

УДК 539.1

ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ДЕТЕКТОРА ФОРМЫ СГУСТКА С ТОНКОЙ ЭМИССИОННОЙ ПРОВОЛОКОЙ-МИШЕНЬЮ

С.В. ЖАМКОЧЯН

Ереванский физический институт им. А.И. Алиханяна, Армения

(Поступила в редакцию 26 марта 2008 г.)

Определено временное разрешение нового детектора продольных характеристик сгустка, основанного на СВЧ развертке вторичных электронов. Для точных расчетов по методу Монте-Карло разброса во временах пролета исследуемых электронов и определения размера регистрируемого электронного пятна разработан специальный код на основе программного обеспечения SIMION 8, где учтены распределение начальных энергий электронов, распределения углов их вылета, а также структура ускоряющего и фокусирующего электрических полей. Показано, что, используя в качестве эмиссионного катода-мишени тонкую проволоку, можно достичь фемтосекундного временного разрешения при умеренных напряжениях, приложенных к катоду и фокусирующим электродам.

1. Введение

Одной из наиболее важных характеристик пучка заряженных частиц является продольное распределение заряда в его сгустках. Этот параметр может быть использован как для изучения динамических свойств пучка, так и для настройки ускорителя. С помощью информации о продольном распределении заряда в сгустке можно вычислить энергетический спектр и продольный эмиттанс пучка. Однако, точное измерение формы сгустка является сложной технической проблемой и требует разработки специальной аппаратуры. Главными требованиями для такой аппаратуры являются высокое разрешение по времени, незначительное искажение первоначального пучка и быстрый отклик.

Продольная форма сгустка заряженных частиц может исследоваться при помощи детекторов, основанных на изучении образовавшихся в результате столкновения пучка с мишенью низкоэнергетических электронов вторичной эмиссии, отличительным свойством которых является слабая зависимость их свойств как от типа первоначальных частиц, так и от энергии пучка. Продольная структура сгустка в таких детекторах когерентно преобразуется во временную структуру потока вторичных электронов (ВЭ) и затем в пространственное распределение путем СВЧ развертки [1].

Детектор, основанный на анализе ВЭ, выбитых первоначальным пучком из проволоки-мишени, был разработан, построен и установлен на перезарядном линейном ускорителе Аргонн (Argonne Tandem Linear Accelerating System) [2]. В этом детекторе сигнал интегрируется в камере на приборе с зарядовой связью (ПЗС-камере) с периодом сбора данных 33 мс.

Настоящая работа посвящена симуляции по методу Монте-Карло работы детектора длины сгустка (BLD – Bunch Length Detector), основанного на разработанном недавно СВЧ отклоняющем устройстве круговой развертки частотой 500 МГц [3]. Использование этого дефлектора дает возможность циркулярно сканировать и регистрировать одиночные ВЭ, усиленные в микроканальных пластинах. Одиночные сигналы, генерируемые в этих пластинах, могут быть обработаны без интеграции при помощи доступной наносекундной электроники, что позволяет наблюдать высокочастотные колебания центра сгустка и его энергии.

Была проведена симуляция детекторов с эмиссионными мишенями в виде тонкой проволоки и плоского точечного катода. Показано, что предложенная система анализа вторичных электронов позволяет регистрировать одиночные электроны с временным разрешением порядка 100 фс.

2. Схематическая планировка предложенной аппаратуры

Схема предложенного детектора с эмиссионной мишенью в виде тонкой проволоки представлена на рис.1. Принцип действия детектора во многом схож с принципом действия устройств, предложенных в работах [2,4]. Исследуемый пучок налетает на проволоку-мишень (1) и выбивает низкоэнергетические ВЭ, которые затем ускоряются на интервале Z отрицательным напряжением, приложенным к проволоке. Пройдя через коллиматор

