

ВИРКАТОР В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ ТОРМОЗНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*А.Е. Дубинов, И.А. Ефимова, В.И. Каргин, М.В. Лойко, Е.А. Ряслов, В.Д. Селемир
ФГУП Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
dubinov@ntc.vniief.ru*

Впервые создан и введен в эксплуатацию мощный виркатор с многократным пролетом электронов сквозь оптически тонкую анодную фольгу для генерации мощных импульсов рентгеновского излучения. Виркатор реализован на базе электронного ускорителя прямого действия с питанием от индуктивного накопителя энергии с плазменным прерывателем тока. Приведены результаты 2-мерных самосогласованных расчетов динамики электронного пучка в камере виркатора и определены спектры сопутствующего СВЧ-излучения. Приведены также результаты 1-мерных самосогласованных расчетов динамики электронного пучка с учетом рассеяния на анодной фольге и определены спектры тормозного рентгеновского излучения. Представлены результаты первых экспериментов по исследованию тормозного рентгеновского излучения виркатора для тонкой (10 мкм, Та) и толстой (100 мкм, Та) анодной фольги. Для тонкой фольги доза рентгеновского излучения ($E_\gamma > 30$ кэВ) в 8 раз превысила дозу, полученную при толстом аноде, а средняя энергия квантов снизилась с 80 до 30 кэВ.

Для некоторых радиационных исследований необходимы интенсивные импульсы рентгеновского излучения в спектральном диапазоне $E_\gamma = 20 \dots 60$ кэВ. Z-пинчи, в которых кинетическая энергия имплозирующей плазмы конвертируется в тепловое излучение, позволяют получать интенсивные потоки излучения с энергией квантов $E_\gamma < 5$ кэВ [1]. Использование же электронных пучков с энергией электронов $E_e = 100 \dots 200$ кэВ ограничено сравнительно небольшими токами пучков и малым сечением радиационных потерь. Решить проблему интенсивности можно только при повышении ускоряющего напряжения. Но при использовании электронных пучков с энергией электронов $E_e = 1 \dots 10$ МэВ высокая эффективность преобразования их энергии в тормозное излучение достигается лишь на достаточно толстых мишенях (0.1...1 мм Та). Большая часть квантов из таких мишеней имеет энергию выше 200 кэВ, кванты с меньшей энергией поглощаются в мишени. Один из вариантов увеличения доли мягких квантов – использование многократного пролета электронов через оптически тонкую (в смысле рентгеновского излучения) мишень, роль которой может выполнять анодная фольга в отражательных триодах или виркаторах [2]. При этом генерируется тормозное излучение, максимум интенсивности которого приходится на более мягкую область спектра рентгеновского диапазона, чем в генераторах тормозного излучения с толстыми мишенями.

В отражательных триодах и виркаторах происходят осцилляции электронного потока в потенциальной яме, образуемой катодом, анодной фольгой и виртуальным катодом, а генерация рентгеновского излучения осуществляется за счет многократного прохождения электронов через тонкую фольгу (10...30 мкм, Та) из материала с большим атомным номером. Возможность генерации мощных импульсов рентгеновского излучения с помощью отражатель-

ного триода была успешно продемонстрирована в работе [3]. Результаты расчетов отражательного триода применительно к установке «ЮПИТЕР» (энергозапас – 30 МДж) представлены в [4], где утверждается, что с его помощью при параметрах пучка электронов 5 МэВ, 60 МА энергия излучения, приходящаяся на диапазон 20...60 кэВ, может составлять 160 кДж.

Отметим, что в работах [3,4] рассмотрены только отражательные триоды, в которых, как известно, высокое напряжение подается на анодную фольгу, а катод и отражающий электрод (заанодный коллектор) заземлены. Наличие же отражающего электрода может затруднить утилизацию рентгеновского излучения в радиационных исследованиях.

В данной работе для генерации рентгеновского излучения впервые используется виркатор. На преимущества виркаторов перед отражательными триодами для генерации импульсов рентгеновского излучения нами неоднократно указывалось в [2,5]: их конструкция более простая, высокое напряжение в них подается на катод, а анодная фольга и коллектор заземлены. Таким образом, в виркаторах при использовании продольного магнитного поля, однородного в области анодной фольги и спадающего в области коллектора, проблемы утилизации рентгеновского излучения не существует.

