

**УДАЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ, ВНЕДРЁННОГО В ГРАФИТ, ПРИ ПОСЛЕДУЮЩЕМ
ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ**
**REMOVAL OF DEUTERIUM IMPLANTED INTO GRAPHITE BY CONSEQUENT
IRRADIATION BY IONS OF HYDROGEN PLASMA.**

А.А. Айрапетов, Л.Б. Беграмбеков, С.С. Довганюк, А.С. Каплевский
А.А. Ayrapetov, L.B. Begrambekov, S.S. Dovganuk, A.S. Kapleuski

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31.
e-mail: lexhair@plasma.mephi.ru*

The paper investigates peculiarities of deuterium removal implanted into graphite by subsequent irradiation with hydrogen plasma ions. It is shown that irradiation with 50-eV hydrogen ions leads to desorption of deuterium previously implanted with energies 100 and 650 eV. The fraction of deuterium remaining in graphite decreases with the increase of hydrogen irradiation dose. The amount of deuterium in graphite stays constant after multiple cycles of consequent irradiation. Conclusion is made that low energy irradiation with hydrogen ions can be used as a method of low temperature graphite degassing.

Выявление закономерностей захвата и удержания изотопов водорода имеет как научное, так и практическое значение, в частности, для разработки методики их удаления из материалов, контактирующих с плазмой в плазменных и термоядерных установках. Проблема детритизации контактирующих с плазмой графитовых элементов чрезвычайно важна для установок, работающих с тритием, в связи с необходимостью не допускать превышение его накопления в материалах первой стенки выше определённого предела.

Для «теплового» обезгаживания графита требуется его длительный прогрев до температуры порядка 800-900 К, неприемлемой в условиях термоядерных установок.

Известны эксперименты по обезгаживанию обращенных к плазме графитовых материалов «чистящими» разрядов на гелии, водороде, дейтерии, либо на смесях этих и других газов. Однако, не проводилось систематического исследования механизмов и закономерностей процессов, способных привести к уменьшению содержания в графите изотопов водорода, предварительно внедрённых в него, с помощью сравнительно низкотемпературного плазменного облучения.

Первые результаты подобного исследования представлены в докладе. В работе изучалась возможность удаления из графита внедрённого дейтерия последующим облучением ионами водородной плазмы.

Облучение исследуемых образцов ионами дейтериевой и водородной плазмы приводилось в плазменной камере установки «Многофункциональный исследовательский комплекс масс-спектрометрического анализа» («МИКМА») [1], а измерение количества изотопов водорода в образцах после их облучения определялось в камере термодесорбционного анализа (ТДС камере) установки. Наличие вакуумного ввода позволяло проводить транспортировку исследуемого образца между камерами без контакта с атмосферой.

Давление рабочего газа при облучении образцов составляло 7.9×10^{-1} Па (при разряде на дейтерии) и 8.6×10^{-1} Па (при разряде на водороде). Состав остаточного газа - 95% H_2O и 5% H_2 . Плотность плазмы газового разряда составляла $\sim 10^{10}$ $см^{-3}$, электронная температура ~ 2 эВ. Нагрев образцов при ТДС анализе проводился со скоростью 5 К/с в диапазоне температур 300-1450 К. Регистрировались спектры термодесорбции H_2 , HD, D_2 (десорбция других молекул, содержащих водород или дейтерий была незначительной).

Для экспериментов использовались образцы графита марки МПГ-8 с размерами $7 \times 7 \times 2$ мм³. Поверхность образцов с каждой из сторон полировалась последовательно различной шлифовальной бумагой с понижением зернистости от 120 мкм до 5-7 мкм. После окончания механической обработки образцы промывались этанолом в ультразвуковой ванне. Далее образцы обезгаживались в вакууме при температуре 1450 К в течении минуты.

Отожженные образцы облучались ионами дейтериевой плазмы с энергией 100 и 650 эВ/ат, поток ионов составлял $1,2 \times 10^{16}$ ат/см²с и $1,8 \times 10^{16}$ ат/см²с соответственно, температура образцов во время облучения - 630К. Для внедрения ионов дейтерия с энергиями, как 100, так и 650 эВ/ат, была выбрана доза облучения 7×10^{19} ат/см². При этом захват дейтерия составлял, соответственно, $5,3 \times 10^{16}$ ат/см² и $12,8 \times 10^{16}$ ат/см². Измерение зависимости количества захваченных ионов от дозы облучения показало, что при такой дозе зона торможения ионов в обоих случаях оказывалась насыщенной. Анализ спектров термодесорбции, выполненный на основе результатов работы [2, 3], показал, что часть дейтерия диффундировала и захватывалась в ловушки в глубине графита. Во время облучения ионами дейтерия происходил также захват водорода, по-видимому, преимущественно из молекул воды, сорбированных на поверхности образцов. Количество захваченного водорода слабо зависело от дозы облучения ионами и составляло $1-1,5 \times 10^{16}$ ат/см² при $E=100$ эВ/ат и $2-2,5 \times 10^{16}$ ат/см² при $E=650$ эВ/ат.

Облучение ионами водородной плазмы имплантированных дейтерием образцов проводилось со следующими параметрами: $E=50$ эВ/ат, $j=7.5 \times 10^{15}$ ат/см²с, $\Phi=(0,5 - 3.5) \times 10^{19}$ ат/см², $T=630$ К. Наблюдалась десорбция дейтерия и захват водорода. Сравнение спектров десорбции дейтерия из образцов, облученных и не облученных водородом производилось на основании результатов работ [2, 3], исследовавших соответствие между положением пиков ТДС спектров и расположением ловушек изотопов водорода в графите. Был сделан вывод о том, что облучение ионами водорода с низкой энергией приводило к удалению дейтерия, удерживаемого не только в зоне торможения, но и в глубине графита. Количества атомов дейтерия, водорода и их суммарное количество после облучения ионами водорода с различной дозой образцов, предварительно облученных дейтерием, показаны на рис. 1.

