

03;04;09;10

## Электромагнитное излучение при наносекундном разряде в открытом газонаполненном диоде

© Ю.А. Андреев, И.Д. Костыря, В.И. Кошелёв, В.Ф. Тарасенко

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия  
e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 11 июля 2005 г.)

Исследованы свойства разряда и излучения в открытом газонаполненном диоде (ОГД), на который подавались наносекундные импульсы высокого напряжения от генератора РАДАН-220. При диффузном разряде в воздухе атмосферного давления зарегистрировано электромагнитное излучение в рентгеновской, УФ, видимой и ближней ИК области спектра, а также мощные субнаносекундные ( $\sim 0.5\text{--}0.7\text{ ns}$ ) импульсы сверхширокополосного (СШП) электромагнитного излучения. Показано, что при аксиальной симметрии катода и анода в ОГД формируются импульсы СШП-излучения с радиальной поляризацией поля, а при катоде в виде сегмента формируется СШП-излучение с линейной поляризацией. Эффективный потенциал для обеих конструкций ОГД составил  $ER = 6\text{ kV}$ . Показано, что источником мягкого рентгеновского излучения является плазма в разрядном промежутке, а источником жесткого — металлический анод.

PACS: 52.80.Pi

### Введение

В работах [1–7] сообщалось о формировании объемных (диффузных) разрядов наносекундной длительности с высокой удельной мощностью энерговода (до  $0.8\text{ GW/cm}^3$  [7]), а в [2–6,8,9] — о получении в подобных экспериментальных условиях в газонаполненных диодах плотных субнаносекундных электронных пучков, амплитуда которых достигала сотни ампер [4,8,9]. Объемный разряд, инициируемый пучком электронных лавин (ОРИПЭЛ [2]) был применен для накачки лазера на атомарных переходах ксенона [6,7]. Субнаносекундный лавинный электронный пучок (СЛЭП [2]) был использован для формирования объемного разряда в  $\text{CO}_2$ -лазере атмосферного давления [10], а также для возбуждения катодолуминесценции в кристаллах [11]. Во всех перечисленных работах на газовый промежуток подавались наносекундные импульсы высокого напряжения.

Известно, что высоковольтные импульсы с большими значениями  $dI/dt$  могут использоваться для генерации мощного сверхширокополосного (СШП) излучения [12–14], а плазма объемного разряда, формируемого в неоднородном электрическом поле, излучает мягкое рентгеновское излучение [15,16]. Также известно, что плазма электрических и пучковых разрядов излучает в радиочастотном и других областях спектра. Например, в [1,6,7] исследовались характеристики ОРИПЭЛ в видимой и УФ областях спектра, и было зарегистрировано мощное излучение второй положительной системы азота. В [17,18] сообщалось о наличии электромагнитных наводок при пробое воздуха импульсами высокого напряжения с крутым фронтом, которые могли приводить к большим погрешностям при регистрации импульсов тока и напряжения [18]. Однако в известных работах каждый вид излучения обычно исследовался независимо от других, а измерения характеристик излучения в

радиочастотной области спектра для ОРИПЭЛ вообще не проводились.

Целью данной работы является исследование характеристик электромагнитного излучения в различных диапазонах из газонаполненного диода при формировании в воздухе атмосферного давления объемного разряда и субнаносекундного электронного пучка.

### Экспериментальная аппаратура и методики измерений

Экспериментальные исследования были проведены с использованием двух типов генераторов наносекундных импульсов, отличающихся амплитудой и формой импульса напряжения. Генератор РАДАН-220 [19,20] имел выходное сопротивление  $20\text{ Ohm}$  и формировал на разрядном промежутке в режиме холостого хода импульс амплитудой  $\sim 220\text{ kV}$ , длительностью на полувысоте  $\sim 2\text{ ns}$ , при фронте  $\sim 0.3\text{ ns}$ . Подобный генератор использовался ранее для получения электронного пучка в газонаполненном диоде и формирования плотных объемных разрядов [2–7]. С генератором РАДАН применялись два типа газонаполненных диодов: обычной конструкции, подробно описанной в [5], и открытый газовый диод. Вывод электронного пучка в первом диоде осуществлялся через AlBe-фольгу толщиной  $45\text{ }\mu\text{m}$ , а разряд формировался между цилиндрическим катодом и плоским анодом (фольгой). Расстояние между катодом и плоскостью фольги равнялось  $12\text{--}20\text{ mm}$ . Также проводились эксперименты при использовании фольги из алюминия, меди и тантала различной толщины.

