

СИЛЬНОТОЧНЫЕ РЕЛЯТИВИСТСКИЕ УСКОРИТЕЛИ ИПЭНМУ ННЦ ХФТИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Ю.Ф. Лонин, И.И. Магда

Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”,
Харьков, Украина

Приведены параметры сильноточных ускорителей релятивистских электронных пучков ИПЭНМУ ННЦ ХФТИ. Представлены основные направления научных исследований и полученные результаты. Указаны пути возможных применений сильноточных ускорителей для решения различных технологических задач.

1. ВВЕДЕНИЕ

Работам в области сильноточных ускорителей предшествовал многолетний цикл теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в 50-60 годах прошлого столетия по инициативе и непосредственному участию Я.Б. Файнберга [1], вследствие чего была создана новая отрасль науки – плазменная электроника, которая, в свою очередь, дала новый толчок в создании сильноточных ускорителей релятивистских электронных пучков (СРЭП).

В начале 70-х годов для научных и практических применений возникла необходимость создания источников энергии с концентрированными потоками мощностей, что и стало стимулом для разработки и создания в ХФТИ ускорителей СРЭП, которые и к настоящему времени являются единственными и уникальными на Украине. Отличительными особенностями таких ускорителей, в сравнении с другими системами ускорения, являются: высокий КПД, низкая стоимость и конструкторская простота. Использование взрывной эмиссии позволяет достигать токи пучков ускоренных электронов до единиц мегаампер. Уникальность таких ускорителей связана с возможностью получения импульсных мощностей до $10^{10} \dots 10^{12}$ Вт, что существенно расширяет диапазон использования их в экспериментальной физике и критических технологиях.

В ХФТИ много лет проводятся исследования, связанные с проблемами оптимизации отдельных узлов и ускорителей в целом, а именно:

- разработка эффективных источников электропитания ускорителей с использованием жидких и твердых диэлектриков;
- выбор материалов и конструкции катодов;
- оптимизация конфигурации и соотношения электрических и магнитных полей в ускоряющем промежутке;
- разработка и создание малоиндуктивных плаз-

менно-эрозионных быстродействующих коммутаторов и разрядников, создание диодов с магнитной изоляцией и др.

На сегодняшний день ННЦ ХФТИ имеет большой опыт в разработке, создании и практической реализации различных по конструктивным особенностям, параметрам и применению сильноточных ускорителей РЭП [2]. В центре существует уникальный комплекс сильноточных ускорителей электронов, которые используются в научных и технологических целях. Созданы и с успехом используются методики диагностики параметров сильноточных РЭП, импульсного СВЧ- и СШП-излучений.

Полученные экспериментальные данные относительно устойчивости и динамики СРЭП, а также взаимодействия пучков с газовыми и плазменными средами стимулировали их применение для развития исследований в ряде традиционных для ХФТИ направлений:

- коллективные методы ускорения заряженных частиц;
- генерация интенсивного микроволнового излучения (СВЧ, СШП), тормозного рентгеновского излучения;
- взаимодействие пучков с твердым телом;
- влияние СВЧ-излучения на объекты РЭА и биологические объекты.

2. ГЕНЕРАЦИЯ ИНТЕНСИВНОГО МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В Институте плазменной электроники и новых методов ускорения ННЦ ХФТИ на основе ускорителей СРЭП (Табл.1) создана экспериментально-исследовательская база [3], позволяющая реализовывать пучки с $E = 0,3 \dots 1,2$ МэВ и $I \approx 10^3 \dots 10^5$ А при длительностях импульса $\tau_{и} \approx 2 \cdot 10^{-8} \dots 5 \cdot 10^{-6}$ с.

