ПРОТОННАЯ ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ МЕЖПЛАНЕТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Акишин А.И.

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ

akishin@hep.sinp.msu.ru

A major concern for spacecraft is internal electrostatic discharge (IESD), a form of spacecraft charging. This paper reviews the work done so far on IESD due to protons and provides a possible example of an anomaly due to a proton induced discharge in interplanetary space on the Galileo spacecraft.

При длительных полетах межпланетных космических аппаратов (МКА) типа «Галилео», «Прометей» на них будут воздействовать потоки протонов с энергией до 100МэВ и выше в периоды мощных солнечных вспышек. Имеется корреляция во времени между неполадками в системе управления космическим аппаратом «Галилео» и возникновением мощной солнечной вспышки в октябре 1989г [1,2] (Рис.1)

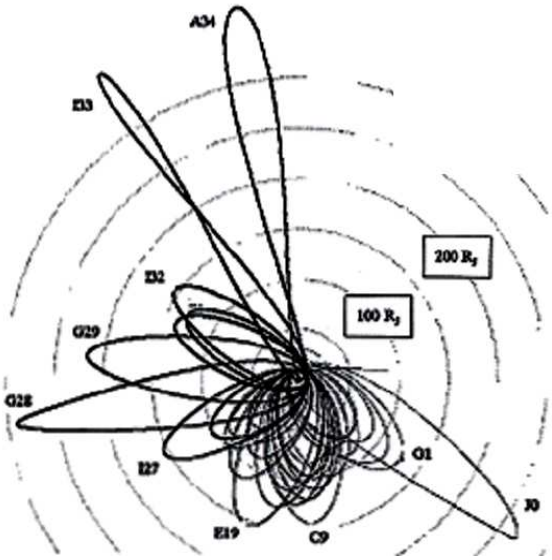

Рис.1 Орбиты КА «Галилео» в районе Юпитера[1].

Предполагается, что причина сбоев на КА «Галилео» в этот период связана с возникновением электростатических разрядов за счет протонной электризации диэлектрических материалов бортового оборудования [2]. Сведений о роли протонной зарядки диэлектрических материалов искусственных спутников Земли, функционирующих в зоне внутреннего радиационного пояса Земли, где имеются значительные потоки протонов высокой энергии, отсутствуют [2]. В лабораторных экспериментах, проведенных в НИИЯФ МГУ [3-6], и приведенных в [2], наблюдалась радиационная электризация и электрический пробой ведренного протонного заряда в облученных диэлектрических материалах при бомбардировке пучками

протонов с энергией 30-100 МэВ. Протоны в [3] ускорялись в линейном протонном инжекторе, а в [2] на циклотронах.

В работах [3-6] показано, что при облучении оптических стекол протонами с энергией 30-100 МэВ возникает электрический пробой внедренного протонного заряда и впервые (1987-1989г.) наблюдалось образование фигур Лихтенберга в конце пробега протонов в стеклах. Облучение оптических стекол проводилось на линейном протонном инжекторе И-100 Института физики высоких энергий (г. Протвино) [3].

Флюенс протонов, при котором возникает электрический пробой в облученном стекле, составляет $Ф_р$~ 10^{13} пр/см^2 и слабо зависит от энергии протонов в интервале 30-100 МэВ [3]. Облучались оптические стекла: сверхтяжелый крон марок СТК-112,СТК-120 и тяжелый крон марки ТК-120.Температура облучаемых стекол была ~70^{0}С, время облучения 25 – 100 с, режим работы ускорителя импульсный, частота следования импульсов 0,25 Гц, длительность импульса 50мкс, ток в импульсе 120 мА. Диаметр пучка ~6см, облучаемая площадь~25 см^2. Облучение проводилось в воздухе. Флюенс протонов за импульс составляет 10^{11} пр/см^2. Глубина залегания фигур Лихтенберга в облученном стекле составляет около 3 см, что примерно соответствует пробегу протонов с энергией 100 МэВ в этом типе стекла. На Рис.2 приведена фотография стекла со следами электрического пробоя радиационно-заряженного стекла, облученного протонами с энергий 100 МэВ [3].

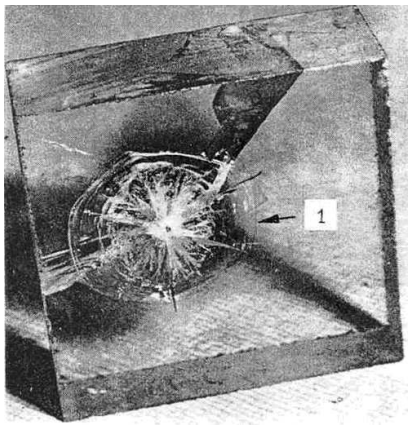

Рис.2 Следы электрического пробоя в радиационно-заряженном стекле, облученного протонами с энергией 100 МэВ, 1-Фигура Лихтенберга и выходное отверстие разрядного канала в центре зоны повреждения стекла после эмиссии плазмоида [3] .

