

ИОННЫЙ ИСТОЧНИК С ОСЦИЛЛИРУЮЩИМИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ ЭЛЕКТРОНАМИ И ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ

Ю.В. Басихин, А.И. Трубецкой, А.Д. Сулимин,
(Новосибирск)

В В Е Д Е Н И Е

Для осуществления первого этапа исследований поверхностных химических реакций был разработан экономичный плазмохимический реактор, составной частью которого является плазменный ионный источник с холодным катодом.

В плазменном ионном источнике электроны осциллируют между электродами ионизационной камеры, благодаря чему значительно увеличивается их путь от катода к нитевидному аноду. Тлеющий разряд в системе, образованной тонким анодом и концентрическим холодным катодом (наружный электрод), может служить эффективным эмиттером ионов при сравнительно низком давлении газа в ионизационной камере. Ионизационная камера описываемого ионного источника по своим геометрическим параметрам близка к описанной в [1].

1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИОННОГО ИСТОЧНИКА

Ионный источник (рис.1) состоит из тонкого цилиндрического анода 1, катодной камеры 2, извлекающего электрода 3. Коллектор 4 служит для измерения тока, извлекаемого из ионного источника.

Катодная камера ионного источника состоит из цилиндрической части, верхнего и нижнего торцов. Верхний торец имеет

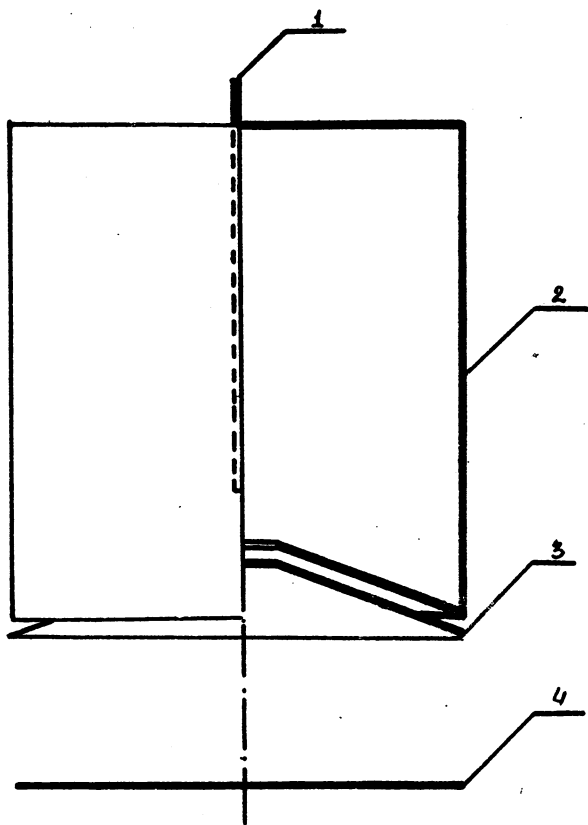


Рис. I. Схема ионного источника с коллектором
1 - анод, 2 - катод, 3 - вытягива-
ющий электрод, 4- коллектор

отверстие, в которое проходит анод ионизационной камеры. В нижнем торце катодной камеры имеется эмиссионное отверстие, через которое осуществляется отбор заряженных частиц из плазмы ионизационной камеры.

Нижний торец катодной камеры и извлекающий электрод образуют квазипирсову систему извлечения и первичного формирования ионного потока.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ЭЛЕКТРОНОВ И ИОНОВ В ИОННОМ ИСТОЧНИКЕ

Траектории электронов в поле с логарифмическим потенциалом были рассчитаны Хуверманом [2] без учета краевых эффектов, имеющих место в реальных приборах. Он показал, что электроны в таком поле движутся по сложным орбитам, которые в предельных случаях переходят в круговые и так называемые вырожденные орбиты. В последнем случае электроны движутся по прямой линии через центр сил.

На статической гравитационной модели моделировались вырожденные траектории электронов. Эти траектории дают представление о характеристике движения электронов в ионизационной камере реактора в основном в момент зажигания разряда, т. е. после зажигания разряда распределение потенциала в системе изменяется.

Геометрический коэффициент подобия модели был принят равным десяти. Отношение "диаметров" катода и анода равнялось 92.