На этой базе проводятся исследования генерации интенсивного микроволнового излучения

Таблица 1. Параметры сильноточных импульсных ускорителей РЭП

АСТРА (ИС-1)	АГАТ (ИС-2)	ТЕМП-А	ТЕМП-Б	МАРС-М	МАРС-Н
$E = 0,6$ МэВ $I \approx 2 \cdot 10^4$ А $\tau_{и} \approx (2 \dots 4) \cdot 10^{-8}$ с	$E = 0,3$ МэВ $I \approx 3 \cdot 10^3$ А $\tau_{и} \approx 1 \cdot 10^{-6}$ с	$E = 1,2$ МэВ $I \approx 1 \cdot 10^4$ А $\tau_{и} \approx 2 \cdot 10^{-8}$ с	$E = 1,6$ МэВ $I \approx 1 \cdot 10^5$ А $\tau_{и} \approx 5 \cdot 10^{-8}$ с	$E = 0,7$ МэВ $I \approx 2 \cdot 10^4$ А $\tau_{и} \approx 2 \cdot 10^{-6}$ с	$E = 0,7$ МэВ $I \approx 1,2 \cdot 10^5$ А $\tau_{и} \approx 7 \cdot 10^{-8}$ с
		$E = 0,5$ МэВ $I \approx (2 \dots 5) \cdot 10^3$ А $\tau_{и} \approx 5 \cdot 10^{-6}$ с	$E = 1,0$ МэВ $I \approx 5 \cdot 10^4$ А $\tau_{и} \approx 5 \cdot 10^{-6}$ с		

узкополосного СВЧ-диапазона и сверхширокопо-

лосного СШП-испытаний радиоэлектронной аппа-

ратуры (РЭА) и ее компонентов на электромагнитную совместимость и стойкость (ЭМСС) к воздействию импульсных электромагнитных полей (ЭМП) сверхкороткой длительности (СКД). На Рис.1,2 приведены виды сильноточных импульсных ускорителей РЭП ТЕМП-А и ТЕМП-Б соответственно.



Рис.1. Ускорительный комплекс РЭП ТЕМП-А



Рис.2. Ускорительный комплекс РЭП ТЕМП-Б

Стеновая база с СВЧ-воздействующим фактором представлена источниками излучения большой импульсной мощности нано- и микросекундного диапазонов, которые основаны на взаимодействии

сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП) с различными электродинамическими структурами (ЭДС). Используемые ЭДС приведены в табл.2, а типичное распределение напряженности электрических полей в рабочей зоне стенов СВЧ-излучения – на Рис.3.

Таблица 2. СВЧ-генераторы с различными ЭДС

Тип ЭДС	F, Гц	P _и , Вт	η, %
Виркатор	3·10 ⁹ ...10 ¹⁰	10 ⁸ ...10 ⁹	2 ... 5
Корсинотрон	10 ⁹	10 ⁸ ...10 ⁹	10...15
Убитрон	10 ⁹ ...10 ¹⁰	10 ⁸ ...10 ⁹	2...3
Магнетрон (*- проект)	(3...8) 10 ⁹ , 3,4·10 ¹⁰ *	10 ⁸ ...10 ⁹ , 10 ⁸ *	25...30 5*
Виргод	3·10 ⁹ ...10 ¹⁰	5·10 ⁸ ...10 ⁹	15...20

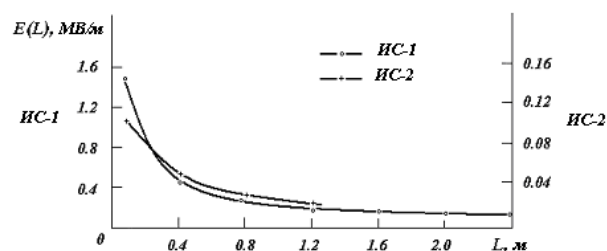


Рис.3. Распределение напряженности электрических полей СВЧ-излучения в рабочих зонах стенов ИС-1 и ИС-2

Для проведения испытаний РЭА и компонентов с целью исследования стойкости и механизмов деградации при действии ЭМП-импульсных полей СШП-спектра используются стенды СШП-излучения, в которых используются известные технологии формирования высоковольтных нано- и субнаносекундных электрических импульсных сигналов. Основные параметры стенов импульсного СШП-излучения приведены в Табл.3 [4-6]. Структурная схема стенда ИС-1М импульсного СШП-излучения и распределение E и H полей в испытательной камере ТЕМ волны стенда приведены на Рис.4,5.

