

Эксперименты по формированию пучков убегających электронов в магнитоизолированном воздушном диоде

Л.Н. Лобанов^{1,*}, С.А. Шунайлов¹, М.И. Яландин^{1,2}, Н.М. Зубарев^{1,2}, К.А. Шарыпов¹

¹Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

*lobanov@iep.uran.ru

Аннотация. Разработана установка для получения пучков убегających электронов в магнитоизолированном воздушном диоде, в котором магнитное поле создается катушками Гельмгольца. Зазор между катушками с квазиоднородным магнитным полем имеет открытую конфигурацию, что позволяет размещать в нем не только датчик тока, люминофор или облучаемый образец, но и, например, датчики для регистрации излучения образца. В качестве анода используется тонкая фольга или сетка, а в качестве катода – система из нескольких соосных трубчатых катодов, срабатывающих синхронно. Такой катод (концентрический) позволил повысить заряд пучка и его однородность при сохранении внешнего диаметра. Диод был исследован при нескольких значениях амплитуды питающего импульса напряжения субнаносекундной длительности и напряженности магнитного поля. Были получены пучки достаточно равномерной структуры диаметром 1–2 см и зарядом более 2 нКл. В них была высока доля высокоэнергетичных электронов: при амплитуде питающего импульса 135 кВ от 5 до 10% электронов имели энергию более 230 кэВ.

Ключевые слова: убегające электроны, катушки Гельмгольца, воздушный диод, пикосекундный пучок, магнитная изоляция.

1. Введение

Для различных задач, таких как катодолюминесцентный анализ состава диэлектриков [1–3], генерация черенковского излучения в средах [4], возбуждение лазерных сред и мишеней [5], существует потребность в источниках сгустков быстрых электронов. К таким источникам и характеристикам формируемых ими пучков предъявляется ряд требований.

Так, для эффективного и стабильного воздействия на объекты пучок должен иметь достаточные плотность тока и удельный (по площади) заряд, но малое энергосодержание (и, следовательно, малую длительность), чтобы не вызывать тепловых и радиационных нарушений в структуре образца. При этом кинетическая энергия электронов должна быть достаточной для проникновения в образец на необходимую глубину (или даже для его «прострела»).

Перечисленным требованиям отвечают источники пучков убегających электронов (УЭ), получаемых в газовых диодах (ГД) с магнитной изоляцией и резко неоднородным распределением электрического поля [6–8]. В данной работе описаны эксперименты, целью которых является разработка такого источника.

Подобные источники обладают рядом преимуществ в сравнении с источниками на основе вакуумных взрывоэмиссионных диодов. Самое очевидное – отсутствие необходимости вакуумирования. Кроме того, для целей, например, импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) интересны и другие особенности [3]. Так, короткая длительность пучка позволяет наблюдать процессы свечения пико- и субнаносекундного диапазонов, а низкий заряд приводит к пониженной дозовой нагрузке.

2. Описание экспериментов

Пучки УЭ в газовых диодах возникают вследствие непрерывного ускорения (убегания) [9] при приложении к промежутку достаточно сильного электрического поля, чья напряженность E превышает некоторое критическое значение [10]. При этом в случае резко

неоднородного распределения поля должны выполняться нелокальные условия убегания в области слабого поля [11].

При достижении на катоде необходимой E начинается автоэлектронная эмиссия. Автоэлектроны ионизуют газ; формируется прикатодная плазма. С её границы испускаются убегающие электроны, формирующие пучок. Он имеет длительность порядка 10 пс и малый заряд порядка $0.1 \div 1$ нКл, поскольку плазма стремительно расширяется, вследствие чего условие убегания для вновь ускоряемых частиц нарушается [12].

Возникновение автоэмиссии с катода определяется как геометрией катода, так и микроструктурой его поверхности, электро- и теплофизическими свойствами его материала [13]. Это позволяет управлять моментом эмиссии и, как следствие, кинетической энергией УЭ на аноде. При этом возможно это при изменении не только катода, но и питающего импульса напряжения.

Формируемые пучки УЭ значительно расходятся от катода в переднюю полусферу [14, 15], поэтому плотности их тока и заряда на аноде невелики. Прилагая к ГД продольное магнитное поле, можно направить сгусток УЭ к аноду и в пространстве за ним. При этом возможно достичь увеличения плотностей тока и заряда поперечным сжатием пучка, что реализуется при увеличении напряженности H_z однородного продольного магнитного поля [16]. Кроме того, радиальное сжатие пучка задается профилем сгущающихся к аноду силовых линий H_z . В этом случае необходимо учитывать возможность возникновения эффекта магнитного зеркала – торможения и отражения части электронов от области увеличения напряженности поля [17].

