

ВАКУУМНО-ДУГОВЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО ОСАДЖЕННЯ ПОКРИТТІВ

І.І.Аксьонов, В.А.Білоус

*Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут",
м.Харків, Україна, E-mail: belous@kipt.kharkov.ua,
тел. (0572) 350-755, факс: (0572) 350-755*

Наведено стислий огляд розробок ННЦ ХФТІ, спрямованих на створення технологічного обладнання для осадження покриттів вакуумно-дуговим методом. Розроблюване обладнання мало бути адаптоване до умов індустриального виробництва, придатне для комерційного використання. Розглянуто результати розробок високоефективних торцевих джерел плазми, вакуумно-дугових випарювачів з протяглими (циліндричними та планарними) катодами, магнітні фільтри для очищення плазми від макрочасток, а також ряд установок для формування покриттів різного призначення.

1. ВСТУП

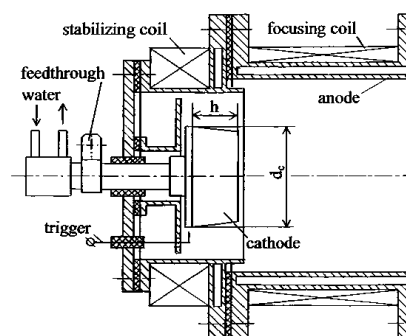
Формування покриттів методом конденсації іонно-плазмових потоків електродугового розряду в вакуумі або в розрідженій атмосфері ($10^{-3} \dots 10^2$) Па реакційних газів протягом останніх двох десятиріч набуло визнання як одне з найперспективніших напрямків поверхневого модифікування матеріалів в інструментальному виробництві, в поверхневому декоруванні виробів побутового призначення й подекуди в машинобудуванні. Результати досліджень, одержані вітчизняними та закордонними фахівцями [1...5], свідчать про те, що переваги методу могли б бути реалізовані в значно більшому колі практичних застосувань. Головною, якщо не єдиною причиною тому до останнього часу є відсутність таких технічних рішень, що були б у змозі забезпечити комерційну доцільність і конкурентну спроможність нових технологічних процесів і обладнання в крузі застосувань значно більш широкому, ніж зазначений вище. Так, зокрема, за браком достатньо ефективних фільтруючих пристроїв для очищення ерозійної плазми від макрочасток катодного матеріалу, вакуумно-дуговий метод, що в принципі дозволяє синтезувати покриття з унікальними комбінаціями фізико-механічних та експлуатаційних характеристик, ще й досі не впроваджено в такі вкрай важливі сучасні галузі як електроніка, оптика (видимого й інфрачервоного діапазонів), медицина (мікрохірургічний інструментарій, протезування), точна механіка, де цей метод здатен був би сприяти суттєвому прогресу. Відсутність ефективних засобів зниження теплового навантаження на оброблюваний об'єкт під час осадження покриттів значно обмежує використання вакуумно-дугового методу для поверхневого зміцнення деталей машин (вузлів тертя), не дозволяючи обробляти цим методом ту переважну більшість деталей, що виготовляється із сталей і сплавів з низьким рівнем температури деградації їх міцності.

Вперше систематичні дослідження й розробки вакуумно-дугового методу й обладнання з метою їх адаптації до умов індустриального виробництва були

започатковані в ХФТІ ще наприкінці 60-х років [4] і тривають до теперішнього часу [5]. Протягом останнього десятиріччя провадились роботи, спрямовані на вирішення зазначених вище проблем створення технологічного обладнання, придатного для комерційного використання. В даній публікації наведено стислий огляд саме цих розробок інституту.

2. ПЛАЗМОВІ ДЖЕРЕЛА

Головним вузлом, що визначає принципові можливості будь-якої вакуумно-дугової установки є джерело плазми. Тому щонайбільше зусиль вкладалося в розробки й дослідження саме цих пристроїв.