Таблица 3. Параметры стенов импульсного СШП-излучения

Наименование	Напряженность E-поля, МВ/м	Напряженность H-поля, кА/м	Длительность импульса, нс	Длительность фронта, нс	Рабочий объем, куб.м
ИС-1М	0,4...2,5	3...12	10...40	0,5 ± 0,3	0,26
ИС-5	0,03...0,4 (изл.)	0,01...1	2...3	0,5	0,125
ИС-6	0,01...0,1	0,1...1	10...40	0,2 ± 0,05	0,7...1,2
ИС-7	0,01...0,12 (изл.)	0,03...3	2...3	0,2 ± 0,1	полигон

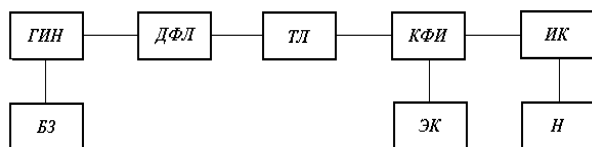


Рис.4. Структурная схема стенда ИС-1М: БЗ - блок запуска, ГИН - генератор импульсных напряжений, ДФЛ - двойная формирующая линия, ТЛ - трансформирующая линия, КФИ - камера формирования импульса, ИК - испытательная коаксиальная камера ТЕМ- волны, ЭК - экранированная комната с измерительной аппаратурой, Н - согласованная широкополосная нагрузка (120 Ом)

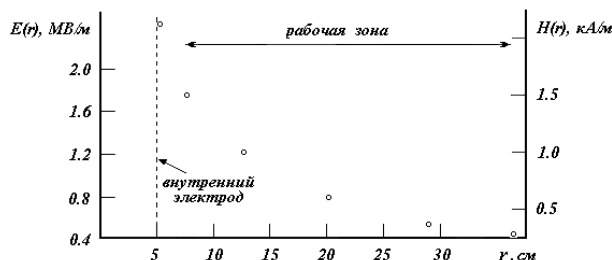


Рис.5. Распределение E- и H- полей в испытательной камере с импедансом 120 Ом

Испытательный стенд СШП-спектра ИС-6 выполнен на основе полосковой полеобразующей структуры для формирования плоской ТЕМ-волны

(ТЕМ-ячейки) с рабочим объемом до 1 м^3 и генератора электрических сигналов СКД. ТЕМ-ячейка представляет собой несимметричную в сечении и неоднородную по длине полосковую линию с сохраняющимся импедансом $\sim 77 \text{ Ом}$, длиной линии – 3 м и объемом однородной рабочей части $\approx 0,5 \text{ м}^3$. На входе линии расположен широкополосный согласующий переход для соединения с высоковольтным генератором импульсов СКД. Выход линии замкнут на согласованную широкополосную нагрузку 77 Ом. Импульсное воздействие на РЭА создается электрическим полем бегущей ТЕМ-волны с напряженностью до $1 \dots 190 \text{ кВ/м}$ при амплитуде питающего генератора до 120 кВ, $t_{\text{И}} = 3 \dots 5 \text{ нс}$ и $t_{\text{Фр}} = 0,2 \dots 0,25 \text{ нс}$ ($f_{\text{МИН}} = 80 \text{ МГц}$, $f_{\text{МАХ}} = 2 \text{ ГГц}$).

Общий вид ТЕМ-ячейки представлен на Рис.6.

