

УДК 621.3.032.269.1

© О. Н. Алякринский, К. В. Губин, М. Ю. Косачев, Э. А. Купер, П. В. Логачев,
А. М. Медведев, В. К. Овчар, В. В. Репков, Ю. И. Семенов, М. М. Сизов,
А. А. Старостенко, М. Г. Федотов, А. С. Цыганов

ПРОТОТИП ИСТОЧНИКА ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ С ЛАЗЕРНЫМ ПОДОГРЕВОМ КАТОДА

Представлен прототип источника пучка электронов с лазерным подогревом катода. Применение принципа его работы может дать возможность управлять током электронов источника модуляцией мощности лазера подогрева катода. Мощность излучения лазера передается через вакуум, что облегчает электрическую изоляцию лазера от катода, находящегося под высоким ускоряющим напряжением пушки. Измерены основные параметры прототипа источника пучка электронов с лазерным подогревом катода электронной пушки:

- зависимости тока катода и времени подъема тока катода с уровня 0.1 до уровня 0.9 от мощности подогрева катода;
- размер профиля пучка на его полувысоте;
- размер области эмиссии электронов с катода.

Кл. сл.: лазерный подогрев катода, размер места эмиссии электронов с катода, деионизованная вода, охлаждение прикатодных узлов, электрическая изоляция, время разогрева катода, электронное изображение

ВВЕДЕНИЕ

Источники электронного пучка широко применяются в процессах термической обработки материалов для синтеза тугоплавких композитов и соединений, получения нанопорошков, реактивного нанесения защитных покрытий, электронно-лучевой сварки и в аддитивных технологиях. Поэтому актуален вопрос совершенствования источников электронного пучка.

Цель доклада — представить техническую реализацию идеи подогрева катодов электронных пушек лазерным лучом [1]. Использование принципа его работы может позволить управлять током электронного пучка источника модуляцией мощности лазера подогрева катода. В этом случае нет

электроники питания накала катода и управления током пучка, как часто бывает, находящейся под полным высоким напряжением пушки. Мощность излучения лазера передается через вакуум, что облегчает электрическую изоляцию лазера от катода, находящегося под высоким ускоряющим напряжением пушки.

ОПИСАНИЕ ПРОТОТИПА

Прототип (см. Приложение) построен на основе ранее изготовленного в Институте ядерной физики СО РАН энергоблока для установок электронно-лучевой сварки [2]. Основные параметры прототипа показаны в таблице.

Основные параметры прототипа источника электронного пучка

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Тип лазера, длина волны излучения, мощность, параметр качества пучка M^2	Иттербиевый волоконный, непрерывный с внешней модуляцией мощности, 1070 нм, до 500 Вт, $M^2 = 1.08$
2	Энергия пучка электронов	До 60 кэВ
3	Ток пучка электронов	До 200 мА
4	Катодный узел	Охлаждается деионизованной водой
5	Диаметр эмиттирующей поверхности катода	От 1.8 мм до 4 мм