В случае открытого газонаполненного диода (ОГД) фольга убиралась, или вместо нее устанавливалась лавсановая пленка. Это приводило к формированию разряда между тем же цилиндрическим катодом и внутренней

поверхностью цилиндрического анода (металлического корпуса газового диода). Внутренний диаметр цилиндрического анода равнялся 47 mm. При малом зазоре между пленкой и катодом диффузный разряд замыкался на анод по поверхности пленки. Катодом служила трубка из стальной фольги толщиной 50  $\mu\text{m}$  и диаметром 6 mm.

Низковольтные генераторы формировали монополярные импульсы напряжения длительностью 2, 1 и 0.5 ns по уровню 0.1 с амплитудой падающей волны 200–300 V и биполярные импульсы напряжения длительностью 0.5 ns с амплитудой падающей волны +30...–30 V. Данные генераторы использовались для исследования СШП-излучения в макете диода. Макет представлял собой линию длиной 10 cm со стандартным 50 Ohm входным разъемом (*N*-типа). Геометрия выходной части макета примерно соответствовала геометрии ОГД, используемого с генератором РАДАН. Центральным электродом служила медная трубка толщиной 0.5 mm и диаметром 6 mm, он на 12 mm был заглублен внутрь внешнего электрода. Расстояние между центральным и внешним электродами по радиусу равнялось 19 mm. Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) макета находился с помощью измерителя комплексных коэффициентов передачи Agilent 8719ET (0.05–13.5 GHz). КСВН макета спадает с 30 до 4 на частотах от 2 до 6 GHz. Следовательно, можно ожидать излучение макетом СШП-импульсов со спектральными составляющими > 2 GHz.

Ток пучка электронов за фольгой измерялся с помощью коллекторов. Коллектором № 1 служил медный диск диаметром 49 mm, установленный на расстоянии 10 mm от фольги. Диск нагружался на коаксиальный кабель. Коллектором № 2 служил центральный проводник высокочастотного кабеля с волновым сопротивлением 50 Ohm. Для регистрации сигналов использовался цифровой осциллограф Tektronix TDS6604 (6 GHz, 20 GS/s). Интегральная картина свечения разряда фотографировалась фотоаппаратом ЗЕНИТ с открытым затвором. Фотография интегрального свечения разряда ОГД в видимой области спектра при давлении воздуха в 1 атмосферу представлена на рис. 1. Видно, что разряд носит диффузный (объемный) характер, и только на электродах видны сгустки плотной плазмы. Наличие рентгеновского излучения определялось по потемнению пленки РФ-3, которая помещалась в черную бумагу толщиной ~ 100  $\mu\text{m}$  и располагалась за фольгой, а также с помощью дозиметра Arrow-Tech, Inc. Model 138, который регистрировал рентгеновское излучение с энергией квантов более 16 keV.

Излучение в УФ, видимой и ближней ИК области спектра регистрировалось через световод спектрографом EPP-2000C (Stellar-Net Inc.), снабженным дифракционной решеткой и фотодиодной линейкой. Данный спектрограф позволяет регистрировать оцифрованные спектры излучения в диапазоне 200–850 nm с разрешением 1.5 nm. Спектр излучения записывался после накопления 100 импульсов. Из полученного спектра вычиталась темновая составляющая, и производился учет

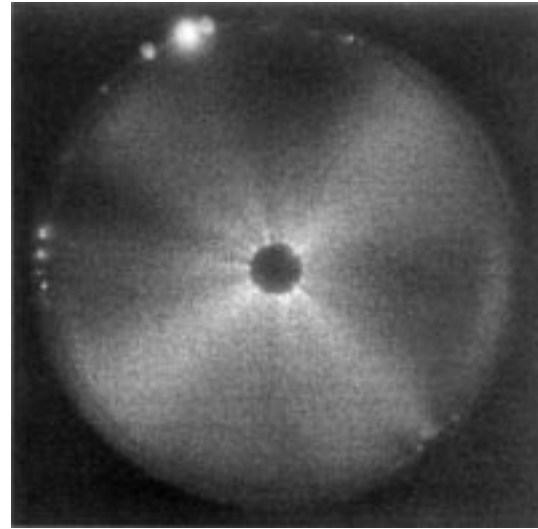


Рис. 1. Фотография свечения разряда в газовом диоде через лавсановую пленку. Расстояние от катода до пленки 20 mm.

чувствительности спектрографа, а также пропускания световода.