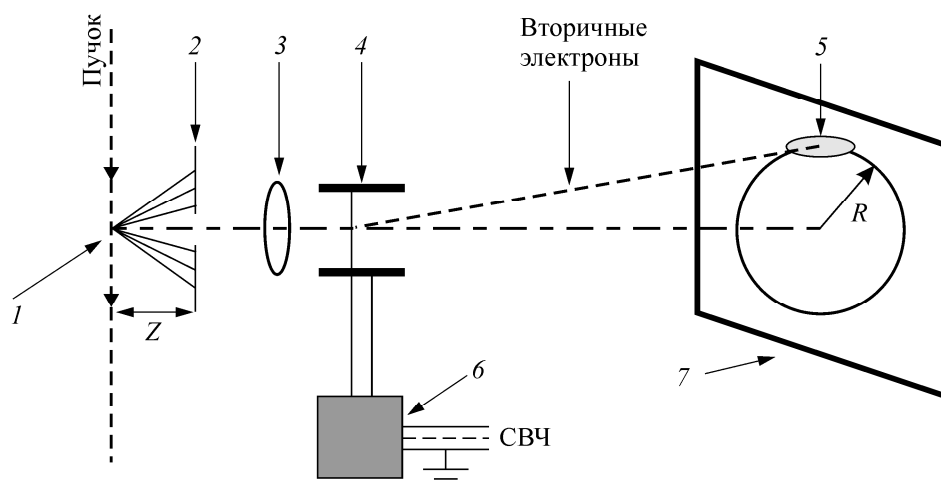


Рис.1. Схематическое изображение детектора с тонкой эмиссионной проволокой-мишенью. 1 – проволока-мишень, 2 – коллиматор, 3 – электростатическая линза, 4 – отклоняющие электроды, 5 – изображение ВЭ, 6 – СВЧ резонатор, 7 – детектор ВЭ.

(2), электроны фокусируются электростатической линзой (3) на экран (7) в дальнем конце установки, где расположен детектор ВЭ. На интервале между линзой (3) и экраном (7) электроны отклоняются СВЧ дефлектором круговой развертки, состоящим из электродов (4) и коаксиального СВЧ резонатора (6), осциллирующего с частотой, кратной частоте образования сгустков в ускорителе. Таким образом, на экране регистрируется ВЭ-изображение сгустка.

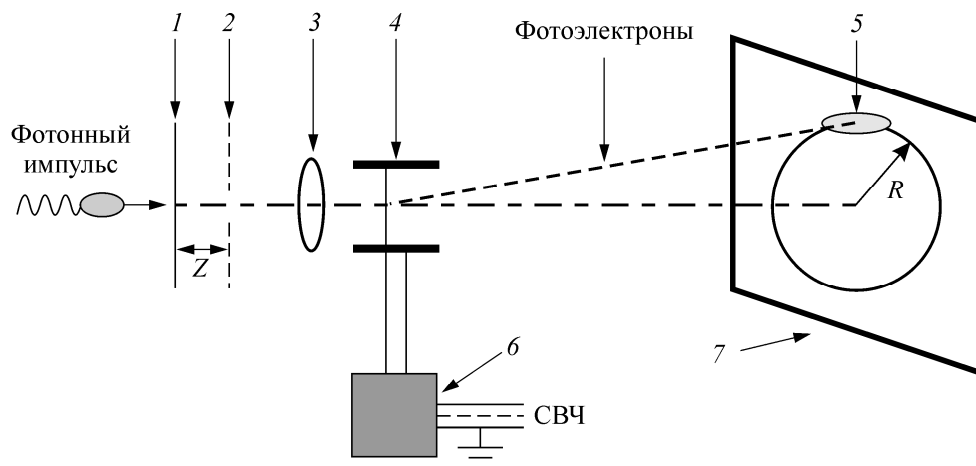


Рис.2. Схематическое изображение детектора с плоской точечной эмиссионной мишенью. 1 – плоская точечная мишень, 2 – прозрачный для электронов электрод, 3 – электростатическая линза, 4 – отклоняющие электроды, 5 – изображение ВЭ, 6 – ВЧ резонатор, 7 – детектор ВЭ.

Аналогичная схема была использована для детектора с мишенью в виде плоского точечного катода (рис.2). В этом случае первоначальный пучок или фотонный импульс сталкивается с плоской эмиссионной мишенью (1). Образовавшиеся электроны ускоряются на интервале Z прозрачным для них электродом (2) и, пройдя через системы фокусировки и СВЧ развертки, сканируются на экран и регистрируются.