В работе приведены результаты 2-мерных самосогласованных расчетов динамики электронного пучка в камере виркатора и определены спектры сопутствующего СВЧ-излучения. Приведены также результаты 1-мерных самосогласованных расчетов динамики электронного пучка с учетом рассеяния на анодной фольге и определены спектры тормозного рентгеновского излучения.

Представлены также результаты первых экспериментов по исследованию тормозного рентгеновского излучения виркатора для тонкой (10 мкм, Та) и толстой (100 мкм, Та) анодной фольги.

Эксперименты предварялись компьютерным моделированием виркатора. Целью моделирования являлось решение следующих задач:

- моделирование пространственно-временной 2-мерной самосогласованной динамики электронного пучка в неоднородном магнитном поле для определения места высадки электронов на коллектор и поиска места установки датчиков рентгеновского излучения, наиболее защищенного от электронов;
- моделирование 2-мерной самосогласованной динамики формирования виртуального катода для расчета величины предельного тока и спектра сопутствующего СВЧ-излучения (в экспериментах наличие мощного СВЧ-излучения соответствующего спектрального диапазона свидетельствовало бы о наличии в пучке виртуального катода);
- моделирование 1-мерной самосогласованной динамики пучка с виртуальным катодом с учетом рассеяния электронов на анодной фольге для расчета спектров тормозного рентгеновского излучения.

При моделировании во всех случаях использовался *particle-in-cell*-метод решения задач, причем для первых двух задач использовался известный релятивистский электромагнитный код «КАРАТ» [6], а для третьей задачи – релятивистский электростатический код собственной разработки [7].

Приведем результаты моделирования виркатора с помощью кода «КАРАТ» для оптимизированной геометрии и режимов работы, использованных в экспериментах.

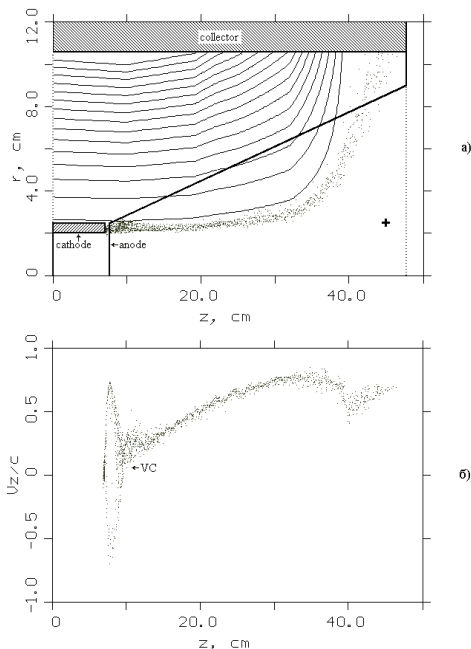


Рис. 1. Результаты моделирования динамики электронного пучка в виркаторе: а) – мгновенный конфигурационный портрет пучка, показаны также силовые линии магнитного поля, крестиком обозначено положение «датчика», в котором рассчитывалось СВЧ-поле; б) – фазовый портрет пучка, VC – виртуальный катод

Геометрия электродной системы виркатора приведена на рис. 1,а. Электродная система включала в себя трубчатый катод и анодный электрод, содержащий массивный коллектор, конический анододержатель, выполненный из прозрачного для электронов материала с малым атомным номером, и танталовый анод-мишень. Считалось, что на виркатор наложено внешнее магнитное поле величиной 4,4 кГс в однородной части. Пространственное распределение магнитного поля в виркаторе, соответствующее измерениям, также показано на рис. 1,а.

Задавалось напряжение в диоде величиной 1 МВ, ток пучка величиной 90 кА. Мгновенный конфигурационный портрет пучка показан на рис. 1,а, из которого определено место высадки электронов на коллектор.

На рис. 1,б показан мгновенный фазовый портрет пучка, из которого видно, что в расчетной системе формируется виртуальный катод, то есть ток пучка превышает предельный ток.

В точке, помеченной на рис. 1,а крестиком, рассчитывался временной ход компонентов электрического поля. Было определено, что при наличии в пучке виртуального катода, в этой точке возникают интенсивные электромагнитные колебания диапазона СВЧ. Поскольку вблизи расчетной точки пучок движется почти радиально, то наиболее информативны колебания радиального компонента электрического поля. Его фурье-образ показан на рис. 2, из которого был определен спектральный диапазон СВЧ-детектора для экспериментов ($\lambda=3 \text{ см}$).

