

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Электронные пушки в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН и перспективы их оснащения фотокатадами с лазерными драйверами нано- и субпикосекундной длительности

Н.А. Винокуров, А.М. Барняков, В.Н. Волков, Е.И. Колобанов,
Г.И. Кузнецов, Г.Я. Куркин, А.Е. Левичев, П.В. Логачёв,
Д.А. Никифоров, В.М. Петров, Д.А. Старостенко, А.Г. Трибендис

Проблема создания сильноточных электронных пучков с относительно малыми поперечными размерами и разбросами скоростей разрабатывается в течение более 100 лет. Непрерывное улучшение параметров источников электромагнитного излучения ближнего ультрафиолетового диапазона (лазеров с умножителями частоты) позволяет существенно улучшить параметры электронных пушек. Обсуждаются некоторые проблемы создания электронных пушек с фотокатадами. Рассмотрены возможности применения лазерных фотокатодов в электронных пушках, разрабатываемых в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН.

Ключевые слова: электронная пушка, фотоинжектор, фотокадод, лазер

PACS numbers: 29.25.Bx, 41.75.Ht, 85.60.Na

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.03.038141>

Содержание

1. Введение (1116).
 2. Эмиттансы и яркость электронных пучков (1117).
 3. Некоторые электронные пушки Института ядерной физики СО РАН (1118).
 - 3.1. Электронные пушки ускорителя-рекуператора Новосибирского лазера на свободных электронах.
 - 3.2. Импульсная высоко-частотная пушка.
 - 3.3. Электронная пушка линейного индукционного ускорителя.
 4. Заключение (1120).
- Список литературы (1120).

Н.А. Винокуров, А.Е. Левичев. Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, просп. Академика Лаврентьева 11, 630090 Новосибирск, Российская Федерация;

Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова 1, 630090 Новосибирск, Российская Федерация
E-mail: vinokurov@inp.nsk.su

А.М. Барняков, В.Н. Волков, Е.И. Колобанов, Г.И. Кузнецов, Г.Я. Куркин, П.В. Логачёв, Д.А. Никифоров, В.М. Петров, Д.А. Старостенко. Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, просп. Академика Лаврентьева 11, 630090 Новосибирск, Российская Федерация

А.Г. Трибендис. Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, просп. Академика Лаврентьева 11, 630090 Новосибирск, Российская Федерация;
Новосибирский государственный технический университет, просп. К. Маркса 20, 630073 Новосибирск, Российская Федерация

Статья поступила 11 апреля 2017 г.

1. Введение

Создание коротких электронных сгустков — одна из самых старых задач ускорительной техники. Первым её решением стало изобретение триода — радиолампы с управляющей сеткой. Сгустки с меньшей длительностью получались в генераторах сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона — клистроне и его предшественниках. Задача стала ещё более актуальной, когда СВЧ-электромагнитные волны применили для ускорения электронов в линейных и циклических ускорителях. Несмотря на это, для создания субнаносекундных сгустков продолжали и продолжают использоваться катодно-сеточные узлы и клистронная группировка, основанная на модуляции энергии частиц, проходящих через ускоряющий зазор с переменным напряжением. Для полноты картины следует упомянуть редко используемое устройство с поперечной СВЧ-развёрткой электронного пучка и коллимационной щелью (по-английски — *chopper*, соответствующего термина в русском научном языке нет).

Применить фотоэффект для получения коротких электронных импульсов было невозможно до тех пор, пока не появились короткие световые импульсы, которых нет в природе. Практически интересная мощность излучения P значительна. Действительно, полагая квантовый выход $\eta = 0,1$, энергию фотонов $h\nu = 5$ эВ (ультрафиолетовое излучение) и ток $I = 1$ А, получим $P = I h\nu / (e\eta) = 50$ Вт. Лазеры с синхронизацией продольных мод позволили получать периодические субнаносекундные импульсы. Позднее были созданы титан-сапфировые лазеры и стали доступными мощные пико- и фемтосекундные импульсы. Параметры лазеров непре-

рывно улучшаются. Это открывает новые возможности для создания электронных пушек с фотокатодами. В частности, можно применять фотокатоды с низким квантовым выходом, которые работают в плохих вакуумных условиях реальных электронных пушек.