3. Временное разрешение детектора

Временное разрешение детекторов рассмотренного типа определяется несколькими факторами [5,6].

а) Физическое временное разрешение вторичной электронной эмиссии, т.е. разброс времен выхода вторичных электронов. Нижний предел этой величины для металлов, согласно теоретическим оценкам, составляет примерно 10 фс [7].

б) Физическое временное разрешение электронной трубки обусловлено начальным распределением энергий и углов вылета ВЭ. Разброс времен пролета электронов на ускоряющем интервале между катодом-мишенью и коллиматором, определяющий в основном физическое разрешение трубки, может быть доведен, как это показано ниже, до десятков фс в случае с эмиссионным катодом-проволокой. Такое высокое разрешение достигается благодаря быстрому ускорению электронов в электрическом поле тонкой проволоки, потенциал φ которого относительно ее поверхности задается выражением $\varphi = -2\kappa \ln(r/R_0)$, где κ – линейная плотность заряда на проволоке, r – расстояние до поверхности проволоки, R_0 – радиус проволоки. Быстрый рост отрицательного потенциала φ проволоки на малых расстояниях от нее ясно виден на рис.3, где показана его форма в плоскости ZY (систему координат см. на рис.4). Для сравнения на рис.5 показан рост кинетической энергии

электрона для случаев движения с поверхности проволоки толщиной 20 мкм и плоского катода на интервале 1 см при ускоряющем напряжении –10 кВ.

в) Техническое временное разрешение электронной трубки определяется ее конструкцией и обусловлено разбросом во временах пролета электронов.

г) Техническое временное разрешение СВЧ отклоняющего устройства определяется как $\Delta\tau_d = d/v$, где d – размер пятна электронного пучка или пространственное разрешение электронного детектора (в случае, если пятно меньше разрешения детектора), а $v = 2\pi R/T$ – скорость развертки. Здесь T – период осцилляций СВЧ поля, R – радиус круговой развертки на позиционно-чувствительном детекторе. При $T = 2 \times 10^{-9}$ с ($f = 500$ МГц), $R = 2$ см и $d = 0.1$ мм $\Delta\tau_d = 2 \times 10^{-12}$ с.

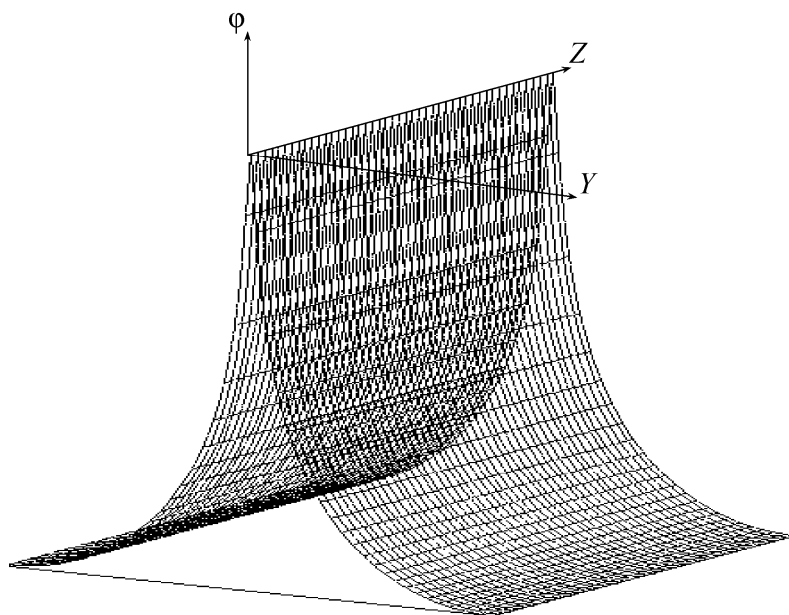


Рис.3. Форма потенциала ϕ тонкой проволоки в плоскости ZY .