СШП-излучение из ОГД регистрировалось с помощью приемной ТЕМ-антенны, аналогичной [21]. Для исследования характеристик канала регистрации использовался измеритель Agilent 8719ET. Канал регистрации СШП-излучения состоял из приемной ТЕМ-антенны,

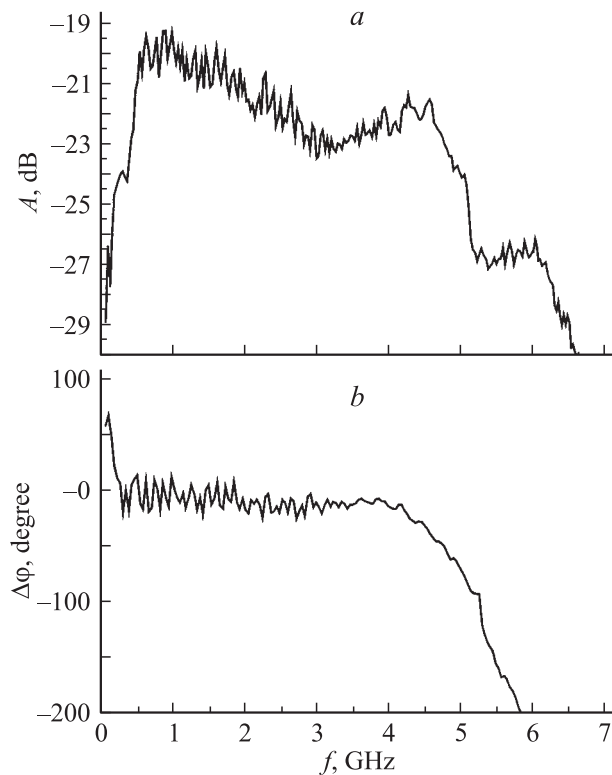


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика (a) и отклонение от линейной фазо-частотной характеристики (b) приемного тракта.

фидера (кабель РК-50-7-11 длиной 3 м), аттенюаторов фирмы Radial, переходника N-SMA-типа фирмы Radial и осциллографа TDS6604. При регистрации СШП-излучения макета из канала регистрации удалялись аттенюаторы. Полоса пропускания аттенюаторов и переходника составляет 18 GHz. Неоднородность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) приемной ТЕМ-антенны с фидером (рис. 2, *a*), в полосе частот 0.4–4.8 GHz не превышает 3.5 dB. Отклонение фазо-частотной характеристики (ФЧХ) ТЕМ-антенны с фидером от линейной (рис. 2, *b*) в полосе частот 0.4–4.8 GHz не более  $\pm 20^\circ$ . Следовательно, данная антенна пригодна для малоискаженной регистрации СШП-импульсов, спектр которых, в основном, находится в данном диапазоне частот. Спад АЧХ в полосе 4.8–6 GHz равен 3.5 dB, а отклонение ФЧХ от линейной достигают  $200^\circ$  и, следовательно, в данном диапазоне частот приемную антенну уже нельзя рассматривать как малоискажающую.

Расстояние между излучающей апертурой макета или ОГД генератора РАДАН и приемной антенной составляло  $R = 1.3$  м, что соответствовало дальней зоне излучения для частот  $\leq 8.7$  GHz с учетом фланца диаметром 15 см на выходе ОГД. Напряженность электрического поля измерялась в соответствии с методикой, приведенной в работе [21].

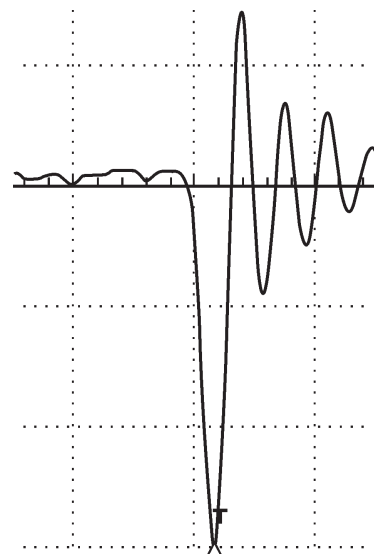
## Результаты экспериментов

При использовании генератора РАДАН-220 были проведены измерения:

- пространственно-временных характеристик широкополосного электромагнитного излучения;
- спектров излучения плазмы разряда в УФ, видимой и ближней ИК областях спектра;
- характеристик рентгеновского излучения в различных условиях. Были сняты на фотопленку автографы рентгеновского излучения, а также одновременно регистрировалась экспозиционная доза рентгеновского излучения;
- зарегистрированы осциллограммы тока пучка за фольгой и импульсы СШП-излучения за лавсановой пленкой.

При использовании низковольтных генераторов были проведены сравнительные измерения пространственно-временных характеристик СШП-излучения. В этом случае пробой воздуха в макете отсутствовал, соответственно не было излучения в других областях спектра. Основные результаты измерений следующие.

