

УДК 537.5

## Современные генераторы пучков электронов для технологических применений (обзор)

А. И. Головин, А. И. Шлойдо

*В обзоре представлено современное состояние генераторов пучков электронов для технологических применений. Представлены как импульсные, так и стационарные генераторы, работающие на различных физических принципах. Обзор предназначен для специалистов, чьей основной специальностью не являются пучки электронов, однако пучки могут быть полезны для реализации тех или иных технологических процессов. Основная цель обзора — представление современной литературы по генерации пучков электронов и их применению для реализации различных технологических процессов.*

PACS: 41.75Fr

*Ключевые слова:* пучок электронов, вывод пучка, убегающие электроны.

### Введение

Практическое применение пучков электронов включает в себя пучковую накачку газовых лазеров [1—4], пучково-плазменное напыление и другие технологические процессы [5, 6], светотехнику [7, 8], квантовую и микроэлектронику [9]. При этом протекающие в вакууме технологические процессы, как правило, происходят в форвакуумной области давлений.

При формировании пучков электронов в глубоком вакууме (при остаточном давлении порядка  $10^{-3}$  Па) проблему вывода пучка в газовую среду решают, обычно, при помощи громоздких систем дифференциальной откачки или фольговых окон, которые рассмотрены, например, в работах [10] и [11] соответственно.

В связи с этим является актуальным создание устройств генерации электронного пучка непосредственно в газовой среде с относительно высоким давлением. Наиболее распространённый прибор такого типа — электронная пушка с высоковольтным тлеющим разрядом (ВТР-пушка) [6]. Однако рабочее давление в ВТР-пушках как правило не превышает 1—10 Па, что во многих случаях недостаточно.

Для увеличения рабочего давления логичным шагом является уменьшение размеров устройства, обеспечивающее сохранение произведения давления на зазор между катодом и анодом, хотя применимость критерия подобия газовых разрядов в данном случае не очевидна. При размерах порядка миллиметров, реализация электронно-оптических систем для формирования пучка, как это делается в ВТР-пушках, становится практически невозможной. В результате, устройство для генерации пучка электронов упрощается до плоского катода и анода с одним или многими отверстиями (в последнем случае обычно используют сетчатый анод).

Одной из первых работ в данном направлении является [2], авторы которой предположили, что в эмиссию электронов с катода определяющий вклад вносит фотоэффект от излучения плазмы, и это принципиально отличает такой разряд от тлеющего, где эмиссия вызвана бомбардировкой катода ионами и нейтралами. В дальнейшем были выдвинуты аргументы против подобной фотоэмиссионной природы разряда [12]. Следует отметить, что используемый авторами многих работ термин «открытый разряд» представляется весьма удачным независимо от преобладающего механизма эмиссии электронов, поскольку эмиссия электронов с катода осуществляется в результате его бомбардировки частицами, поступающими извне разрядного промежутка.

Цель данного обзора — дать представление о современных методах формирования импульсных и стационарных пучков электронов и областях их практического применения для технических специалистов, которым могут быть полезны те или

Головин Андрей Иванович, начальник отдела.  
Шлойдо Андрей Игоревич, ведущий инженер.  
ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша».  
Россия, 125438, Москва, Онежская ул., 8.  
Тел. 8 (495) 456-64-13. E-mail: aigolovin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2016 г.

© Головин А. И., Шлойдо А. И., 2016

иные варианты пучков в решении технологических задач, но для которых пучки электронов не являются основной областью деятельности.

### **Формирование пучков электронов в вакууме**

В высоковакуумных электронных пушках пучки электронов формируются при давлении не выше  $10^{-3}$  Па [13]. Наибольшее распространение получили термоэмиссионные катоды из различных материалов (вольфрам, гексаборид лантана, различные типы оксидных катодов). Эмиссия электронов зависит от материала и температуры катода и описывается формулой Ричардсона [14]. Однако если эмиссия достаточно велика, вблизи катода образуется облако свободных электронов, экранирующее катод, и ток пучка определяется свойствами электронно-оптической системы электронной пушки. При этом пушка работает в первичном режиме и выполнен «закон трех вторых» — ток пучка пропорционален напряженности поля вблизи катода в степени  $3/2$ . В случае диодных пушек это означает, что ток пропорционален приложенному напряжению в степени  $3/2$ , в случае наличия управляющего электрода — напряжению между управляющим электродом и катодом.

Следует отметить, что помимо термоэмиссионных катодов в последнее время все большее распространение получают автоэмиссионные катоды [15].

Электронно-оптические системы электронных пушек весьма разнообразны, так как в различных задачах требуется формирование электронных пучков с различными характеристиками. В классической пушке Пирса вблизи катода размещается фокусирующий электрод. Для получения требуемых характеристик пучка ускоряющую систему электронной пушки могут формировать из нескольких ускоряющих электродов. Кроме того, для управления током пучка пушка может содержать управляющий электрод. Поскольку на движение электронов пучка существенное влияние оказывает множество различных эффектов, включая воздействие собственных электрического и магнитного полей и фокусирующее действие обратного потока ионов, электронно-оптические системы рассчитаны на формирование требуемого пучка лишь в некотором диапазоне параметров (напряжение, ток, давление остаточного газа). Как следствие, электронно-оптические системы различаются для стационарных пучков и импульсных.

При формировании пучков электронов магнитные поля нередко используются для фокусировки, сопровождения пучка в системах диффе-

ренциальной откачки [16], равномерного распределения пучка по площади выводной фольги, сканирования пучком какой-либо поверхности [17].

Важной проблемой при реализации вневакуумных электронно-лучевых технологий является вывод пучка электронов в газовую среду.

