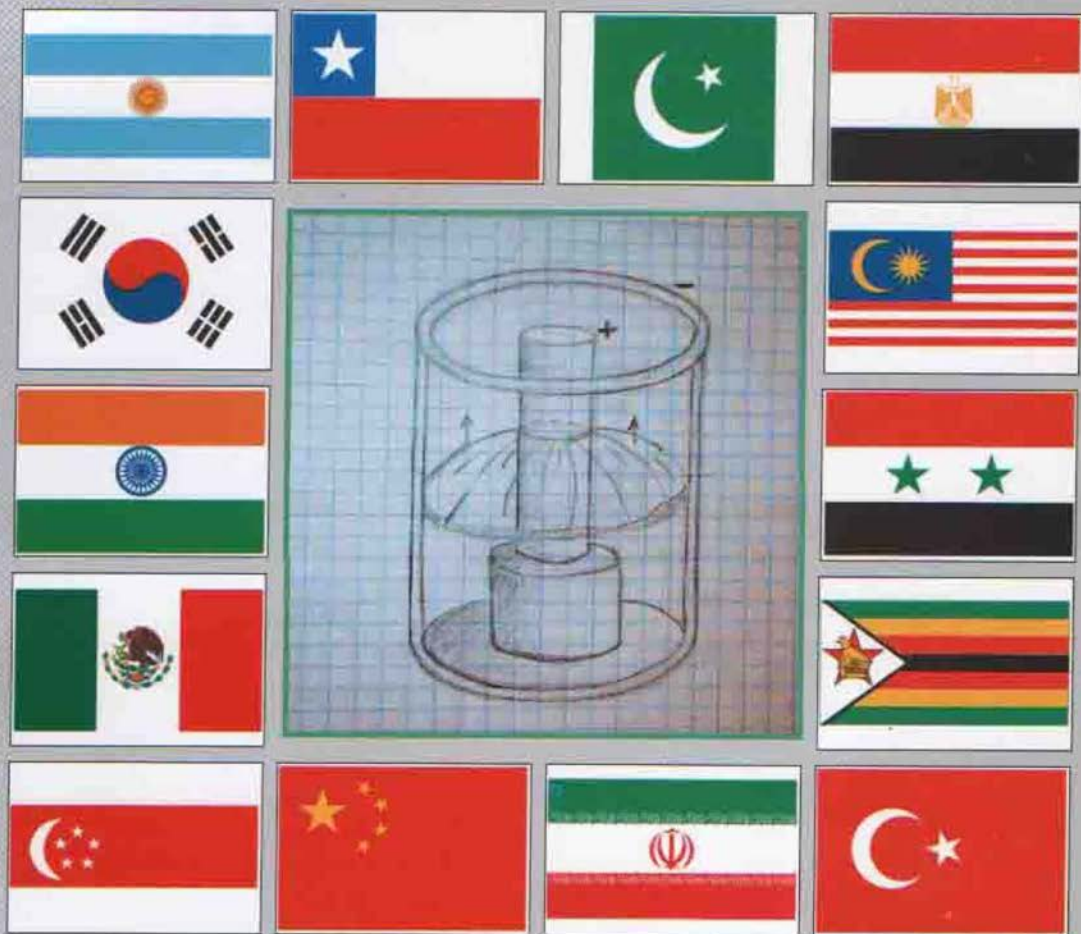


А

А. Е. Дубинов, Л. А. Сенилов



Исследования на плазменных фокусах  
в развивающихся странах

А

ФГУП «Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский институт  
экспериментальной физики»

**А. Е. Дубинов, Л. А. Сенилов**

**Исследования  
на плазменных фокусах  
в развивающихся странах**

Саров  
2013

УДК 533.952  
ББК 22.333  
Д79

**Дубинов, А. Е., Сенилов, Л. А.**

**Д79 Исследования на плазменных фокусах в развивающихся странах /**  
А. Е. Дубинов, Л. А. Сенилов. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2013. –  
161 с.: ил.

ISBN 978-5-9515-0222-3

Рассмотрен современный уровень развития техники, исследований и применений на ПФ в развивающихся странах Азии, Африки и Латинской Америки. Представлена сводка имеющихся установок ПФ. Приведены результаты исследований работы ПФ: генерация электронных и ионных пучков, нейтронов, МРИ и ЖРИ, разряда в ПФ. Показаны примеры применения ПФ в обработке материалов, рентгенографии, нейтронографии, генерации короткоживущих изотопов, медицине.