При подаче напряжения на газонаполненный диод, закрытый фольгой, регистрируется электронный пучок за фольгой и рентгеновское излучение. Осциллограмма электронного пучка, полученная на коллекторе малого размера (№ 2) при максимальном разрешении регистрирующей системы, приведена на рис. 3. Видно, что длительность импульса тока пучка на полувывоте менее 0.1 ns. Наличие осцилляций после основного импульса может быть обусловлено ограниченностью полосы

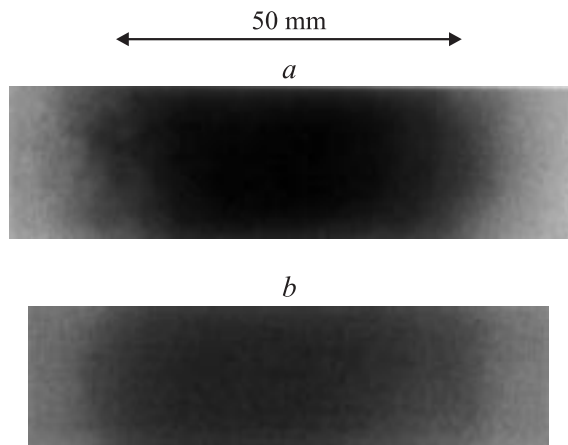


**Рис. 3.** Осциллограмма импульса тока пучка электронов, полученная за AlBe-фольгой толщиной  $45 \mu\text{m}$  при заполнении газового диода воздухом атмосферного давления. Коллектор № 2, генератор РАДАН-220; масштаб по горизонтали 500 ps/division, по вертикали — 0.04 A/division.

пропускания системы регистрации. Улучшение разрешения системы регистрации по сравнению с предыдущими измерениями [2–5] привело к сокращению длительности импульса тока пучка.

Интенсивность радиочастотного излучения только от генератора РАДАН (эксперимент с толстой фольгой, которая полностью поглощает электронный пучок) сравнительно слабая и обусловлена, в основном, неполной экранировкой электрических цепей РАДАНА и ОГД. Максимальная напряженность электрического поля на расстоянии 1.3 м составила менее 400 V/m. Интенсивность радиочастотного излучения при выводе электронного пучка в воздух через тонкую фольгу была также малой. Она практически не отличалась от интенсивности радиочастотного излучения генератора РАДАН.

Интенсивность рентгеновского излучения, регистрируемого дозиметром, зависела от материала и толщины фольги. Максимальная экспозиционная доза, зафиксированная дозиметром на расстоянии 1 см от AlBe-фольги толщиной  $45 \mu\text{m}$ , составила 300 mR. Расчет полной экспозиционной дозы не проводился, так как стенки газового диода не позволяли снять распределение экспозиционной дозы по всем направлениям. Регистрация автографов рентгеновского излучения в этих условиях с помощью фотопленки показала, что при использовании тонкой фольги или пленки из диэлектрика, достаточно одного импульса для ее сильной засветки, рис. 4. Однако с увеличением толщины фольги ( $350 \mu\text{m}$  Al) для заметной засветки фотопленки требуется уже несколько сотен импульсов. Измерения с помощью фотопленок и дозиметра показали, что в газовом диоде имеется по меньшей мере две группы быстрых электронов.



**Рис. 4.** Фотографии почернения фотопленки РФ-3, помещенной в черную бумагу толщиной  $100\ \mu\text{m}$ . Зазор между катодом и плоскостью фольги  $16\ \text{mm}$ . *a* – диод закрыт пленкой из диэлектрика толщиной  $100\ \mu\text{m}$ , *b* – диод закрыт Al-фольгой толщиной  $20\ \mu\text{m}$ .

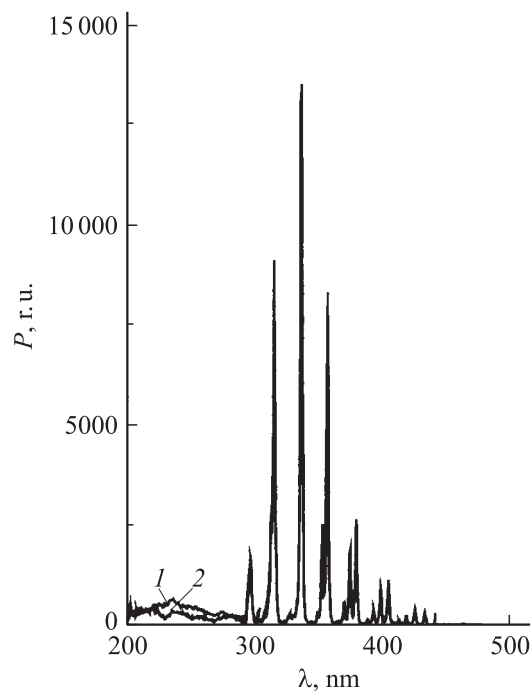
Первая имеет энергию от единиц до десятков keV. Эти электроны теряют свою энергию, в основном, при столкновениях с молекулами воздуха и ответственны за рентгеновское излучение из разрядного промежутка. Подробно исследования данной группы электронов при полной длительности импульса напряжения  $170\ \text{ns}$  и длительности его переднего фронта  $10\ \text{ns}$  были выполнены в работе [16]. Вторая группа электронов имеет энергию  $\sim 100\ \text{keV}$  [2–5] и в данных условиях (субнаносекундная длительность фронта импульса напряжения и малая индуктивность газонаполненного диода [4]) формируется в прианодной области (СЛЭП). При торможении убегающих электронов (СЛЭП) на аноде регистрируется жесткое рентгеновское излучение.