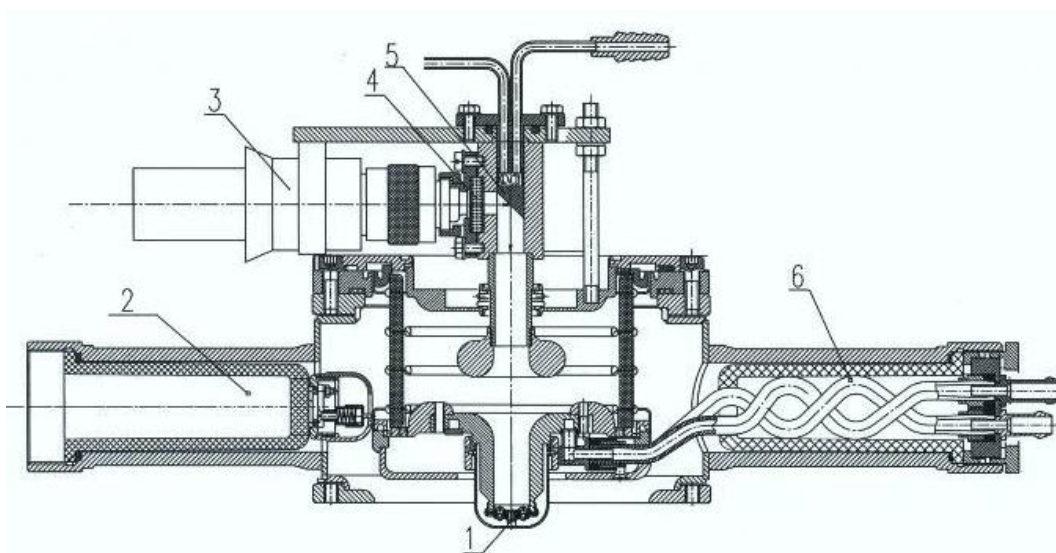


Рис. 1. Схема лазерного подогрева катода.

1 — катод, 2 — ввод высокого напряжения, 3 — коллиматор, 4 — окно ввода лазерного излучения, 5 — медное поворотное зеркало с охлаждением, 6 — ввод деионизованной воды охлаждения катодного узла

Электронная пушка работает по диодной схеме. Как показано на рис. 1, мощность излучения лазера по оптоволокну подводится к коллиматору 3 и через кварцевое окно 4 и медное охлаждаемое поворотное зеркало 5 фокусируется на катод 1. Катод диаметром 4 мм имеет вогнутую сферическую форму и выполнен из танталовой фольги толщиной 0.2 мм. Катод подогревается лазерным лучом до температуры выше 2000 °С. Управление величиной тока эмиссии осуществляется мощностью подводимого лазерного излучения. Форма и взаимное расположение всех электродов, включая катод и анод, определяют электронную оптику системы. Катодный узел установлен на секционированном высоковольтном изоляторе. К катодному узлу подводится несколько сот ватт мощности подогрева лазером. Поэтому катодный узел охлаждается деионизованной водой.

Для контроля формы и стабильности интенсивности мощного лазерного излучения подогрева катода электронной пушки разработан простой волоконно-оптический индикатор лазерного излучения. Индикатор состоит из оптического волокна, фотодиода, доработанного коаксиального разъема СР-50-33ПВ и источника напряжения смещения фотодиода. Оптическое волокно (кварц-полимер) диаметром 200 микрон вводится в вакуумную камеру через вакуумно-плотный разъем. Полированный торец оптического волокна направлен на катод со стороны ввода лазерного излучения. Некоторая часть рассеянного лазерного

излучения поступает в волокно и передается на другой конец волокна, находящийся вне вакуумной камеры, и встраивается в коаксиальный металлический разъем Lemo-штырь. Внутри этого разъема к торцу волокна подсоединяется кремниевый рpн-фотодиод. Выводы фотодиода припаиваются к выводам этого разъема. Металлический корпус разъема Lemo-штырь служит хорошим экраном для сигнала с фотодиода. Разъем Lemo-штырь вставляется в изолированный разъем Lemo-гнездо, который встроен в доработанный коаксиальный разъем СР-50-33ПВ. На корпус разъема Lemo-гнездо подключается источник напряжения смещения для фотодиода (батарея на 9 В). Сигнал с доработанного коаксиального разъема СР-50-33ПВ через коаксиальный кабель поступает на регистрацию на осциллограф или АЦП. На конце коаксиального кабеля должна быть подключена нагрузка 50 Ом или входное сопротивление тракта 0–300 МГц. Полоса пропускания тракта 0–300 МГц. Время нарастания и спада сигнала по уровню 0.9 и 0.1 равно 1 нс. Диапазон мощности лазерного излучения в оптическом волокне 0.2–20 мВт (0.6–60 Вт/см²). Для импульсного лазерного излучения длительностью меньше 1 мс и скважностью больше 10 максимальную мощность можно увеличить в 10 раз. Еще в 16 раз можно увеличить максимальную плотность мощности излучения, если использовать оптическое волокно диаметром 50 мкм.

Рабочий вакуум — порядка 10^{-4} мбар.