Расчетный флюенс протонов, внедренных в диэлектрик и создающих объемный заряд и напряженность электрического поля, Е, не менее Е = 10^5 В/см, Ф~5·10^{10} пр/см^2 [2]. При этих условиях облучения может произойти разряд в диэлектрике. Как известно, максимальный флюенс протонов с энергией выше 30МэВ при самых мощных солнечных вспышках не превышает Ф~10^{10} пр/см^2 [2].

Из натурных экспериментов, проведенных на ИСЗ CRRES/IDM [8,9], известно, что электрический пробой внутри диэлектрических материалов возникает, если флюенс поглощенных электронов с энергией выше 1МэВ превышает $\Phi \sim 2\cdot 10^{10}$эл/см^2,при этом напряженность электрического поля в объеме диэлектрика, Е, должна быть в
пределах10^5-10^6В/см (Рис.3).

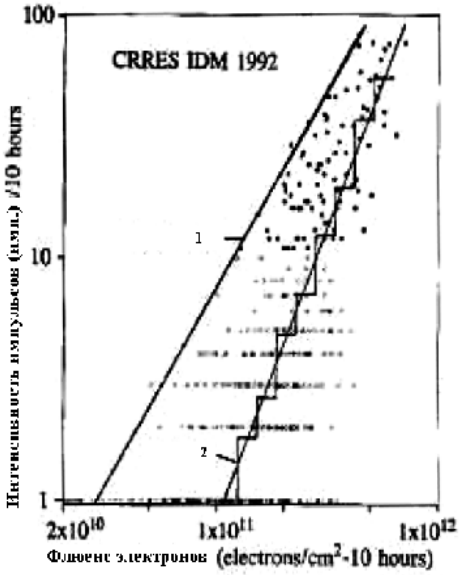

Рис.3 Интенсивность разрядных импульсов на ИСЗ CRRES/IDM [8],
1 - худший вариант;2 - усредненный вариант.

Различие расчетных и экспериментальных флюенсов протонов с энергией выше 30 МэВ, приводящих к электрическому пробою в диэлектриках, по-видимому, связано с тем фактом, что в натурных космических условиях плотность потока протонов, а следовательно и радиационная проводимость диэлектрика намного ниже, чем в условиях облучения на линейных протонных ускорителях, что сказывается на коэффициенте захвата протонного заряда в объеме облученного диэлектрика.

В качестве примера можно сослаться на работу [3]. Как уже отмечалось, флюенс протонов с энергией 30-100 МэВ, при котором возникает электрический пробой при облучении оптического стекла составляет $\Phi \sim 10^{13}$ пр/см^2. В работе [2] аналогичные фюенсы при облучении на циклотроне для ряда полимерных материалов оцениваются в пределах 10^{12}-10^{13}пр/см^2. Флюенс протонов за один импульс от линейного протонного инжектора И-100 составляет $\Phi \sim 10^{11}$ пр/см^2 при длительности импульса 50 мкс, плотность потока протонов в импульсном пучке будет составлять $J_у = 10^{15}$ пр/см^{2}с. В космических условиях на поверхность МКА в момент мощной солнечной вспышки попадает плотность потока протонов с энергией выше 30 МэВ до $J_к \sim 10^5$ пр/см^{2}с. Таким образом, плотность потока протонов при облучении на линейном протонном инжекторе И-100 в лаборатории будет превышать плотность потока протонов, падающих на поверхность диэлектрика МКА в

~10^{10} раз. Коэффициент захвата внедряемого в диэлектрик протонного заряда при облучении зависит как от энергии протонов, так и от радиационной и собственной проводимости в облучаемой области диэлектрика. При этом, чем выше радиационная проводимость облучаемого диэлектрика, тем ниже коэффициент захвата внедряемых в диэлектрик протонов [2].

Характер зависимости радиационной проводимости диэлектрика, σ_r , от мощности дозы излучения, p , имеет вид [10]: $\sigma_r = kp^n$, где k - константа, связанная со структурой материала, n-лежит в пределах 0.5 – 1, а p - мощность дозы протонного излучения в объеме диэлектрика. В качестве примера на Рис.4 показана зависимость радиационной проводимости полиимидной пленки от мощности дозы излучения [10]. В свою очередь, σ_r, пропорциональна плотности потока протонов, бомбардируемых диэлектрик, а также мощности дозы излучения, если n~1. Таким образом, коэффициент захвата протонного заряда в условиях космического полета должен быть намного выше, чем в условиях лабораторного облучения на линейном протонном инжекторе И-100, когда радиационная проводимость в облучаемом диэлектрике в зависимости от, n, может быть в 10^5- 10^{10} раз выше, чем в космосе.