2. Эмиттансы и яркость электронных пучков

Напомним некоторые сведения о пучках заряженных частиц (см., например, [1, 2]). Для определённости мы будем рассматривать электроны. Электронным сгустком будем называть ансамбль электронов с относительно малыми разбросами по координатам и импульсам. Отклонения по координатам x, y, z от некоторой частицы, выбранной опорной, обычно много меньше характерных размеров системы (например, апертуры электроннооптического канала), а по импульсам — много меньше модуля импульса опорной частицы p_0 . Обычно направление импульса опорной частицы выбирают в качестве оси z , которую называют продольной координатой, а положение опорной частицы считают началом координат. Тогда x и y являются поперечными координатами, а малые отношения p_x/p_0 и p_y/p_0 примерно равны углам между проекциями траектории на плоскости xz и yz соответственно и осью z . В качестве переменной, описывающей продольное движение, удобно выбрать не сам продольный импульс p_z , а вычест из него p_0 . Малость координат частиц в фазовом пространстве позволяет в первом приближении представить движение частиц как линейное преобразование их координат. Тогда удобно характеризовать распределение частиц вторыми моментами, например квадратами среднеквадратичных размеров $\langle x^2 \rangle, \langle y^2 \rangle$ и $\langle z^2 \rangle$.

Если движение описывается уравнениями Гамильтона, то для любой пары частиц сохраняется так называемое кососкалярное произведение шестимерных векторов (\mathbf{r}, \mathbf{p}) — билинейная форма $\mathbf{p}_1 \mathbf{r}_2 - \mathbf{p}_2 \mathbf{r}_1$, т.е. сумма площадей параллелограммов в плоскостях $(x, p_x), (y, p_y)$ и $(z, p_z - p_0)$ с вершинами в начале координат и в точках, изображающих частицы. Матрицы линейных преобразований, сохраняющих кососкалярное произведение, называются симплектическими (ср. с ортогональными матрицами, описывающими преобразование вращения, сохраняющее обычные скалярные произведения). Определители симплектических матриц равны единице (теорема Лиувилля), поэтому сохраняется определитель матрицы вторых моментов. В простейших случаях независимых степеней свободы определитель матрицы вторых моментов равен произведению трёх определителей вида

$$\det \begin{pmatrix} \langle x^2 \rangle & \langle xp_x \rangle \\ \langle xp_x \rangle & \langle p_x^2 \rangle \end{pmatrix} = \langle x^2 \rangle \langle p_x^2 \rangle - \langle xp_x \rangle^2.$$

Величина, характеризующая площадь, занимаемую электронами на фазовой плоскости (x, p_x) ,

$$\varepsilon_x = \frac{1}{mc} \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle p_x^2 \rangle - \langle xp_x \rangle^2}, \quad (1)$$

где m — масса частицы, c — скорость света, называется нормализованным среднеквадратичным эмиттансом (степени свободы x). "Хороший" электронный пучок имеет малый эмиттанс.

Другая практически важная характеристика электронного пучка — его яркость B , которую можно опреде-

лить как нормированную плотность тока в четырёхмерном поперечном фазовом пространстве. Яркость может быть выражена через нормализованные среднеквадратичные эмиттансы как

$$B = \frac{I}{(2\pi)^2 \varepsilon_x \varepsilon_y}, \quad (2)$$

где I — ток пучка. Например, для плоского круглого катода с температурой T $\langle p_x^2 \rangle = \langle p_y^2 \rangle = mk_B T$ и

$$B = \frac{j}{\pi} \frac{mc^2}{k_B T}, \quad (3)$$

где k_B — постоянная Больцмана, $j = I / (4\pi \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle y^2 \rangle})$ — плотность тока катода.