2.1. Описание экспериментальной установки

В описанных экспериментах для питания ГД применялся высоковольтный источник на базе 5-нс драйвера РАДАН-303 с управляемым искровым разрядником. Сформированный им импульс преобразовывался работающим в режиме бегущей волны индуктивно-емкостным блоком [18] и парой азотных неуправляемых разрядников высокого давления [19], срезающим и обостряющим. При этом имелась возможность плавной регулировки параметров импульса за счет оперативной подстройки разрядников. В результате через коаксиальную передающую линию (ПЛ) на ГД подавались импульсы напряжения субнаносекундной длительности с регулируемой амплитудой, которая могла превышать 200 кВ (по модулю). Длительность импульсов на полувысоте в данной работе не превышала 300 пс. ГД заполнялись воздухом атмосферного давления.

Регистрация импульсов напряжения в питающей ПЛ проводилась емкостным датчиком. По методике рефлектометрии [20, 21] имелась возможность вместе с падающим импульсом U_{in} наблюдать его очищенное от искажений отражение U_{ref} от ГД. При использованных значениях U_{in} пробоя в ПЛ не происходило.

Измерения тока и заряда формируемых пучков УЭ проводились с помощью широкоапертурного коллекторного датчика. Его коллектор имеет диаметр 25 мм, что позволило регистрировать весь сгусток УЭ с катода диаметром 22 мм. Регистрация откликов коллекторного и емкостных датчиков производилась с помощью осциллографа Tektronix TDS6604B (ширина полосы пропускания 6 ГГц, частота дискретизации 20 Гвыб/с). Временные разрешения датчика тока и регистратора были недостаточными, но интегрированием «токовых» сигналов по времени получалась корректная информация о заряде пучка УЭ. Поэтому указанные в работе значения тока пучка являются оценкой снизу.

2.2. Концентрический катод

Ранее на аналогичной установке были проведены эксперименты по формированию однородного по сечению широкоапертурного пучка УЭ в виде сплошного диска [22]. В них использовался концентрический катод диаметром 20 мм, представляющий собой систему соосных трубчатых катодов из графита. Такая геометрия позволила не только увеличить заряд пучка за счет увеличения площади эмиссионной поверхности, но и обеспечить его однородность.

Была достигнута синхронная эмиссия с каждого из усилителей. Для этого величины их выступов численно рассчитывались исходя из требования одновременного достижения критического поля на каждом из них. При амплитуде $|U_{in}| \approx 200$ кВ в однородном магнитном поле H_z величиной 8 кЭ был получен заряд ≈ 1 нКл, в неоднородном же – ≈ 0.7 нКл. В последнем случае перепад поля на оси от катода к наибольшему значению составлял ≈ 3.6 раза ($5.5 \rightarrow 20$ кЭ), что позволило сжать пучок в 1.6 раза по диаметру.

Однако, благодаря свойствам графита и наличию на нем большого количества микровыступов эмиссия УЭ с графитового катода начинается слишком рано: на начальном участке переднего фронта U_{in} . Как следствие, электроны ускоряются при напряжении, меньшем амплитудного. Поэтому кинетическая энергия электронов пучка оказывается небольшой. Так, использованием в качестве анода фольговых фильтров с известными энергиями отсечки было установлено, что заряд электронов сгустка с энергией > 190 кэВ составлял 15%. В случае неоднородного поля энергетическая структура пучка оказалась близка – около 6% частиц с энергией > 200 кэВ.

Для увеличения заряда пучка и кинетической энергии его электронов был изготовлен концентрический катод из нержавеющей стали (Рис. 1). Для стали характерен значительный разброс моментов эмиссии элементарных сгустков, поэтому величины выступов подбирались экспериментально.