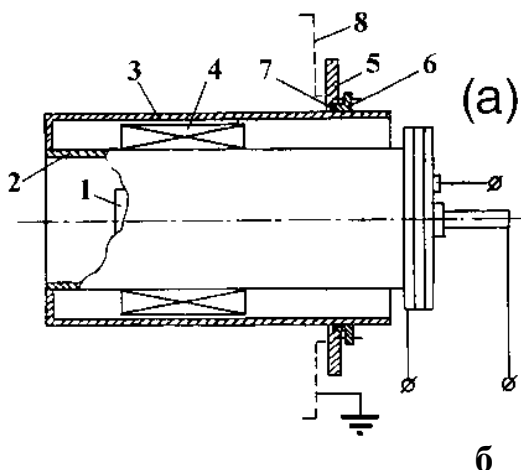
*Фіг.1. Торцевий випарювач
h - висота витрачаємої частини катода;
d - діаметр катода*

Найбільш широке практичне застосування знаходять джерела так званого торцевого типу. Конструкції й принципи дії таких джерел, що розроблені в інституті, наведено в публікаціях [6 - 11]. Викладені в цих публікаціях принципи використано в більш пізніх розробках, що здійснювались з урахуванням накопиченого досвіду й потреб виробництва.

Так, зокрема, створено модель плазмового джерела, що дозволяє застосовувати торцеві катода

будь-якого діаметра у межах від 60 до 110 мм при висоті витрачаємої частини до 60 мм (фіг.1).

Розроблено також джерела, конструкція котрих передбачає можливість регулювання положення його вихідного отвору відносно оброблюваного об'єкту за допомогою пересувного ущільнюючого пристрою, якому можна надавати будь-яке (потрібне за умов технологічного процесу) положення уздовж зовнішньої поверхні кожуха джерела (фіг.2).

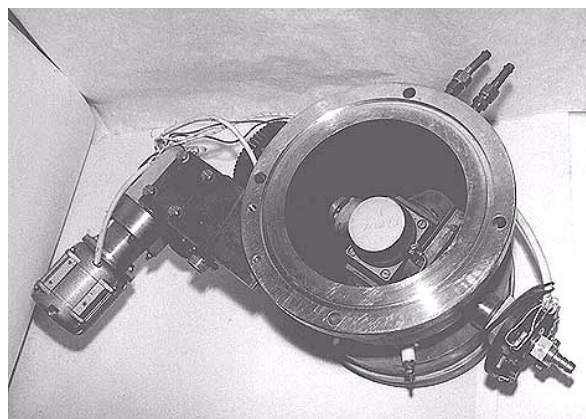


Фіг.2. Плазмове джерело з пересувним вузлом ущільнення.

1 - катод; 2 - анод; 3 - кожух; 4 - магнітна катушка, 5, 6, 7 - елементи вузла ущільнення (затискувачі фланці та гумове кільце), 8 - камера

На фіг.3 наведено фото трьохкатодного джерела плазми, призначеного для формування багаточарових покриттів на базі двох-трьох металів або сплавів. В цьому пристрої катодна пляма (КП) дугового розряду запалюється по черзі (згідно з заданою програмою) на тому чи іншому катоді, який перед цим, відповідно, встановлюється в робочу позицію (по осі джерела, робочою поверхнею у бік вихідного отвору). Переміщення катодів забезпечується револьверним пристроєм з електромеханічним приводом. Осадження покриттів вакуумно-дуговим методом на довгомірні вироби (вали, труби, протяжки і т.п.), а також на ролонні матеріали (металеві фольги, полімерні плівки) здійснюється, як правило, з використанням вакуумно-дугових джерел плазми (випарювачів) з протягим катодом: (I) планарного типу, або (II) у

вигляді циліндра з боковою робочою поверхнею. Практичне застосування цього обладнання обмежувалося відсутністю кардинального вирішення проблеми надійного керування переміщенням КП вздовж робочої поверхні катода. На подолання цього утруднення були спрямовані розробки планарного джерела плазми [12] й випарювача з протягим циліндричним катодом [5] (з боковою робочою поверхнею).