Моделирование проводилось в предположении, что начальная скорость электронов, эмитированных с поверхности катода ("первичные" электроны) и с различных точек внутри разрядного промежутка ("вторичные" электроны) равна нулю. Действием пространственного заряда пренебрегается.

Так как моделирование осуществлялось на плоской модели, то результаты носят качественный характер.

На рис. 2-4 представлены примеры траекторий "первичных" электронов, эмитированных с различных участков катодной камеры при потенциалах на аноде $+1,0$, на извлекающем электроде и коллекторе $-1,0$ относительно катода. Осцилляционный характер вырожденных траекторий электронов очевиден.

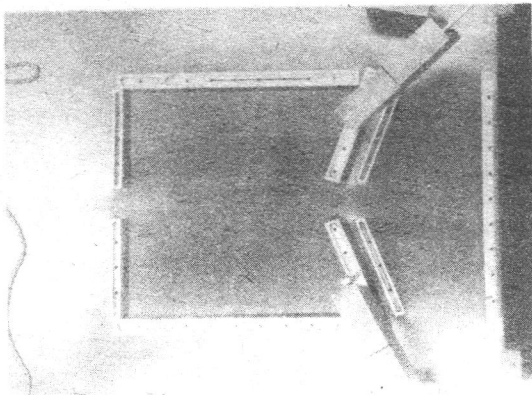


Рис. 2.

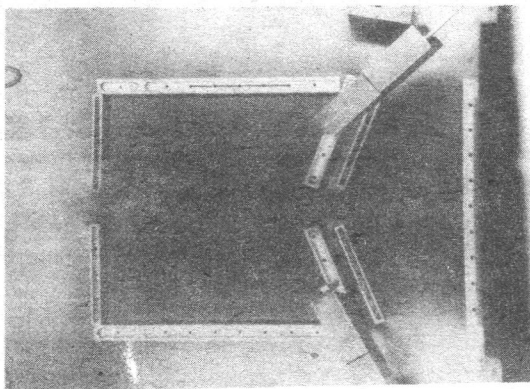


Рис. 3.

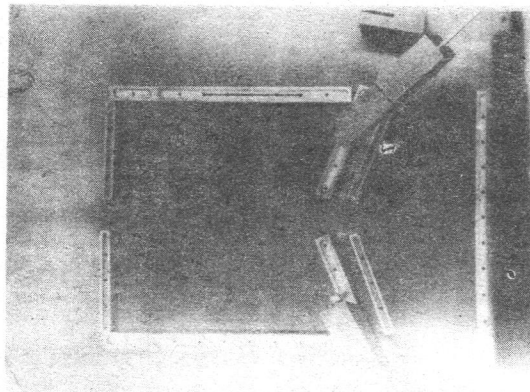


Рис. 4.

Анализ результатов моделирования показал, что электронное облако вблизи эмиссионного отверстия ионизационной камеры формируется "первичными" электронами, эмиттированными в основном с противоположного эмиссионному отверстию торца катода с круговой области радиуса $r_{\max} = 0,5R$, где R — радиус катодного цилиндра. "Вторичные" электроны, дающие вклад в формирование электронного облака у эмиссионного отверстия ионизационной камеры, эмиттируются в основном из прилегающей к аноду области $\frac{r_2}{R} \leq 0,4$, где r_2 — радиус, с которого эмиттируются "вторичные" электроны.

На рис. 5 и 6 зафиксированы результаты моделирования траекторий "первичных" электронов (центральная область ионизационной камеры) и ионов (линии, выходящие из границ "электронного облака") при потенциалах на аноде $+1,0$ на извлекающем электроде и коллекторе $-1,0$ (рис. 5) и $-8,0$ (рис. 6). Электроны эмиттировались с верхнего торца катода. Траектории "вторичных" электронов не моделировались, так как создаваемое ими электронное облако у эмиссионного отверстия вписывается в образованное "первичными" электронами.

Траектории ионов строились в предположении, что они эмиттируются с границы электронного облака.

Из рис. 5 и 6 видно, что примененная система извлечения ионов обеспечивает удовлетворительную первичную фокусировку ионного потока.

3. КОНСТРУКЦИЯ ИОННОГО ИСТОЧНИКА

В результате моделирования траекторий заряженных частиц, стендовых испытаний различных моделей, для экспериментов по активированию поверхностных химических реакций, была определена конструкция ионного источника, изображенная на рис. 7.