При неограниченной эмиссии катода плотность тока ограничена тем, что поле, создаваемое электронами, уже покинувшими катод, тормозит вылетающие электроны. В статическом случае этот эффект описывается законом Чайлда–Ленгмюра. Для фотокатода, освещаемого пикосекундными импульсами, электронные сгустки имеют форму дисков с поверхностной плотностью заряда σ и создают на поверхности фотокатода тормозящее поле $4\pi\sigma$. Таким образом, первые электроны сгустка ускоряются некоторым полем E_0 , а последние — полем $E_0 - 4\pi\sigma$. Поэтому для получения достаточно малых эмиттансов, энергетического разброса и длины сгустка следует потребовать выполнения условия $\sigma \ll E_0 / (4\pi)$. Например, при $E_0 = 100 \text{ МВ м}^{-1}$ $\sigma \ll 1 \text{ нКл мм}^{-2}$. Это означает, что для получения заряда сгустка 1 нКл площадь освещаемого пятна должна существенно превышать 1 мм². Пусть, например, освещается круг радиусом $a = 2 \text{ мм}$. Тогда $\varepsilon_{x,y} > (\langle x^2 \rangle \langle p_x^2 \rangle)^{1/2} / (mc) = [k_B T / (mc^2)]^{1/2} a / 2$, что при комнатной температуре даёт величину $0,3 \times 10^{-6} \text{ м}$. Знак неравенства в этой оценке появился из-за того, что взаимное расталкивание электронов и абберации фокусировки приводят к возрастанию эмиттансов. Кроме того, разброс поперечных импульсов фотоэлектронов может превышать температурный.

Во многих случаях электронный пучок должен быть не непрерывным, а состоять из отдельных сгустков. Это, в частности, необходимо для ускорения частиц в высокочастотном поле. Поэтому необходимо быстро включать и выключать эмиссию электронов. Наиболее разработанный способ сделать это, используемый в радиолампах, — применение управляющей сетки. На сетку для прерывания тока с катода подаётся отрицательное (относительно катода) напряжение. Так можно получить сгустки длительностью порядка 1 нс и больше. Более короткие сгустки получаются с катодов, помещённых в высокочастотные (например, с частотой 3 ГГц) резонаторы. Электрическое поле вытягивает электроны с катода и ускоряет их в течение значительной доли периода изменения поля. Поэтому из резонатора выходят электроны с разными энергиями, зависящими от момента их выхода из катода. Если выделить электроны в относительно малом интервале энергий, то они могут образовывать сгустки длительностью менее 0,1 нс. Так как большая часть электронов при этом теряется, заряд такого сгустка обычно невелик (порядка 10 пКл). Для преодоления ограничений вышеназванных способов модуляции тока можно использовать фотоэффект. В частности, при освещении катода пико- и фемтосекундными

лазерными импульсами получают электронные сгустки соответствующей длительности. Мощность современных лазеров достаточна для получения значительных (порядка 1 нКл) зарядов сгустка даже при низком выходе электронов, например, просто за счёт облучения медной внутренней стенки высокочастотного резонатора.

3. Некоторые электронные пушки Института ядерной физики СО РАН

В этом разделе мы опишем некоторые электронные пушки, разработанные, изготовленные и используемые в Институте ядерной физики (ИЯФ) им. Г.И. Будкера СО РАН.

3.1. Электронные пушки ускорителя-рекуператора Новосибирского лазера на свободных электронах

В установке *Новосибирский лазер на свободных электронах* (ЛСЭ) [3] используется электростатическая пушка. Напряжение до 300 кВ подаётся на высоковольтный терминал от выпрямителя по кабелю. Источником электронов служит катодно-сеточный узел высокочастотной радиолампы ГС-34. На него подаётся постоянное запирающее напряжение и открывающие импульсы длительностью около 1 нс и амплитудой до 50 В. Частота следования импульсов может меняться от нуля до 22 МГц. Максимальный заряд сгустка 1,5 нКл. Сгустки, вышедшие из электронной пушки, ускоряются затем в резонаторах, работающих на частоте $f = 180$ МГц.

Длительность $\Delta t = 1$ нс слишком велика, так как приводит к относительному разбросу энергий $(\pi f \Delta t)^2 / 2$ около 20 %. Поэтому перед ускорением осуществляется

так называемая клистронная группировка электронов. Электроны, находящиеся в середине сгустка, проходят через зазор ускоряющего высокочастотного резонатора (его часто называют группировочным) в момент, когда ускоряющее электрическое поле равно нулю. При этом передние электроны, проходящие раньше, немного тормозятся, а задние — немного ускоряются. Проходя от группировочного резонатора до основной ускоряющей структуры, задние частицы догоняют передние, и сгустки укорачиваются до приемлемой длительности около 0,2 нс. Электронный инжектор Новосибирского ЛСЭ, состоящий из электростатической пушки, группировочного резонатора и пары ускоряющих резонаторов, показан на рис. 1.