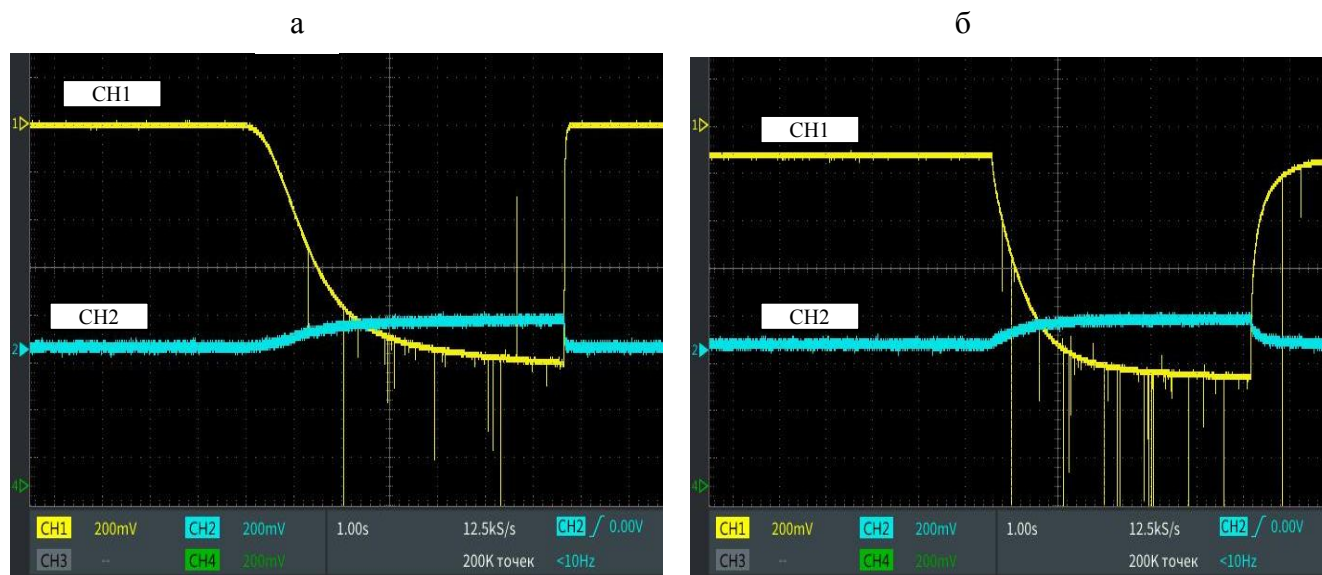


Рис. 2. Осциллограммы тока катода при нагреве прямоугольным импульсом мощности лазера 124 Вт с фронтом ≈ 20 мкс.

а — без предварительного нагрева катода, фронт 2.6 с; б — с предварительным подогревом катода 103 Вт, фронт 1.8 с. CH1 — ток с цилиндра Фарадея на 100 Ом, CH2 — ток с шунта высоковольтного источника, 100 мА/В