При замене Al-фольги на лавсановую пленку наблюдалось резкое (более чем на порядок) возрастание амплитуды сигнала на коллекторе № 1, который использовался для регистрации электронного пучка. При этом почернение фотопленки в экспериментах с  $20\ \mu\text{m}$  Al-фольгой и с пленкой из диэлектрика практически не отличались, рис. 4. Как показывают данные эксперименты, значительное увеличение амплитуды сигнала с коллектора, установленного после ОГД, обусловлено регистрацией на коллекторе СШП-излучения. Этот результат также подтверждается сохранением амплитуды сигнала с коллектора при увеличении толщины диэлектрической пленки (пластинки) более чем на порядок (до  $2\ \text{mm}$ ). При этом, как и следовало ожидать, при использовании толстых диэлектрических пленок почернения фотопленки за один импульс не наблюдалось. Мы полагаем, что в работах [22,23], в которых использовались газовые диоды с двумя лавсановыми пленками в промежутке, возможность генерации СШП-излучения не была учтена, и радиочастотное излучение могло быть принято за ток пучка убегающих электронов, что подтверждают последующие опубликованные результа-

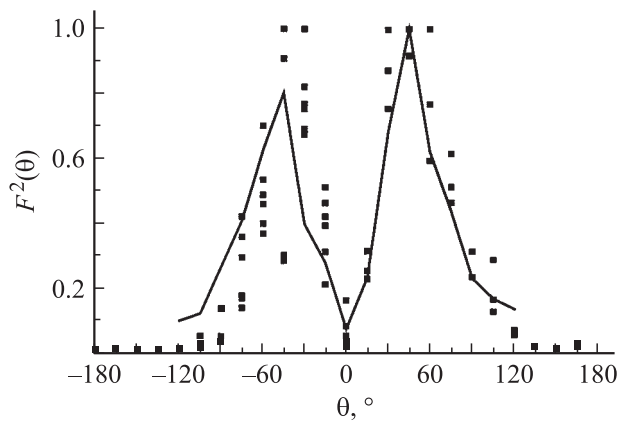
ты. В [22,23] утверждается, что минимум зависимости амплитуды тока пучка от давления газа не зависит от сорта газа и что длительность импульса тока пучка в газовом диоде достигает  $15\text{--}20\ \text{ns}$ .

При подаче напряжения на открытый газовый диод регистрируется электромагнитное излучение в радиочастотной, рентгеновской и оптической областях спектра. Спектрограмма излучения в области  $200\text{--}850\ \text{nm}$  приведена на рис. 5. Наибольшую интенсивность имеет полоса второй положительной системы азота с максимумами на длине волны  $337\ \text{nm}$ . Интенсивность излучения в диапазоне  $200\text{--}300\ \text{nm}$  различается в прикатодной области и промежутке. Плотная плазма у катода имеет большую интенсивность излучения в области  $\sim 250\ \text{nm}$  (кривая 1).