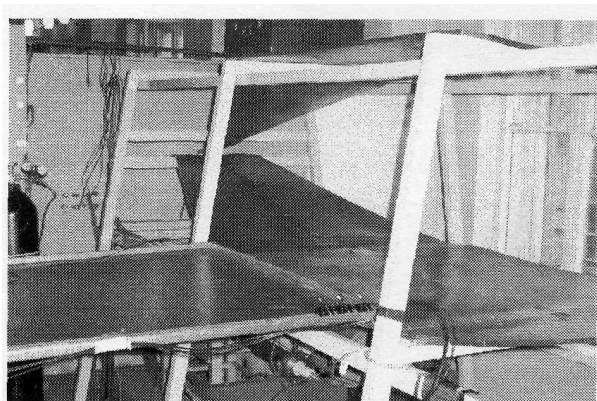


Рис.6. Общий вид ТЕМ-ячейки стенда ИС-6

Для получения на выходе коаксиального фидера импульсной мощности до 1 ГВт в качестве первичного импульсного источника (ПИИ) использован генератор Маркса. На выходе коаксиального фидера ФВЭИ СКД (импеданс 70...75 Ом) формируется электрический СШП-импульс с параметрами: $U_{\text{ВЫХ}} = 350 \text{ кВ}$, $t_{\text{И}} = 1 \dots 2 \text{ нс}$, $t_{\text{Фр}} = 0,15 \dots 0,25 \text{ нс}$. Для излучения СШП-спектра ($f_{\text{МИН}} = 200 \text{ МГц}$, $f_{\text{МАХ}} = 2,5 \text{ ГГц}$) создана импульсная антенна (ИА) на основе полукруговой рефлекторной параболической антенны, возбуждаемой двумя неоднородными линиями (Рис.7). Используемая система возбуждения ИА наиболее удобна для эксплуатации и обеспечения высоковольтной изоляции элементов антенны. Энергетический потенциал ИА с радиусом рефлектора 0,9 м ($W = E_{\text{дз}}L$) достигает 1,2 ГВт, а поле излучения в дальней зоне ($L = 10 \text{ м}$) $E_{\text{дз}} = 120 \text{ кВ/м}$.

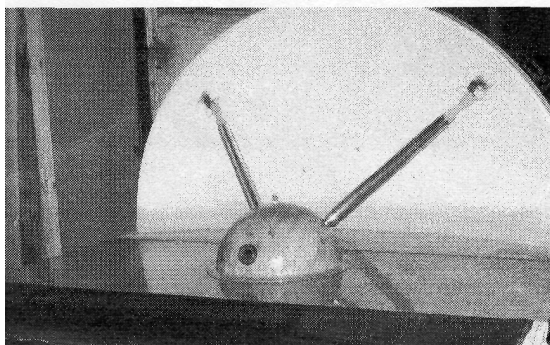


Рис.7. Импульсный излучатель стенда ИС-7

Кроме выше указанных методов генерации

СШП-импульсов была экспериментально изучена возможность генерации СШП-импульсных сигналов путем прямого возбуждения разных типов антенн мощным сильнооточным релятивистским электронным пучком, без его предварительной модуляции. Такие устройства были реализованы и экспериментально исследованы и получили название электронно-пучковые антенны (ЭПА).

Экспериментальные исследования ЭПА разного типа проводились на сильнооточном импульсном ускорителе РЭП ТЕМП-А (см. Рис.1), параметры которого приводятся ниже: $E_b \approx (0,7 \dots 1,2) \text{ МэВ}$, $I_b \approx (5 \dots 10) \text{ кА}$, длительность пучка $\sim 15 \text{ нс}$, при величине переднего фронта $\sim 1 \dots 2 \text{ нс}$. Такие параметры пучка наиболее приемлемы для исследования генерации СШП-излучения разными типами ЭПА.

Одним из наиболее простых вариантов реализации таких исследований было возбуждение изолированной штыревой антенны. На этом ускорителе также были проведены исследования по возбуждению ТЕМ-рупорной антенны. В этих экспериментах наблюдалась корреляция между флуктуациями тока на переднем фронте пучка и генерацией СШП-излучения [7,8].

Наиболее перспективные результаты СШП-излучения были получены при возбуждении спиральной антенной [9]. Для этого был проведен теоретический расчет и численный анализ с условием согласования входа антенны с импедансом сильнооточного релятивистского пучка электронов ускорителя ТЕМП-А (75...100) Ом, а выхода – с сопротивлением свободного пространства 377 Ом. Частотный диапазон этой антенны лежит в пределах от 0,5 до 10 ГГц, т.е. $\lambda_{\text{МИН}} = 60 \text{ см}$, а $\lambda_{\text{МАХ}} = 3 \text{ см}$. Приемная антенна была аналогична излучающей. Типичная схема экспериментов по возбуждению СШП-импульсов показана на Рис.8.