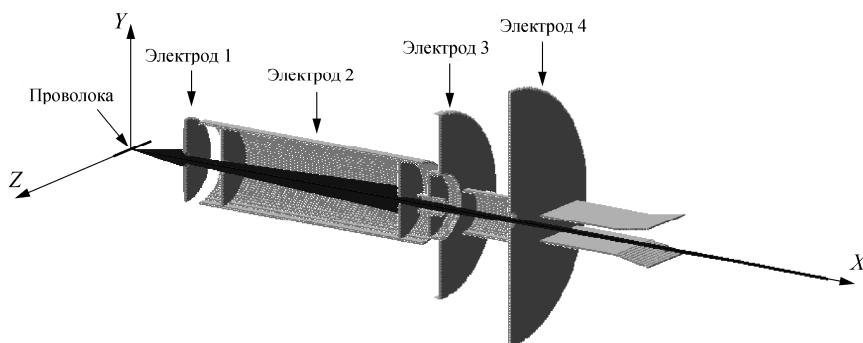


Рис.4. Симуляция детектора длины сгустка с эмиссионной проволокой-мишенью в SIMION 8.

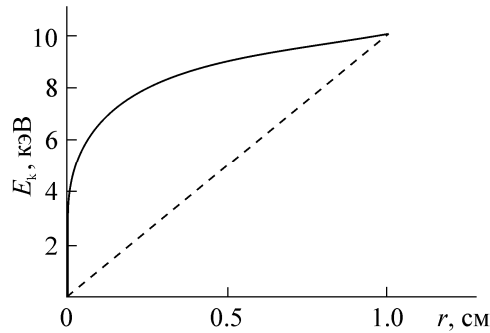


Рис.5. Рост кинетической энергии электрона при движении с поверхности проволоки толщиной 20 мкм (сплошная линия) и плоского катода (пунктирная линия).

В настоящей работе рассмотрены физическое и техническое разрешения электронной трубки, а также техническое разрешение СВЧ дефлектора.

4. Монте-Карло моделирование

Расчеты по методу Монте-Карло были проведены с помощью программного обеспечения SIMION 8 [8], которое позволяет вычислять значения электростатических потенциалов путем решения уравнения Лапласа для электрического поля

$$\nabla^2 \phi = \nabla E = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0$$

с заданными граничными условиями.

Для оценки временного разрешения, а также с целью подбора оптимальных форм и напряжений для электродов электростатической линзы, было проведено моделирование работы предложенных детекторов длины сгустка. На рис.4 показана смоделированная фокусирующая система детектора с эмиссионным катодом в виде проволоки (аналогичная система предполагается и для детектора с плоским эмиссионным катодом-мишенью).

Начальные энергии вторичных электронов генерировались согласно экспоненциальному распределению

$$P(E) = \frac{E}{E_0} e^{-\frac{E}{E_0}},$$

где E – кинетическая энергия, а E_0 – наиболее вероятная энергия испущенного вторичного электрона. Такое энергетическое распределение примерно соответствует экспериментальному энергетическому спектру электронов, выбитых из алюминиевой фольги альфа-частицами с энергией 5.48 МэВ, если принять, что $E_0 = 1.8$ эВ [9]. Как показано в работе [10], энергетический спектр вторичных электронов практически не зависит от свойств эмиссионной поверхности, и приведенное выше распределение может быть использовано для генерации начальных энергий вторичных электронов с произвольной эмиссионной

поверхности. Для генерации значений полярного Φ и азимутального Θ углов вылета электронов было использовано изотропное распределение.

5. Результаты Монте-Карло моделирования

Временная дисперсия σ_{ph} между проволокой-мишенью и коллиматором может быть существенно уменьшена путем использования проволок меньшего радиуса. На рис.6 показаны рассчитанные значения σ_{ph} в зависимости от радиуса R_0 использованной проволоки для различных приложенных ускоряющих напряжений. Расчеты были проведены для расстояния между проволокой и коллиматором $Z = 1$ см и диаметра отверстия коллиматора $D = 1$ мм.