Фіг.3. Трьохкатодне плазмове джерело

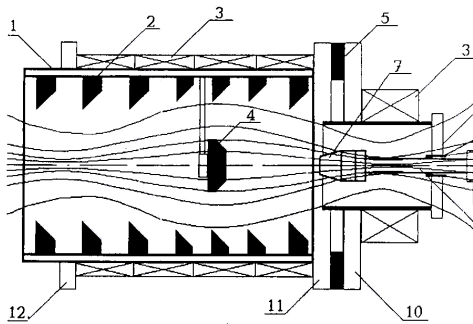
Поширення областей практичного використання вакуумно-дугового методу значною мірою залежатиме також від того, як буде вирішено проблему очищення потоків плазми від макрочасток катодного матеріалу. Принципово проблему фільтрування вакуумно-дугової плазми вирішено створенням криволінійних магнітних фільтрів. Але, незважаючи на велику кількість запатентованих варіантів таких фільтрів [13-18], їх складність, низька продуктивність та характерна для переважної більшості фільтрів недостатня ефективність очищення плазми перешкоджають широкому застосуванню цих пристроїв на практиці. У зв'язку з цим заслуговують уваги розробки удосконалених фільтрів (сепараторів), здійснені фахівцями ХФТІ останніми роками. При цьому зусилля розробників були спрямовані, головним чином, на спрощення конструкції (а отже й на зниження вартості) нових фільтрів, на підвищення ефективності очищення плазми, та на зниження втрат плазмового потоку при транспортуванні його від КП до оброблюваного об'єкту. Комп'ютерні розрахунки магнітних полів і траєкторій макрочасток в фільтруючих системах значно спростили процедуру їх оптимізації за всіма трьома показниками. В результаті створено кілька варіантів фільтруючих систем, які умовно можна віднести до трьох груп: (I) до прямолінійних фільтрів з лабіринтною системою перехоплюючих екранів [19-21]; (II) до систем з перетворенням зустрічних аксіальних потоків в радіальний [22]; (III) до систем з криволінійним плазмоведучим каналом і вдосконаленою системою поглинаючих екранів. "Представники" кожної з зазначених груп схематично зображені на фіг.4-6.

3. ВАКУУМНО-ДУГОВІ УСТАНОВКИ

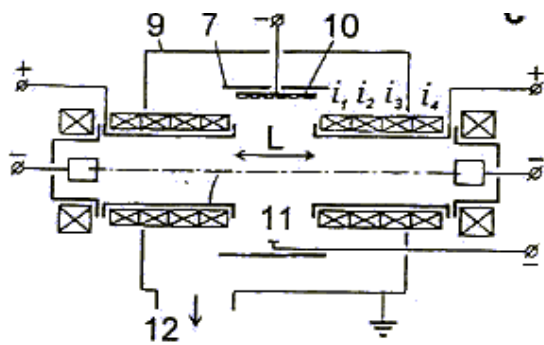
3.1. Високопродуктивна автоматизована установка "Булат-9"

Обладнання для нанесення покриттів вакуумно-

дуговим методом на вироби, що виготовлюються в умовах масового індустріального виробництва, має забезпечити якомога більшу продуктивність технологічного процесу та високу точність контролю його параметрів, а відтак – і високу ступінь відтворення характеристик одержуваних покриттів. З цією метою сучасні вакуумно-дугові установки оснащено високопродуктивним обладнанням для відкачки реакційного об'єму камери, надійними випарювачами, що забезпечують потрібну швидкість осадження покриттів, та системою комп'ютерного управління процесом. І все ж продуктивність вакуумно-дугового процесу осадження покриттів з використанням навіть найсучаснішого удосконаленого обладнання далеко не завжди задовольняє потреби виробництва з точки зору продуктивності.



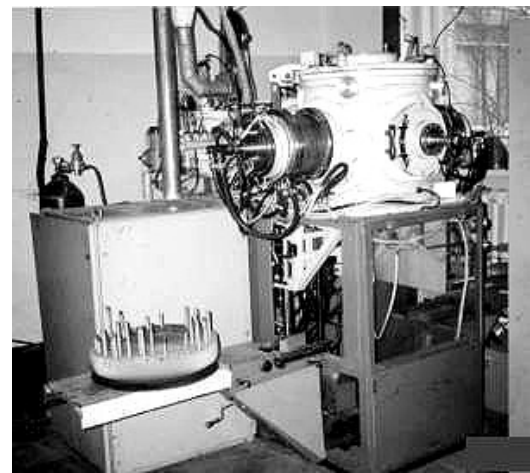
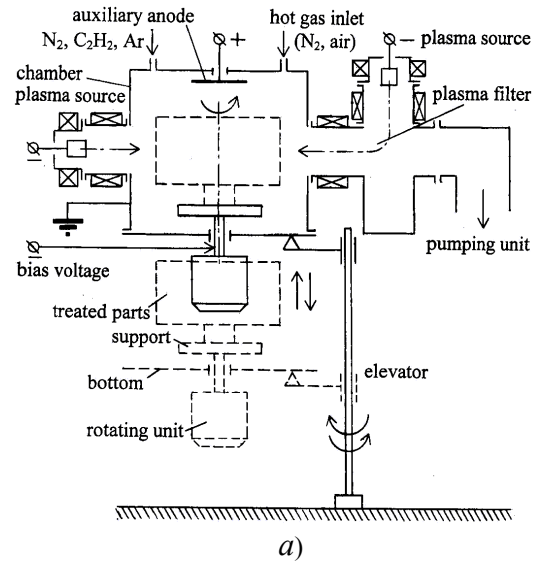
Фіг.4. Вакуумно-дугове джерело фільтрованої плазми 1-анод; 2-ребра; 3-соленоїди; 4-екран; 5,6-ізолятори; 7-катод; 8-; 9-; 10-;11-;12-фланці