Угол наклона образующей нижнего торца 5 катодной камеры и извлекающего электрода 6 к оси ионного источника был принят равным 70° . Нижний торец 5 катодной камеры, извлекающий электрод 6, крепятся с верхним катодным торцом 3 с помощью трех металлических стержней, изоляционных втулок, фиксирующих межэлектродные расстояния, и стягивающих гаек.

Ионный источник крепится на фланец с штырьчатым патентом и токовыми вводами.

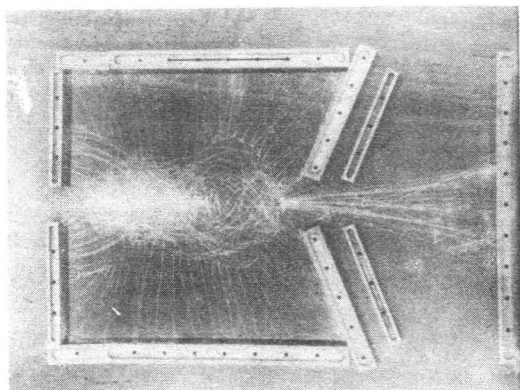


Рис. 5

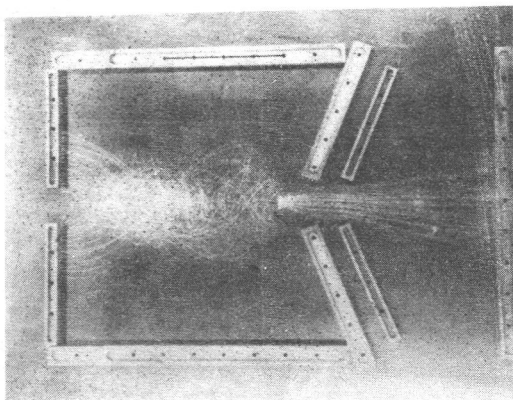


Рис. 6.

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОННОГО ИСТОЧНИКА

Фланец с ионным источником укреплялся в вакуумной камере, откачиваемой паромасляным диффузионным агрегатом типа ВА-2-3 до давления 2×10^{-6} тор. Газ в ионизационную камеру источника подавался через игольчатый натекатель (типа ДЖ-2). При работе источника давление в вакуумной камере увеличивалось до $(1 \pm 50) 10^{-5}$ тор.

Измерение токов пучка ионов проводилось без подавления вторичной электронной эмиссии. Диаметр пучка ионов определялся по свечению люминофора - виллемита, которым покрывался коллектор ионов.

Давление газа P в ионизационной камере источника рассчитывалось по формуле

$$P = \frac{SP_1}{3,64 A \sqrt{\frac{T}{M}}},$$

где S - быстрота откачки вакуумной системы (л/сек),

P_1 - давление в вакуумной камере (тор),

A - площадь эмиссионного отверстия ионного источника (см^2),

T - абсолютная температура газа,

M - молекулярный вес газа.

Расход газа Q через ионный источник определялся по формуле:

$$Q = S \cdot P_1.$$

а. Характеристики первого варианта ионного источника

В таблице I приведены значения токов пучка ионов воздуха для различных режимов разряда при напряжении на извлекающем электроде - 600 вольт и давлении $P_1 = 3 \cdot 10^{-4}$ тор.

Т а б л и ц а I

Ток разряда мА	Напряжение раз- ряда, В	Ток извлекающего электрода, мА	Ток коллектора мА
80	500	8	125
70	498	7,5	115
60	490	6,0	105
50	484	5,2	95
40	478	4,1	80
30	460	3,5	65
20	440	2	50
10	400	1	27
5	360	0,5	16

Примененная в источнике квазипирсова система извлечения ионов обеспечивает удовлетворительное токопрохождение ионного пучка. С увеличением отрицательного напряжения ток на извлекающем электроде сначала возрастает до 20% от общего извлекаемого тока, а затем уменьшается, составляя менее 10% от него (рис.8). Параметры ионного источника сведены в таблицу 2.