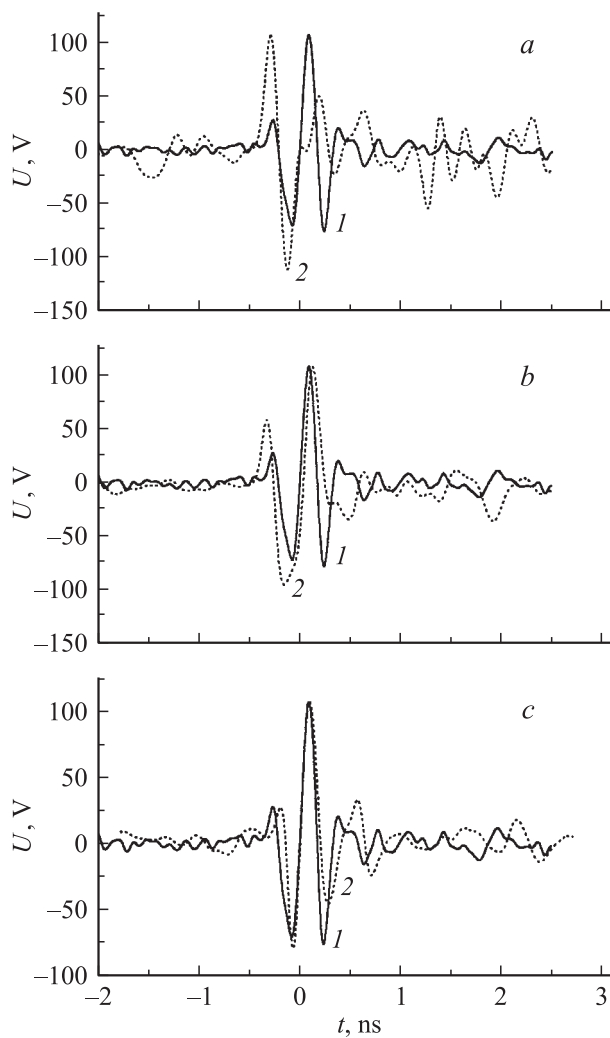
Из измерений пространственного распределения СШП-излучения ОГД и макета (для всех низковольтных генераторов) следует, что оно радиально поляризовано. Диаграмма направленности (ДН) по пиковой мощности СШП-излучения ОГД генератора РАДАН и макета при возбуждении его монополярными импульсами  $0.5\ \text{ns}$  представлены на рис. 6. Как видно из приведенных данных, максимум ДН СШП-излучения соответствует углам  $\theta = \pm 45^\circ$ , а ДН РАДАНА и макета удовлетворительно согласуются. Осциллограммы импульсов излучения макета при его возбуждении монополярными импульсами напряжения длительностью  $2$ ,  $0.5\ \text{ns}$  и биполярным импульсом длительностью  $0.5\ \text{ns}$  приведены на рис. 7, *a, b, c* соответственно. Здесь же для сравнения приведен импульс излучения ОГД с генератором РАДАН. Все импульсы излучения приведены для



**Рис. 5.** Спектрограммы излучения из открытого газонаполненного диода при разряде в воздухе атмосферного давления. 1 — приемник излучения смещен в сторону катода, 2 — приемник в центре промежутка.



**Рис. 6.** Диаграммы направленности сверхширокополосного излучения открытого газонаполненного диода с генератором РАДАН (квадратики) и макета (кривая).

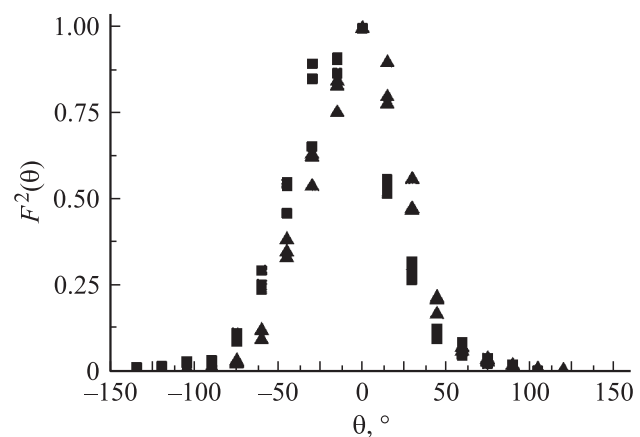


**Рис. 7.** Осциллограммы сверхширокополосных излученных импульсов. 1 — открытый газонаполненный диод с генератором РАДАН, 2 — макет при различных импульсах возбуждения.

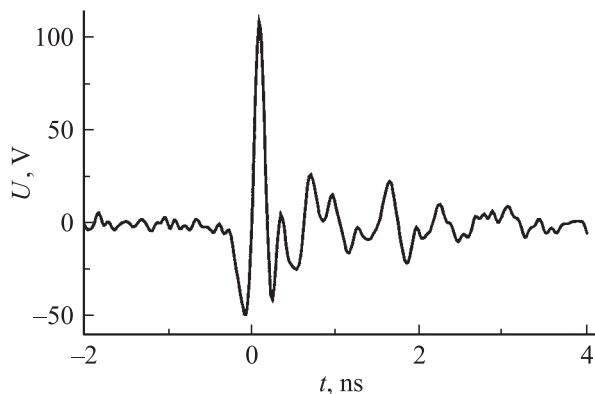
одного угла ДН, равного  $45^\circ$ . Видно, что излучаемые импульсы РАДАНА и макета отличаются. Наилучшее согласие форм излученных импульсов соответствует возбуждению макета биполярным (рис. 7, *c*) и монополярным (рис. 7, *b*) импульсами длительностью 0.5 ns. Удовлетворительное совпадение СШП-импульсов наблюдается для углов наблюдения  $\theta \leq 45^\circ$ , а для  $\theta \geq 60^\circ$  в излучении ОГД возрастает количество временных лепестков. Максимумы спектров излучения ОГД генератора РАДАН и макета, возбуждаемого биполярным импульсом длительностью 0.5 ns, близки и соответствуют частотам 2.7 и 2.5 GHz соответственно.