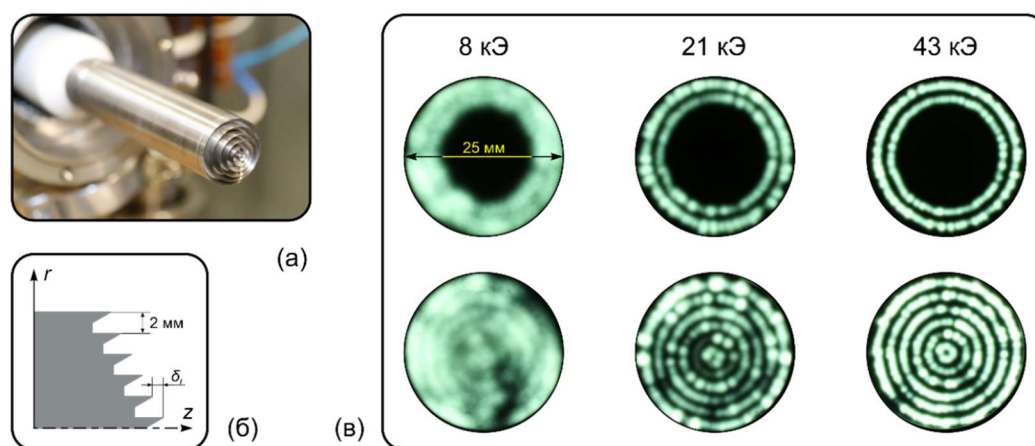


Рис. 1. Стальной концентрический катод: внешний вид (а), геометрия (б) и свечение люминофора (в) под действием потоков УЭ при различных значениях H_z и различном числе усилителей поля.

Данный катод был установлен в ГД вместо графитового концентрического катода и был испытан в однородном магнитном поле при $|U_{in}| = 125 \div 135$ кВ. По реакции люминофора видно, что структура поперечного сечения пучка УЭ отражает конфигурацию катода. Заряд пучка при $H_z = 21$ кЭ лежал в диапазоне $2.9 \div 3.4$ нКл. Это в 3 раза больше, чем для графитового концентрического катода (при $|U_{in}| \approx 200$ кВ), и в 1.5 раза больше, чем для трубчатого стального катода того же внешнего диаметра (в том же ГД, при том же $|U_{in}|$).

2.3. ГД с катушками Гельмгольца

Стальной concentрический катод был применен в ГД специализированной конструкции (Рис. 2). В нем магнитное поле создавалось катушками Гельмгольца — двумя соосными одинаковыми соленоидами, разнесенными на расстояние, примерно равное их среднему радиусу. Такая система формирует квазиоднородное магнитное поле в зазоре между соленоидами.

Питание соединенных последовательно катушек осуществлялось путем разряда на них батареи конденсаторов с емкостью 180 мкФ. Регулировка амплитуды напряженности магнитного поля осуществлялась изменением зарядного напряжения батареи U_0 . Последствием такой схемы питания является наличие ударных механических нагрузок, для защиты от которых предусмотрена система крепления катушек, выполненная из слабомагнитной нержавеющей стали.

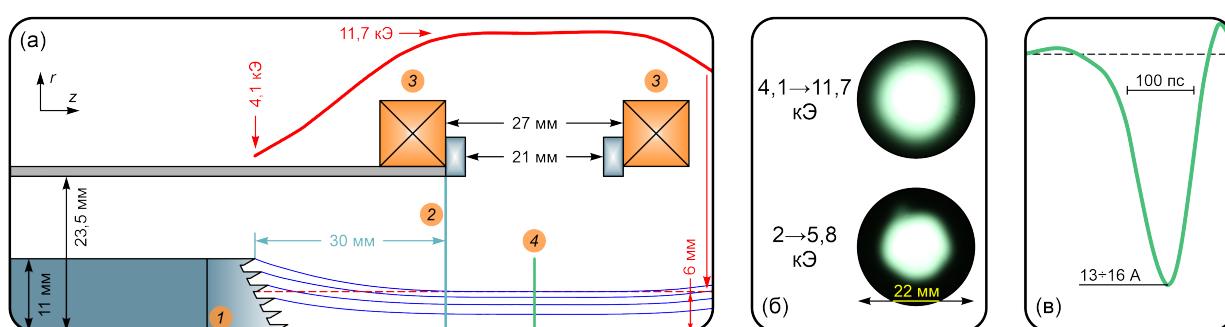


Рис. 2. Упрощенная схема ГД (а): 1 – катод, 2 – фольговый анод, 3 – катушки Гельмгольца, 4 – люминофор (или коллекторный датчик тока), красная и синие линии – профиль и силовые линии H_z соответственно. Снимки свечения люминофора при двух значениях H_z (б) и типичная осциллограмма тока пучка (в) при $|U_{in}| \approx 135$ кВ.

При этом зазор между катушками остается открытым. Такая конфигурация не только обеспечивает удобство размещения образца, но и позволяет установить, например, датчики его излучения. Кроме того, это снимает ограничение на длину образца, хотя его ширина и ограничена расстоянием между соединяющими катушки стержнями (60 мм).

Представленные на рис. 2 силовые линии и профиль H_z были численно рассчитаны в динамическом режиме с учетом потерь на вихревые токи, скин-эффект и краевые эффекты. При $U_0 = 2$ кВ H_z на квазиоднородном участке составляет 11.7 кЭ, а в области катода – 4.1 кЭ; при $U_0 = 1$ кВ – 5.8 и 2 кЭ соответственно. При таком перепаде эффект магнитного зеркала не проявляется.