Фіг.5. Джерело фільтрованої плазми з радіальним вихідним потоком

Це обумовлюється тим, що всі зазначені вище досконалості сучасних установок здатні впливати на тривалість лише двох етапів робочого циклу осадження: це по-перше, на тривалість відкачки робочої камери і, по-друге, на тривалість безпосередньо процесу іонно-плазмової обробки, включаючи конденсацію покриття. Але ж крім цих двох етапів тривалість усього технологічного циклу, що пов'язаний з установкою, обумовлюється ще й такими етапами як (I) завантаження камери виробами, що підлягають обробці, (II) герметизація камери, (III) охолодження виробів після обробки, (IV) розгерметизація камери й (V) її розвантаження. Якщо тривалість відкачки і іонно-плазмової обробки

(включаючи осадження) в сучасних установках становить 20...60 хвилин (залежно від конкретного процесу), то сумарна тривалість всіх інших етапів (I-V) (також в залежності від конкретного процесу й типу покриття) становить величину значно (у кілька разів) більшу. Крім того, тривалість етапу відкачки в існуючих конструкціях відповідає значенням, що рекламуються, здебільшого тільки на початку експлуатації установки. Згодом тривалість откачки значно збільшується у зв'язку з накопиченням на стінках камери атмосферної вологи на протязі досить тривалих етапів (I) та (V), коли камера повністю відкрита.



Фіг.6. Схема (а) і фото (б) вакуумно-дугового агрегату установки "Булат-9"

В ХФТІ створено установку, в якій автоматизовано весь пов'язаний з нею технологічний цикл, починаючи з завантаження камери касетами з виробами й закінчуючи її розвантаження. Така ступінь автоматизації разом з використанням низки додаткових конструкційних і технологічних заходів(зокрема використання камери ковпакового типу та заповнення камери перед розгерметизацією підігрітим сухим азотом або аргоном) забезпечило стабілізацію часу, потрібного

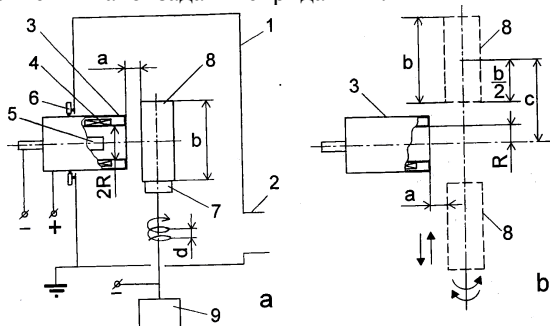
на відкачку (на рівні 8...10 хвилин), зменшення витрат часу (до 1,5 хвилин), потрібного для завантаження й розвантаження камери, й практичне включення витрат часу на охолодження оброблених виробів перед розвантаженням. Продуктивність установки в цілому підвищено у 2,5...3 рази порівняно з продуктивністю "звичайних" установок з аналогічною за об'ємом камерою ($\cong 0,2 \text{ м}^3$).

Окрім звичайних ("стандартних") технологій установка дозволяє здійснити низку технологічних процесів, котрі на серійних машинах провести практично неможливо. До таких процесів належать: нанесення зносостійких нітридних покриттів на інструменти дрібних розмірів (свердла $\sim \varnothing 1$, зубні бори, тощо); нанесення покриттів на внутрішні поверхні, таких інструментів як плашки, філь'єри; нанесення зносостійких покриттів на деталі машин із сталей з низькою (250...280) °С температурою відпуску (ХВГ, 40Х); осадження "безкрапельних" металевих та нітридних покриттів; азотування поверхонь на глибину 30...50 мкм при температурі до 500°С.