Типичная величина измеренного нормализованного эмиттанса электронов — 20 мкм — на порядок больше соответствующего теплового эмиттанса, что объясняется неоднородностью электрического поля, вызванной наличием сетки и зарядом сгустка. Кроме того, при группировании в дрейфовом промежутке из-за разности энергий передних и задних частиц возникают хроматические aberrации, а короткий сгусток создаёт нелинейное дефокусирующее поле.

Средний ток электронов при обычном режиме работы порядка 10 мА. Для повышения среднего тока (а следовательно, мощности Новосибирского ЛСЭ) создана высокочастотная (ВЧ) электронная пушка [4] (рис. 2).

Катодно-сеточный узел, такой же как и в описанной выше электростатической пушке, установлен на задней стенке высокочастотного резонатора, возбуждаемого на частоте 90 МГц. Пушка находится на испытательном стенде. На ней достигнут средний ток более 100 мА при энергии электронов около 300 кВ.



Рис. 1. (В цвете онлайн.) Электронный инжектор. Слева направо: электронная пушка (синий бак), диагностический промежуток, группировочный резонатор, дрейфовый промежуток, в котором происходит группировка, и два ускоряющих резонатора.

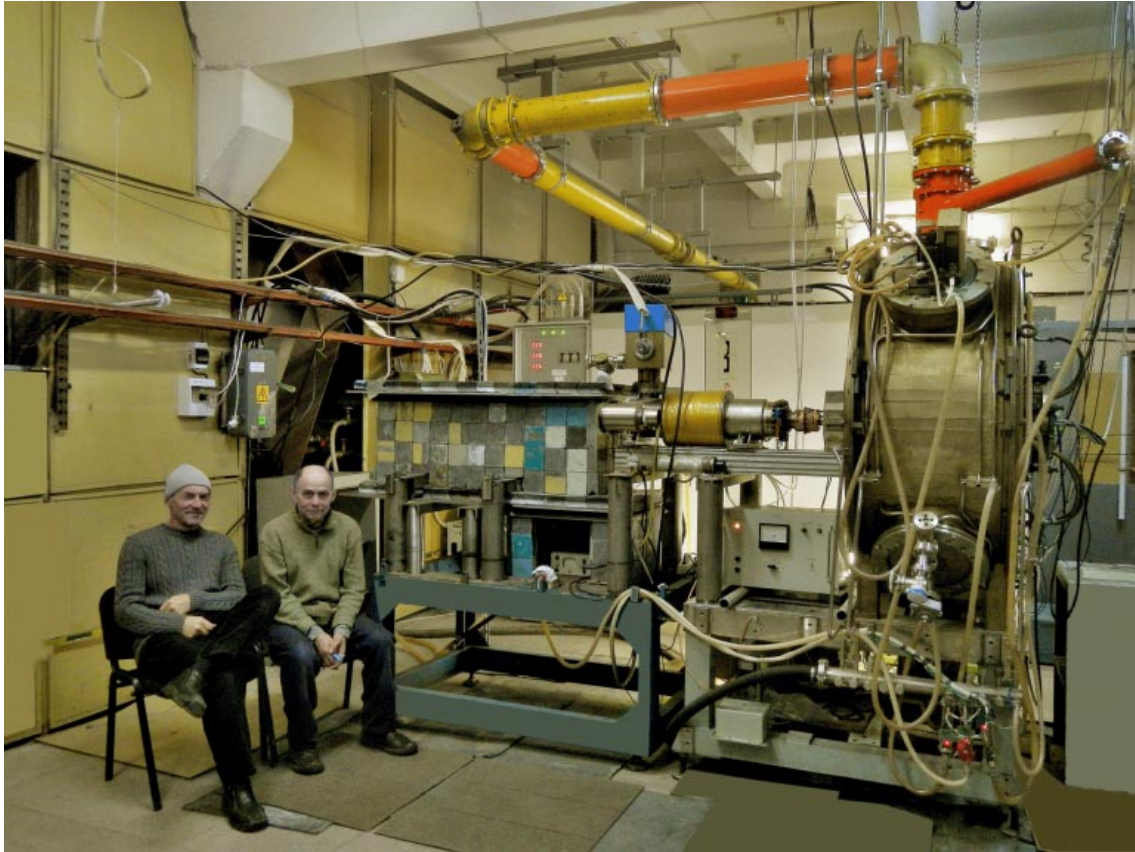


Рис. 2. В.Н. Волков, Е.И. Колобанов и высокочастотная электронная пушка (большой цилиндрический резонатор справа) на испытательном стенде.