### **Вывод пучков в газ при помощи систем дифференциальной откачки**

В системе дифференциальной откачки пучок электронов проходит через сквозные отверстия в стенках нескольких шлюзовых камер, при этом натекающий в камеры газ непрерывно откачивается вакуумными насосами. Естественно, чем меньше диаметр отверстий, через которые проходит пучок, тем меньше натекание газа и требования к производительности откачки. Поэтому при таком способе вывода пучка, как правило, применяют магнитную фокусировку и магнитное сопровождение для получения минимально возможных отверстий. Нередко самим пучком прожигают отверстия в выходных окнах и даже длинные каналы [18].

Различные методы уменьшения натекания газа рассмотрены в обзоре [10]. При реализации систем вывода пучка через шлюзовые камеры необходимо обеспечить достаточно высокую производительность вакуумных насосов. Создание подобных установок невозможно без использования форвакуумных насосов с высокой производительностью, которые даже в случае вывода пучка в разреженную среду необходимы для поддержания требуемого давления на выхлопе турбомолекулярных или бустерных насосов. Масса требуемых форвакуумных насосов составляет сотни килограмм, а их работа сопровождается вибрацией [19], что приводит к необходимости организации достаточно прочного фундамента. Кроме того, энергопотребление насосов составляет от единиц до десятков киловатт, и это для слабых пучков может существенно снизить энергетическую эффективность системы в целом. Возможно, существенный прогресс может быть достигнут при использовании конденсационных насосов [20].

### **Вывод пучков в газ через фольговые окна**

При выводе пучка через фольговое окно вакуумная полость ускорителя электронов и рабочий газ разделены тонкой фольгой, в той или иной степени прозрачной для электронов. Часть энергии пучка электронов теряется в фольге и нагревает ее. Потери энергии увеличиваются с увеличени-

ем толщины фольги, увеличением атомного номера материала фольги, уменьшением ускоряющего напряжения. Как правило, в качестве материала фольги используют алюминий, бериллий и титан. Реже используют полимерные пленки, например, из майлара [21]. При выводе пучка в газ атмосферного давления типичной является фольга из сплава 50 % алюминия и 50 % бериллия толщиной 40—50 мкм. При ускоряющем напряжении 220 кВ потери мощности пучка в фольге составляют около 15 % и максимальная допустимая мощность пучка не превышает 1,5 кВт. Максимальная рабочая температура такой фольги — 300 °С, максимальный перепад давления — 1,5 атм. Похожие результаты достигаются при использовании фольги из титана толщиной 20 мкм, но рабочая температура в этом случае уже может достигать 700 °С.

Толщина фольги определяется требованиями прочности, т.е. геометрическими размерами выводного окна и давлением газа, в который выводится пучок. При уменьшении давления газа толщину фольги можно уменьшать, что приведет к уменьшению потерь энергии электронов в фольге и уменьшению ее нагрева. Однако уменьшение толщины приведет к уменьшению теплоотвода через фольгу.

При значительном тепловыделении в фольге применяются различные методы ее охлаждения, например, за счет продува газа [11]. На практике вывод пучков через фольговые окна применяется для электронов с энергиями в сотни и тысячи килоэлектронвольт [21].

Для пучков с энергией в десятки килоэлектронвольт в [22] предложена мембрана из нитрида кремния толщиной 300 нм. При энергии электронов около 10 кэВ потери не превышали 10 %. Для обеспечения механической прочности мембраны размер выводного окна был уменьшен до 0,7×40 мм, что позволило обеспечить перепад давления до 2 атм. Однако широкого распространения такие мембраны пока не получили.

### Устройства с катодной плазмой

Широкое практическое применение нашли устройства с плазменными эмиттерами электронов [6]. В таких устройствах реализуется вспомогательный разряд, являющийся источником электронов. Разряд ограничен эмиттерным электродом с одним или несколькими отверстиями, через которые электроны попадают в область электростатического ускорения и фокусировки. Как правило, используют тлеющий или дуговой разряд.

Обычно эффективность генерации пучков электронов в устройствах такого типа составляет

50—70 %, а рабочее давление — несколько десятков Па, что в некоторых случаях позволяет реализовывать технологические процессы без вывода пучка в более плотный газ [23].

Несомненным достоинством плазменных эмиттеров электронов является их надежность и долговечность. В то же время увеличение рабочего давления свыше ~100 Па в этих системах затруднено развитием высоковольтного тлеющего разряда [24].

### Устройства с анодной плазмой

Образующаяся вблизи анода плазма является источником ионов, движущихся в сторону катода. Даже при использовании термоэмиссионных катодов поток ионов из прианодной плазмы может оказывать определяющее влияние на характеристики создаваемого пучка как за счет эффекта фокусировки, так и за счет формирования «плазменного анода», искажающего распределение электрического поля вблизи катода.

Большой практический интерес представляют электронные пушки с высоковольтным тлеющим разрядом (ВТР) [6]. В таких устройствах поток ионов из прианодной плазмы бомбардирует холодный катод, вызывая эмиссию электронов. Электроны, в свою очередь, ускоряются электронно-оптической системой. В случае самостоятельного разряда анодная плазма создается за счет ионизации газа ускоренными электронами, а в случае несамостоятельного — вблизи анода зажигают вспомогательный разряд, обеспечивающий необходимое количество ионов.

Необходимо отметить, что и в случае самостоятельного разряда анодные системы ВТР-пушек обычно проектируются таким образом, чтобы обеспечить диффузию достаточного количества ионов в ускоряющий промежуток из специально формируемой эквипотенциальной полости, поэтому зачастую состоят из нескольких электродов или используют цилиндрический анод. В отдельных случаях для увеличения концентрации электронов в прианодной области специально создают условия для возникновения пучково-плазменного разряда, увеличивающего температуру свободных электронов плазмы и, как следствие, степень ионизации.