Книга рассчитана на специалистов в области электрофизики, физики плазмы и ядерной физики.

УДК 533.952  
ББК 22.333

ISBN 978-5-9515-0222-3

© ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	5
<b>Глава 1. Базовые конструкции и принцип действия ПФ .....</b>	<b>7</b>
1.1. Немного истории .....	7
1.2. Ф-камера ПФ Филиппова .....	8
1.3. М-камера ПФ Мейзера .....	10
1.4. Сравнение Ф- и М-камер ПФ .....	11
1.5. Некоторые крупнейшие установки ПФ в развитых странах .....	12
1.6. Скейлинги ПФ .....	17
<b>Глава 2. Установки с ПФ в развивающихся странах: Юго-Восточная Азия, Ближний Восток, Латинская Америка, Африка .....</b>	<b>18</b>
2.1. Истоки: международная коллаборация развивающихся стран в исследованиях и применениях ПФ .....	18
2.2. Сингапур .....	21
2.3. Малайзия .....	26
2.4. Южная Корея .....	26
2.5. Индия .....	28
2.6. Китай .....	31
2.7. Иран .....	32
2.8. Пакистан .....	36
2.9. Сирия .....	39
2.10. Турция .....	40
2.11. Египет .....	41
2.12. Зимбабве .....	41
2.13. Аргентина .....	42
2.14. Мексика .....	45
2.15. Чили .....	46
<b>Глава 3. Исследования происходящих в ПФ физических процессов ...</b>	<b>50</b>
3.1. Исследование структуры разряда .....	50
3.2. Исследование области высокотемпературной плазмы ПФ .....	57
3.3. Исследование генерации нейтронов в ПФ .....	60
3.4. Исследование генерации рентгеновского и УФ-излучения .....	68
3.5. Исследование пучков заряженных частиц, формируемых в ПФ ...	79
3.6. Исследования влияния материалов и формы электродов и изолятора ПФ на его работу .....	84

<b>Глава 4. Применения ПФ в технологиях в развивающихся странах ...</b>	<b>99</b>
4.1. Обработка материалов с помощью ПФ .....	99
4.2. Рентгеновская и электронная микролитография .....	127
4.3. Применение ПФ в рентгенографии .....	133
4.4. Применение ПФ в нейтронографии .....	138
4.5. Получение короткоживущих изотопов .....	139
4.6. Применение ПФ в медицине .....	144
Заключение .....	148
Список литературы .....	149

177. Raspa V., Sigaut L., Llovera R. et al. // *Brazilian Journal of Physics*. 2004. Vol. 34, N 4B. P. 1696.
178. Tartaglione A., Ramos R., Gonzalez J. et al. // *Ibid.* P. 1756.
179. Barbaglia M., Bruzzone H., Acuna H. et al. // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2009. Vol. 51, N 4. P. 045001-1.
180. Barbaglia M., Bruzzone H., Rios I. et al // *Ibid.* 2010. Vol. 52, N 3. P. 032001-1.
181. Milanese M., Moroso R., Pouzo J. // *European Physical Journal D*. 2003. Vol. 27, N 1. P. 77.
182. Bruzzone H., Acuna H., Barbaglia M. et al. // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2006. Vol. 48, N 5. P. 609.
183. Bruzzone H., Acuna H., Clausse A. // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2007. Vol. 49, N 2. P. 105.
184. Bruzzone H., Acuna H., Clausse A. // *Brazilian Journal of Physics*. 2008. Vol. 38, N 1. P. 117.
185. Feugeas J. // *Journal of Appl. Phys.* 1989. Vol. 66, N 8. P. 3467.
186. Lorenzo F., Raspa V., Knoblauck P. et al. // *Journal of Physics D: Appl. Phys.* 2007. Vol. 102, N 3. P. 033304-1.
187. Knoblauck P., Lorenzo F., Raspa V. et al. // *Physica Scripta*. 2008. Vol. T131, N 014033. P. 1.
188. Castillo F., Herrera J., Rangel J. et al. // *Brazilian Journal of Physics*. 2002. Vol. 32, N 1. P. 3.
189. Castillo F., Herrera J., Rangel J. et al. // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2003. Vol. 45, N 3. P. 289.
190. Castillo F., Herrera J., Gamboa I. et al. // *Journal of Appl. Phys.* 2007. Vol. 101, N 1. P. 013303-1.
191. Castillo F., Herrera J., Rangel J. et al. // *Revista Mexicana de Física*. 2007. Vol. S53, N 3. P. 61.
192. Moreno J., Birstein L., Mayer R. et al. // *Measurement Science and Technology*. 2008. Vol. 19, N 8. P. 087002.
193. Soto L., Esaulov A., Moreno J. et al. // *Physics of Plasmas*. 2001. Vol. 8, N 5. P. 2572.
194. Silva P., Soto L., Moreno J. et al. // *Review of Scientific Instruments*. 2002. Vol. 73, N 7. P. 2583.
195. Moreno J., Silva P., Soto L. et al. // *Plasma Sources Science and Technology*. 2003. Vol. 12, N 1. P. 39.
196. Silva P., Soto L., Kies W. et al. // *Ibid.* 2004. Vol. 13, N 2. P. 329.
197. Soto L. // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2005. Vol. 47, N 5A. P. A361.
198. Soto L., Silva P., Moreno J. et al. // *Journal of Physics D: Appl. Phys.* 2008. Vol. 41, N 20. P. 205215.
199. Tarifeno-Saldivia A., Pavez C., Moreno J., Soto L. // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2011. Vol. 39, N 2. P. 756.
200. Soto L., Pavez C., Moreno J. et al. // *Physica Scripta*. 2008. Vol. T131, N 1. P. 014031-1.
201. Silva P., Moreno J., Soto L. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2003. Vol. 83, N 16. P. 3269.

