

К. ф.-м. н. О. А. ФЕДОРОВИЧ, М. П. КРУГЛЕНКО,  
Б. П. ПОЛОЗОВ

Украина, г. Киев, Институт ядерных исследований  
E-mail: oafedorowich@kinr.kiev.ua, interdep@kinr.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
14.07 2009 г.

Оппонент д. т. н. В. В. БАРАНОВ  
(БГУИР, г. Минск)

## ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ ТОРЦОВ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

*Выбраны оптимальные режимы плазмохимического травления торцов пластин в реакторе, разработанном в ИЯИ, который по производительности превосходит лучший зарубежный аналог при более высоком качестве обработки пластин.*

В связи с экономическим и энергетическим кризисом все большую актуальность приобретают разработки альтернативных источников энергии. Перспективными среди них являются устройства, которые преобразуют энергию солнечного излучения непосредственно в электрическую энергию — фотоэлектрические преобразователи (ФЭП). Стоимость электрической энергии, выработанной при помощи ФЭП, приближается к стоимости электроэнергии, получаемой традиционными методами от тепло-, гидро- и атомных электростанций [1].

Большинство источников электрической энергии относятся к невозобновляемым, запасы же солнечной энергии практически неисчерпаемы, что открывает большую перспективу для развития солнечной энергетики и является неоспоримым ее преимуществом. Кроме того, получение электрической энергии с помощью ФЭП абсолютно бесшумно, экологически чисто, не имеет вредных отходов и выбросов.

Наиболее важными задачами в настоящее время при производстве ФЭП являются уменьшение их себестоимости, увеличение коэффициента полезного действия, долговечности и надежности. Самыми распространенными, надежными и дешевыми являются ФЭП, изготовленные из монокремния. При их изготовлении необходимо получить надежную изоляцию между рабочей и обратной плоскостями солнечного элемента. В процессе легирования рабочей поверхности пластин ФЭП происходит также легирование их торцов, которые становятся токопроводящими. Для увеличения КПД фотоэлектрических преобразователей необходимо получить максимально возможную высокоомную изоляцию между рабочей и обратной сторонами ФЭП для предотвращения появления токов утечки зарядов по всему периметру боковой поверхности. Ухудшение изоляции даже в одной точке на боковой поверхности ФЭП приводит к появлению токов утечки и существенному снижению КПД. Для решения задачи создания надежной изоляции между

рабочей и обратной сторонами пластин кремния в Институте ядерных исследований был разработан и изготовлен специальный плазмохимический реактор (ПХР) [2].

В данной работе приводятся результаты технологических испытаний ПХР, необходимые для выбора наиболее экономичного и экологичного режима травления торцов ФЭП из монокремния.

### Экспериментальные результаты

Скорость плазмохимического травления кремния существенно зависит от качественного состава рабочего газа и соотношения компонент в смесях рабочих газов. Чаще всего для травления кремния используют смесь  $\text{CF}_4 + \text{O}_2$  [3—5], в том числе и для травления торцов ФЭП. Используется для травления кремния также элегаз ( $\text{SF}_6$ ) и его смесь с кислородом [6, 7]. Поэтому для выбора оптимальных режимов травления кремния с максимальной скоростью были проведены исследования влияния состава рабочего газа на скорость травления. Одновременно проводились исследования влияния величины площади обрабатываемых пластин на скорость обработки кремния («эффект загрузки»). В [3] было показано, что максимальная скорость травления кремния в среде  $\text{CF}_4$  получается при добавке в рабочую камеру ПХР 20%  $\text{O}_2$ . В работах [4, 6] было показано, что максимальная скорость травления в элегазе получена при добавке в ПХР 10% кислорода. Эти данные были использованы нами при проведении исследований.

На рис. 1 приведены зависимости скорости травления монокремния от величины обрабатываемой площади в двух разных смесях рабочего газа при неизменных значениях тока в разряде  $I_p = 11$  А, напряженности магнитного поля около  $400$  А/м, рабочем давлении в ПХР  $P = 5 \cdot 10^{-2}$  торр. Напряжение автосмещения  $U_{\text{см}}$  поддерживалось на уровне  $-80$  В. Как видно, скорость травления в смеси 90% элегаза и 10%  $\text{O}_2$  в 5 раз превышает скорость травления в смеси 80%  $\text{CF}_4$  и 20%  $\text{O}_2$  при одинаковых прочих условиях. Скорость травления монокремния при увеличении площади обрабатываемой поверхности от 10 до 600  $\text{cm}^2$  уменьшается с 2 до 0,3  $\mu\text{m}/\text{min}$  при травлении в смеси элегаза и 10%  $\text{O}_2$ . Аналогичным был эффект загрузки и при травлении в смеси  $\text{CF}_4$  (хладона-14) и 20%  $\text{O}_2$ . Скорость травления при увеличении площади монокристаллического кремния с 10 до 300  $\text{cm}^2$  уменьшается с 0,4 до 0,1  $\mu\text{m}/\text{min}$ . Эффект