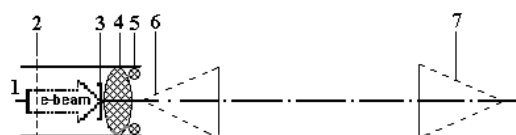


Рис.8. Схема возбуждения спиральной ЭПА:
1 – катод; 2 – анод; 3 – коллектор; 4 – изолятор;
5 – пояс Роговского; 6 – излучающая антенна;
7 – приемная антенна

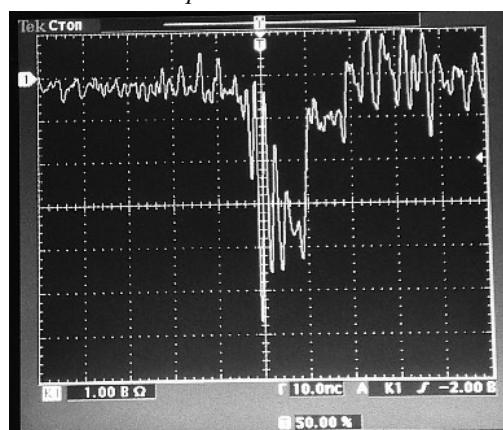


Рис.9. Осциллограмма напряжения на излучающей спиральной антенне

Форма сигнала напряжения (Рис.9), снимаемого с делителя напряжения на излучающей антенне, практически точно передает форму тока пучка и находится в хорошем соответствии с расчетами (для тока возбуждения с гауссовским нарастанием переднего фронта) [9].

Таким образом, по своим параметрам испытательная база ННЦ ХФТИ является уникальной для исследований влияния импульсных ЭМП короткой и сверхкороткой длительности на РЭА и биологические объекты.

3. ВЛИЯНИЕ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА РЭА И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

В исследованиях влияния СВЧ-излучения на РЭА была показана эффективность использования статистических параметров откликов радиоэлектронных устройств, возникающих при воздействии на них коротких импульсов электромагнитного излучения.

Построены радиофизические модели для устройств, включающих в свой состав реальные линии передач или для устройств, для которых можно приближено представить их функционирование в виде сети линий передач. Показано, что эффективным критерием функционирования аппаратуры являются обобщения статистических характеристик, полученных авторами ранее – псевдометрика в пространстве состояний системы на основе статистических распределений, энтропийные расстояния между состояниями. Эти обобщенные характеристики получаются на основе применения соотношений, следующих из неравновесной термодинамики, вместо обычно используемых равновесных соотношений для статистических величин [10-11].

В развитие общего подхода тестов на СКД-воздействия проведена разработка методов измерения параметров электрических сигналов и электромагнитных полей СКД и создан измерительный комплекс, включающий антенны, датчики импульсных сигналов, линий передачи с высокой помехозащищенностью и экранированные кабины с размещенной в них высокоскоростной регистрирующей аппаратурой. В частности, для этого используются стационарные и мобильные датчики параметров электромагнитного излучения и ТЕМ-волны в полеобразующих структурах стенов бегущей волны:

- датчики емкостного типа для измерения напряжения (1...1000 кВ, 0.2...10 нс);
- датчики индукционного типа для измерения тока (1...10 кА, 2...100 нс);
- измерительные преобразователи бегущей волны на основе полосковой линии для измерения напряженности E -компоненты электромагнитного поля (0.1...100 кВ/м, 0.2...10 нс);
- измерительные антенны СВЧ-диапазона (2...32 ГГц);
- измерительные импульсные антенны СШП-спектра (0.1...3 ГГц).

Регистрация параметров стенов и сигналов реакции ОТ производится с помощью измерительной аппаратуры, размещаемой в экранированном помещении 2.5х2.5х2.2 м, оборудованном сетевыми фильтрами и вторичными экранами сигнальных линий. Для регистрации реакции объектов используются до 10 электрических ($\Delta f = 2$ ГГц) и оптоволоконных линий ($\Delta f = 0,5$ ГГц). Разработанные методы и средства позволяют проводить измерения сигналов с минимальной амплитудой 2...5 мВ, определяемой шумами оптических модулей. Использование ВОЛС позволяет достигнуть весьма низкий уровень электромагнитных помех (-100...-120 дБ) по сравнению с электрическими линиями передач при непосредственной близости измерительных датчиков поля к полеобразующим структурам стенов. Сбор данных проводится с помощью 4-канальных цифровых осциллографов Tektronix 224 ($\Delta f = 100...300$ МГц) и HP 45846B ($\Delta f = 2,25$ ГГц).