Достоинством несамостоятельного разряда является возможность контролировать параметры высоковольтного разряда за счет управления вспомогательным. Однако и в случае самостоятельного разряда нередко используют дополнительные управляющие электроды [25].

По сравнению с устройствами с катодной плазмой, ВТР-пушки конструктивно проще, так

как отсутствует необходимость зажигания вспомогательного разряда под потенциалом катода, однако эмиссия электронов с холодного катода под воздействием ионной бомбардировки из прианодной плазмы приводит к существенной эрозии катода и снижению его ресурса. Максимальное рабочее давление в ВТР-пушках в несколько раз выше, чем в системах с плазменным эмиттером, а КПД может превышать 80 %.

### Импульсный открытый разряд

Увеличение рабочего давления ВТР-пушек требует уменьшения габаритов устройств для соблюдения критерия подобия газового разряда и, вместе с тем, приводит к значительному увеличению потока бомбардирующих катод ионов. В результате отпадает необходимость в специальных мерах по поддержанию достаточно плотной прианодной плазмы, а электронно-оптическая система упрощается до плоского катода и плоского сетчатого анода (включая предельный случай «сетки» с единичным отверстием). Поскольку функционирование устройства обеспечивается за счет бомбардировки катода потоком частиц извне разрядного промежутка, уместным представляется использованный в [2] термин «открытый разряд».

Такой тип разряда разрабатывался и успешно применяется для накачки газовых лазеров на парах металлов [26, 27], инертных газах [28], молекулярных азоте и фторе [29]. Так как рассматривавшиеся лазеры работают в импульсном режиме, их накачка пучком электронов также осуществлялась импульсами. Поэтому большинство работ по исследованию открытого разряда направлено на изучение импульсных разрядов в инертных газах, даже когда авторами не ставилась цель непосредственно разработки лазера, а изучался лишь источник накачки. Так, например, в работе [8] изучалась эффективность генерации пучков электронов в гелии, а в работе [30] — возможность получения пучков электронов при большой площади катода ( $1100 \text{ см}^2$ ) в неоне.

Основным отличием импульсного разряда от непрерывного является отсутствие сформированной области катодного падения потенциала (КПП). Поэтому распределение электрического поля в разряде в начале импульса описывается уравнениями электростатики для катода и анода без учета разряда; пример расчета электрического поля приведен в [31]. Затем движущиеся к катоду ионы экранируют его и формируют область КПП. В работе [32] обобщены результаты исследований импульсного открытого разряда, рассмотрены критерии подобия, приведены основные законо-

мерности. В частности, показано, что после формирования КПП электрическое поле определяется потоком ионов и слабо зависит характеристик анода. Поэтому пространственное распределение параметров импульсного разряда в начальный момент времени существенно отличается от распределения параметров в стационарном разряде и, по мере формирования КПП, стремится к нему.

Длительность формирования КПП оценена в [32] в сотни наносекунд, тогда как типичная длительность импульсов открытого разряда при накачке лазеров составляет от 10 нс до  $\sim 1$  мкс. Таким образом, лишь при максимальной продолжительности импульсов параметры разряда могут приблизиться к стационарным. При этом следует иметь в виду, что у импульсных источников высоковольтного питания со столь малой продолжительностью импульса выходное напряжение в той или иной степени меняется во время импульса.

Типичные напряжения импульсного открытого разряда составляют от 1,5 до 20 кВ, однако в некоторых работах достигались и более высокие значения [33]. Рабочее давление в гелии может превышать 13 кПа. Например, в работе [34] рабочее давление составляло около 16 кПа. Плотность тока разряда достигает десятков  $\text{А/см}^2$ .

Помимо накачки лазеров, импульсный открытый разряд нашел и другие применения. Например, в работе [33] открытый разряд использовался как источник тормозного рентгеновского излучения для предьонизации рабочей среды  $\text{CO}_2$ -лазера. В работе [35] предложено несколько вариантов конструкции «кивотрона» — высоковольтного коммутатора на основе открытого разряда. Продемонстрирована коммутация токов в десятки килоампер при напряжении до 20 кВ с временем коммутации менее 400 пс и частотой до 100 кГц. В работе [36] достигнуто время коммутации около 80 пс.

### Стационарный открытый разряд

Возможность работы устройств с открытым разрядом в непрерывном режиме была отмечена еще в [2]. Однако до настоящего времени количество публикаций по стационарному открытому разряду намного меньше количества публикаций по разряду импульсному. Этому можно дать два объяснения.

Во-первых, во многих случаях технологического применения пучков электронов достаточно импульсно-периодического воздействия. В первую очередь, это относится к термической обработке материалов, так как скорости тепловых процессов намного меньше периода повторения импульсов.

Аналогично и в светотехнике [7], где даже без учета послесвечения люминофора, при достаточно высокой частоте повторения импульсов мерцание источника света будет незаметным.

Во-вторых, работа в импульсном режиме является более стабильной, чем в непрерывном. Связано это с тем, что характерное время развития неустойчивостей определяется скоростью движения ионов и размерами устройства и по порядку величины совпадает со скоростью формирования КПП. При достаточно короткой продолжительности импульсов не успевают развиваться неустойчивости, паразитные разряды и т. п. Именно по этой причине в работе [7] при низких напряжениях использовали непрерывный режим возбуждения люминофора в широкоапертурном источнике света, а при повышенных — импульсно-периодический.

В то же время импульсные источники высоковольтного питания с длительностью импульсов в сотни, а тем более, в десятки наносекунд конструктивно сложнее, чем источники, работающие в непрерывном режиме. Паразитные емкости и индуктивности не позволяют использовать длинные кабели для передачи импульсного напряжения. Поэтому в тех случаях, когда источник питания не может быть размещен в непосредственной близости от катода, использование импульсного режима может стать невозможным.