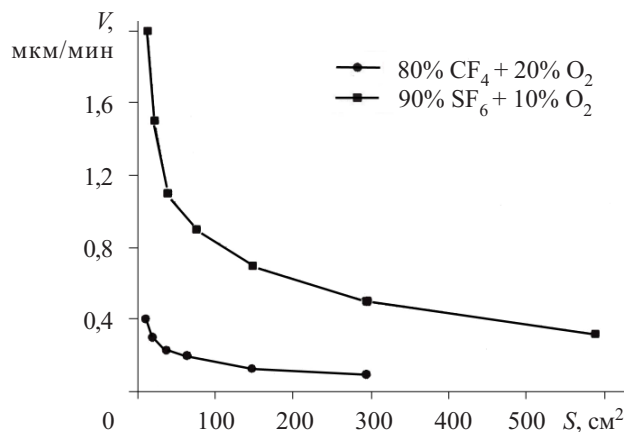


Рис. 1. Зависимость скорости травления монокремния в различных смесях рабочего газа от площади обрабатываемых пластин

загрузки, полученный в данной работе, проявляется примерно так же, как и при реактивном ионно-плазменном травлении в элегазе, описанном в [4], однако максимальная скорость травления монокремния, полученная в нашем реакторе при малой загрузке (2 мкм/мин), была в четыре раза выше.

Масс-спектрометрические исследования состава газов в ПХР при различных условиях показали, что в продуктах реакции, полученных при травлении в смеси  $\text{CF}_4 + 20\% \text{O}_2$ , имеются  $\text{COF}_2$  и  $\text{COF}$  (рис. 2), которые являются отравляющими веществами и опасны для обслуживающего персонала и окружающей среды. Учитывая, что к тому же скорость травления

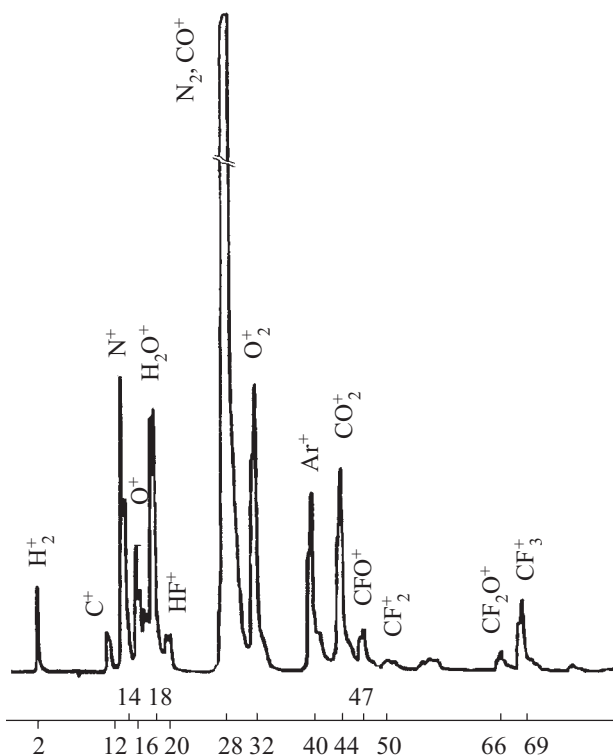


Рис. 2. Масс-спектрограмма продуктов реакции, образующихся в ПХР при ВЧ-разряде в смеси 80% хладона-14 и 20%  $\text{O}_2$

монокремния в этой смеси в 5 раз ниже скорости травления в смеси элегаза и кислорода, далее исследовалась только последняя смесь, как более перспективная и, как оказалось, практически безопасная.