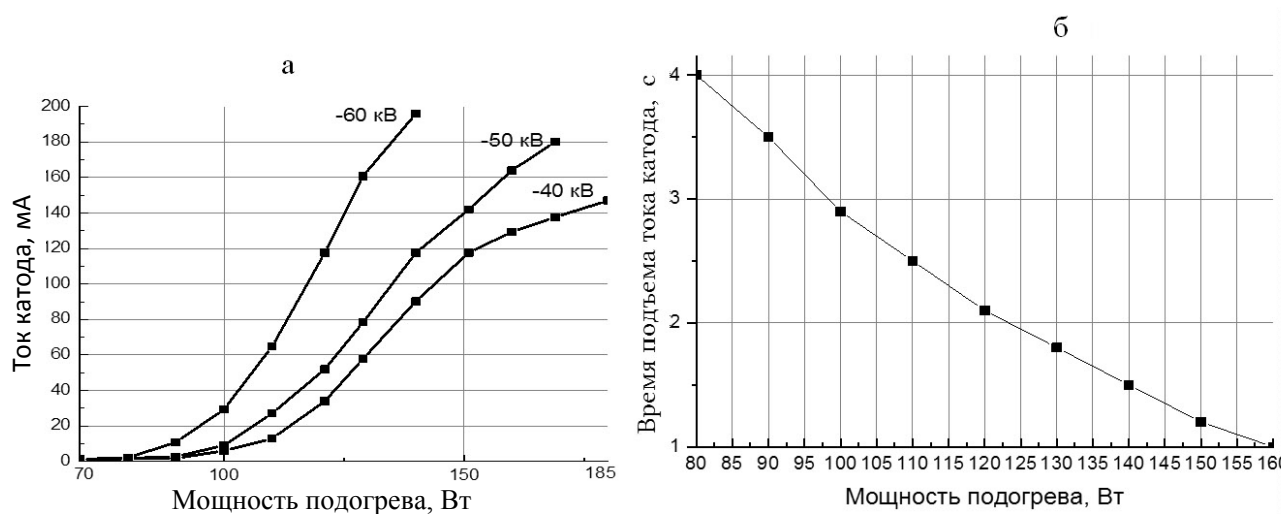


Рис. 3. Графики тока катода (а) и времени подъема тока катода с уровня 0.1 до 0.9 (б) в зависимости от мощности подогрева катода

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОТИПА

Для измерения времени подъема катодного тока источника с уровня 0.1 до уровня 0.9 в технологическую камеру помещался цилиндр Фарадея, и сигнал падения напряжения на 100 Ом от тока цилиндра Фарадея подавался на цифровой осциллограф. CH1 — ток с цилиндра Фарадея

на 100 Ом, CH2 — ток с шунта высоковольтного источника, 100 мА/В.

1. На рис. 2 показаны осциллограммы тока катода при диаметре пятна луча лазера на катоде около 2 мм. Из них видно, что время подъема катодного тока с уровня 0.1 до уровня 0.9 при предварительном подогреве катода сокращается.

2. Аналогичным образом измерялся ток источника. На рис. 3 представлены графики тока катода

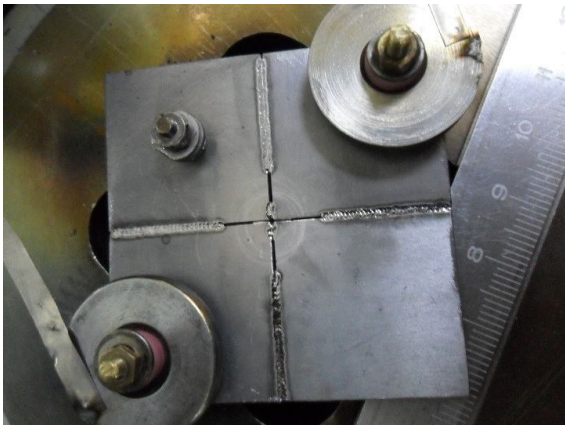


Рис. 4. Датчик измерителя профиля пучка

и времени подъема тока катода с уровня 0.1 до уровня 0.9 в зависимости от мощности подогрева катода при диаметре пятна луча лазера на катоде около 2 мм. Из них видно, что время подъема тока катода с уровня 0.1 до уровня 0.9 при росте мощности подогрева катода с 80 Вт до 160 Вт сокращается в 4 раза.

3. Путем круговой развертки пучка поперек щели шириной от 0.3 до 0.5 мм в танталовой

пластине толщиной 0.8 мм (рис. 4) измерялся диаметр пучка в кроссовере на полувысоте профиля пучка. Такой датчик измерителя помещается на цилиндр Фарадея и измеряется ток заряда, прошедшего через щели датчика. Ток измеряемого профиля пучка до 10 мА. Осциллограмма измерения профиля пучка приведена на рис. 5. Диаметр d пучка на полувысоте его профиля определяется как

$$d = \pi \cdot D \cdot f \cdot t$$

где D — диаметр орбиты круговой развертки пучка, f — частота круговой развертки, t — время на полувысоте осциллограммы профиля.

4. Для индикации области эмиссии с катода использовалась медная пластина толщиной 4 мм, покрытая оксидом алюминия. Оксидное покрытие толщиной около 20 мкм служит люминофором и наносится детонационным способом. Система магнитной оптики прототипа позволяет получение электронного изображения на люминофоре.

На рис. 6 и 7 показаны электронное изображение области эмиссии с катода и размер проплава катода лазерным лучом. Сравнивая эти рисунки, можно утверждать, что при охлаждении катодного узла размер области эмиссии с катода приблизительно равен размеру пятна луча лазера на катоде. На рис. 7 диаметр области эмиссии равен 2 мм.

