

## НАПРАВЛЕННОСТЬ СВЕРХИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ПЛАЗМЫ СИЛЬНОТОЧНОГО ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДИОДА

*А.Ф. Целуйко, В.Т. Лазурик, Д.Л. Рябчиков, И.Н. Серета, Д.В. Зиновьев, Е.В. Боргун*  
Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, Украина  
*E-mail: tselujko@htuni.kharkov.ua*

Исследуется интенсивность и направленность сверхизлучения в диапазоне длин волн 12,2...15,8 нм, которое наблюдается в виде серии мощных пиков длительностью 50...100 нс на фоне рекомбинационного излучения в сильноточном импульсном плазменном диоде, работающем на парах олова. Генерация сверхизлучения происходит в плотной прианодной плазме при плотностях анодного тока 0,1...0,7 МА/см<sup>2</sup> в индуктивной стадии развития разряда. Показано, что интенсивность и преимущественная направленность сверхизлучения зависят от разрядного напряжения, диаметра анода и различны для разных пиков.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования связаны с созданием интенсивного плазменного источника излучения с длиной волны  $\lambda = 13,5$  нм для нанолитографии. Длина волны обусловлена минимальными потерями на неполное отражение, которые для уменьшающей изображение брегговской оптики лежат в диапазоне длин волн (13,4±2) нм.

В настоящей работе излучение формируется в результате рекомбинации многократно ионизованных атомов олова. Создание и разогрев плазмы осуществляется в сильноточном плазменном диоде за счет разряда конденсатора емкостью 2 мкФ. Использование олова обусловлено наличием в спектре излучения мощной линии с длиной волны 13,5 нм и тем, что для олова прогнозируется высокая энергетическая эффективность источника [1].

В работе [2] было показано, что в таких условиях при начальном энергозапасе конденсатора более 20 Дж на фоне обычного рекомбинационного излучения в индуктивной стадии развития разряда наблюдается сверхизлучение в виде серии мощных пиков длительностью 50...100 нс. Пики излучения, как правило, наблюдаются в первых трех-четырех полупериодах протекания разрядного тока. В работе [3] отмечалось, что сверхизлучение у разных пиков имеет преимущественно либо продольную, либо поперечную направленность.

Целью данной работы было обобщение результатов, полученных в работах [2, 3], а также определение влияния диаметра анода на интенсивность и направленность сверхизлучения.

### 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Ток в диоде возбуждался разрядом конденсатора емкостью 2 мкФ между покрытыми оловом электродами при стартовом давлении  $2 \cdot 10^{-6}$  Торр. Длина разрядного промежутка составляла 5 см. Для вывода излучения в продольном направлении катод имел трубчатую конфигурацию. Внешний диаметр катода составлял 1 см, внутренний – 0,7 см. В экспериментах использовались стержневые аноды диаметром 0,15; 0,25 и 0,5 см. Для локализации тока разряда на торец анода его боковая поверхность была закрыта керамической трубкой. Индуктивность разрядной цепи составляла 0,15 мкГн, разрядное напряжение 4...15 кВ, амплитуда тока – 5...35 кА, плотность

тока на анод – 0,1...0,7 МА/см<sup>2</sup>, полупериод колебаний тока – 1,5 мкс.

Инициирование разряда происходило после предварительного заполнения разрядного промежутка первичной плазмой вследствие поверхностного пробоя на катоде с помощью трех поджигающих электродов. Импульсное напряжение 0,5...5,0 кВ подавалось на поджигающие электроды через синхронизирующий дроссель от конденсатора емкостью 0,025 мкФ. Коммутация поджигающего напряжения осуществлялась тиратроном, ток поджига ограничивался индуктивностью 400 мкГн.

Излучение регистрировалось одновременно вдоль и поперек разряда с помощью калиброванных датчиков AXUV-20, имеющих входные оптические фильтры с полосой пропускания в диапазоне длин волн 12,2...15,8 нм. Имелась возможность пространственного сканирования разрядного промежутка боковым датчиком.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате экспериментов было установлено, что интенсивность и направленность сверхизлучения существенно зависят от разрядного напряжения и диаметра анода. Сверхизлучение в исследуемом диапазоне длин волн наблюдалось в первых трех полупериодах колебаний разрядного тока. Вне зависимости от направления тока в индуктивной стадии разряда зоной генерации излучения служила прианодная область протяженностью 0,5...1,0 см и диаметром  $< 0,5$  см.