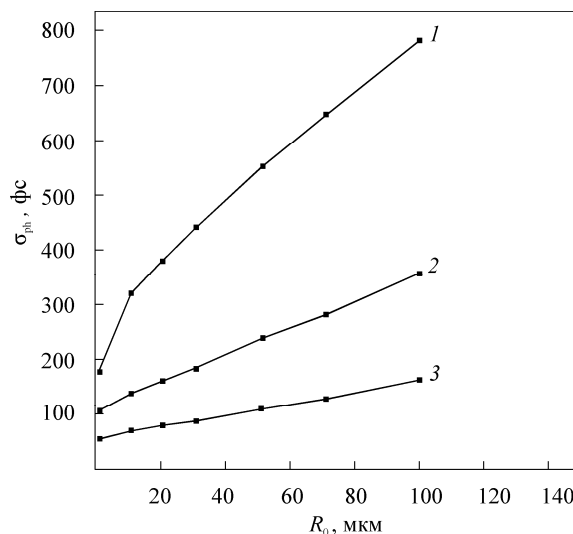


Рис.6. Зависимость дисперсии σ_{ph} времен пролета электронов между эмиссионной проволокой и коллиматором от радиуса проволоки R_0 . Кривые 1, 2 и 3 соответствуют приложенным напряжениям – 2.5 кВ, – 5 кВ и – 10 кВ, соответственно.

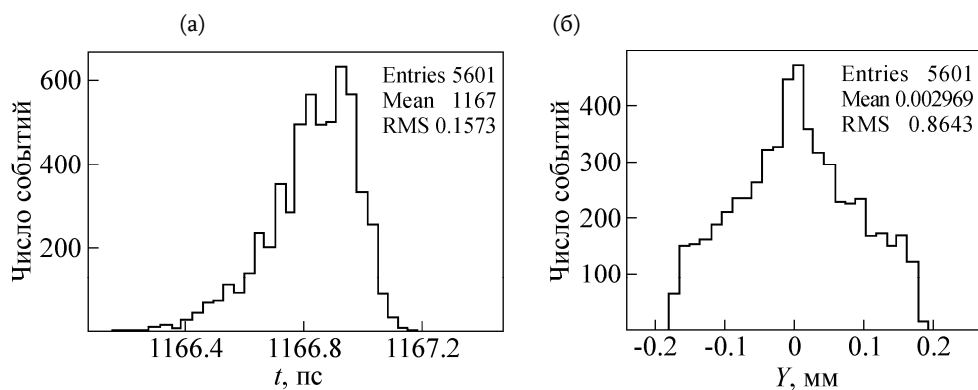


Рис.7. Гистограммы, полученные для конфигурации 2 в табл.1. а) распределение времен пролета вторичных электронов; б) распределение Y -отклонений вторичных электронов при выключенном СВЧ поле.

Как видно из рисунка, временного разрешения в десятки фемтосекунд можно достичь при умеренных приложенных напряжениях. Так, например, для радиуса 10 мкм и напряжения -10 кВ $\sigma_{ph} \sim 70 \text{ фс}$. Для сравнения, при использовании в аналогичных условиях плоского катода $\sigma_{ph} \sim 1 \text{ пс}$.

Распределение времен пролета электронов через всю систему и распределение, характеризующее размер электронного пятна (распределение Y -отклонений электронов при выключенном СВЧ поле), показаны на рис.7 ($R_0 = 12.5 \text{ мкм}$). Приложенные к электродам напряжения соответствуют конфигурации 2 в табл.1.

Таблица 1. Рассчитанные конфигурации фокусирующей системы с тонкой эмиссионной проволокой-мишенью.

Конфигурация (детектор с проволокой в качестве эмиссионной мишени)	Приложенные напряжения, В				
	Проволока	Электрод 1 (коллиматор)	Электрод 2	Электрод 3	Электрод 4
1	– 20 000	0	15 500	0	15 500
2	– 10 000	0	7 750	0	7 750
3	– 5 000	0	3800	0	3800
4	– 2 500	0	1900	0	1900

Следует отметить, что в случае детектора с проволокой-мишенью лишь около 0.5% от общего числа испущенных ВЭ достигает высокочастотного модулятора. Остальные электроны задерживаются коллиматором или сталкиваются со стенками электродов электростатической линзы. Использование же плоского катода позволяет регистрировать более 50% электронов. Такое свойство делает возможным применение детектора с плоским катодом-мишенью в системе регистрации тяжелых частиц. Как показывают расчеты для схемы с отклонением испущенных ВЭ в магнитном поле на 90° , временное разрешение такой системы можно довести до 15–20 фс, при ускоряющем напряжении 5 кВ.