В случае использования пучков электронов для создания плазмы, которая должна существовать непрерывно, использование импульсно-периодического режима затрудняется тем, что следующий импульс пучка должен быть сгенерирован до полного распада плазмы, т.е. потребуется высокая частота повторения импульсов. При этом плазма останется и в разрядном промежутке, что может создать условия для развития неустойчивостей.

Следует отметить некоторые работы, посвященные исследованию свойств стационарного открытого разряда. В работе [8] исследовалась эффективность генерации пучков электронов в импульсном и непрерывном режимах работы. Показано, что доля тока пучка, достигающего коллектора, может превышать 98 % от суммы токов, текущих на коллектор и анод.

В работе [37] выполнены экспериментальные исследования разряда в гелии при давлении до ~9 кПа с измерением пространственного распределения интенсивности свечения пяти спектральных линий атома гелия и двух линий иона  $He^+$ . Проводилось численное моделирование разряда методом Монте-Карло, показавшее хорошее совпадение с результатами измерений.

В работе [38] исследовался стационарный открытый разряд, включая исследования структуры катода после эрозии в результате ионной бомбардировки. Вольтамперные характеристики стационарного разряда исследовались в [39] и [40].

Стационарный открытый разряд нашел ряд практических применений. Например, в работе [41] такой разряд использовался для травления образцов из диоксида кремния. В работе [42] осуществлялось напыление оксидных пленок при распылении мишеней из сигнетоэлектрических и металлических материалов.

### Отличия открытого разряда и ВТР-пушек

В высоковольтном тлеющем разряде основным механизмом эмиссии электронов с катода является электронная эмиссия под воздействием бомбардировки катода ионами и образующимися в результате перезарядки быстрыми молекулами [6], влияние других механизмов считается пренебрежимо малым. Тем не менее, в работе [2] было высказано предположение, что в условиях открытого разряда основной механизм эмиссии — фотоэмиссия с катода в результате его подсветки из области дрейфа электронов. Это предположение позволило авторам говорить о принципиально новом типе разряда, существенно отличающемся от тлеющего.

Позднее один из авторов работы [2] выдвинул серьезные аргументы против преобладания фотоэмиссии. В частности, в [12] для типичных условий открытого разряда выполнены энергетические оценки, показавшие, что потери энергии электронами на возбуждение и ионизацию атомов в области дрейфа недостаточно велики и не могут обеспечить самоподдержания разряда, если считать, что фотоэмиссия является единственным источником электронов.

Необходимо отметить, что в работах, обосновывающих определяющее влияние фотоэмиссии, например, [8] и [43], в качестве основного аргумента в пользу фотоэмиссионной природы разряда называется высокая эффективность генерации пучков электронов, которая, по мнению авторов, не может быть достигнута в аномальном тлеющем разряде. При этом цельная математическая модель процессов в разряде, которая позволила бы выполнить расчеты характеристик разряда и сравнить их с экспериментами, в таких работах отсутствует. В работе [44], например, в разделе 1 помимо высокой эффективности фотоэмиссионная природа разряда обосновывается его стабильным равномерным горением при использовании катода большой площади. Однако в разделе 2 при описа-

нии созданной авторами расчетной модели для моделирования разряда методом Монте-Карло приводятся лишь данные по использованным коэффициентам ион-электронной эмиссии и подвижности ионов, тогда как фотоэмиссия не упомянута вовсе.

В работе [45] была предпринята попытка подтвердить фотоэмиссионный механизм разряда при помощи дополнительной подсветки катода, реализованной при помощи вспомогательного тлеющего разряда. Однако в [46] справедливо отмечено, что вспомогательный разряд являлся также источником дополнительных ионов.

Хотя сторонники фотоэмиссионной природы открытого разряда продолжают отстаивать свою точку зрения вплоть до настоящего времени [36], в работе [47] отмечено, что фотоэффект может играть определяющую роль только для больших катодов, характерный размер которых много больше размера катодного слоя. При этом необходимо признать, что для обоснования фотоэмиссионной природы разряда ими выполнен значительный объем работ по измерению коэффициентов эмиссии (как фотоэмиссии, так и ион-электронной и атом-электронной) для реальных условий разряда [47, 48]. Действительно, как отмечено в [49], коэффициенты эмиссии, измеренные в техническом и сверхвысоком вакууме могут различаться на «один-два порядка величины». В условиях же газового разряда происходит интенсивная бомбардировка поверхности катода с имплантацией атомов рабочего газа и соответствующей модификацией поверхности с изменением коэффициентов эмиссии.

Если основным механизмом эмиссии считать фотоэффект, то открытый разряд следует признать принципиально новым типом разряда, не имеющим ничего общего с ВТР-пушками. Однако если принять точку зрения противников фотоэмиссионной природы разряда, то открытый разряд следует считать разновидностью высоковольтного тлеющего разряда, т.е. генераторы пучков убегающих электронов с открытым разрядом можно считать разновидностью ВТР-пушек. Однако и в этом случае существует ряд серьезных отличий как в конструкции устройств, так и в происходящих в них физических процессах.

Прежде всего, необходимо подчеркнуть, что в устройствах с открытым разрядом достаточный поток бомбардирующих катод быстрых частиц обеспечивается непосредственно в катодном слое поэтому в отличие от ВТР-пушек, для обеспечения самостоятельности разряда нет необходимости предпринимать какие-либо специальные меры по организации прианодной плазмы, являющейся источником ионов в ВТР-пушках.

Другим немаловажным отличием является то, что электроны в ВТР-пушках ускоряются в промежутке между катодом и анодом, тогда как в открытом разряде ускорение электронов происходит в области катодного падения потенциала, которая в большинстве случаев больше расстояния между катодом и анодом, другими словами, происходит «провисание» электрического поля за анод [32, 38].