202. Sylvester G., Zambra M., Silva P. et al. // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2006. Vol. 34, N 5. P. 1934.
203. Silva P., Moreno J., Pavez C. et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2008. Vol. 134, N 1. P. 012044-1.
204. Silva P., Farías C., L'Huissier P. et al. // *Ibid.* P. 012045-1.
205. Pavez C., Moreno J., Silva P. et al. // *Ibid.* P. 012049-1.
206. Zambra M., Silva P., Pavez C. et al. // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2009. Vol. 51, N 12. P. 125003-1.
207. Favre M., Silva P., Choi P. et al. // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 1998. Vol. 26, N 4. P. 1154.
208. Silva P., Favre M. // *Journal of Physics D: Appl. Phys.* 2002. Vol. 35, N 20. P. 2543.
209. Pavez C., Soto L., Moreno J. et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2008. Vol. 134, N 1. P. 012050-1.
210. Zambra M., Soto J., Silva P. et al. // *Ibid.* P. 012046-1.
211. Soto L., Pavez C., Moreno J. et al. // *Plasma Sources Science and Technology*. 2009. Vol. 18, N 1. P. 015007-1.
212. Bhuyan H., Chuaqui H., Favre M. et al. // *Journal of Physics D: Appl. Phys.* 2005. Vol. 38, N 8. P. 1164.
213. Bhuyan H., Favre M., Valderrama E. et al. // *Appl. Surface Science*. 2007. Vol. 254, N 1. P. 197.
214. Lee S. // *Proc. College Plasma Phys., Trieste, Italy*. 1983. Vol. 2. P. 967.
215. Goundarzi S., Amrolahhi R., Saberi Moghaddam R. // *Journal Fusion Energy*. 2008. Vol. 27, N 3. P. 195.
216. Gonzalez J., Clausse A., Bruzzone H., Florido P. // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2004. Vol. 32, N 3. P. 1383.
217. Gonzalez J., Barbaglia M., Casanova F., Clausse A. // *Brasilian Journal of Physics*. 2009. Vol. 39, N 4. P. 633.
218. Bruzzone H., Milanese M. M., Niedbalski J. J. et al. // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2010. Vol. 38, N 7. P. 1592.
219. Soto L., Pavez C., Tarifeño A. et al. // *Plasma Sources Science and Technology*. 2010. Vol. 19, N 5. P. 055017.
220. Lu M. F. // *Physical Review E*. 1996. Vol. 54, N 2. P. R1074.
221. Rawat R. S., Zhang T., Phua C. B. L. et al. // *Plasma Sources Science and Technology*. 2004. Vol. 13, N 4. P. 569.
222. Pouzo J. O., Milanese M. M. // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2003. Vol. 31, N 6. P. 1237.
223. Milanese M. M., Cortazar O. D., Moroso R. et al. // *Ibid.* 2011. Vol. 39, N 11. P. 2402.
224. Favre M., Silva P., Choi P. et al. // *Ibid.* 1998. Vol. 26, N 4. P. 1154.
225. Zakaulah M., Alamgir K., Rassol A. et al. // *Ibid.* 2001. Vol. 29, N 1. P. 62.
226. Zakaulah M., Akhtar I., Murtaza G. et al. // *Physics of Plasmas*. 1999. Vol. 6, N 8. P. 3188.