Одновременно в плазмохимическом реакторе можно обрабатывать 600 псевдоквадратов с размерами  $125 \times 125$  мм (диаметр заготовок 150 мм) толщиной 260 мкм или 800 пластин толщиной 200 мкм. Масс-спектрометрические исследования продуктов реакции при травлении монокремния в смеси элегаза с кислородом (рис. 3) показали, что при полной загрузке реактора в «выхлопных газах» имеются только продукты реакции фтора с кремнием ( $\text{SiF}_4^+$ ,  $\text{SiF}_3^+$ ,  $\text{SiF}_2^+$ ), а серы — с кислородом и водородом ( $\text{SO}_2^+$ ,  $\text{SO}^+$ ,  $\text{H}_2\text{S}^+$ , рис. 3, в). При этом не наблюдаются пики  $\text{SF}_5^+$ ,  $\text{SF}_4^+$ ,  $\text{SF}_3^+$ ,  $\text{SF}_2^+$ ,  $\text{SF}^+$ , как на рис. 3, а и б, что свидетельствует о полном использовании рабочих газов и высокой экологической эффективности ПХР. Следует отметить наличие очень малого пика  $\text{SiF}_4^+$ , что было получено в работах и других авторов [3, 4]. Этот факт может объясняться диссоциацией  $\text{SiF}_4^+$  в ионизаторе масс-спектрометра, как это происходит и при напуске в камеру элегаза, когда в масс-спектрометре не наблюдается  $\text{SF}_6^+$ , а только  $\text{SF}_5^+$ ,  $\text{SF}_4^+$ ,  $\text{SF}_3^+$ ,  $\text{SF}_2^+$ ,  $\text{SF}^+$ , как на рис. 3, а и б [3, 4, 8].

Проводились также исследования зависимости скорости травления монокремния от разрядного тока и напряженности магнитного поля при неизменных прочих параметрах разряда. График такой зависимости при травлении в смеси элегаза и кислорода приведен на рис. 4. Давление в камере ПХР составляло около  $5 \cdot 10^{-2}$  торр, обрабатываемая площадь 9  $\text{см}^2$ , напряженность магнитного поля  $H=400$  А/м. Скорость напуска газа и скорость его откачки не изменялись. При увеличении разрядного тока частотой 13,56 МГц от 5 до 10 А скорость травления монокремния увеличивалась от 1,4 до 2,5 мкм/мин. В данных исследованиях использовался ВЧ-генератор мощностью 1 кВт, поэтому не удавалось получить максимальный ток более 11 А. При работе с генератором мощностью 2,5 кВт, которым оснащена промышленная установка «Картер» ОАО «Квазар», получали режим разряда в ПХР с током 16 А. При увеличении разрядного тока наблюдается близкое к линейному увеличение скорости травления, поэтому при токе 16 А следует ожидать увеличения скорости травления площади 9  $\text{см}^2$  до 3 мкм/мин. Следовательно при полной загрузке скорость травления монокристалла кремния может быть не менее 0,5 мкм/мин. Так как глубина термического легирования монокремния не превышает 0,5 мкм, можно предположить, что для полного снятия легированного слоя время травления торцов заготовок из кремния не должно превышать нескольких минут. Однако поскольку на поверхности торцов практически всегда есть окисная пленка кремния ( $\text{SiO}_2$ ), остатки хлора после легирования, а также органические соединения, время травления было увеличено до 7—8 мин, учитывая, что напряжение автосмещения составляет  $-(80-90)$  В. Так как зависимость скорости травления от напряжения автосмещения (а соответственно и средней энергии химически активных ионов [9]) исследована недостаточно [4],

