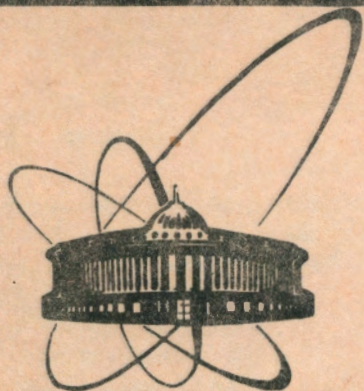


91-324



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P9-91-324

**Д. Л. Боровков, В. П. Вадеев, А. И. Говоров,
С. А. Корнев, С. В. Костюченко, В. П. Овсянников,
В. А. Попов, А. И. Пикин, К. А. Решетникова,
И. Н. Семенюшкин, В. В. Слесарев, М. С. Хвастунов**

**ЛИНЕЙНЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ИОНОВ
(ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО СОЗДАНИЮ
УСКОРИТЕЛЯ-ИМПЛАНТЕРА ИОНОВ)**

1991

1. ВВЕДЕНИЕ

Метод ионной имплантации позволяет вносить в материал атомы различных элементов в широком интервале концентраций и обеспечивает необходимое распределение по глубине имплантированного слоя, что позволяет получать поверхностные слои со специфическими физико-химическими свойствами. Рассмотренный в данном проекте имплантер может найти применение при производстве полупроводниковых структур, в технике эксперимента по физике твердого тела, в технологическом оборудовании для:

- структурных и фазовых превращений веществ;
- аморфизации материалов;
- получения коррозионно-стойких материалов и защитных покрытий в условиях воздействия различных агрессивных сред;
- изменения твердости металлов и сплавов;
- изменения коэффициента трения между деталями;
- изменения износостойкости металлов и сплавов;
- изменения циклической устойчивости, прочности металлов и сплавов;
- изменения физико-химических свойств полупроводников;
- изменения электрофизических свойств диэлектриков и высокотемпературных сверхпроводников.

2. КРАТКИЙ ОБЗОР

В настоящее время в качестве имплантеров ионов широко используются ускорители прямого действия на напряжение ~300 кВ и выше (см., например, ^{1/1}). Присутствие высокого напряжения (сотни кВ) в технологическом оборудовании нежелательно; поэтому для прикладных целей предпочтительней использовать высокочастотные ускорители.

В работе ^{2/} описан линейный резонансный ускоритель для ионной имплантации. Ускоритель включает 12 независимо фазируемых резонаторов. Фокусировка ионов осуществляется с помощью электростатических квадруполей. Все (одно- и двухзарядные) ионы от бора до сурьмы ускоряются до максимальной энергии ~1 МэВ без перестройки резонансной частоты (изменяются фазы и амплитуды напряжений в резонаторах). Ускоритель управляется с помощью микропроцессора.

В^{3,4,5/} предложен многоканальный имплантер ионов на энергию ~1 МэВ; ускоритель имеет сложную систему радиальной фокусировки пучка, состоящую из миниатюрных электростатических квадруполей.

Наиболее полно разработано предложение ускорителя-имплантера^{4,5/} на основе RFQ-ускорителя (линейного резонансного ускорителя с пространственно однородной высокочастотной квадрупольной фокусировкой). Данный ускоритель включает основной, RFQ-ускоритель и один или два корректирующих ускорителя. Эффективное ускоряющее напряжение U_{eo} основного ускорителя составляет 3 МэВ, и с помощью одного корректирующего ускорителя величина U_e варьируется в пределах от 2,7 до 3,7 МВ, а при двух корректорах - от 1,7 до 4,7 МВ. Для всего интервала зарядностей q/A ионов (заряд/массовое число ионов) от ~0,017 до ~0,24 требуется четыре различных RFQ-ускорителя. Недостатком RFQ-имплантера являются низкий темп ускорения (~0,5 МэВ/м) и высокие напряженности электрического поля на поверхности электродов, ограничивающие возможности ускорения ионов в широком интервале значений q/A .

В ускорителях-имплантерах^{6-8/}, разрабатываемых в Советском Союзе, используется фазопеременная фокусировка ионов. Применение фазопеременной фокусировки дает преимущество (перед высокочастотной квадрупольной) - более высокий (в несколько раз) темп ускорения. В качестве ускоряющей структуры используется Н-резонатор (в многоканальном ускорителе^{6/} и в ускорителе^{8/} с встречноштыревой структурой) и резонатор на основе двухпроводной линии^{7/}.

3. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ УСКОРИТЕЛЬ-ИМПЛАНТЕР

В основу данного предложения положен резонансный предускоритель ионов^{9/}, разработанный в связи с планируемым развитием инжекционного комплекса нуклотрона Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. В новом ускорителе магнитная квадрупольная фокусировка, примененная ранее в^{9/}, заменена на фазопеременную фокусировку, включающую фокусирующие (дефокусирующие) по радиусу (фазе) периоды с равновесной фазой $\phi_s = +90^\circ$ ($\phi_s = -90^\circ$)^{10/}. Переход на фазопеременную фокусировку обеспечил повышение (в сравнении с^{9/}) шунтового сопротивления ускоряющего резонатора, что дало возможность работы ускорителя в квазинепрерывном режиме. Кроме того, для предлагаемого ускорителя рассчитан новый каскадный группирователь ионов, отличающийся от традиционного уменьшенным импульсным разбросом ионов, вносимым в процессе группирования, что необходимо для ускорителя с фазопеременной фокусировкой.

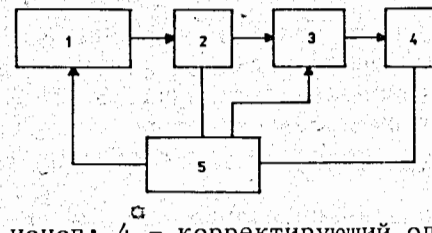


Рис.1. Схема ускорителя-имплантера: 1 - источник имплантируемых ионов на высоковольтной платформе и селектор ионов по зарядности; 2 - каскадный группирователь ионов; 3 - основной однорезонаторный ускоритель ионов; 4 - корректирующий однорезонаторный ускоритель ионов; 5 - система управления ускорителя.

Были выполнены расчеты двух вариантов ускорителя: 1) для интервала зарядностей ионов q/A от 0,02 до 0,08 и 2) q/A от 0,08 до 0,32. В обоих вариантах основные ускорители - однорезонаторные многозазорные и корректирующие ускорители - четырехзазорные однорезонаторные. В первом варианте рабочая частота f выбрана равной 25 МГц и резонатор - на основе четвертьволнового отрезка экранированной симметричной полосковой линии; во 2-м варианте $f = 50$ МГц и использован Н-резонатор. Резонаторы корректирующих ускорителей выполнены на основе четвертьволновых отрезков линии.

На рис.1 показана схема предлагаемого ускорителя-имплантера (одинаковая для обоих вариантов).

В качестве ионного источника для имплантера целесообразно использовать сменные источники ионов для конкретного сорта ионов. Для получения ионов металла предполагается использовать плазменный источник с активной генерацией вакуумной дуги. Ионы газовых элементов целесообразно получать в плазменном источнике с контрагированием вакуумного разряда в разрядной камере. Для получения ионов щелочных металлов предполагается использовать ионный источник с автономным эмиттером на основе алюмосиликатов.

На рис.2 схематично показан предполагаемый источник ионов металлов. При его проработке использовались экспериментальные данные по формированию катодной и анодной плазмы в острых

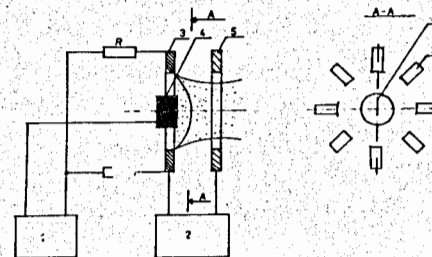


Рис.2. Схема источника ионов металлов: 1 - источник питания для зажигания вакуумного разряда; 2 - источник ускоряющего (вытягивающего напряжения); 3 - поджигающие электроды; 4 - основной электрод; 5 - вытягивающий электрод.

системах^{11-13/}. Он состоит из разрядного узла, образованного основным цилиндрическим электродом и серией расходящихся поджигающих электродов, системы вытягивания ионного пучка. В источнике отсутствует ограничение на сорт ионов металлов.

В качестве источника ионов газовых элементов целесообразно использовать подобный описанному в^{14/}.

Источник щелочных металлов предполагается разработать на основе вакуумного диода с анодом из алюмосиликата^{15/}.

Следующим элементом любого ионного источника в нашем случае является магнитный сепаратор, который предназначен для сепарации ионов по заряду. Планируется его изготовить по стандартным принципам. Система управления и измерения параметров ионного пучка проста и надежна в эксплуатации и входит в состав системы управления имплантера. Система управления ускорителя включает также датчики уровня вытягивающего напряжения U_{in} , амплитуд группирующего и ускоряющих (основного и корректирующего) напряжений и их фаз. Управление работой имплантера осуществляется с помощью мини-ЭВМ.

В представленной таблице приведены основные расчетные параметры двух вариантов предлагаемого имплантера (колонки 1 и 2) и двух вариантов проекта^{4,5/}, упоминавшегося выше (колонки 3 и 4). В проекте^{4,5/} используется RFQ-ускоритель с резонатором на основе четырехпроводной линии и корректирующий ускоритель (двухзазорный) с четвертьволновым резонатором (со спиральным внутренним проводником).

Два варианта предлагаемого имплантера достаточны для ускорения всех ионов от бора до урана, в то время как в проекте^{4,5/} для этой цели требуются четыре варианта имплантера.