На Рис.1 показаны характерные осциллограммы тока и напряжения разряда, а также интенсивности излучения в диапазоне длин волн 12,2...15,8 нм поперек и вдоль разряда для анода диаметром  $d_a = 0,25$  см и разрядных напряжений до 10 кВ.

В первом полупериоде колебаний тока разряда при напряжениях до 10 кВ, как правило, наблюдался широкий импульс излучения относительно малой амплитуды. Его длительность совпадала с длительностью полупериода колебаний тока. При напряжениях свыше 10 кВ на фоне широкого импульса обычного рекомбинационного излучения появлялся узкий пиковый импульс сверхизлучения длительностью ~200 нс, интенсивность которого росла с увеличением разрядного напряжения.

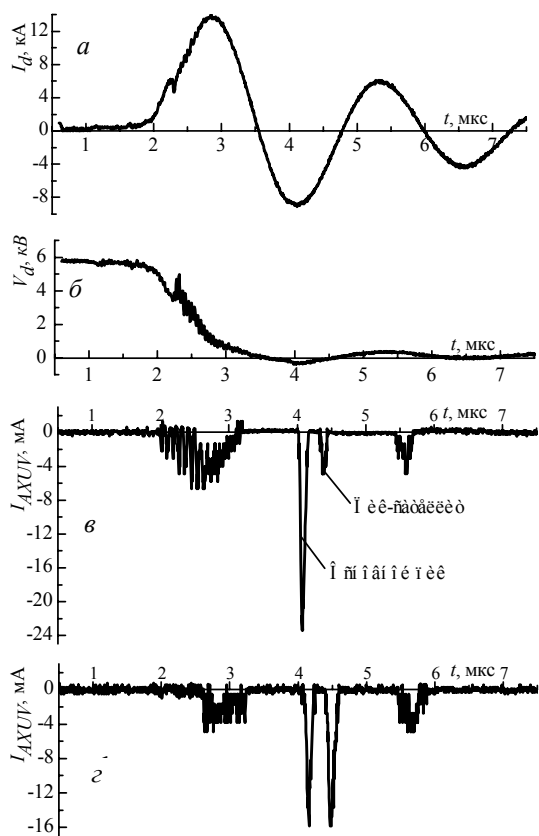


Рис. 1. Осциллограммы тока (а) и напряжения (б) разряда, интенсивности излучения в диапазоне длин волн 12,2...15,8 нм поперек (в) и вдоль (г) разряда при  $V_0 = 6$  кВ,  $d_a = 0,25$  см

В узком пиковом импульсе было сосредоточено свыше 70% энергии, излученной за первый полупериод. Время возникновения узкого пикового импульса зависело от напряжения поджига. (Чем выше напряжение, тем раньше появлялся пиковый импульс). Интенсивность сверхизлучения вдоль и поперек разряда при повышенном разрядном напряжении демонстрирует Рис.2. Из него видно, что пиковое сверхизлучение в первом полупериоде имеет ярко выраженную продольную направленность.

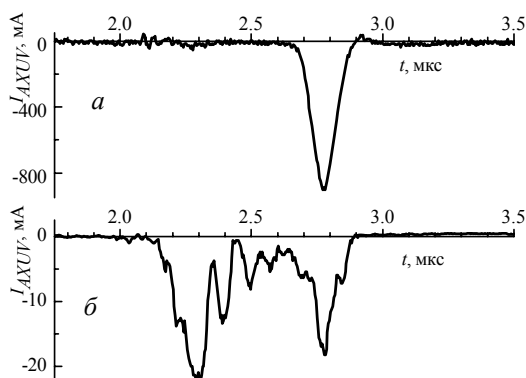


Рис.2. Интенсивность излучения в первом полупериоде тока разряда вдоль (а) и поперек (б) разряда при  $V_0 = 13$  кВ,  $d_a = 0,25$  см

Рис.3 показывает зависимости отношений продольной и поперечной составляющих интенсивности сверхизлучения от напряжения разряда и напряжений поджига для первого полупериода раз-

рядного тока в случае использования анода диаметром 0,25 см. Из графиков видны существенное увеличение продольной направленности излучения с ростом разрядного напряжения и слабая зависимость направленности излучения от напряжения поджига.