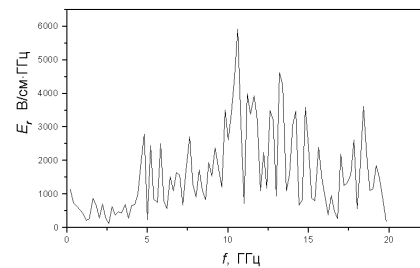


Рис. 2. Рассчитанный спектр радиальной компоненты СВЧ-поля в точке расположения «датчика»

Приведем теперь результаты моделирования генерации тормозного излучения с помощью кода [7]. В этих расчетах виркатор состоял из двух цилиндрических металлических камер. Первая камера служит ускоряющим диодом, а вторая – промежуточной дрейфа. Диодная и дрейфовая камеры разделены фольгой. В фольге предусмотрен расчет ионизационных потерь энергии электронов методом Монте-Карло так, что учитываются не только средние ионизационные потери энергии в фольге, но и флуктуации этих потерь. Задача решается *particle-in-cell*-методом с учетом релятивистского движения электронов. Крупные частицы одинаковы и представляют собой тонкие шайбы с фиксированными и задаваемыми ранее внутренним радиусом и внешним радиусом. Модельные расчеты виркатора про-

водились при следующих параметрах. Диодная область виркатора: внешний диаметр пучка 5 см; толщина электронного пучка 1 см; длина ускоряющего зазора 0,7 см. Дрейфовая область виркатора имеет длину 24 см. Внешний диаметр диодной и дрейфовой камер 21 см. К катоду прикладывалось напряжение 1 МВ. Инжектируемый ток катода составлял 90 кА. Толщина фольгового анода в первом случае 10 мкм, во втором случае 100 мкм. Материал анода – Та.

Энергетические спектры крупных частиц, пересекающих анодную фольгу, приведены на рис. 3. При толщине фольги 100 мкм наблюдается заметное снижение интенсивности частиц в низкоэнергетических областях спектра по сравнению со случаем фольги толщиной 10 мкм.

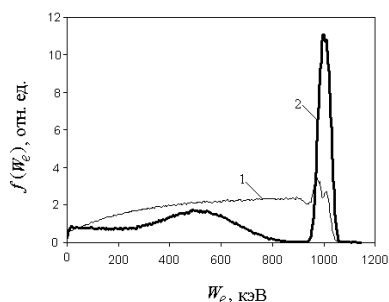


Рис. 3. Спектры электронов, пересекающих фольгу, рассчитанные для разных толщин анодной фольги

На основе полученных данных по следующей формуле из [8] рассчитывались спектры тормозного рентгеновского излучения:

$$I_v = k v^{2/3} v_0^{-2} [(v_0 - v)^{-1/2} - v_0^{-1/2}]^{-2/3}, \quad (1)$$

где I_v – спектральная интенсивность; v_0 – частота коротковолновой границы спектра; v – частота тормозного излучения; k – коэффициент пропорциональности. Полученные спектры приведены на рис. 4. Их анализ показывает, что для тонкой фольги рентгеновская генерация действительно смещается в мягкую область спектра.

Виркатор для генерации импульсов рентгеновского излучения был создан на базе электронного ускорителя прямого действия с питанием от индуктивного накопителя энергии с плазменным прерывателем тока [9]. Максимальный ток индуктивного накопителя установки составлял 130 кА, амплитуда импульса напряжения при разрыве цепи накопителя – 1,3 МВ.

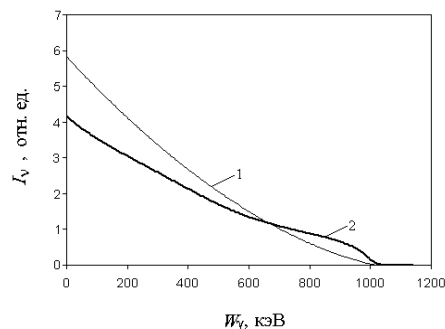


Рис. 4. Спектры тормозного рентгеновского излучения, рассчитанные для разных толщин анодной фольги

В последней секции индуктивного накопителя была размещена нагрузка – вакуумный диод виркатора, содержащий трубчатый тонкостенный катод диаметром 50 мм и толщиной стенки 500 мкм, напротив которого соосно устанавливался конический тонкостенный анододержатель также толщиной 500 мкм. На торце анододержателя закреплялась анодная танталовая фольга толщиной 10 и 100 мкм так, что межэлектродный зазор в диоде составлял 9 мм. На этой секции установлен соленоид, в котором создается аксиальное магнитное поле величиной 4,4 кГс в области диода.