Применение разработанной методики и инфраструктуры проведения ЭМСС-тестов объектов к электромагнитному излучению СКД позволяет определять характерные реакции цепей цифровой и аналоговой РЭА при воздействии одиночными и повторяющимися импульсами длительностью 2...30 нс и фронтом импульса 0.2...5 нс.

В настоящее время медико-биологические, гигиенические и экологические аспекты проблемы электромагнитных излучений приобрели особую актуальность. Это связано с тем, что в народное хозяйство активно внедряется новая техника, работающая в самых различных диапазонах частот и режимах излучения. Одним из основных механизмов, давно изученных и успешно используемых при СВЧ-облучении в различных отраслях народного хозяйства, является "тепловой механизм" [12].

На стендах экспериментальной базы ННЦ ХФТИ были проведены исследования влияния короткоимпульсного СВЧ-излучения сантиметрового диапазона длин волн различной мощности и длительности импульса на биологические объекты. Методика исследований предполагает облучение объектов при различных напряженностях электрического поля СВЧ-излучения. Располагая исследуемые объекты в рабочей зоне на различном расстоянии от рупора, можно реализовать необходимые условия эксперимента. Во избежание экранировки, биологические объекты располагались в контейнерах из СВЧ-прозрачного материала. Ориентация БО в контейнерах может быть заданной или произвольной.

Объектами испытаний на испытательных стендах "Астра" (ИС-1) и "Агат" (ИС-2) были: колорадский жук, семена озимой пшеницы, семена шелковицы. Объекты располагались на различных расстояниях от конического излучающего рупора $D=120$ мм. Однотипные объекты облучались одновременно одними и теми же СВЧ-импульсами. В ходе облучения семян сельскохозяйственных культур устойчиво наблюдалось увеличение энергии прорастания на 30...45%, всхожести на 9...16%. При облучении колорадского жука на 2-3-й день проявляется изменение окраски хитинового покрова, а на 8-й день <50%

особей погибает. Интересный факт наблюдался при облучении мышей. После второго-третьего импульса мыши располагались по краю диаграммы направленности, т.е. стремились в минимум поля импульса.

Исследования влияния короткоимпульсного мощного СВЧ-излучения на донорскую кровь проводились на ускорителе ТЕМП-Б, где был обнаружен нетепловой (полевой) механизм воздействия. В экспериментах наблюдались повышения ротационной вязкости и электрорезистентности мембран эритроцитов, увеличение объемно-плоскостных параметров, снижение рН и относительной вязкости по отношению к контрольным образцам. Полученные экспериментальные результаты не могут быть объяснены «тепловым» [12] или «резонансным» [13] механизмами, которые характеризуются малой интенсивностью СВЧ-полей и длительными временами воздействия. В наших экспериментах длительность импульса очень короткая ($\tau_{им} \sim 10^{-6}$ с), излучаемая длина волны много больше размеров объекта, а величина нагрева не превышает $0,01^\circ\text{C}$. Высказано предположение, что ответственным за результаты воздействия короткоимпульсного мощного СВЧ-излучения на эритроциты донорской крови может быть механизм, вызванный полями $E_{из} \approx (250 \dots 150) \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}$ и скоростью их изменения $dE/dt \sim 10^{10} \text{ В}\cdot\text{см}\cdot\text{с}$. Такие поля могут приводить к поляризационным явлениям в мембранах и образовывать в них поры.

Наиболее ярким примером эффективности воздействия импульсных ЭМП являются эксперименты по сравнению влияния обработки СШП-сигналом семян ячменя и яровой пшеницы, зараженных головней, с химическим протравлением (бенлат 2,5 кг/г) [14]. Результаты лабораторных и полевых испытаний в условиях вегетации приведены на гистограмме Рис.10.