Применение ультрафиолетового излучения в виде периодических импульсов длительностью около 1 нс, следующих с частотой порядка 10 МГц, позволило бы относительно быстро заменить катодно-сеточные узлы вышеописанных пушек фотокатодами, а затем сделать ВЧ-пушку, оптимизированную для работы с фотокатодом. Это может быть полезным не только для укорочения электронных сгустков и снижения их эмиттансов, но и для подавления так называемых гало — электронов с большими отклонениями координат и импульсов, которые теряются в процессе ускорения и увеличивают интенсивность ионизирующих излучений в зале ускорителя. Так как вакуумные условия в этих и, видимо, во всех других сравнительно сильноточных пушках довольно плохие, а эффективные фотокатоды работают только при сверхвысоком вакууме, можно попробовать использовать низкоэффективные фотокатоды. Например, при квантовой эффективности 3×10^{-5} (медь при длине волны излучения 253 нм [5]) для получения сгустков с зарядом 1,5 нКл требуются импульсы с энергией 0,2 мДж. Поскольку средняя мощность излучения при этом будет порядка нескольких киловатт, возможно применение тугоплавких материалов (вольфрам, графит и др.).

3.2. Импульсная высокочастотная пушка

На рисунке 3 показана импульсная высокочастотная пушка с рабочей частотой 3 ГГц. Так как поле вблизи катода в пушках такого типа достигает 100 МВ м^{-1} и электроны быстро ускоряются, именно в подобных пушках получены электронные сгустки с малым (несколько



Рис. 3. Импульсная высокочастотная пушка с коаксиальным вводом. На первом плане — выходное отверстие, слева и справа — прямоугольные фланцы для питающего волновода и вакуумного насоса, сзади — два высокочастотных резонатора. Фотокатодом служит задняя стенка дальнего резонатора.

десятых микрометра) нормализованным эмиттансом при довольно больших (до 1 нКл) зарядах [6].

Энергия электронов на выходе описываемой пушки около 3 МэВ. Предполагается использовать её для исследования кильватерного ускорения и создания уста-

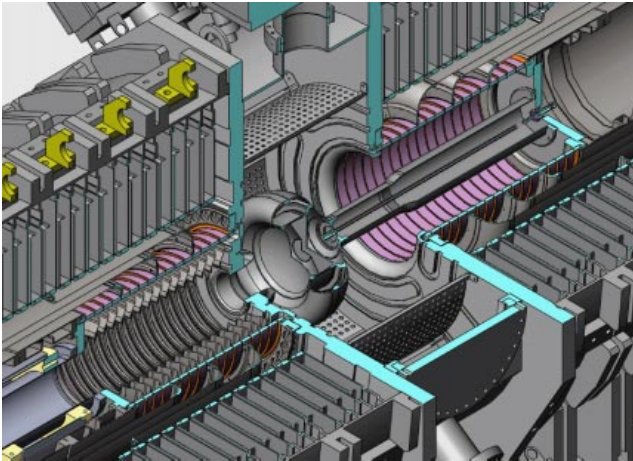


Рис. 4. Устройство катодного узла. Сферический катод закреплён на катодной ноге, проходящей через секционированный высоковольтный изолятор.

новки для электронной дифрактометрии быстропротекающих процессов. Для кильватерного ускорения необходимы большие (до 2 нКл) заряды сгустка, что требует импульсов ультрафиолетового излучения с энергией порядка 1 мДж и длительностью менее 10 пс. Для быстрой электронной дифрактометрии требуются субпикосекундные сгустки с зарядом до 10 пКл (заряд ограничен взаимным расталкиванием электронов), т.е. импульсы излучения с энергией около 2 мкДж.