Схема установки с виркатором в качестве нагрузки показана на рис. 5, там же показаны датчики для измерения различных параметров установки.

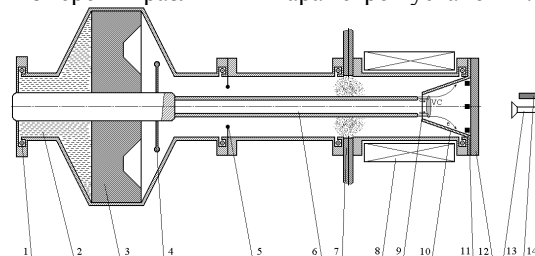


Рис. 5. Схема ускорителя с виркатором в качестве нагрузки и расположения диагностической аппаратуры: 1 – пояс Роговского, 2 – маслонаполненная секция индуктивного накопителя, 3 – изолятор, 4 – предохранительное диэлектрическое кольцо, 5 – предохранительное металлическое кольцо между вакуумными секциями индуктивного накопителя, 6 – катод, 7 – плазменные пушки плазменного прерывателя тока, 8 – соленоид магнитного поля, 9 – анодная фольга, 10 – конический анододержатель, 11 – термолюминесцентные дозиметры, 12 – окно вывода СВЧ-излучения, 13 – СВЧ-детектор на горячих носителях, 14 – полупроводниковые детекторы рентгеновского излучения

Измерения токов в различных частях установки проводились с помощью поясов Роговского.

Исследование обскурограммы электронного пучка и его автографа на анодной фольге, показанных соответственно на рис. 6, позволило определить поперечную структуру пучка: сечение пучка – коль-

цо с внешним диаметром, равным диаметру катода. Эти изображения позволяют определить форму источника тормозного излучения на анодной фольге, а также подтверждают адекватность приведенных выше результатов расчетов экспериментальным результатам.

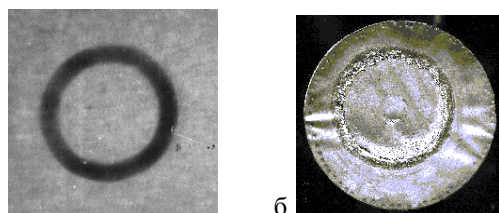


Рис. 6. Автографы пучка: а – обскурограмма пучка, б – след пучка на аноде

Измерение дозы рентгеновского излучения проводилось с помощью термолюминесцентных дозиметров типа ТЛД на основе алюмофосфатного стекла $MgO \cdot P_2O_5$ (87%), $Al_2O_3 \cdot 3P_2O_5$ (13 %) и MnO_2 (0,1 %). Для измерения временных параметров импульсов рентгеновского излучения и оценки спектра использовались полупроводниковые детекторы с алюминиевыми фильтрами толщиной 2,4 и 7 мм. Детекторы располагались на расстоянии 700 мм от анодной фольги. Регистрация импульсов СВЧ-излучения проводилась с помощью СВЧ-детектора на горячих носителях, размещенного в волноводе сечением 23×10 мм и описанного в [10]. СВЧ-детектор располагался на расстоянии 500 мм от окна вывода излучения.

Отметим, что для вывода СВЧ-излучения из вакуумного объема виркатора использовалось диэлектрическое окно. Для того, чтобы оно не разрушилось продуктами испарения анодной фольги, толщина его выбиралась равной 35 мм. При такой толщине интенсивность квантов рентгеновского излучения с энергией 50 кэВ ослабляется в 2,5 раза. Поэтому термолюминесцентные дозиметры располагались внутри вакуумной камеры на расстоянии 70 мм от анодной фольги за защитой, предохраняющей их от электронов.