Кроме того, в ускорительном промежутке ВТР-пушек электроны практически не взаимодействуют с газовой средой, тогда как в открытом разряде взаимодействие электронов с газом достаточно велико для бомбардировки катода ионами ионизации газа в катодном слое. При этом в открытом разряде реализуется режим убегания или «просвиста» электронов, тогда как в ВТР-пушках режим ускорения близок к высоковакуумным пушкам.

Наконец, в открытом разряде промежутки между катодом и анодом столь мал (от десятых долей до нескольких миллиметров), что формирование какой-либо электронной оптики становится практически невозможным, тогда как в ВТР-пушках часто реализуют фокусирующие пучок системы, включая классическую геометрию Пирса [6]. Открытый же разряд, как правило, реализуется в простейшей плоской геометрии, хотя известны устройства с цилиндрической и даже сферической геометрией [50]. Более того, в устройствах с открытым разрядом характерные размеры катода обычно существенно превышают зазор между катодом и анодом, что нетипично для ВТР-пушек.

Разумеется, перечисленные отличия являются следствием увеличения рабочего давления и в этом смысле открытый разряд является эволюцией ВТР-пушек. Однако данные отличия позволяют выделить устройства с открытым разрядом в отдельный класс. Из-за близости открытого разряда к ВТР-пушкам различные авторы используют разную терминологию. Например, в работе [51], в соответствии с предложенными выше критериями, электронную пушку ЭПП-6 следует отнести к устройствам с открытым разрядом, а пушку ЭПП-14 — к ВТР-пушкам из-за наличия дополнительных ускоряющих электродов, хотя для обоих устройств автор использует термин «электронная газоразрядная пушка». Дополнительный ускоряющий электрод использован также в работе [29]. Стоит отметить, что в работах [52] и [53] автор работы [51] использует термин «низковакуумная газоразрядная электронная пушка» для, фактически, тех же устройств, что и пушка с открытым разрядом ЭПП-6 в [51].

В работах [38] и [41] используется термин «газовый разряд высоковольтного типа», хотя ре-

лизирующее его устройство почти идентично пушке ЭПП-6 работы [51] и его, безусловно, можно отнести к устройствам с открытым разрядом. По признаку перехода эмитируемых катодом электронов в режим убегания и ускорению электронов с области катодного падения потенциала к открытому разряду следует также отнести устройства, в которых отсутствовал близко расположенный к катоду анод, например, в работах [4] и [54].

### Барьерный открытый разряд

Дальнейшему увеличению рабочего давления устройств с открытым разрядом препятствует возникновение неустойчивостей и переход разряда в дуговую форму. Связано это, вероятно, с ростом плотности тока разряда и увеличением тепловой нагрузки на катод. При этом даже незначительные флуктуации плотности тока, вызванные как процессами на катоде, так и процессами в газоразрядной плазме, могут приводить к локальному росту температуры катода и увеличению термоэмиссии с последующим переходом разряда в дуговой.

Для решения этой проблемы в работе [55] предложено использовать катод из диэлектрического материала (керамики). Реализована коаксиальная геометрия, разряд зажигался внутри керамической трубки. Сетчатый анод располагался на расстоянии 1,5 мм от керамики. Разумеется, разряд с керамическим катодом может быть реализован только в импульсном режиме, так как в момент генерации пучка на поверхности катода накапливается положительный заряд, для нейтрализации которого требуется существенно большее время, чем в случае катода с высокой проводимостью. При длительности импульсов в десятки наносекунд достигнуты частоты повторения в десятки килогерц в зависимости от прикладываемого напряжения. Генерация пучков убегающих электронов достигалась при давлениях до атмосферного в гелии с небольшой примесью ксенона. Напряжение между катодом и анодом достигало ~10 кВ.

Аналогичные результаты получены в работе [56], однако здесь реализована плоская геометрия, а анодная сетка располагалась непосредственно на диэлектрике.

### Газонаполненные диоды

Другим методом генерации пучков электронов в газе атмосферного давления является использование газонаполненных диодов с разрядом наносекундной длительности [57]. Как правило, разряд зажигается между близко расположенными взрывоэмиссионным катодом и плоским анодом

при высокой напряженности поля, обеспечивающей переход электронов в режим убегания. Если передний фронт питающего напряжения короче времени формирования разряда до замыкания катода и анода разрядной плазмой, то формируется пучок убегающих электронов, состоящий как из эмитированных катодом электронов, так и ускоренных вторичных электронов, образовавшихся в результате ионизации газа.

Размеры разрядного промежутка составляют, как правило, 1—2 см. Типичные напряжения составляют сотни киловольт [58], однако исследовались и приборы с рабочим напряжением в десятки киловольт [59]. Типичная длительность пучка убегающих электронов составляет от десятков до сотен пикосекунд. В работе [60] для конкретного варианта газонаполненного диода расчетным путем показано существование двух режимов генерации пучка убегающих электронов — длительностью 10—15 пс и длительностью более 100 пс в зависимости от эмиссионной способности катода.

В качестве катода, как правило, используют тонкостенные металлические трубки. Например, в [58] использовалась трубка диаметром 6 мм, изготовленная из стальной фольги толщиной 50 мкм. Однако используются и другие катоды. В той же работе исследовался другой катод — графитовый стержень диаметром 6 мм с закругленными краями. Плоские аноды изготавливают либо из тонкой металлической фольги, либо из сеток.

В работе [61] плоский катод размещался внутри диэлектрической трубки, выступавшей над катодом на некоторое расстояние, меньшее расстояния до анода. По мнению авторов, ограничение прикатодного пространства диэлектрической трубкой обеспечивало формирование внутри трубки плазменного катода, с которого и осуществлялась эмиссия электронов. Это привело к стабилизации разряда и увеличению тока пучка убегающих электронов.