Были исследованы параметры пучка при нескольких значениях амплитуд U_{in} и H_z . Наибольшие заряд и ток сгустка были получены при $|U_{in}| \approx 155 \div 160$ кВ: заряд лежал в диапазоне 1.9–2.2 нКл; ток достигал 16.5 А при длительности на полувысоте ≈ 100 пс. При $|U_{in}| \approx 135$ кВ заряд был ≈ 1.5 нКл, что вдвое больше, чем для графитового concentрического катода в неоднородном магнитном поле с большей в 1.5 раза амплитудой U_{in} .

В этих режимах свечение люминофора было стабильным от импульса к импульсу. При понижении $|U_{in}|$ до 120 кВ стабильность ухудшилась. В этом случае короткой длительности U_{in} (≈ 180 пс) недостаточно для ускорения электронов на всем промежутке. Поэтому чем раньше начинается эмиссия УЭ, тем дольше они ускоряются на нарастающем участке фронта U_{in} , тем выше заряд пучка и тем ярче реакция люминофора. Заряд в таком режиме лежал в диапазоне 0.6–1.4 нКл.

Была оценена доля высокоэнергетичных электронов в пучке методом фольговых фильтров при упомянутых ранее значениях H_z . Так, при $|U_{in}| \approx 135$ кВ в меньшем поле лишь

2% электронов имели кинетическую энергию > 210 кэВ, в большем – от 5 до 10% частиц обладали энергией > 230 кэВ. Причиной такого изменения распределения является эффект компрессии электрического поля фронтом ионизационной волны, возрастающий с увеличением N_e из-за увеличения плотности плазмы в волне.

3. Заключение

Разработанный в результате экспериментов ГД перспективен для использования в составе установки для ИКЛ. Благодаря уже упомянутым свойствам УЭ такая установка позволит снизить дозовую нагрузку относительно вакуумных диодов. Пучки УЭ не повреждают структуру образца, благодаря чему возможна регистрация спектров, не искаженных образующимися центрами окраски. Короткая же длительность пучков УЭ позволяет наблюдать быстропротекающие процессы ИКЛ в динамике.

Открытая конфигурация зоны облучения позволяет удобно размещать образец и датчики для регистрации его излучения. Использование катода специальной конструкции были улучшены характеристики пучка. Так, в разработанной установке был получен заряд до 2.2 нКл, ток же достигал значения 16.5 А (напомним, что ввиду недостаточной переходной характеристики измерительного тракта значение тока является оценкой снизу). Удельные по поперечному сечению плотности заряда и тока также достигали высоких значений: 1.5 нКл/см² и 14 А/см² соответственно. Кинетическая энергия превышала значения, достижимые при ускорении амплитудным напряжением U_{in} : при $|U_{in}| \approx 135$ кВ до 10% электронов имели энергию > 30 кэВ. Это является следствием компрессии следующей за пучком УЭ волны ионизации, которая усиливается с усилением продольного магнитного поля.

Наиболее перспективными для нас представляются режимы пониженной амплитуды U_{in} . Такие режимы реализуемы при использовании наиболее компактного высоковольтного источника из семейства РАДАН – РАДАН Эксперт [23]. В этом случае напряжение $|U_{in}| \approx 135$ кВ достижимо в режиме редких включений, а 120 кВ – в импульсно-периодическом режиме с частотой до 10 Гц, пакетами из нескольких десятков импульсов. Длительность и частота повторения пакета будут ограничены адиабатическим нагревом катушек Гельмгольца (≈ 1 градус за импульс). При этом вероятно, что для импульсов U_{in} с увеличенной длительностью полки заряд пучка увеличится.

Благодарности

Работа была поддержана Российским научным фондом, грант № 23-19-00053 (<https://rscf.ru/project/23-19-00053>).

4. Список литературы

- [1] V. Solomonov et al., CLAVI pulsed cathodoluminescence spectroscopy, *Laser Phys.*, vol. **16**, 126, 2006, doi: 10.1134/S1054660X06010117
- [2] M. Yalandin et al., Specific Features of Pulsed Cathodoluminescence under Excitation by Nanosecond and Subnanosecond Electron Beams, *Dokl. Phys.*, vol. **68**, 50, 2023, doi: 10.1134/S1028335823020064
- [3] L. Babich, K. Becker, and T. Loiko, Luminescence From Minerals Excited by Subnanosecond Pulses of Runaway Electrons Generated in an Atmospheric-Pressure High-Voltage Discharge in Air, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **37**, 2261, 2009, doi: 10.1109/TPS.2009.203057
- [4] L. Babich, T. Loiko, and A. Rodigin, The First Observations of Cherenkov's Radiation of Runaway Electrons Produced by Discharge in Dense Gas, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **42**, 948, 2014, doi: 10.1109/TPS.2014.2308529