На рис. 7, 8 приведены осциллограммы, полученные в экспериментах с тонким анодом (10 мкм Ta). Амплитуда тока линии – 100 кА, амплитуда тока нагрузки – 90 кА. Из отношения величин зарядов на детекторах с различными фильтрами можно оценить коэффициент ослабления μ и среднюю энергию излучения: $\mu \approx 1 \text{ см}^{-1}$ и $E_\gamma \approx 50 \text{ кэВ}$. Тот же результат для E_γ дает сравнение показаний дозиметров ТЛД. Доза рентгеновского излучения на ТЛД без фильтров – 200 рад, на ТЛД с фильтрами 5 мм алюминия – 120 рад.

Эксперименты с толстым анодом (100 мкм Ta) проводились по той же методике, что и с тонким анодом. На рис. 9 представлены осциллограммы импульсов тока линии и тока нагрузки. Амплитуда тока линии – 115 кА, амплитуда тока нагрузки – 93 кА. Осциллограммы импульсов рентгеновского излучения приведены на рис. 10. Сравнивая величины зарядов на детекторах рентгеновского излучения

с фильтрами различной толщины, находим: $\mu \approx 0.54 \text{ см}^{-1}$ и $E_\gamma \approx 80 \text{ кэВ}$. Доза рентгеновского излучения на дозиметрах ТЛД без фильтра составила 25 рад, на ТЛД с фильтром 5 мм алюминия – 18 рад.

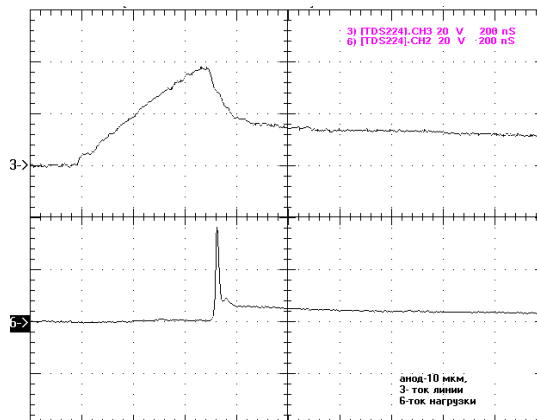


Рис. 7. Осциллограммы импульсов тока для фольги 10 мкм: ток линии 50 кА/дел, ток нагрузки 50 кА / дел

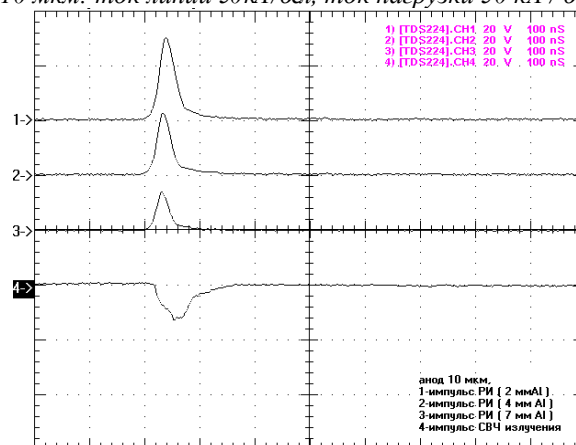


Рис. 8. Осциллограммы импульсов рентгеновского и СВЧ-излучения для фольги 10 мкм, интенсивность рентгеновского излучения в относительных единицах

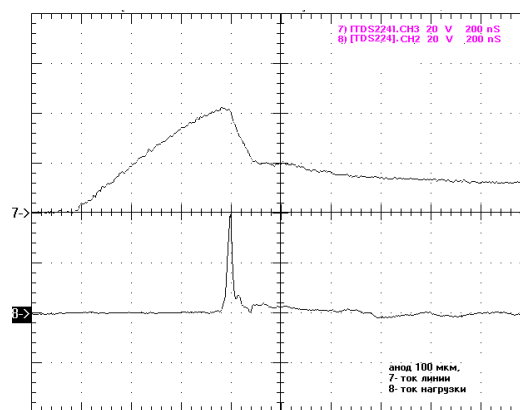


Рис. 9. Осциллограммы импульсов тока для фольги 100 мкм, ток линии 50 кА / дел, ток нагрузки 50 кА / дел