Т а б л и ц а 2

Давление P_1 [тор]	3×10^{-4}	3×10^{-4}	$1,5 \times 10^{-4}$
Ток разряда, [мА]	80	150	150
Напряжение раз- ряда, [В]	500	510	510
Мощность, [Вт]	41	76,5	76,5
Давление P_2 [тор]	10^{-1}	10^{-1}	5×10^{-2}
Ионный ток, [мА]	0,125	0,22	0,26
Плотность ионного тока [мА/см ²]	1,78	8,14	3,7
Расход газа, [см ³ /час]	940	940	470
Извлекающее напряже- ние [В]	600	600	600
Экономичность, [В/А]	$3,05 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$3,4 \times 10^{-3}$

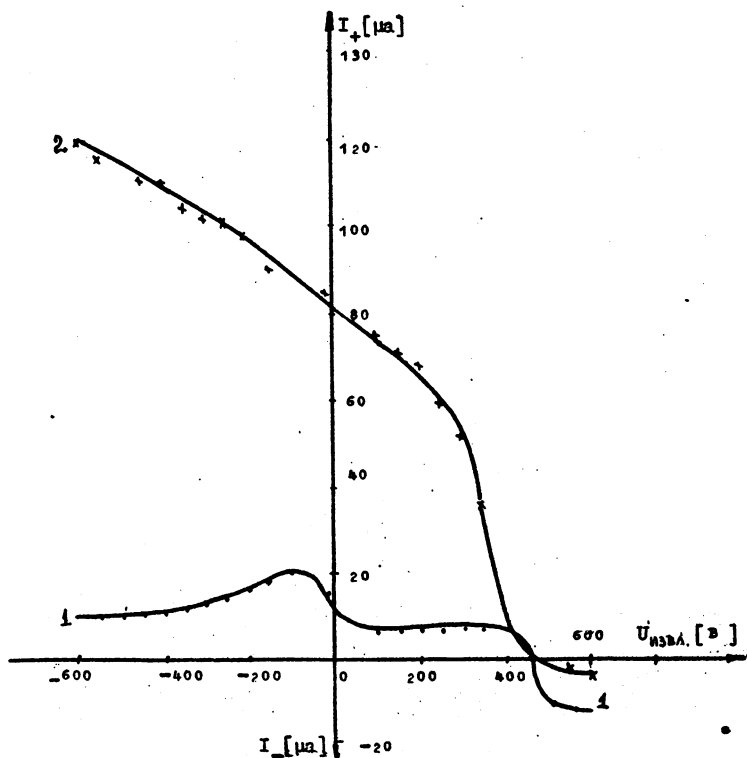


Рис. 8. Зависимость тока на извлекающий электрод (кривая 1) и коллектор (кривая 2) от напряжения на извлекающем электроде. $P_1 = 3 \times 10^{-4}$ тор, $I_{\text{разряда}} \approx 80 \text{ мА}$, $U_{\text{разряда}} = 480 \text{ вольт}$.

ПРИМЕЧАНИЕ. Плотность ионного тока, приведенная к выходному отверстию ионного источника $j = \frac{I_+}{A^0}$, где I_+ - общий фокусируемый ионный ток, - A^0 - сечение выходного отверстия ионного источника. Q - расход рабочего газа при нормальных условиях, см³/час.

б. Характеристики второго варианта ионного источника

Во втором варианте ионного источника диаметр анода равнялся 100 мкм, диаметр эмиссионного отверстия - 7 мм, расстояние от нижнего торцового электрода катодной камеры до извлекающего электрода - 3 мм.

Напряжения поджига разряда в ионизационной камере резко возрастает с уменьшением давления в ней. При использовании в ионизационной камере аргона напряжение поджига разряда увеличивается с 400 до 3400 вольт при уменьшении давления P_2 от 10^{-1} тор до 7×10^{-3} тор соответственно. При использовании в ионизационной камере кислорода напряжение поджига увеличивается с 400 вольт при $P_2 = 6 \times 10^{-2}$ тор, до 2200 вольт при $P_2 = 6 \times 10^{-3}$ тор.

Диаметр пучка ионов. При давлении в ионизационной камере 5×10^{-2} тор, напряжении на извлекающем электроде 0 вольт, токе разряда 24×10^{-3} а, диаметр пучка ионов кислорода составляет 36 мм. С увеличением напряжения на извлекающем электроде до - 600 вольт диаметр пучка ионов уменьшается до 10 мм.

Влияние тока разряда ионизационной камеры на величину извлекаемого ионного тока.