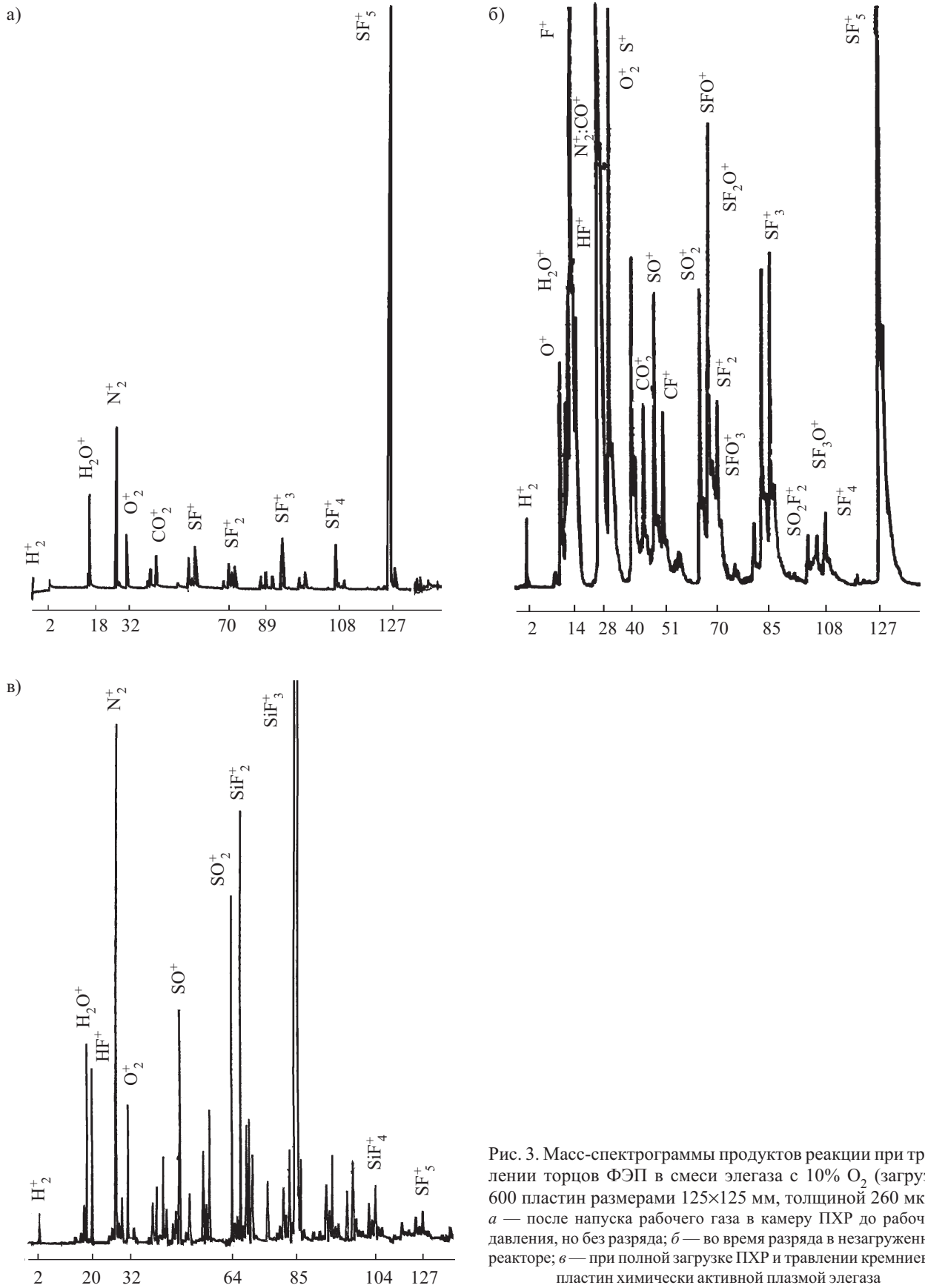


Рис. 3. Масс-спектрограммы продуктов реакции при травлении торцов ФЭП в смеси элегаза с 10%  $O_2$  (загрузка 600 пластин размерами 125×125 мм, толщиной 260 мкм): а — после напуска рабочего газа в камеру ПХР до рабочего давления, но без разряда; б — во время разряда в незагруженном реакторе; в — при полной загрузке ПХР и травлении кремниевых пластин химически активной плазмой элегаза

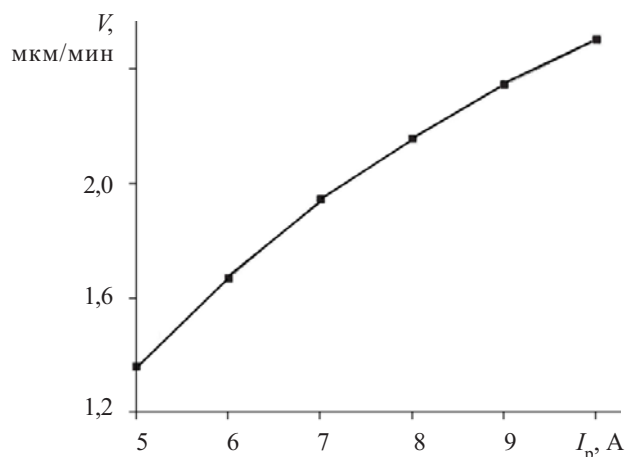


Рис. 4. Зависимость скорости травления монокремния в смеси элегаза с кислородом от силы разрядного тока

для гарантированного снятия проводящих слоев и создания надежной изоляции  $p-n$ -перехода при изготовлении фотопреобразователей было рекомендовано работать при  $U_{см} = -(80—100) В$ .