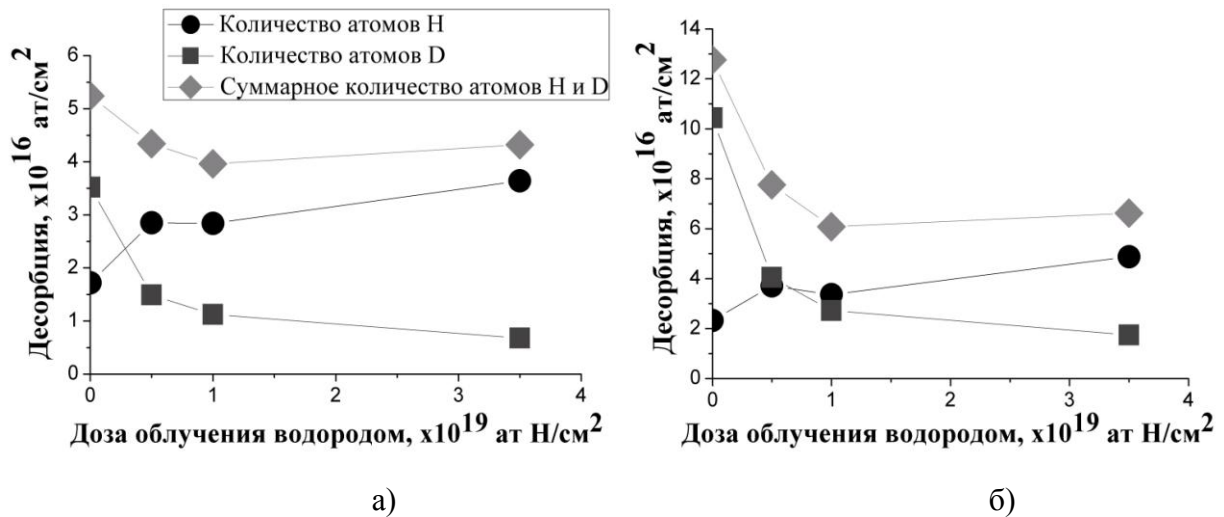


Рис. 1. Количество атомов водорода и дейтерия, а также суммарное количество изотопов водорода в графите в зависимости от дозы облучения ионами водорода. Имплантация дейтерия производилась облучением ионами дейтерия с энергией 100 эВ/ат (а) и 650 эВ/ат (б).

Видно, что при дозе облучения водородом 0.5×10^{19} ат/см² в обоих случаях осталось примерно 40% первоначального количества дейтерия, а при дозе 1×10^{19} ат/см² - только 30%. При этом наблюдалось увеличение количества захваченного водорода, и суммарное количество изотопов водорода при дозе 1×10^{19} ат/см² составляло приблизительно три четверти от первоначального для энергии 100 эВ/ат и половину - для энергии 650 эВ/ат. При увеличении дозы до 3.5×10^{19} ат/см² содержание дейтерия уменьшилось в обоих случаях уже до 20%, но за счет увеличения захвата водорода наблюдался небольшой рост суммарного количества изотопов водорода в образце.

Важно отметить, что, несмотря на разные количества дейтерия, захваченного после облучения ионами дейтерия с разной энергией, отношение удаленного количества дейтерия к первоначальному в обоих случаях одинаково. Это говорит о том, что механизм удаления дейтерия не связан ни с количеством захваченных ионов дейтерия, ни с характерной глубиной их торможения в графите.

Так как облучения ионами с энергией 100 эВ/ат и 650 эВ/ат являются характерными примерами «низкоэнергетического и высокоэнергетического облучения» [2], можно предположить, что и при промежуточных энергиях ионов дейтерия его удаление будет происходить аналогичным образом.

Для того, чтобы определить, будет ли происходить накопление изотопов водорода при многократном повторении последовательных облучений ионами дейтерия и водорода, были проведены эксперименты с двух-, трёх- и четырехкратным повторением облучения дейтерием с энергией 650 эВ/ат, дозой 7×10^{19} ат/см² и последующего облучения водородом с энергией 50 эВ/ат, дозой $0,5 \times 10^{19}$ ат/см². ТДС-анализ показал, что во всех этих случаях количества захваченного дейтерия и водорода практически совпадают. Это дает основание предполагать, что и при большем количестве циклов их содержание в образце останется тем же.

Полученные результаты можно суммировать следующим образом.

Облучение ионами водородной плазмы с энергией 50 эВ/ат при температуре 630К приводит к десорбции из графита, имплантированного с энергиями 100 и 650 эВ/ат.

Доля остающегося в графите дейтерия уменьшается с 40% до 20% при увеличении дозы облучения ионами водорода с $0,5 \times 10^{19}$ ат/см² до $3,5 \times 10^{19}$ ат/см².

Количества остающихся в графите имплантированного дейтерия и захваченного из остаточного газа водорода не меняются при повторении циклов повторного облучения дейтерием и водородом.

Полученные результаты могут служить основой для разработки методики низкотемпературного удаления изотопов водорода из графита.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых, № 14.У30.17.2913-МК.

1. A. Airapetov, L. Begrambekov, S. Bremond, etc., J.Nucl.Mat. 418(2011) pp. 1042-1045
2. A. Airapetov, L. Begrambekov, C. Brosset, etc., J.Nucl.Mat. 390-391(2009) pp. 589-592
3. A. Airapetov, L. Begrambekov, Vergazov S., etc., Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2010, 4, 567-571