В исследованном интервале токов разряда $(8 + 82) \times 10^{-3}$ а ионный ток линейно зависит от тока разряда (рис.9).

Параметры ионного источника с тонким анодом сведены в таблицу 8.

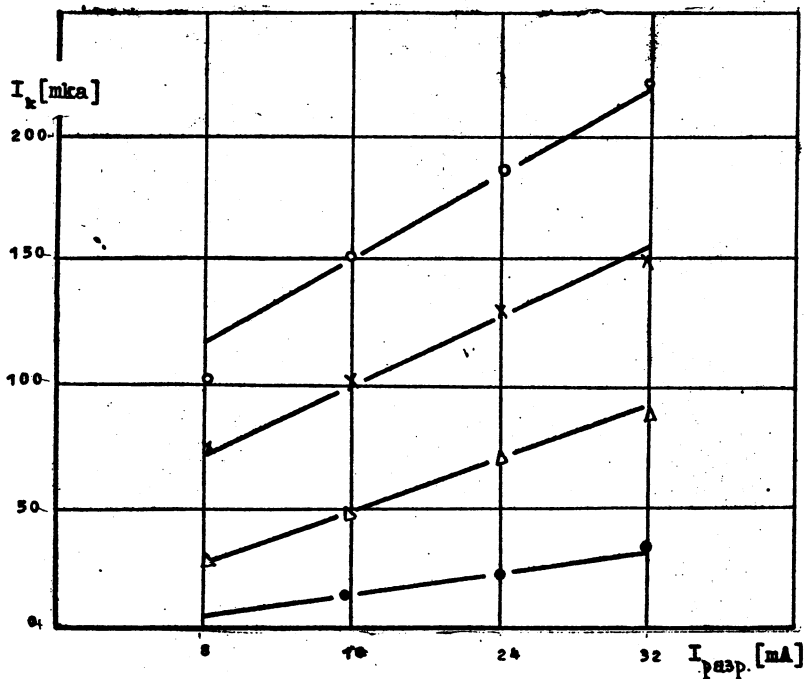


Рис. 9. Зависимость тока коллектора от тока разряда
($P_2 = 5 \cdot 10^{-2}$ тор)

• — • — • — • — $U_{\text{извл.}} = 0 \text{ В}$
 Δ — Δ — Δ — Δ — $U_{\text{извл.}} = -200 \text{ В}$
 × — × — × — × — $U_{\text{извл.}} = -400 \text{ В}$
 ◊ — ◊ — ◊ — ◊ — $U_{\text{извл.}} = -600 \text{ В}$

Т а б л и ц а 3

Давление P_1 , [тор]	3×10^{-4}	1×10^{-4}	7×10^{-5}	5×10^{-5}
Ток разряда, [мА]	32	32	32	36
Напряжение разряда	600	490	500	600
Мощность, [Вт]	19,2	15,7	16	21,6
Давление P_2 , [тор]	$5 \cdot 10^{-2}$	-	-	$7,6 \cdot 10^{-3}$
Ионный ток, [мА]	0,22	0,24	0,25	0,25
Плотность ионного тока [мА · см ⁻²]	0,57	0,63	0,68	0,65
Расход газа [см ³ /час]	940	310	220	150
Извлекающее напряже- ние, [В]	600	600	600	600
Экономичность, [мА/Вт]	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-2}$
Газовая экономичность *) $0,5 I_+ / Q$	$1,9 \times 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$9,5 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$

Экономичность разработанного ионного источника с т о н -
к и м а н о д о м имеет такой же порядок, что и у высоко-
частотных полных источников.

Описанный ионный источник был применен в ионном реакторе
для получения тонких пленок двуокиси кремния и углерода.

5. ПОЛУЧЕНИЕ ПЛЕНОК ДВУОКИСИ КРЕМНИЯ В ИОННОМ РЕАКТОРЕ

Пластины монокристаллического кремния (III) и или р - типа помещались на коллектор. Реагент - тетраэтоксисилан напускался через натекатель в вакуумную камеру.

Предварительное разрежение в вакуумной камере составляло 1×10^{-5} тор. Давление остаточного газа и паров реагента составляло 5×10^{-5} тор. Давление остаточного газа, паров реагента и кислорода (кислород напускался в камеру ионного источника) составляло 3×10^{-4} тор.