Были проведены исследования влияния на скорость травления монокремния величины напряженности магнитного поля  $H$ . Обрабатываемая площадь монокремния составляла  $10,5 \text{ см}^2$ , ток разряда поддерживался 11 А, давление в ПХР  $5 \cdot 10^{-2}$  торр. Как видно из рис. 5, характер зависимости скорости травления от напряженности близко к линейному с тенденцией выхода на максимум или насыщение. Следует отметить, что при этом происходит также изменение напряжения автосмещения — постоянного напряжения, возникающего между центральным (внутренним) электродом и внешним (заземленным) из-за разной подвижности электронов и ионов в плазме и разной площади электродов, между которыми поддерживается высокочастотный разряд. В то же время напряжение автосмещения зависит и от величины тока разряда, давления в разрядной камере и других параметров. Поскольку остальные параметры разряда поддерживались неизменными, очевидно, что полученный график зависимости скорости травления кремния от напряженности магнитного поля отражает и ее зависимость от напряжения автосмещения при указанных условиях разряда (при анализе следует учитывать, что с увеличением напряженности магнитного поля напряжение автосмещения уменьшается). Как уже отмечалось, зависимость скорости травления кремния от напряжения автосмещения изучена недостаточно. В настоящее время проводятся исследования и этому вопросу будет посвящена отдельная работа.

Проведенные исследования позволили дать рекомендации по выбору оптимальных режимов работы на ПХР, разработанном в ИЯИ и внедренном в технологический процесс изготовления ФЭП на ОАО «Кварзар». На момент изготовления ПХР лучший зарубежный аналог фирмы «Alkatel» позволял обрабатывать 500 пластин в час. В нашем реакторе обрабатывается 1200 пластин в час. Время травления при обработке указанного количества пластин составляло соответственно 40 мин на зарубежном аналоге и 10 мин на

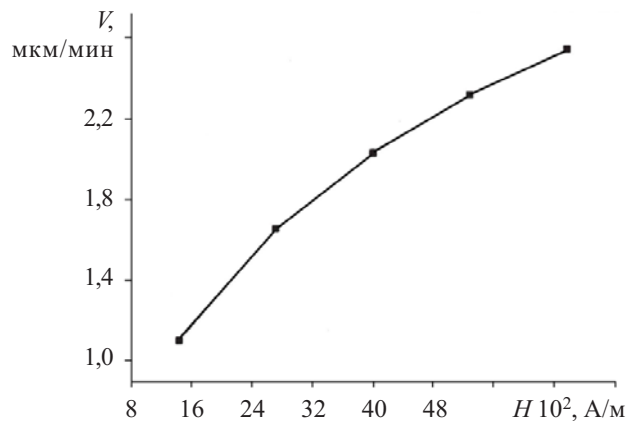


Рис. 5. Зависимость скорости травления монокремния в смеси элегаза с кислородом от напряженности магнитного поля

нашем ПХР. Даже такое малое время травления позволяет получать чистые кромки, высокое сопротивление между двумя сторонами пластин. При этом нет подтравливания лицевой и обратной сторон пластин, что улучшает параметры солнечных преобразователей.

\*\*\*

Разработана технология травления торцов пластин ФЭП в предложенном ПХР является оптимальной, поскольку при полной загрузке реактора пластинами происходит полное использование рабочего газа (смеси элегаза с кислородом), а время травления не превышает 10 мин. По производительности ПХР более чем в два раза превосходит лучший зарубежный аналог при более высоком качестве обработки пластин.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Archer M. D., Hill R. Clean electricity from photovoltaic.— London: Imperial College Press, 2001.
2. Fedorovich O. A., Polozov V. P. Modernized equipment for plasmachemical etching of insulation of p-n transition of photo // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Серия «Физика плазмы» (13).— 2007.— № 1.— 3.— С. 203—205.
3. Плазменная технология в производстве СБИС / Под ред. Н. Айнспрука и Д. Брауна.— М.: Мир, 1987.
4. Данилин Б. С., Киреев В. Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов.— М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. www.pvtepla.com, (www.teplaamerica.com)
6. Федорович О. А., Коновал В. М., Миц Ю. П., Волосянко В. Д. Плазмохимическая технология глубинного анизотропного травления датчиков давления на основе кремния // Труды Украинского вакуумного общества, Киев.— 1995.— Т. 1.— С. 338—341.
7. Полозов В. П., Федорович О. А., Гололюк В. Н. и др. Влияние плазмохимического травления на структуру поверхности кремниевых пластин фотоэлектрических преобразователей // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2006.— № 2.— С. 52—55.
8. Костин Е. Г., Усталов В. В., Федорович О. А. Масс-спектрометрические исследования химически активной плазмы высокочастотных разрядов в управляемых магнитных полях // Збірник наукових праць ІЯД. Київ.— 2004.— № 2 (13).— С. 86—95.
9. Шустин Б. Г., Исаев Н. В., Темиряева М. П. и др. Пучково-плазменный разряд в слабом магнитном поле как источник плазмы для плазмохимического реактора // ВАНТ. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения» (6).— 2008.— № 4.— С. 169—173.