Таблица 2. Рассчитанные конфигурации фокусирующей системы с плоским точечным катодом-мишенью.

Конфигурация (детектор с плоским точеч- ным эмис- сионным катодом)	Приложенные напряжения, В				
	Катод	Электрод 1 (прозрачный для элек- тронов)	Электрод 1	Электрод 2	Электрод 3
1	- 20 000	0	18 000	0	18 000
2	- 10 000	0	9 000	0	9 000
3	- 5 000	0	4 500	0	4 500
4	- 2 500	0	2 250	0	2 250

Временные разрешения различных конфигураций приложенных к электродам напряжений для детектора с мишенью-проволокой (табл.1; $R_0 = 12.5$ мкм, $Z = 1$ см) и детектора с плоским катодом (табл.2; $Z = 2$ мм) показаны на рис.8 и 9, соответственно.

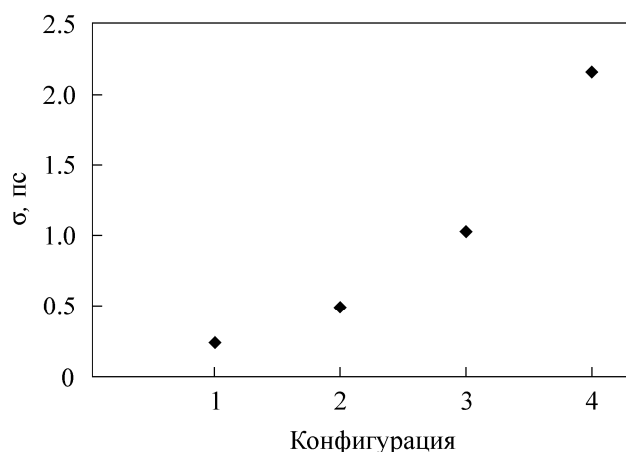


Рис.8. Временное разрешение детектора с эмиссионной проволокой в зависимости от конфигурации приложенных к электродам напряжений.

Полученные значения σ для случая плоского катода согласуются с данными, полученными другими авторами [11]. Как видно из приведенных таблиц, временное разрешение существенно выше при использовании тонкой проволоки. Для предложенных конфигураций временные дисперсии составляют сотни фемтосекунд. Таким образом, полное разрешение детектора определяется, в основном, точностью фокусировки электростатической линзы. Для рассмотренных случаев эта величина меньше 100 мкм (в переводе на время 1.6 пс при частоте сканирования $f = 500$ МГц и радиусе окружности на экране $R = 2$ см). Точность системы может быть улучшена путем повышения частоты сканирования. Так, при частоте 10 ГГц техническая ошибка также сводится к величине порядка 100 фс.

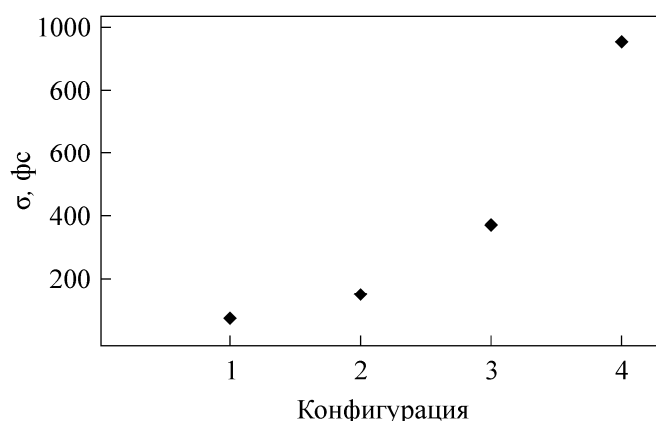


Рис.9. Временное разрешение детектора с плоским катодом в зависимости от конфигурации приложенных к электродам напряжений.