Пиковая напряженность электрического поля излучаемого ОГД составляет  $E = 5.4 \text{ kV/m}$  и в 1500 раз больше напряженности поля макета при возбуждении его монополярным импульсом длительностью 0.5 ns. При возбуждении макета биполярным импульсом длительностью 0.5 ns пиковая напряженность электрического поля в 3000 раз меньше напряженности поля ОГД генератора РАДАН. При возбуждении макета монополярными импульсами длительностью 1 и 2 ns регистрировались такие же напряженности электрического поля, как и в случае возбуждения его биполярными импульсами длительностью 0.5 ns.

Были проведены также исследования СШП-излучения для геометрии ОГД, в которой катодом являлась металлическая пластина в форме сектора с вершиной на оси генератора РАДАН, направленная своим раскрытием к аноду. Угол при вершине сектора  $30^\circ$ , толщина пластины равна 0.25 mm. Зазор катод-анод равнялся 10 mm. СШП-излучение в данном случае линейно поляризовано и вектор электрического поля  $\mathbf{E}$  ориентирован параллельно биссектрисе сектора. ДН СШП-излучения по пиковой мощности для  $E$ - и  $H$ -плоскостей представлены на рис. 8. Пиковая напряженность электрического поля в направлении максимума излучения ( $\theta = 0^\circ$ ) равна  $E = 5.4 \text{ kV/m}$ . Уровень кроссполаризованного излучения по пиковой плотности мощности не превышает 25% от пиковой плотности мощности в главном



**Рис. 8.** Диаграммы направленности линейно-поляризованного сверхширокополосного излучения открытого газонаполненного диода с генератором РАДАН. ■ —  $E$ -плоскость, ▲ —  $H$ -плоскость.



**Рис. 9.** Осциллограмма излучаемого сверхширокополосного импульса открытого газонаполненного диода с генератором РАДАН для секторной геометрии катода.

направлении линейно-поляризованного излучения. Осциллограмма импульса излучения в главном направлении ДН приведена на рис. 9. Длительность импульса СШП-излучения в данном случае составляет  $\sim 0.5$  ns.

## Обсуждение полученных результатов

Интерпретация полученных результатов следующая. При подаче высоковольтного импульса напряжения с субнаносекундным передним фронтом на газонаполненный диод (в данном случае воздухом атмосферного давления) с катодом, имеющим малый радиус кривизны, за время менее  $0.7$  ns происходит его пробой. При этом плазма за счет усиления поля на макро- и микронеоднородностях возникает сначала у катода, а затем фронт ионизации распространяется к аноду и переключает промежуток [24]. В этих условиях без дополнительной предионизации формируется объемный (диффузный) разряд. Более того, как было показано в [25–27], на объемный характер разряда не оказывают влияния полярность наносекундного импульса напряжения и конструкция электродов. Плазма такого наносекундного разряда во время ее формирования при отрицательной полярности электрода с малым радиусом кривизны является эффективным источником мягкого рентгеновского излучения. Быстрые электроны формируются за счет усиления поля у катода (неоднородности на катоде и сгустках плотной плазмы) и в промежутке (избыточный отрицательный заряд на фронте волны ионизации). Отметим, что поляризационное самоускорение электронов до больших энергий при формировании стримера было предложено в [28]. Жесткое рентгеновское излучение ( $\sim 100$  keV) формируется, в основном, при торможении СЛЭП на аноде.

Оптическое излучение УФ, видимого и ИК диапазонов обусловлено возбуждением и ионизацией газа во время всего импульса разряда, мощность излучения в УФ области спектра для второй положительной системы азота при использовании генератора РАНАН-220 составила  $\sim 40$  kW, а длительность импульса излучения не

превышала  $\sim 5$  ns [6]. Удельная мощность возбуждения в ОРИПЭЛ, как мы уже отмечали выше, может достигать  $0.8$  MW/cm<sup>3</sup> [7]. Источником широкополосного излучения в области  $200$ – $300$  nm являются сгустки плотной плазмы у катода.

СШП-излучение ОГД формируется как за счет импульса напряжения, прикладываемого к газонаполненному диоду, так и за счет изменения тока в диоде во время развития пробоя. Причем время переключения плазмой промежутка можно оценить по длительности импульса СШП-излучения из газового диода. Как мы отмечали выше, в экспериментах при низком напряжении (без пробоя промежутка) и в экспериментах на генераторе РАДАН длительности импульсов СШП-излучения близки при длительности импульса низковольтного генератора  $0.5$  ns и составляют  $\sim 0.7$  ns; т.е. время переключения плазмой, в течение которого и существует СШП-излучение, не превышает  $0.7$  ns. На основании исследований можно предположить, что импульс тока в начальной стадии разряда близок по форме к биполярному длительностью  $\sim 0.5$  ns.