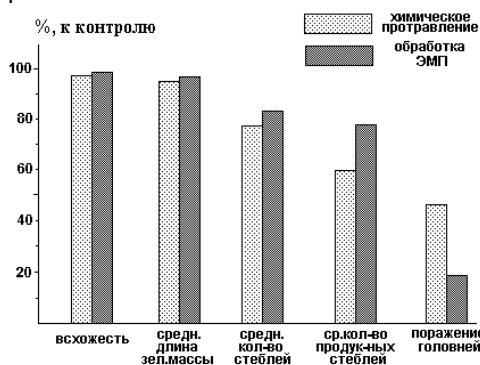


Рис.10. Сравнительная гистограмма полевых испытаний в условиях вегетации семян ячменя

4. ИСТОЧНИКИ КПЭ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В настоящее время одним из перспективных способов в радиационных технологиях является воздействие на материалы концентрированными потоками энергии. Одним из источников КПЭ являются импульсные сильноточные ускорители РЭП. На базе нано- и микросекундного ускорителей РЭП в отделе

созданы импульсные источники тормозного рентгеновского излучения с $0,2 < E_\gamma < 1,0 \text{ МэВ}$ и различной площадью поперечного сечения $12 < S_\gamma < 700 \text{ мм}^2$, при этом поглощенную дозу можно изменять от 10^2 Гр до нескольких единиц на 10^5 Гр [15]. Эти источники с успехом используются для выполнения работ по ЯМРТ № 815-Х и №Х-5-527 „Исследование изменения структур и свойств конструкционных материалов ядерных реакторов под воздействием импульсных пучков электронов и рентгеновского излучения большой мощности”. При облучении сверхжестким рентгеновским излучением образцов сплавов Ti-Zr-Ni, Ti-Hf-Ni обнаружена немонотонность изменения структуры и накопление вторичных радиационных дефектов при больших дозах облучения [16].

Характер воздействия электронных пучков на материалы отличается от воздействия на твердые тела потоков ионов. Так как в данном случае не происходит легирования обрабатываемой поверхности, а пробег электронов в веществе значительно больше глубины проникновения ионов, в основном воздействие характеризуется количеством теплоты, переданной облучаемому материалу, а также скоростью нагрева и охлаждения.

Так на ускорителе ТЕМП-А осуществлено дистанционное нанесение покрытия на подложку, в котором наносимый материал покрытия под действием электронного пучка расплавляется и получает реактивный импульс в направлении подложки. В условиях высоких температур и давления, реализуемых при ударном взаимодействии жидкого слоя покрытия с твердой холодной подложкой, возможно образование неравновесных фаз, которые сохраняются в структуре покрытия после его сверхбыстрого охлаждения. Рассмотрены условия, при которых возможна равномерная наплавка материалов на подложку.

Данный метод позволяет наносить на поверхность изделий слои разнообразного состава, обладающие хорошим сцеплением с подложкой. Сочетание высокой температуры и давления с регулируемой скоростью закалки обеспечивает условия для протекания химических реакций с высокой энергией активации непосредственно в процессе нанесения покрытия, что открывает новые возможности в технологии обработки поверхности материалов с помощью сильноточных РЭП [17].

ЛИТЕРАТУРА

1. Я.Б. Файнберг // *Атомная энергия*. 1961, т.11, вып.4, с.13.
2. А.П. Диденко, Ю.Г. Юшков. *Мощные СВЧ-импульсы наносекундной длительности*. М.: «Энергоатомиздат», 1984, с.112.
3. И.И. Магда, И.Ф. Харченко // *Укр. фіз. журн*. 1998, т.43, №9, с.1175-1180.
4. С.Б. Блудов, Н.И. Гадецкий, К.А. Кравцов, И.И. Магда, С.И. Найстетер, Е.А. Прасол и др. Генерирование мощных СВЧ-импульсов ультракороткой длительности и их воздействие на изделия электрон-