Существенным недостатком газонаполненных диодов являются жесткие требования к переднему фронту импульсов высокого напряжения. Для исключения влияния паразитных емкостей и индуктивностей катод диода монтируют непосредственно на высоковольтном выводе источника питания, что ограничивает возможности конструктивной реализации.

Детальный обзор импульсных генераторов пучков убегающих электронов, включая как газонаполненные диоды, так и открытые разряды, приведен в [62].

### Заключение

В работе перечислены основные современные методы генерации пучков электронов в газах на-

чина с форвакуумной области давлений и заканчивая атмосферным давлением. В обзоре отсутствуют редко используемые методы генерации пучков электронов и методы, являющиеся вариантами перечисленных, как, например, использование взрывоэмиссионных и плазменных катодов в вакуумных диодах. Представленная в обзоре информация должна быть достаточна для обоснованного выбора того или иного способа получения пучков электронов специалистами в смежных областях с привлечением приведенной в обзоре литературы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов И. Г., Латуш Е. Л., Сэм М. Ф. Ионные лазеры на парах металлов. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Бохан П. А., Сорокин А. Р. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 1. С. 88.
3. Азаров А. В., Митько С. В., Очкин В. Н. // Патент РФ № 2172573, 2000.
4. Rocca J. J., Meyer J. D., Farell M. R., Collins G. J. // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 56. No. 3. P. 790.
5. Holliday J. H. // Electrical Rev. 1970. Vol. 187. No. 25. P. 875.
6. Завьялов М. А., Крейнделъ Ю. Е., Новиков А. А. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
7. Муратов Е. А., Рахимов А. Т., Суетин Н. В. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 5. С. 121.
8. Бохан А. П., Закревский Д. Э. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 2. С. 74.
9. Ковалев А. С., Манкевич Ю. А., Муратов Е. А., Рахимов А. Т., Суетин Н. В. // Физика плазмы. 1992. № 18. С. 1076.
10. Коротеев А. С., Ризаханов Р. Н. // Прикладная физика. 2008. № 4. С. 64.
11. Голубенко Ю. И., Куксанов Н. К., Салимов Р. А., Немытов П. И. // Прикладная механика и техническая физика. 2010. Т. 51. № 2. С. 3.
12. Сорокин А. Р. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 20. С. 1.
13. Алямовский И. В. Электронные пучки и электронные пушки. — М.: 1966.
14. Фоменко В. С. Эмиссионные свойства материалов. Справочник. Киев, «Наукова думка», 1970.
15. Бушуев Н. А., Глухова О. Е., Григорьев Ю. А., Иванов Д. В., Колесникова А. С., Николаев А. А., Шалаев П. Д., Шестеркин В. И. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 2. С. 134.
16. Коротеев А. С., Ризаханов Р. Н. // Прикладная физика. 2009. № 6. С. 123.
17. Овсянникова Л. П., Фишкова Т. Я. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 5. С. 96.
18. Коротеев А. А. // Вестник МАИ. 2010. Т. 17. № 5. С. 96.
19. Вакуумная техника. Справочник. Под ред. Фролова Е. С. и Минайчева В. Е. — М.: Машиностроение, 1992.
20. Джанибекова С. Х. / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. — Москва, 2012.
21. Бугаев С. П., Крейнделъ Ю. Е., Щанин П. М. Электронные пучки большого сечения. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
22. Ulrich A., Niebl C., Tomizava H. et al. // J. Appl. Phys., 86, 3525 (1999).
23. Бурдовицин В. А., Климов А. С., Окс Е. М. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 11. С. 61.
24. Зенин А. А., Климов А. С., Бурдовицин В. А., Окс Е. М. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 10. С. 9.
25. Мельник И. В. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 592.
26. Бохан П. А., Сорокин А. Р. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 10. С. 620.
27. Бохан П. А., Сорокин А. Р. // Квантовая электроника. 1990. Т. 17. № 11. С. 1426.
28. Бельская Е. В., Бохан П. А., Закревский Д. Э. // Квантовая электроника. 2010. Т. 40. № 7. С. 599.
29. Холмич В. Ю., Ямицков В. А. // Прикладная физика. 2010. № 6. С. 77.
30. Арланцев С. В., Борович Б. Л., Голубев Л. Е., Воронин А. С., Заворотный С. И., Смирнов В. М., Юрченко Н. И. // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. № 9. С. 824.
31. Маркушин М. А., Колпаков В. А., Кричевский С. В., Колпаков А. И. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 3. С. 60.
32. Сорокин А. Р. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 5. С. 47.
33. Орешкин В. Ф., Серёгин А. М., Синайский В. В., Сорокин А. Р., Щетинкина Т. А. // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. № 12. С. 1043.
34. Азаров А. В., Митько С. В., Очкин В. Н. / XLIV научная конференция МФТИ (Долгопрудный, 2001).
35. Бохан П. А., Гугин П. П., Закревский Д. Э., Лаврухин М. А. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 10. С. 50.
36. Бохан П. А., Гугин П. П., Закревский Д. Э., Лаврухин М. А. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 7. С. 73.
37. Акишев Ю. С., Дятко Н. А., Напартович А. П., Перемятько П. И. // ЖТФ. 1989. Т. 89. Вып. 8. С. 14.
38. Колпаков В. А., Колпаков А. И., Подлиннов В. В. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 4. С. 41.
39. Азаров А. В., Митько С. В., Очкин В. Н., Виттеман В. Я. / XXVII Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород, 2000).
40. Головин А. И., Егорова Е. К., Шлойдо А. И. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 10. С. 27.
41. Казанский Н. Л., Колпаков В. А. // Компьютерная оптика. 2003. Вып. 25. С. 112.
42. Зинченко С. П., Ковтун А. П., Томачев Г. Н. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 1. С. 43.
43. Бохан А. П., Закревский Д. Э. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 11. С. 21.
44. Arlantsev S. V., Borovich B. L., Buchanov V. V., Molodykh E. I., Yurchenko N. I. // Journal of Russian Laser research. 1995. Vol. 16. No. 2. P. 99.
45. Бохан А. П., Бохан П. А. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 6. С. 7.
46. Сорокин А. Р. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 9. С. 14.
47. Бохан П. А., Закревский Д. Э. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 1. С. 109.
48. Бохан П. А., Закревский Д. Э. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 96. Вып. 2. С. 139.
49. Сорокин А. Р. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 17. С. 1.
50. Бельская Е. В., Бохан П. А., Закревский Д. Э. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 8. С. 132.
51. Тутык В. А. // Сучасні проблеми металургії. 2006. Т. 9. С. 143.
52. Тутык В. А. // Доповіді Національної академії наук України. 2008. № 11. С. 86.
53. Тутык В. А. // Вопросы атомной науки и техники. 2008. № 4. С. 184.
54. Поноваренко В. О., Толмачев Г. Н. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. Вып. 16. С. 34.
55. Азаров А. В., Митько С. В., Очкин В. Н. // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. № 8. С. 675.
56. Сорокин А. Р. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 9. С. 42.