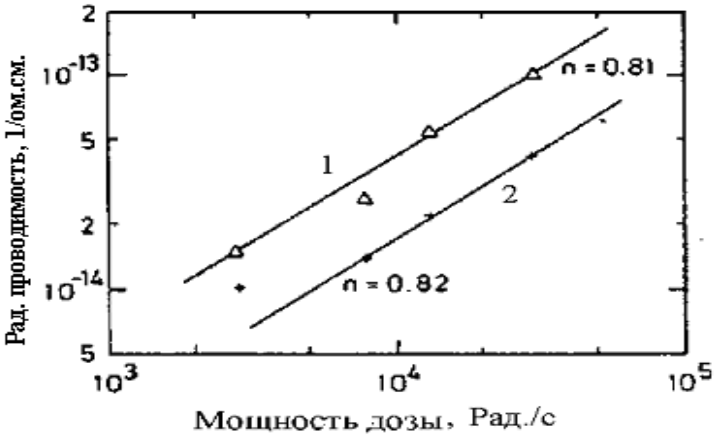

Рис.4 Зависимость радиационной проводимости полиимидной пленки от мощности дозы излучения; 1 - исходная, 2 - минимальная [10] .

На коэффициент захвата может также влиять собственная проводимость диэлектрика, сильно зависящая от температуры. В условиях облучения протонами на линейном инжекторе И-100 температура на облучаемом образце оптического стекла составляла ~70^0C [3]. В реальных условиях межпланетного полета КА многие диэлектрические материалы оборудования могут иметь более низкие значения температур, включая криогенные. Время релаксации при T~20^OC внедренного протонного заряда в облученных оптических стеклах при энергии бомбардируемых протонов 100 МэВ составляет около 1-2 года [7].Поэтому в условиях космического полета возможен эффект накопления протонного заряда в диэлектрических материалах МКА от нескольких последующих, мощных солнечных вспышек. Можно ожидать, что на борту МКА флюенс протонов с энергией выше 30 МэВ, приводящий к электрическому пробою диэлектрика, будет возможно менее $5{\cdot}10^{10}$-10^{11} пр/см^2, т.е. намного ниже флюенса, получаемого при испытании диэлектрических матери-

алов на протонных ускорителях [2,3]. Очень важно при дальнейших лабораторных испытаниях на протонных ускорителях с энергией протонов 30-100 МэВ определить значение флюенса протонов, ответственного за возникновения объемного электростатического разряда в диэлектриках, при плотностях потока протонов 10^5-10^6 пр./см^2 с в интервале температур: (-100) ÷ 50°С.

1. P. D. Fieseler, S. M. Ardalan, A. R. Frederickson. "The Radiations Effects on Galileo Spacecraft Systems at Jupiter." *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 49, no. 6, December 2002. Pages: 2739-
1. 2.N.W.Green, A.R.Frederickson. A Study of Spacecraft Charging due to Expousure to Interplanetary Protons. http://adsabs.harvard.edu/abs/2006AIPC..813.694
2. Акишин А.И., Витошкин Э.А., Тютрин Ю.И., Цепляев Л.И. Электроразрядное разрушение диэлектриков протонным излучением. ФХОМ, 1994, №3, с. 32-34
3. Akishin A.I., Tsepliaev L.I. Destruction and Discharge Phenomena in the Irradiated Glasses. J. Nucl. Mater. 1996, v.233-236, p. 1318-1320
4. A.I.Akishin, E. A. Vitoshkin, N. I. Zakharov, and L. I. Tsepliaev. "Electric Discharge Mechanism of Failure of Solid Dielectrics under Proton Radiation." *Physics and Chemistry of Materials Treatment*, vol 30, no. 3, June-July, 1996. Pages: 197-199.
5. A.I. Akishin. "Electric Discharge Phenomena in Irradiated Dielectrics May Reduce the Reliability of Space and Thermonuclear Equipment." *Physics and Chemistry of Materials Treatment*, vol. 31, no.5, Sept-Oct.1997. Pages: 457-463.
6. Акишин А.И., Витошкин Э.А., Громов В.В., Розно А.Г., Цепляев Л.И. О релаксации внедренного объемного заряда в оптических стеклах, облученных протонами 100 МэВ // ФХОМ, 1998, N6, с.24-27.
7. A.C.Whittlesey, A.R.Frederickson, H.B.Garrett. Comparing CRRES Internal Discharge Monitor Results with Ground Tests and Published Guidelines. http://ieeexplore.ieee.org/iel5/27/36079/01710072.
8. 9, H.B.Garrett, A.C.Whittlesey, Spacecraft Charging, An Update // IEEE Trans. On Plasma Science, 2000, v.28,№6,p.2017-2028.

G. M. Yang and G. M. Sessler, "Radiation-induced Conductivity in Electron-beam Irradiated Insulating Polymer Films." *IEEE Transactions on Electrical Insulation* ,vol. 27 no. 4, August 1992. Pages: 843-848.