Ускоряющее эффективное напряжение в обоих вариантах ($f = 25$ МГц; $0,02 \leq q/A \leq 0,08$ и $f = 50$ МГц; $0,08 < q/A \leq 0,3$) на выходе основного ускорителя равно $U_{eo} = 2,5$ МВ. Путем подтормаживания или подускорения ионов в корректирующем ускорителе эффективное ускоряющее напряжение U_e имплантера может плавно варьироваться в пределах от 1,0 до 4,0 МВ; энергетический разброс ускоренных ионов не превышает 2%. Энергия ионов разной зарядности на выходе имплантера варьируется в пределах от 21 кэВ/А до 84 кэВ/А (в варианте с $f = 25$ МГц и $0,02 \leq q/A \leq 0,08$) и от 84 кэВ/А до 336 кэВ/А (в варианте $f = 50$ МГц и $0,08 < q/A \leq 0,32$).

В проекте^{4,5/} эффективное ускоряющее напряжение U_{eo} основного ускорителя составляет $U_{eo} = 3,0$ МВ, и с помощью одного корректирующего ускорителя величина U_e на выходе имплантера варьируется в пределах от 2,7 до 3,7 МВ, а при двух корректорах от 1,7 до 4,7 МВ.

Таблица. Основные параметры ускорителя-имплантера

	Данные предложения		Проект ^{4,5/}	
	1	2	3	4
q/a	0,02	0,08	0,017	0,06
f, МГц	25	50	36	108
L, м	2,8	2,0	3,5	3,5
D, м	1,6	0,8	0,6	0,35
Na	16	16		
U_{in} , кВ	75-300	75-300		
I, МА	5	10	5	10
T_{in} , кэВ/А	6,3	25,2	1,0	5,0
T_{out} , кэВ/А	50	200	50	200
U_e , МВ	1,0-4,0	1,0-4,0	2,7-3,7	2,7-3,7
U_{am} , кВ	220	220	90	80
P_a , кВт	40	80	65	150
U_{mk} , кВ	420	420		250
P_k , кВт	100	110		50
R_a , МОм	1,5	0,62	0,13	0,043
R_k , МОм	1,8	1,5		1,25

L/D - длина/диаметр резонатора основного ускорителя;
 Na - число ускоряющих зазоров основного ускорителя;
 U_{in} - напряжение фотоинжектора;
 T_{in}/T_{out} - энергия ионов (на нуклон) на входе/выходе основного ускорителя;
 U_e - эффективное ускоряющее напряжение имплантера;
 U_{am}/U_{mk} - амплитуды напряжений резонаторов основного/корректирующего ускорителей;
 P_a/P_k - мощности ВЧ-потерь в резонаторах основном и корректирующем;
 R_a/R_k - шунтовые сопротивления резонаторов основного и корректирующего ускорителей.

Электродинамические параметры резонаторов предполагаемого имплантера превышают таковые в цитированном проекте, что является несомненным преимуществом данного предложения.

Предлагаемый ускоритель-имплантер достаточно универсален, прост по конструкции, в изготовлении и настройке, имеет низкую мощность ВЧ-потерь и может работать в квазинепрерывном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vytkin A.F. et al. - Nucl. Instr. and Meth., 1991, B55, p.386.
2. a) Glavish H.F. - Nucl. Instr. and Meth., 1987, B24/25, p.771.
b) Glavish H.F. - Nucl. Instr. and Meth., 1987, B21, p.264.
3. Weis T. et al. - Nucl. Instr. and Meth., 1987, B24/25, p.787.
4. Deitinghoff H. et al. - EPAC, 1988, v.2, p.1468.
5. Thomae R.W. et al. - Nucl. Instr. and Meth., 1989, B37/38, p.235.
6. Chuvilo I.V. et al. - EPAC, 1988, v.2, p.1024.
7. Antropov A.N. et al. - EPAC, 1988, v.2, p.1451.
8. Бондаренко П.В. и др. - В сб.: Труды X Всес. совещания по ускорителям заряженных частиц, ОИЯИ, Д9-87-105, 1987, т.1, с.243.
9. Говоров А.И. и др. - Сообщения ОИЯИ, 9-89-605, 1989, Дубна.
10. Безногих Ю.Д. - Сообщения ОИЯИ, Р9-5312, 1970, Дубна.
11. Корнев С.А. - В сб.: Тезисы докладов III Всесоюзного семинара "Плазменная электроника", Харьков: ХФТИ, 1988, с.53.
12. Корнев С.А. - Препринт ОИЯИ Р13-89-330, Дубна, 1989.
13. Латам Р. - Вакуумная изоляция установки высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1988.
14. Диденко А.Н., Лигачев А.Е., Куракин И.Б. - Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов. М.: Энергоатомиздат, 1987.
15. Кан Х.С. - В сб.: Труды II Международной конференции "Электронно-лучевые технологии ЭЛТ-88", БАН, София, НРБ, 1988, т.1, с.129.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 июля 1991 года.