3.3. Электронная пушка

линейного индукционного ускорителя

ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН разработал уникальный линейный индукционный ускоритель (ЛИУ) [7, 8] с малым (для тока 2 кА) нормализованным эмиттансом (5 мм). Длительность электронных импульсов порядка 100 нс. Устройство катодного узла показано на рис. 4. В нём использован металлопористый (диспенсерный) термокатод диаметром 190 мм.

Замена термокатада фотокатодом позволила бы уменьшить эмиттанс и модулировать ток пучка. Принимая снова квантовый выход равным 3×10^{-5} , получим, что для этого необходима мощность ультрафиолетового излучения 300 МВт, которая при длительности 100 нс соответствует энергии 30 Дж. Источником такого излучения может быть неодимовый лазер с преобразованием в четвёртую гармонику либо эксимерный лазер.

4. Заключение

На примере электронных пушек ускорителей ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН мы попытались показать перспективность применения фотокатодов. Современный уровень развития лазерной техники позволяет начать соответствующие разработки. Кроме того, за несколько лет, которые потребуются на создание соответствующих экспериментальных стендов, параметры лазеров значительно улучшатся. Результатом предлагаемых работ должно стать существенное улучшение имеющихся и проектируемых электронных ускорителей.

Работа выполнена при поддержке Российским научным фондом (проект № 14-50-00080).

Список литературы

1. Chao A W, Tigner M (Eds) *Handbook of Accelerator Physics and Engineering* (River Edge, NJ: World Scientific, 1999)
2. Wiedemann H *Particle Accelerator Physics* 3rd ed. (Berlin: Springer-Verlag, 2007)
3. Kulipanov G N et al. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **5** 798 (2015)
4. Волков В Н и др. *Письма в ЭЧАЯ* **13** 1244 (2016); Volkov V et al. *Phys. Part. Nucl. Lett.* **13** 796 (2016)
5. Akre R et al. *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **11** 030703 (2008)
6. Dowell D H et al. *ICFA Beam Dynamics Newslett.* (46) 162 (2008); <http://www-bd.fnal.gov/icfabd/Newsletter46.pdf>
7. Старостенко Д А и др. *Письма в ЭЧАЯ* **11** 1022 (2014); Starostenko D A et al. *Phys. Part. Nucl. Lett.* **11** 660 (2014)
8. Старостенко Д А и др. *Письма в ЭЧАЯ* **13** 1500 (2016); Starostenko D A et al. *Phys. Part. Nucl. Lett.* **13** 962 (2016)

Electron guns at the Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS: prospects for the use of photocathodes with nanosecond and subpicosecond laser drivers

N.A. Vinokurov^(1,2), A.M. Barnyakov⁽¹⁾, V.N. Volvo⁽¹⁾, E.I. Kolobanov⁽¹⁾, G.I. Kuznetsov⁽¹⁾, G.Ya. Kurkin⁽¹⁾, A.E. Levichev^(1,2), P.V. Logachev⁽¹⁾, D.A. Nikiforov⁽¹⁾, V.M. Petrov⁽¹⁾, D.A. Starostenko⁽¹⁾, A.G. Tribendis^(1,3)

⁽¹⁾ Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk, Russian Federation

⁽²⁾ Novosibirsk State University, ul. Pirogova 1, 630090 Novosibirsk, Russian Federation

⁽³⁾ Novosibirsk State Technical University, prosp. K. Marksa 20, 630073 Novosibirsk, Russian Federation

E-mail: ^(1,2)vinokurov@inp.nsk.su

The problem of producing high-current electron beams with relatively small transverse sizes and small velocity spread is more than a hundred years old. The continuous improvement of near ultraviolet electromagnetic radiation sources (lasers with harmonics generators) allows improving the parameters of existing electron guns. This paper discusses some problems in the development of electron guns with photocathodes and considers possible ways of using laser photocathodes in the electron guns at the Budker INP SB RAS.

Keywords: electron gun, photoinjector, photocathode, laser

PACS numbers: 29.25.Bx, 41.75.Ht, 85.60.Ha

Bibliography — 8 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **187** (10) 1116–1120 (2017)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.03.038141>

Received 11 April 2017

Physics – Uspekhi **60** (10) (2017)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.03.038141>