-
- [5] K. Berezhnoi, et al., A setup for recording the picosecond dynamics of radiation of semiconductor targets in a gas diode, *Instrum. Exp. Tech.*, vol. **53**, 272, 2010, doi: 10.1134/S0020441210020211
- [6] S. Yatom et al., Recent studies on nanosecond-timescale pressurized gas discharges, *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. **25**, no. 6, p. 064001, 2016, doi: 10.1088/0963-0252/25/6/064001.
- [7] V. Tarasenko, D. Beloplotov, and D. Sorokin, Duration of runaway electron current pulses when applying voltage pulses with a subnanosecond rise time, *Tech. Phys.*, vol. **67**, 586, 2022, doi: 10.21883/TP.2022.05.53674.317-21
- [8] G. Mesyats, et al., Generation of a Picosecond Runaway Electron Beam in a Gas Gap With a Nonuniform Field, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **36**, 2497, 2008, doi: 10.1109/TPS.2008.2005884
- [9] H. Dreicer, Electron and Ion Runaway in a Fully Ionized Gas. II, *Phys. Rev.*, vol. **117**, 329, 1960, doi: 10.1103/PhysRev.117.329
- [10] L. Babich, T. Loiko, and V. Tsukerman, High-voltage nanosecond discharge in a dense gas at a high overvoltage with runaway electrons, *Sov. Phys. Uspekhi*, vol. **33**, 521, 1990, doi: 10.1070/PU1990v033n07ABEH002606
- [11] N. Zubarev, et al., Experimental and theoretical investigations of the conditions for the generation of runaway electrons in a gas diode with a strongly nonuniform electric field, *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. **51**, 284003, 2018; doi: 10.1088/1361-6463/aac90a.
- [12] G. Mesyats et al., How short is the runaway electron flow in an air electrode gap?, *Appl. Phys. Lett.*, vol. **116**, 063501, 2020, doi: 10.1063/1.5143486
- [13] S. Korovin, et al., Experimental investigation of graphite explosive-emission cathodes operating in a periodic pulse regime, *Tech. Phys. Lett.*, vol. **30**, 813, 2004, doi: 10.1134/1.1813718
- [14] S. Belomytsev, et al., Initial stage of gas discharge in an inhomogeneous electric field, *Tech. Phys. Lett.*, vol. **34**, 367, 2008, doi: 10.1134/S1063785008050027
- [15] V. Shklyaev, et al., Simulation of the formation of a runaway electron beam in an overvolted gas gap breakdown, *J. Appl. Phys.*, vol. **112**, 113303, 2012, doi: 10.1063/1.4768912
- [16] G. Mesyats, et al., Emission features and structure of an electron beam versus gas pressure and magnetic field in a cold-cathode coaxial diode, *Electronics*, vol. **11**, 248, 2022, doi: 10.3390/electronics11020248
- [17] M. Gashkov, et al., Compression of a Runaway Electron Flow in an Air Gap with a Nonuniform Magnetic Field, *JETP Lett.*, vol. **113**, 370, 2021, doi: 10.1134/S0021364021060059
- [18] M. Yalandin, et al., High peak power and high average power subnanosecond modulator operating at a repetition frequency of 3.5 kHz, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **30**, 1700, 2002, doi: 10.1109/TPS.2002.805383
- [19] G. Mesyats, et al., Desktop subnanosecond pulser: research, development, and applications, *Proc. SPIE 2154*, Los Angeles, USA, 1994, doi: 10.1117/12.175753
- [20] K. Sharypov, et al., Time-domain reflectometry of high-voltage nonlinear loads with picosecond resolution, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **84**, 055110, 2013, doi: 10.1063/1.4804355
- [21] K. Sharypov, et al., Current waveform reconstruction from an explosively emissive cathode at a subnanosecond voltage front, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **85**, 125104, 2014, doi: 10.1063/1.4902853
- [22] L. Lobanov, et al., Disk-Shaped Bunch of Runaway Electrons Formed in a Magnetized Air Diode, *IEEE EDL*, vol. **44**, 1748, 2023, doi: 10.1109/LED.2023.3301867
- [23] G. Mesyats, et al., RADAN-EXPERT portable high-current accelerator, *10 IEEE International Pulsed Power Conference*, Albuquerque, USA, 1995, doi: 10.1109/PPC.1995.596681