Особливості установки дозволяють використовувати її як складову частину технологічних ліній у виробництві інструментів, деталей машин, виробів (або їх елементів) побутового призначення.

3.2. Установка для осадження товстих плівок

При осадженні покриття вакуумно-дуговим методом формування заданого (наприклад, рівномірного) розподілу його властивостей (найчастіше – товщини) по поверхні конкретного об'єкту з одночасним забезпеченням високої ефективності використання плазмоутворюючого (катодного) матеріалу являє собою досить складну проблему. Це обумовлюється великою неоднорідністю просторового розподілу характеристик плазми (перш за все – її щільності) в потоці, що генерується катодною плямою дуги й займає практично весь напівпростір над робочою поверхнею катода. Тому до останнього часу уважалось, що вакуумно-дуговий метод для вирішення такої задачі непридатний.



Фіг.7. Установка для формування товстих плівок.

1 - камера; 2 - відкачний патрубок; 3 - анод; 4 - соленоїд; 5 - катод; 6 - ущільнений вузол; 7 - підкладкоутримувач;

8 - підкладка; 9 - пристрій для обертання підкладкоутримувача

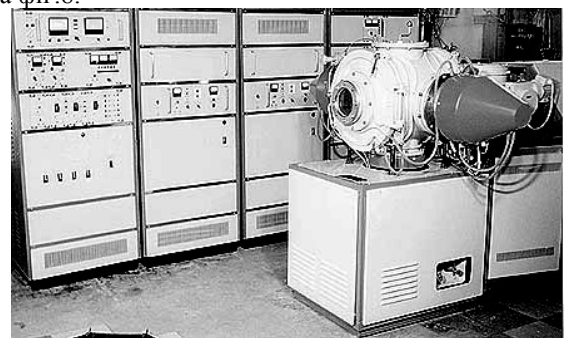
Проте нещодавно в ХФТІ завершено цикл експериментальних досліджень, результати яких доводять практичну доцільність використання вакуумно-дугового методу для формування товстих плівок. Розроблено установку, що забезпечує формування покриттів (плівок) з одного або кількох тугоплавких металів (Mo, Nb, Ta) з швидкістю осадження до 40 мкм/год при ефективності використання катодного матеріалу $k \cong 0,3$. (Коефіцієнт k визначається величиною частки m_c/m_Σ де m_c – маса матеріалу, що безпосередньо становить масу покриття; m_Σ – сумарна маса матеріалу, що покинула катод під час формування покриття). Схема, що ілюструє метод осадження рівнотовщинної плівки на об'єкт циліндричної форми, наведена на фіг.7.

При формуванні багат шарової плівки з двох (або більше) металів застосовується два (або більше) випарювачів (див. фіг.2), катоди яких виготовлені з відповідних металів.

3.3. Модифікації серійної установки "Булат-6"

Установку "Булат-6" використано як базу при розробці трьох її модифікованих варіантів.

Варіант 1. Установка оснащена двома вакуумно-дуговими джерелами з прямолінійними [21] фільтруючими пристроями. Призначена для осадження захисних покриттів з одного або з двох металів та їх нітридів. Використовується, головним чином, для формування зносостійких покриттів на деталях прецизійних вузлів тертя в точній механіці (газодинамічні опори гіроприладів, плунжери паливних насосів, тощо). Фото установки наведено на фіг.8.



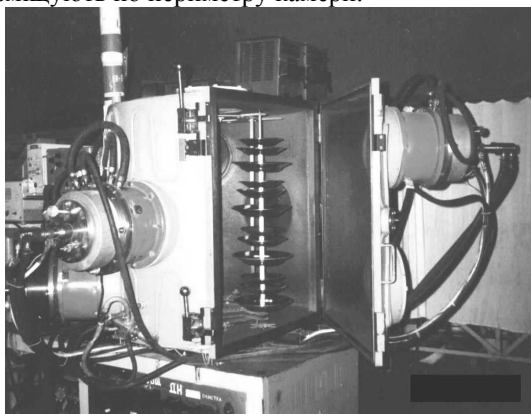
Фіг.8. Установка для формування "безкрапельних" покриттів