57. Королев Ю. Д., Месяц Г. А. Физика импульсного пробоя газов. — М.: Наука, 1991. — 224 с.

58. Тарасенко В. Ф., Алексеев С. Б., Орловский В. М., Шпак В. Г., Шунайлов С. А. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 8. С. 30.

59. Бахит Е. Х., Бураченко А. Г., Ломаев М. И., Рыбка Д. В., Тарасенко В. Ф., Хрущ Е. А. // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312. № 2. С. 126.

60. Шкляев В. А., Рыжов В. В. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 2. С. 46.

61. Мастюгин Д. С., Осипов В. В., Соломонов В. И. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 11. С. 10.

62. Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges. Ed. by V.F. Tarasenko. — New York: Nova Science Publishers, Inc. USA. 2014.

## Modern electron beam generators for technological applications (a review)

*A. I. Golovin and A. I. Shloydo*

M. V. Keldysh Research Centre (SSC FSUE Keldysh Research Centre)

8 Onezhskaya str., Moscow, 125438, Russia

E-mail: aigolovin@yandex.ru

*Received September 20, 2016*

***The review represents modern generators of electron beams for technological applications. Both pulse and stationary generator are presented working using different physical principles. The review is dedicated to specialist for who the electron beams are not the main specialty but the beams could be useful to implement one or another technological process. The main goal of the review is to represent modern publications about electron beam generation.***

PACS: 41.75Fr

*Keywords:* electron beam, beam extraction, run-away electrons.

### REFERENCES

- I. G. Ivanov, E. L. Latush, and M. F. Sem, *Ion lasers on metal vapors* (Energoatomizdat, Moscow 1990) [in Russian].
- P. A. Bokhan and A. R. Sorokin, *Zh. Tekh. Fiz.* **55**(1), 88 (1985).
- A. V. Azarov, S. V. Mit'ko and V. N. Ochkin, *Generator of electron beam*. Patent of RF No 2172573, 2000.
- J. J. Rocca, J. D. Meyer, M. R. Farrell and G. J. Collins, *J. Appl. Phys.* **56** (3), 790 (1984).
- J. H. Holliday, *Electrical Rev.* **187** (25), 876 (1970).
- M. A. Zav'yalov, Yu. E. Kreindel', and A. A. Novikov *Plasmic Processes in Technological Electron Guns* (Energoatomizdat, Moscow, 1989) [in Russian].
- E. A. Muratov, A. T. Rakhimov, N. V. Suetin, *Technical Physics* **49** (5), 638 (2004).
- P. A. Bokhan, & D. E. Zakrevsky, *Tech. Phys. Lett.* **28**, 73 (2002).
- A. S. Kovalev, Yu. A. Mankelevich, E. A. Muratov, A. T. Rakhimov and N. V. Suetin. *J. Vac. Sci. Technol.* **10**, 1086 (1992).
- A. S. Koroteev and R. N. Rizakhanov, *Prikl. Fiz.*, **4**, 64 (2008).
- Y. I. Golubenko, N. K. Kuksanov, R. A. Salimov, P. I. Nemytov, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics* **51** (2), 145 (2010).
- A. R. Sorokin, *Tech. Phys. Lett.* **29**, 836 (2003).
- I. V. Alyamovsky, *Electron Beams and Electron Guns*, (Sovetskoye Radio, Moscow 1966) [in Russian].
- V. S. Fomenko, *Emission Properties of Materials*, (Naukova Dumka, Kiev, 1970) [in Russian].
- N. A. Bushuev, O. E. Glukhova, Y. A. Grigor'ev, et al. *Tech. Phys.* **61**, 290 (2016).
- A. S. Koroteev and R. N. Rizakhanov, *Plasma Phys. Rep.* **36**, 1173 (2010).
- L. P. Ovsyannikova and T. Ya. Fishkova, *Technical Physics* **71** (5), 601 (2001).
- A. A. Koroteev *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo Instituta* **17** (5), 96 (2010).
- E. S. Frolov, V. E. Minaichev, A. T. Aleksandrova et al., *Vacuum Technique: A Handbook* (Mashinostroenie, Moscow, 1992) [in Russian].
- S. Kh. Dzhanibekova. Summary of dissertation for the degree of candidate of physico-mathematical sciences. (FSUE Keldysh Research Center, Moscow, 2012) [in Russian].
- S. P. Bugaev, Yu. E. Kreindel', and P. M. Shchanin, *Electron Beams of Large Cross Section* (Energoatomizdat, Moscow, 1984) [in Russian].
- A. Ulrich, C. Niebl, H. Tomizava et al. *J. Appl. Phys.* **86**, 3525 (1999).
- V. A. Burdovitsin, A. S. Klimov & E. M. Oks, *Tech. Phys. Lett.* **35**, 511 (2009).
- A. A. Zenin, A. S. Klimov, V. A. Burdovitsin, and E. M. Oks, *Tech. Phys. Lett.* **39**, 454 (2013).
- I. V. Melnik, *Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics)* **1** (5), 592 (2013).
- P. A. Bokhan and A. R. Sorokin, *Pis'ma Zh. Tehn. Fiz.* **10**, 620 (1984).
- P. A. Bokhan, A. R. Sorokin, *Kvant. Electron.*, **17**, 1426 (1990).
- E. V. Bel'skaya, P. A. Bokhan, and D. E. Zakrevskii, *Quantum Electronics.* **40** (7), 599 (2010).
- V. Yu. Khomich and A. V. Yamschikov, *Prikl. Fiz.*, No. 6, 77 (2010).
- S. V. Arlantsev, B. L. Borovich, L. E. Golubev, A. S. Voronin, S. I. Zavorotnyi, V. M. Smimov, and N. V. Yurchenko, *Quantum Electronics*, **21** (9), 824 (1994).