## Заключение

Таким образом, проведенные исследования показывают, что открытые газовые диоды являются источником электромагнитного излучения в различных областях спектра. При объемном разряде в воздухе атмосферного давления получены субнаносекундные импульсы СШП-излучения, а также зарегистрировано рентгеновское излучение из газоразрядной плазмы и металлического анода.

При аксиальной симметрии катода и анода в источнике на основе РАДАНА с напряжением на диоде до  $220$  kV формируются импульсы СШП-излучения с радиальной поляризацией поля и эффективным потенциалом  $ER = 6$  kV. При катоде в виде сегмента и плазме разряда, сосредоточенной в одной области, формируется СШП-излучение с линейной поляризацией и эффективным потенциалом  $ER = 6$  kV. Длительность импульса СШП-излучения не превышает  $0.7$  ns, что позволяет оценить время переключения разрядного промежутка плазмой. Существование различий в формах импульсов излучения на источниках ОГД с генератором РАДАН и макет указывает на влияние разряда в ОГД на характеристики излучения.

## Список литературы

- [1] Бабич Л.П., Лойко Т.В., Тарасова Л.В. // ПТЭ. 1977. № 1. С. 203–205.
- [2] Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. // Изв. вузов. Физика. 2003. Т. 46. № 3. С. 94–95.
- [3] Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И., Орловский В.М., Ткачев А.Н., Шунайлов С.А. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77. Вып. 11. С. 737–742.

- [4] *Tarasenko V.F., Skakun V.S., Kostyrya I.D., Alekseev S.B., Orlovskii V.M.* // Laser and Particle Beams. 2004. Vol. 22. N 1. P. 75–82.
- [5] *Тарасенко В.Ф., Алексеев С.Б., Орловский В.М., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И.* // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 8. С. 30–34.
- [6] *Костыря И.Д., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В.* // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 8. С. 35–40.
- [7] *Алексеев С.Б., Губанов В.П., Костыря И.Д., Орловский В.М., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф.* // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 11. С. 1007–1010.
- [8] *Алексеев С.Б., Губанов В.П., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 20. С. 35–41.
- [9] *Алексеев С.Б., Губанов В.П., Орловский В.М., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф.* // ДАН. 2004. Т. 398. № 5. С. 611–614.
- [10] *Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф.* // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. № 12. С. 1059–1061.
- [11] *Липатов Е.И., Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Алексеев С.Б., Рыбка Д.В.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 6. С. 29–33.
- [12] *Губанов В.П., Коровин С.Д., Пегель И.В., Ростов В.В., Степченко А.С., Тараканов В.П.* // Изв. вузов. Физика. 1996. № 12. С. 110–118.
- [13] *Губанов В.П., Коровин С.Д., Пегель И.В., Ростов В.В., Степченко А.С., Ульмаскулов, Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 14. С. 89–93.
- [14] *Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Визирь В.А., Ефремов А.М., Зорин В.Б., Ковальчук Б.М., Кошелев В.И., Сухушин К.Н.* // ПТЭ. 1997. № 5. С. 72–76.
- [15] *Павловский А.И., Босамыкин В.С., Карелин В.И., Никольский В.С.* // Квантовая электроника. 1976. Т. 3. № 3. С. 601–604.
- [16] *Ретин Б.П., Репьев А.Г.* // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 7. С. 33–37.
- [17] *Коляда Ю.Е.* // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 16. С. 52–56.
- [18] *Алексеев С.Б., Губанов В.П., Орловский В.М., Степченко А.С., Тарасенко В.Ф.* // ПТЭ. 2003. № 4. С. 81–84.
- [19] *Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г., Юрике Я.Я., Яландин М.И.* // ПТЭ. 1989. № 2. С. 146–149.
- [20] *Яландин М.И., Шпак В.Г.* // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5–31.
- [21] *Andreev Yu.A., Gubanov V.P., Efremov A.M., Koshelev V.I., Korovin S.D., Kovalchuk V.M., Kremnev V.V., Plisko V.V., Stepchenko A.S., Sukhushin K.N.* // Laser and Particle Beams. 2003. Vol. 21. N 2. P. 211–217.
- [22] *Королев В.С., Мальцев А.Н.* // Изв. вузов. Физика. 1992. № 2. С. 7–9.
- [23] *Королев В.С., Мальцев А.Н.* // Изв. вузов. Физика. 1993. № 6. С. 67–70.
- [24] *Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И.* // УФН. 2004. Т. 174. № 9. С. 953–971.
- [25] *Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф.* // Изв. вузов. Физика. 2004. Т. 47. № 12. С. 85–86.
- [26] *Костыря И.Д., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н., Яковленко С.И.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 7. С. 65–69.
- [27] *Костыря И.Д., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н., Яковленко С.И.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 7. С. 19–26.
- [28] *Аскаръян Г.А.* // Труды ФИАН. 1973. Т. 66. С. 66–72.