227. Roshan V. M., Lee P., Pan Z. et al. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. Vol. 38, N 9. P. 2434.
228. Goundarzi S., Sadat Kiai S. M., Morshedien N. et al. // Czechoslovak Journal of Physics. 2005. Vol. 55, N 1. P. 45.
229. Talaei A., Sadat Kiai S. M. // Journal of Fusion Energy. 2009. Vol. 28, N 3. P. 235.
230. Talaei A., Sadat Kiai S. M. // Ibid. P. 304.
231. Yasin M., Ali R., Solaija T. J. et al. // Ibid. 2004. Vol. 22, N 4. P. 247.
232. Raspa V., Moreno C., Sigaut L., Clausse A. // Journal of Appl. Phys. 2007. Vol. 102, N 12. P. 123303-1.
233. Raspa V., Knoblauch P., Di Lorenzo F., Moreno C. // Phys. Lett. A. 2010. Vol. 374, N 46. P. 4675.
234. Neog N. K., Mohanty S. R., Borthakur T. K. // Ibid. 2008. Vol. 372, N 13. P. 2294.
235. Zakaullah M., Alamgir K., Shafiq M. et al. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2002. Vol. 30, N 6. P. 2089.
236. Ahmad S., Shafiq M., Zakaullah M., Waheed A. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89, N 6. P. 061503-1.
237. Mohanty S. R., Sakamoto T., Kobayashi Y. et al. // Review of Scientific Instruments. 2006. Vol. 77, N 4. P. 043506-1.
238. Zakaullah M., Ahmad I., Shafique M. et al. // Physica Scripta. 1998. Vol. 57, N 1. P. 136.
239. Kelly H., Lepone A., Marquez A. // IEEE Transactions on Plasma Science. 1997. Vol. 25, N 3. P. 455.
240. Bhuyan M., Neog N. K., Mohanty S. R. et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2010. Vol. 208, N 1. P. 012126-1.
241. Rout R. K., Shyam A., Chitra V. // Annals of Nuclear Energy. 1991. Vol. 18, N 6. P. 357.
242. Beg F. N., Zakaullah M., Murtaza G., Beg M. M. // Physica Scripta. 1992. Vol. 46, N 2. P. 152.
243. Shyam A., Rout R. K. // IEEE Transactions on Plasma Science. 1997. Vol. 25, N 5. P. 1166.
244. Zhang T., Lin X., Chandra K. A. et al. // Plasma Sources Science and Technology. 2005. Vol. 14, N 2. P. 368.
245. Wong D., Patran A., Tan T. L. et al. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2004. Vol. 32, N 6. P. 2227.
246. Neog N. K., Mohanty S. R., Hotta E. // Journal of Appl. Phys. 2006. Vol. 99, N 1. P. 013302-1.
247. Bhuyan H., Mohanty S. R., Neog N. K. et al. // Ibid. 2004. Vol. 95, N 6. P. 2975.
248. Hussain S. S., Ahmad S., Lee S., Zakaullah M. // Plasma Sources Science and Technology. 2007. Vol. 16, N 3. P. 587.
249. Zeb S., Qayyum A., Shafiq M., Zakaullah M. // European Physical Journal Appl. Phys. 2008. Vol. 42, N 2. P. 145.