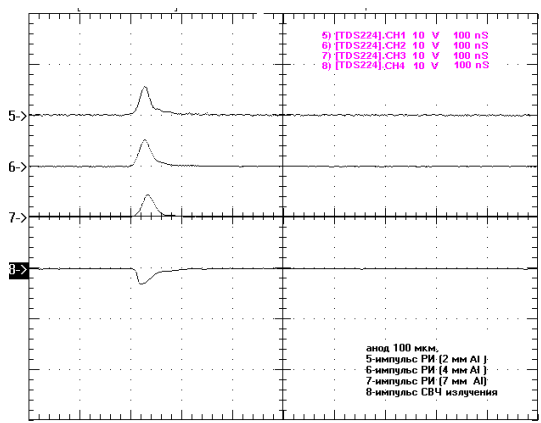


Рис. 10. Осциллограммы импульсов рентгеновского и СВЧ-излучения для фольги 100 мкм, интенсивность рентгеновского излучения в относительных единицах

Сигнал с детектора СВЧ-излучения подтверждает образование виртуального катода. Длина пробега электрона с энергией 1 МэВ в тантале составляет ≈ 0.5 мм, поэтому часть электронов пучка выходит за анод. Но спектр излучения более коротковолновый, чем в случае тонкого анода. По-видимому, это объясняется малым числом электронов, участвующих в осцилляциях. Проведенные эксперименты показали, что при тонком аноде доза рентгеновского излучения при $E_\gamma > 30$ кэВ в 8 раз превышает величину дозы для толстого анода. Если учесть, что излучение в области (10...30 кэВ) составляет около 25% от энергии излучения во всем спектре [4], выход рентгеновского излучения возрастет на 25%, а средняя энергия квантов снизится до 30 кэВ. Впервые создан и введен в эксплуатацию мощный виркатор с многократным пролетом электронов сквозь оптически тонкую анодную фольгу для генерации мощных импульсов рентгеновского излучения. Виркатор реализован на базе электронного ускорителя прямого действия с питанием от индуктивного накопителя энергии с плазменным прерывателем тока.

Приведены результаты 2-мерных расчетов динамики электронного пучка в камере виркатора и

определены спектры сопутствующего СВЧ-излучения. Приведены также результаты 1-мерных самосогласованных расчетов динамики электронного пучка с учетом рассеяния на анодной фольге и определены спектры тормозного рентгеновского излучения.

Представлены результаты первых экспериментов по исследованию тормозного рентгеновского излучения виркатора для тонкой (10 мкм, Та) и толстой (100 мкм, Та) анодной фольги. Для тонкой фольги доза рентгеновского излучения ($E_\gamma > 30$ кэВ) в 8 раз превысила дозу, полученную при толстом аноде, а средняя энергия квантов снизилась с 80 до 30 кэВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. N.R. Pereira, J. Davis // *J. Appl. Phys.* 1988, v.64, № 3, p.R1.
2. А.Е. Дубинов, В.Д. Селемир // *Радиотехника и электроника.* 2002, т.47, № 6, с.645.
3. Н.И. Завада, И.А. Трошкин, К.Ф. Зеленский и др. // *Вопросы атомн. науки и техн.: Сер. Физика радиационного воздействия на радиофизическую аппаратуру.* 1994, № 3-4, с.23.
4. T.W.L. Sanford, J.A. Halbleib, G. Cooperstein, B.V. Weber // *IEEE Trans.* 1995, v. NS-42, № 6, p.1902.
5. Пат. РФ № 2128411, МКИ: Н 05 G 2/00. Н 01 j 35/08. *Способ генерации импульсов мягкого рентгеновского излучения.* А.Е. Дубинов, В.Д. Селемир, Н.Н. Макарова // *Открытия. Изобретения.* 1999, № 9.
6. V.P. Tarakanov *User's manual for code Karat*, Berkley Research Associate Inc., Springfield, VA, 1992.
7. А.Е. Дубинов, М.В. Лойко // *Вычислительные технологии.* 2003, т.8, № 2, с.53.
8. М.А. Блохин *Физика рентгеновских лучей.* М.: ГИТТЛ, 1957.
9. N.F. Popkov, V.I. Kargin, E.A. Ryaslov, A.S. Pikar' // *J. X-Ray Sci. Techn.* 1995, № 5, p.289.
10. М.Д. Райзер, Л.Э. Цопп // *Радиотехника и электроника.* 1975. т.20, № 8, с. 16.