- ной техники // *Физика плазмы*. 1994, т.20, №7-8, с.712-718.
- 5.В.Т. Уваров, Ю.В. Ткач, Н.П. Гадецкий и др. *Получение сильнооточных пучков микросекундной длительности с высоким КПД*: Препринт ХФТИ 84-30. М.: «ЦНИИАтоминформ», 1984, с.13.
- 6.И.Ф. Харченко, В.В. Ермоленко, Ю.Ф. Лонин, Е.А. Прасол. Мощный СВЧ-генератор с релятивистским пучком на основе комбинации виркатора и убитрона // *Труды 7-й Крымской конференции и выставки "СВЧ-техника и спутниковый прием"*. Севастополь, Вебер, 15-18 сентября 1997, т.2, с.447-449.
- 7.Н.И. Гапоненко, А.М. Горбань, Д.В. Горожанин и др. Формирование интенсивных электромагнитных импульсов, излучаемых при прямом возбуждении изолированной штыревой антенны короткоимпульсным сильнооточным РЭП // *Физика плазмы*. 2000, т.26, №4, с.1-3.
- 8.V.A. Balakirev, N.I. Gaponenko, A.M. Gorban', D.V. Gorozhanin, et al. Excitement TEM-horn antenna by impulsive relativistic electron beam // *ВАНТ. Серия "Физика плазмы"*. 2000, №3, с.118-119.
- 9.В.А. Балакирев, А.М. Горбань, А.М. Егоров и др. Генерация СШП-сигнала при возбуждении спиральной антенны сильнооточным РЭП // *ВАНТ. Серия "Ядерно-физические исследования"*. 2006, №2, с.85-87.
- 10.Н.П. Гадецкий, И.И. Магда, А.М. Поляков, А.А. Сахнин, Г.В. Скачек. Функциональные сбои радиоприемных устройств в условиях действия помех сверхкороткой длительности // *Сборник докладов Всероссийской научной конференции «СШП сигналы в радиолокации, связи и акустике»* / Научное издание под ред. Н.А. Арманды. Муром, 1-3 июля 2003, с.386-391.
- 11.И.И. Магда, В.Е. Новиков, А.В. Пашенко и др. Технология адаптивного тестирования состояний нелинейных систем и новая схема хаотической связи // *КИП и Автоматика*. 2004, №8, с.25-31.
- 12.И.А. Рогов, С.В. Некруман. *СВЧ-нагрев пищевых продуктов*. М.: «Агропромиздат», 1986, 351 с.
- 13.Н.Д. Девятков и др. *Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности*. М.: «Радио и связь», 1991, 168с.
- 14.Н.Е. Алферов, А.М. Егоров, Н.И. Гапоненко и др. Комплексные экспериментальные исследования биологического действия импульсных электромагнитных полей // *Труды 13-й Крымской конференции и выставки КрыМиКо-2003*. Севастополь, Вебер, 8-12 сентября 2003, с.78-79.
- 15.А.Б. Батраков, Б.В. Середа, А.М. Егоров и др. Создание импульсного источника тормозного излучения на базе наносекундного и микросекундного ускорителей РЭП // *ВАНТ. Серия "Ядерно-физические исследования"*. 2004, №2, с.206-207.
- 16.В.М. Ажажа, С.Д. Лавриненко, Б.В. Середа и др. Структурные изменения в быстроокаленных лентах металлических сплавов при радиационном воздействии // *Труды 17-й Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению*. 4-9 сентября 2006, Алушта, с.76.
- 17.В.Ф. Клепиков, А.В. Пашенко, А.Г. Пономарев и др. Дистанционное нанесение покрытий сильнооточным релятивистским электронным пучком // *ФизХОМ*. 2006, №3, с.24-28.

Статья поступила в редакцию 24.10.2007 г.

HIGH-CURRENT RELATIVISTIC ACCELERATORS OF IPENMA NSC KIPT AND THEIR APPLICATION

Yu.F. Lonin, I.J. Magda

Parameters of high-current accelerators of relativistic electron beams of IPENMA NSC KIPT are given. The main directions of scientific research and obtained results are shown. Ways of possible applications of high-current accelerators for solution of various technological problems are discussed.

СИЛЬНОСТРУМОВІ РЕЛЯТИВІСТСЬКІ ПРИСКОРЮВАЧІ ІПЕНМП ННЦ ХФТІ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Ю.Ф. Лонін, І.І. Магда

Наведені параметри сильнострумових прискорювачів релятивістських електронних пучків ІПЕНМП ННЦ ХФТІ. Вказані основні напрямки наукових досліджень і отриманих результатів. Відбиті можливі шляхи впровадження сильнострумових прискорювачів для вирішення різноманітних технологічних задач.