Напряжение разряда ионизационной камеры составляло 500 вольт, ток разряда 32 мв, извлекающее напряжение 600 вольт. При этом средняя плотность ионного тока на коллектор составила 60×10^{-6} а.см⁻²

*) В предположении, что ионы Q_2^+ .

Длительность опытов 35 минут. Средняя доза облучения составила 0,607 кулона. Процесс получения пленки при комнатной температуре сопровождается разрядами на поверхности, наблюдаемыми визуально, что является причиной появления так называемых "кратеров" (рис.10). "Кратеры" - следы микропробоев пленки, обусловленные накоплением на поверхности растущей пленки положительного заряда.

Свечение возбужденных молекул в пучке - синеватого цвета. Поверхность подложки (пластины кремния) под пучком высвечивается синеволетовым цветом. Диаметр пучка ионов составлял при этом 25 мм.

Благодаря облучению поверхности кремния положительными ионами кислорода с энергией 1000 эв пластины кремния покрывались окисными пленками кремния. Центральное пятно диаметром до 15 мм имеет синий цвет, к краям переходит в фиолетовый (диаметром до 25 мм). Из-за обилия на пленке "кратеров" не было возможности произвести измерение физических параметров пленки. Напряжения пробоя, измеренные тонким зондом (ϕ 0,5мм), составили для пленок на кремнии n-типа ($\rho = 15 \text{ ом см}$) 4-30 вольт, а для пленок на кремнии p-типа ($\rho = 15-20 \text{ ом см}$) - 24 + 63 вольт.

Толщина пленки в центре ориентировочно была определена в 1000 + 1500 Å.

Пористость пленок, выявленная травлением в хлоре при температуре 700°C составила $4 \times (10^3 + 10^4) \text{ I/cm}^2$.

С целью устранения разрядов на поверхности пленок были проведены опыты с подогревом подложки. Было выяснено, что при температурах подложки 270 + 300°C искрения и кратеры на пленке исчезают.

6. Получение тонких пленок углерода в ионном реакторе

В ионизационную камеру ионного источника подавался метан до получения в вакуумной камере давления 1×10^{-4} тор. На коллектор ионного реактора помещались пластины кремния (II) p-типа. С обратной стороны коллектора имелся молибденовый подогреватель; тепловой контакт подогревателя с коллектором осуществлялся через пластину особо чистого графита.

Температура подложки могла регулироваться в пределах от комнатной до 750°C. Ток разряда ионного источника был равен

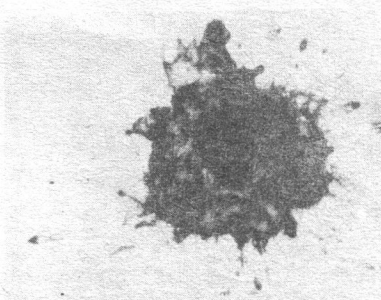


Рис. 10. "Кратер" на плёнке. 300^x

30 мА, напряжение разряда 540 вольт, извлекающее напряжение - 600 вольт, ток пучка - $14 \cdot 10^{-6}$ а; длительность опытов составляла 30 минут. Электронографирование образцов по методу микродифракции показало, что полученные пленки кристаллической структурой не обладают. Микротвердость углеродных пленок была определена на микротвердомере типа ПМТ-3 методом вдавливания алмазной пирамидки. Для пленок, полученных при температуре подложки 600^oС, она оказалась равной 9300 кг мм⁻², что составляет примерно 0,9 твердости алмаза.

Следует иметь в виду, что рассчитанные значения микротвердости занижены, так как углеродные пленки имеют малую толщину, а твердость подложки кремния Р-типа не превышает 1120 кг.мм⁻².

ВЫВОДЫ

1. Разработан ионный реактор с холодным катодом. В ионном реакторе получены тонкие пленки углерода и окисные пленки кремния.

2. Окисные пленки кремния получены из тетраэтоксисилана $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ при возбуждении поверхности потоками положительных ионов кислорода.

3. Углеродные пленки с высокой микротвердостью получены из метана при возбуждении поверхностных химических реакций потоками положительных ионов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mc Clure G.W. Appl. Phys. Letters, 1963, vol. 2, N 2, 233-234.
2. R. H. Hooverman. J. of Appl. Physics, 1963, vol. 34, N 12, p. 3505-3508.