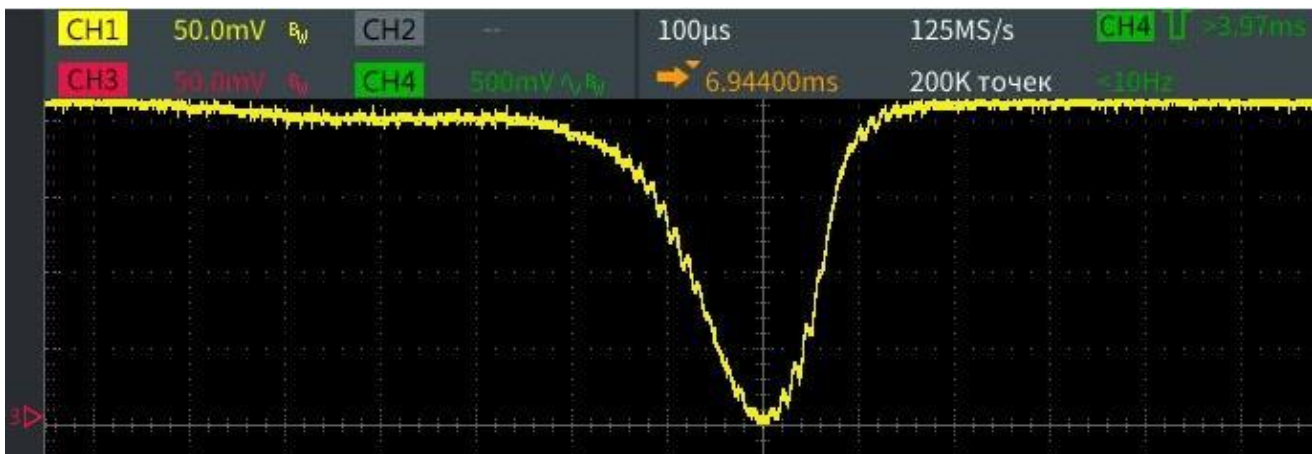


Рис. 5. Осциллограмма измерения профиля пучка.

Из осциллограммы: диаметр профиля на его полувысоте — 0.43 мм при токе 2.8 мА



Рис. 6. Электронное изображение области эмиссии электронов с катода.
а — прямонакальный катод без водяного охлаждения катодного узла, б — лазерный подогрев катода с водяным охлаждением катодного узла

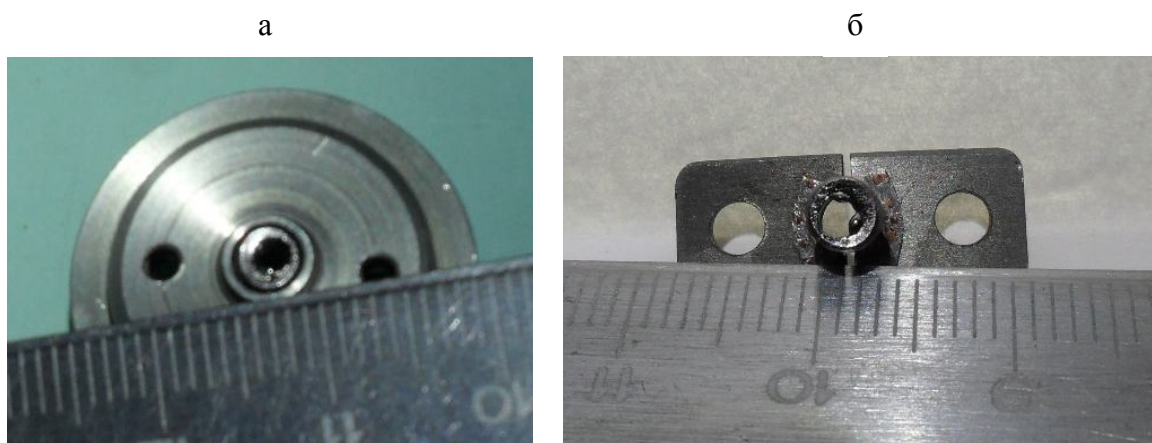


Рис. 7. Катоды, проплавленные лучом лазера (а, б).
а — катод, установленный в картридж

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерены основные параметры прототипа источника пучка электронов с лазерным подогревом катода электронной пушки:

- зависимости тока катода и времени подъема тока катода с уровня 0.1 до уровня 0.9 от мощности подогрева катода;
- размер профиля пучка на его полувысоте;
- размер области эмиссии электронов с катода.