6. Заключение

Показано, что предложенные схемы детектора продольной длины сгустка позволяют достичь временного разрешения в сотни фс за счет быстрого ускорения ВЭ в электрическом поле тонкой проволоки и оптимального подбора форм и приложенных напряжений для электродов фокусирующей системы. Устройство способно измерять формы сгустков непрерывных пучков благодаря возможности регистрации и анализа одиночных вторичных электронов [4]. Подобная техника может использоваться для регистрации запаздывающих продуктов деления с субнаносекундными временами жизни, а также в экспериментах с пучками тяжелых ионов как компактный и точный инструмент для измерения времени пролета [12].

Данная работа была поддержана программой NFSAT, проект № 11/06.

ЛИТЕРАТУРА

1. **A.V.Feschchenko**. Proc. of the Particle Accelerator Conference, Chicago, 2001, p.517.
2. **N.E.Vinogradov** et al. Nucl. Instr. and Meth., **A526**, 206 (2004).
3. **A.Margaryan, R.Carlini, R.Ent**, et al. Nucl. Instr. and Meth., **A566**, 321 (2006).
4. **A.Margaryan** et al. Proc. of Int. Conf. Brilliant Light in Life and Material Sciences, Springer, p.455 (2007).
5. **E.K.Zavoisky, S.D.Feschchenko**. Appl. Optics, **4**, 1155 (1965).
6. **R.Kalibjian** et al. Rev. Sci. Instrum., **45**, 776 (1974).
7. **И.М.Бронштейн, Б.С.Фрайман**. Вторичная электронная эмиссия. М., Наука, 1969.
8. Scientific Instrument Services, Inc., <http://www.simion.com>.
9. **V.M.Agranovich, D.K.Dankevich**, et al. Sov. Phys. JETP, **30**, 220 (1979).
10. **E.J. Sternglass**. Phys. Rev., **108**, 1 (1957).
11. **W.Sibbett, H.Niu, R.Baggs**. Rev. Sci. Instrum., **53**, 758 (1982)
12. **R.Pardo et al.** RIA Diagnostics Development at Argonne. <http://www.oro.doe.gov/riaseb/wrkshop2003/papers/p-2-4-4.pdf>.

ԹԱՆՁՐՈՒԿԻ ՁԵՎԻ ԲԱՐԱԿ ԼԱՐՈՎ ԷՄԻՍԻՈՆ ԴԵՏԵԿՏՈՐԻ
ԺԱՄԱՆԱԿԱՅԻՆ ԼՈՒԾՈՂԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ս.Վ. ԺԱՄԿՈՉՅԱՆ

Որոշված է գերբարձր հաճախականությունների վրա հիմնված նոր, թանձրուկի երկարության դետեկտորի ժամանակային լուծողականությունը: Մոնտե-Կարլո մեթոդով հետազոտվող էլեկտրոնների թռիչքի ժամանակների և էլեկտրոնային պատկերի չափսերի ճշգրիտ հաշվարկների համար ստեղծվել է SIMION 8 ծրագրի վրա հիմնված հատուկ կոդ, որտեղ հաշվի են առնվել էլեկտրոնների նախնական էներգիաների բաշխումը, նրանց դուրս գալու անկյունների բաշխումը, ինչպես նաև արագացնող և ֆոկուսացնող էլեկտրական դաշտերի ռեալ կառուցվածքը: Ցույց է տրված, որ, օգտագործելով որպես էմիսիոն թիրախ բարակ լար, հնարավոր է ստանալ ֆեմտո-վայրկյանային ժամանակային լուծողականություն, առանց մեծ լարումներ կիրառելու:

TIME RESOLUTION OF THE BUNCH SHAPE DETECTOR
WITH A THIN-WIRE EMISSION TARGET

S.V. ZHAMKOCHYAN

The time resolution of a new bunch length detector based on radio frequency (RF) scanning of the produced secondary electrons is calculated. A dedicated Monte-Carlo code by means of SIMION software is developed for accurate simulation of spread in the investigated secondary electrons transit times and image width. In calculations the initial energy distribution of electrons and the actual structure of accelerating and focusing electric fields were considered. It is shown that by using a thin-wire emission target a femtosecond time precision could be achieved using moderate applied voltages.