31. M. A. Markushin, V. A. Kolpakov, S. V. Krichevskii, and A. I. Kolpakov, *Technical Physics* **60** (3), 376 (2015).
32. A. R. Sorokin, *Technical Physics* **51** (5), 580 (2006).
33. V. F. Oreshkin, A. M. Seregin, V.V. Sinaiskii, A. R. Sorokin, and T. A. Shchetinkina, *Quantum Electronics*, **33** (12), 1043 (2003).
34. A. V. Azarov, S. V. Mit'ko, and V. N. Ochkin in *Proceedings of the XLIV MIPT Scientific Conference*, (Dolgoprudny, 2001).
35. P. A. Bokhan, P. P. Gugin, D. E. Zakrevskii, and M. A. Lavrukhin, *Tech. Phys.* **60**, 1464 (2015).
36. P. A. Bokhan, P. P. Gugin, D. E. Zakrevsky, and M. A. Lavrukhin, *Tech. Phys. Lett.* **42**, 451 (2016).
37. Y. S. Akishev, N. A. Dyatko A. P. Napartovich, and P. I. Peretyat'ko, *Technical Physics*, **89** (8), 14 (1989).
38. V. A. Kolpakov, A. I. Kolpakov, and V. V. Podlipnov, *Tech. Phys.* **58**, 505 (2013).
39. A. V. Azarov, S. V. Mit'ko, V. N. Ochkin, et al., in *Proceedings of the 37th International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion* (Zvenigorod, 2010).
40. A. I. Golovin, E. K. Egorova and A. I. Shloido, *Technical Physics* **59** (10), 1445 (2014).
41. N. L. Kazanskii and V. A. Kolpakov, *Komp'yut. Opt.*, **25**, 112 (2003).
42. S. P. Zinchenko, A. P. Kovtun, and G. N. Tolmachev, *Tech. Phys. Lett.* **40**, 21 (2014).
43. P. A. Bokhan and D. E. Zakrevsky, *Tech. Phys. Lett.* **28**, 454 (2002).
44. S. V. Arlantsev, B. L. Borovich, V. V. Buchanov, E. I. Molodykh, and N. I.Yurchenko, *Journal of Russian Laser Research*, **16** (2), 99 (1995).
45. A. P. Bokhan and P. A. Bokhan, *Tech. Phys. Lett.* **27**, 220 (2001).
46. A. R. Sorokin, *Tech. Phys. Lett.* **28**, 361 (2002).
47. P. A. Bokhan and D. E. Zakrevsky, *Tech. Phys.* **52**, 104 (2007).
48. P. A. Bokhan and D. E. Zakrevsky, *JETP Lett.* **96**, 133 (2012).
49. A. R. Sorokin, *Tech. Phys. Lett.* **29**, 701 (2003).
50. E. V. Bel'skaya, P. A. Bokhan, and Dm. E. Zakrevskii, *Tech. Phys.* **53**, 1091 (2008).
51. V. A. Tutyk, *Modern Problem of Metallurgy*, **9**, 143 (2006).
52. V.A. Tutyk, *DAN Ukraine*, **11**, 86, (2008).
53. V. A. Tutyk, *Problems of Atomic Science and Technology. Plasma Electronics and New Methods of Acceleration.* **4**, 184 (2008).
54. V. O. Ponomarenko and G. N. Tolmachev, *Tech. Phys. Lett.* **38**, 747 (2012).
55. A. V. Azarov, S. V. Mit'ko, and V. N. Ochkin, *Quantum Electronics*, **32**(8), 675 (2002).
56. A. R. Sorokin, *Tech. Phys. Lett.* **29**, 373 (2003).
57. Yu. D. Korolev and G. A. Mesyats *Physics of Pulsed Breakdown in Gases* (Moscow, Nauka, 1991) [in Russian].
58. V. F. Tarasenko, S. B. Alekseev, V. M. Orlovskii, V. G. Shpak, and S. A. Shunailov, *Tech. Phys.* **49**, 982 (2004).
59. E. H. Baksht, A. G. Burachenko, M. I. Lomaev, D. V. Rybka, V. F. Tarasenko, and E. A. Khrush, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University* **312** (2), 126 (2008).
60. V. A. Shklyayev and V. V. Ryzhov, *Tech. Phys. Lett.* **37**, 72 (2011).
61. D. S. Mastuygin, V. V. Osipov, and V. I. Solomonov, *Tech. Phys. Lett.* **35**, 487 (2009).
62. *Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges*. Ed. by V. F. Tarasenko (Nova Science Publishers, New York, 2014).