250. Hassan M., Qayyum A., Ahmad R. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2009. Vol. 267, N 11. P. 1911.
251. Shafiq M., Hassan M., Shahzad K. et al. // Chinese Physics B. 2010. Vol. 19, N 1. P. 012801-1.
252. Rawat R. S., Lee P., White T. et al. // Surface and Coatings Technology. 2001. Vol. 138, N 2–3. P. 159.
253. Jabar S., Khan I. A., Ahmad R. et al. // Journal of Vacuum Science and Technology A. 2009. Vol. 27, N 2. P. 381.
254. Nayak B. B., Acharya B. S., Mohanty S. R. et al. // Surface and Coatings Technology. 2001. Vol. 145, N 1–3. P. 8.
255. Sadiq M., Ahmad S., Shafiq M., Zakaullah M. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2006. Vol. 252, N 2. P. 219.
256. Khan I. A., Hassan M., Ahmad R. et al. // Thin Solid Films. 2008. Vol. 516, N 23. P. 8255.
257. Hassan M., Ahmad R., Qayyum A. et al. // Vacuum. 2006. Vol. 81, N 3. P. 291.
258. Gupta R., Srivastava M. P., Balakrishnan V. R. et al. // Journal of Physics D: Appl. Phys. 2004. Vol. 37, N 7. P. 1091.
259. Khan I. A., Hassan M., Hussain T. et al. // Appl. Surface Science. 2009. Vol. 255, N 12. P. 6132.
260. Khan I. A., Hassan M., Ahmad R. et al. // International Journal of Modern Physics B. 2008. Vol. 22, N 23. P. 3941.
261. Zeb S., Sadiq M., Qayyum A. et al. // Materials Chemistry and Physics. 2007. Vol. 103, N 2–3. P. 235.
262. Zeb S., Qayyum A., Sadiq M. et al. // Plasma Chemistry and Plasma Processes. 2007. Vol. 27, N 2. P. 127.
263. Zeb S., Murtaza G., Zakaullah M. // Journal of Appl. Phys. 2007. Vol. 101, N 6. P. 063307-1.
264. Malhotra Y., Roy S., Srivastava M. P. // Journal of Physics: Conference Series. 2010. Vol. 208, N 1. P. 012106-1.
265. Devi N.B., Roy S., Srivastava M. P. // Ibid. P. 012103-1.
266. Singh V. P., Roy S., Srivastava M. P. // Ibid. P. 012105-1.
267. Pan Z. Y., Rawat R. S., Verma R. et al. // Phys. Lett. A. 2010. Vol. 374, N 8. P. 1043.
268. Lin J. J., Roshan M. V., Pan Z. Y. et al. // Journal of Physics D: Appl. Phys. 2008. Vol. 41, N 1. P. 135213-1.
269. Pan Z. Y., Lin J. J., Zhang T. et al. // Thin Solid Films. 2009. Vol. 517, N 8. P. 2753.
270. Pan Z. Y., Rawat R. S., Roshan M. V. et al. // Journal of Physics D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42, N 17. P. 175001.
271. Mohanty S. R., Neog N. K., Rawat R. S. et al. // Phys. Lett. A. 2009. Vol. 373, N 22. P. 1962.

272. Sadiq M., Shafiq M., Waheed A. et al. // Phys. Lett. A. 2006. Vol. 352, N 1–2. P. 150.
273. Roshan M. V., Rawat R. S., Babazadeh A. R. et al. // Appl. Surface Science. 2008. Vol. 255, N 5. P. 2461.
274. Rawat R. S., Zhang T., Thomas Gan K. S. et al. // Ibid. 2006. Vol. 253, N 3. P. 1611.
275. Rawat R. S., Arun P., Vadeshwar A. G. et al. // Journal of Appl. Phys. 2004. Vol. 95, N 12. P. 063307-1.
276. Lee S., Kudryashov V., Lee P. et al. // Proc. of SPIE. 1999. Vol. 3899. P. 247.
277. Gribkov V. A., Srivastava A., Keat P. L. C. et al. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2002. Vol. 30, N 3. P. 1331.
278. Raspa V., Di Lorenzo F., Knoblauch P. et al. // PMC Phys. A. 2008. Vol. 2, N 5. P. 1.
279. Verma R., Rawat R. S., Lee P. et al. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. Vol. 38, N 4. P. 652.
280. Roshan M. V., Springham S. V., Rawat R. S., Lee P. // Ibid. N 12. P. 3393.
281. Asle-Zaeem A., Sadat Kiai S. M., Sedaghatizadeh M. et al. // Journal of Fusion Energy. 2009. Vol. 28, N 4. P. 350.
282. Rawat R. S., Zhang T., Lim G. J. et al. // Ibid. 2004. Vol. 23, N 1. P. 49.

Научное издание

**Дубинов** Александр Евгеньевич,  
**Сенилов** Леонид Андреевич

**Исследования на плазменных фокусах  
в развивающихся странах**

Редактор *Н. Ю. Костюничева*

Корректор *Н. Ю. Костюничева*

Компьютерная подготовка оригинала-макета *С. В. Макеева, С. Н. Фролова*

---

Подписано в печать 27.03.2013    Формат 70×100/16  
Печать офсетная.    Усл. печ. л. ~13,4    Уч.-изд. л. ~8,4  
Тираж 150 экз.    Зак. тип. 1584-2012

---

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
607188, г. Саров Нижегородской обл., ул. Силкина, 23