Варіант 2. Установка має два вакуумно-дугові джерела з прямолінійними плазовими фільтрами [20] : один з Ті-катодом, другий з графітовим катодом. Призначена для осадження алмазоподібних вуглецевих покриттів на прецизійні деталі вузлів тертя, на спеціальні інструменти (для обробки кольорових металів, вимірювальні інструменти), на елементи оптики (лінзи, дзеркала, ІЧ вікна, тощо). Установка оснащена високочастотним генератором, ВЧ вакуумним уводом для подачі ВЧ-потенціалу на оброблюваний об'єкт, системою подачі

охолоджуючої води до підкладкоутримувача, електродуговим приводом для обертання підкладкоутримувача, системою екранів для відсікання плазмового потоку від оброблюваної поверхні під час обезгажування катодів.

Варіант 3 ("Булат ТНП-5"). Відрізняється від базової моделі камерою, що має розміри: висота 850 мм, діаметр 850 мм (фіг.9). Установка призначена для нанесення декоративних покриттів на виробі побутового вжитку.

Конструкцією камери передбачена можливість розміщення двох плазмових джерел, зорієнтованих назустріч одне одному (зверху і знизу) і утворюючих систему перетворення первинних аксіальних потоків плазми у вихідних радіальних потік [22]. У цьому випадку оброблювані об'єкти розміщують по периметру камери.



Фіг.9. Установка "Булат ТНП-5"

ЛІТЕРАТУРА

- 1.R.L.Boxman, S.Goldsmith // *Surface and Coating Technology*, 1987, v. 33, p.153–167.
- 2.R.L.Boxman, S.Goldsmith.// *IEEE Transactions on Plasma Science*, October 1989, v.17, No.5, p.705-712.
- 3.A.Anders // *Surface and Coating Technology*, 1997, v. 93, p.158–167.

- 4.I.I.Aksenov, A.A.Andreev // *Problems of Atomic Science and Technology, Series: Plasma Physics*, 1999, № 3 (3), 4 (4), p.242-246.

- 5.I.I.Аксёнов, В.А.Білоус // *Тр.3-го Международного симпозиума "Вакуумные технологии и оборудование"*, Харьков, Украина, сентябрь 1999. Т.1, с.77-85.

- 6.I.I. Axenov et al. US Patent No.4551221, Nov.5, 1985.

- 7.И.И.Аксенов и др. Авт. свид. №1040631, 24.06.1980.

- 8.И.И.Аксенов, В.А.Белоус // *ПТЭ*. 1979, №3, с.160-162.

- 9.И.И.Аксенов, В.А.Белоус // *Теплофизика высоких температур*. 1979, т.17, вып.1, с.1-4.

- 10.И.И.Аксенов, В.Г.Падалка, В.М.Хороших. // *Физика плазмы*. 1979, т.5, вып.3, с.607-612.

- 11.И.И.Аксенов и др. // *Химия высоких энергий*. т.20, №1, 1986, с.82-86.

- 12.L.P.Sablev et al. // *Proc. of the 6th Int. Symp. on TATF'98*, Regensburg, Germany, March 1998, p.323.

- 13.Falabela, D.M.Sanders, US Patent No.5279723, Jan 18, 1994.

- 14.D.M.Sanders, S.Falabela, US Patent No.5282944, Febr.1, 1994.

- 15.J.R.Treglio, US Patent No. 5317235, May 31, 1994.

- 16.P.J.Martin, R.P.Netterfield, T.J.Kinder, US Patent No. 5433836, July 18, 1995.

- 17.V.I.Gorokhovsky, US Patent No.5435900, Jul.25, 1995.

- 18.Xu Shi et al. Int. Appl. Number:PCT/GB 96/00389, Feb.20, 1996.

- 19.I.I.Aksenov, V.M.Khoroshikh, // *Proc.of the 6th Int. Symp. on TATF'98*, Regensburg, Germany, March 1998, 283.

- 20.I.I.Aksenov et al. // *Diamond and Related Materials*, 1999, v. 8 p.468-471.

- 21.I.I.Aksenov et al., // *IEEE Trans. on Plasma Science*, August 1999, v.27, No. 4, p.1026-1029.