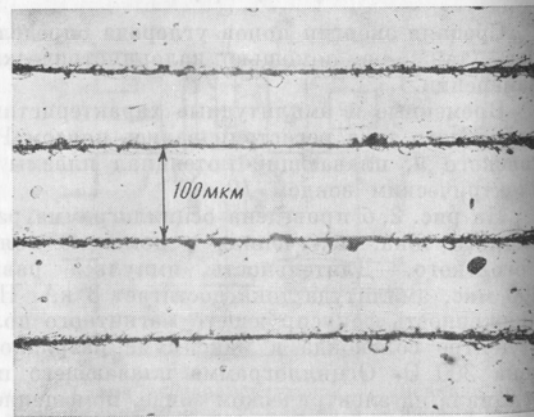


Рис. 7. Микрофотография поверхности углеродного покрытия на кремниевой пластине. Увеличение $300\times$. $H_\Phi = 150$ Э, $U_H = 300$ В, $L = 35$ см, толщина покрытия $\delta = 0,25$ мкм

Следует отметить, что осаждение импульсного потока углеродной плазмы с мгновенной скоростью $\sim 10^4$ Å/с на металлические и диэлектрические подложки, имеющие температуру 150 °С, приводило к образованию углеродных конденсатов с ярко выраженными алмазоподобными свойствами (микротвердость HV 7000, электросопротивление 10^8 Ом·см). Это свидетельствует о том, что применение импульсного источника углеродной плазмы обеспечивает формирование алмазоподобных структур в более широком интервале температур конденсации по сравнению с известными методами получения высокопрочных углеродных пленок из стационарных плазменных потоков [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Aisenberg S., Chabot R. J. Appl. Phys., 1971, v. 42, p. 2953.

2. Аксенов И. И., Падалка В. Г., Стрельницкий В. Е. и др. Сверхтвердые материалы, 1979, № 1, с. 25.
3. Гончаренко В. П., Дмитриев Г. К., Маслов А. И. и др. Электронная пром-сть, 1983, вып. 6 (123), с. 50.
4. Стрельницкий В. Е., Падалка В. Г., Вакула С. И. ЖТФ, 1978, т. 48, вып. 2, с. 377.
5. Балаков А. В., Коншина Е. А. Опт.-мех. пром-сть, 1982, № 9, с. 52.
6. Аксенов И. И., Вакула С. И., Падалка В. Г. и др. ЖТФ, 1980, № 9, с. 2000.
7. Блинов И. Г., Дороднов А. М., Минайчев В. Е. и др. Вакуумные сильноточные плазменные устройства и их применение в технологическом оборудовании микроэлектроники. /Обзоры по электронной технике. М.: ЦНИИ «Электроника», 1974, вып. 7 (268).
8. Moravec T. J. Thin. Solid Films, 1980, v. 70, № 1, p. 9.

Московский институт электронной техники
Поступила в редакцию 9.IV.1984