Показано, что размер области эмиссии с катода близок к размеру пятна луча лазера на катоде.

ВЫВОДЫ

Прототип источника пучка электронов с лазерным подогревом катода электронной пушки обеспечивает ток до 200 мА.

1. Возможно управление током источника модуляцией мощности лазера подогрева, что существенно упрощает высоковольтную изоляцию, т. к. в конструкции электронной пушки нет электроники питания накала катода и управления током пучка, находящихся под полным ускоряющим напряжением пушки.

2. Применение охлаждения катодного узла деионизованной водой позволяет менять размер области эмиссии электронов с катода изменением размера пятна луча лазера на катоде.

Основные недостатки.

1. Значительное время подъема тока катода с уровня 0.1 до уровня 0.9, которое можно укоротить повышением мощности лазера в начале

импульса подогрева катода и предварительным дежурным подогревом катода.

2. Возможна механическая усталость материала катода из-за повторяющегося нагрева катода до высоких температур, что может сократить ресурс работы катода. Дежурный режим подогрева катода может уменьшить величину перепадов температуры катода, сглаживая эффект механической усталости.

ПРИЛОЖЕНИЕ



Общий вид прототипа

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент США № US 6,781,300 B1, 24.08.2004.
2. *Semenov Yu. I., Logatchev P. V. et al.* 60 keV 30 kW electron beam facility for electron beam technology // Proceedings of EPAC08. Genoa, Italy. TUPP161.

**Институт лазерной физики (ИЛФ СО РАН),
Новосибирск (Губин К.В.)**

Контакты: Семенов Юрий Игнатьевич,
Yu.I.Semenov@inp.nsk.su

**Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера (ИЯФ
СО РАН), Новосибирск (Алякринский О.Н., Косачев М.Ю., Купер Э.А., Логачев П.В., Медведев А.М., Овчар В.К., Репков В.В., Семенов Ю.И., Сизов М.М., Старостенко А.А., Федотов М.Г., Цыганов А.С.)**

**Новосибирский государственный университет
(НГУ), Новосибирск (Старостенко А.А., Федотов М.Г.)**

Материал поступил в редакцию 26.06.2018

PROTOTYPE OF SOURCE OF ELECTRON BEAM WITH LASER HEATING OF THE CATHODE

O. N. Alyackrinskiy¹, K. V. Gubin³, M. Yu. Kosachev¹, E. A. Kuper¹, P. V. Logatchov¹,
A. M. Medvedev¹, V. K. Ovchar¹, V. V. Repkov¹, Yu. I. Semenov¹, M. M. Sizov¹,
A. A. Starostenko^{1,2}, A. S. Tsygunov¹, M. G. Fedotov^{1,2}

¹*Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS),
Novosibirsk, Russia*

²*Novosibirsk State University (NSU), Novosibirsk, Russia*

³*Institute of Laser Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (ILPSB RAS), Novosibirsk, Russia*

A prototype of the electron beam source with laser cathode heating is presented. Application of the principle of its operation allows to control the current of the source electrons by modulating the power of the cathode heating laser. The power of the laser radiation is transmitted through a vacuum, which facilitates the electrical isolation of the laser from the cathode, which is under the high accelerating voltage of the gun. The main parameters of the prototype of the electron beam source with laser heating of the electron gun cathode are measured:

- the dependence of the cathode current and the rise time of the cathode current from the level 0.1 to the level of 0.9 on the cathode heating power;
- the size of the beam profile at its half-height;
- size of the electron emission region from the cathode.

Keywords: laser heating of the cathode, the size of the place of emission of electrons from the cathode, deionized water, cooling of cathode nodes, electrical insulation, cathode heating time, electronic image

REFERENCES

1. Patent USA no. US 6,781,300 B1, 24.08.2004.
2. Semenov Yu. I., Logatchev P.V. et al. 60 keV 30 kW

electron beam facility for electron beam technology. *Proceedings of EPAC08*, Genoa, Italy, TUPP161.

Contacts: *Semenov Yuriy Ignat'evich*,
Yu.I.Semenov@inp.nsk.su

Article received in edition 26.06.2018