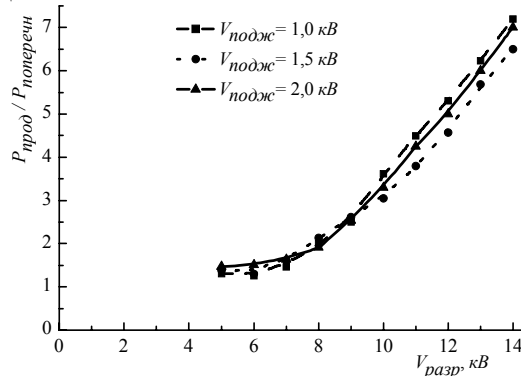


Рис.3. Зависимость отношения продольной и поперечной составляющих интенсивности излучения от напряжения разряда и напряжений поджига для первого полупериода разрядного тока при  $d_a = 0,25$  см

Следует отметить, что уменьшение диаметра анода с 0,25 см до 0,15 мм приводит к увеличению продольной направленности сверхизлучения в первом полупериоде. При разрядных напряжениях 12...14 кВ продольная составляющая интенсивности сверхизлучения более чем в 50 раз может превышать поперечную, однако общая интенсивность сверхизлучения при этом снижается. Увеличение диаметра анода до 0,5 см ведет к существенному росту общей интенсивности сверхизлучения, но при этом продольная направленность резко падает, стремясь к единице.

Во втором полупериоде (см. Рис.1) для всех используемых анодов импульсы излучения носили исключительно пиковый характер сверхизлучения с длительностью  $< 200$  нс, что существенно меньше длительности полупериода тока. Эти импульсы излучения наблюдались всегда на максимуме тока. Кроме того, при разрядных напряжениях 5...8 кВ, помимо основного пика сверхизлучения, наблюдался дополнительный пик-спутник длительностью  $\sim 200$  нс, который следовал за основным пиком через 200 нс.

Основные пики сверхизлучения наблюдались при амплитуде тока более 10 кА. Их интенсивность возрастала с ростом разрядного напряжения, однако они полностью исчезали при увеличении разрядного напряжения свыше 10 кВ в случае использования анодов диаметром 0,15 и 0,25 см. Для анода диаметром 0,5 см основные пики сверхизлучения наблюдались во всем исследуемом диапазоне разрядных напряжений. Интенсивность пика-спутника также возрастала с увеличением разрядного напряжения, но при напряжениях свыше 8 кВ пик-спутник исчезал.

Излучение основного пика и пика-спутника имело различную направленность. Для основного пика излучение происходило преимущественно в поперечном направлении, а пика-спутника – в продольном. На Рис.4 приведены зависимости направ-

ленности сверхизлучения основного пика во втором полупериоде от напряжения разряда и напряжения поджига. С ростом разрядного напряжения происходит увеличение поперечной составляющей излучения. Зависимость направленности излучения от напряжения поджига незначительна.

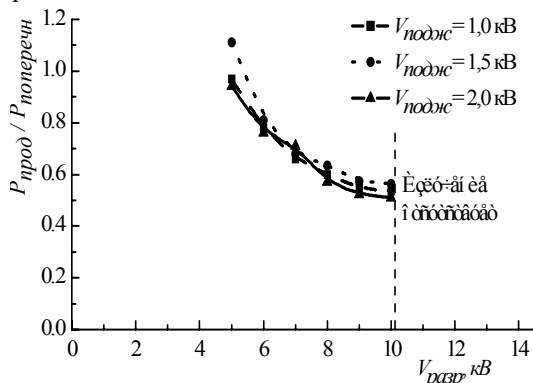


Рис.4. Зависимость отношения продольной и поперечной составляющих интенсивности излучения от напряжения разряда и напряжений поджига для основного пика во втором полупериоде при  $d_a = 0,25$  см

Рис.5 демонстрирует увеличение направленности излучения пика-спутника с ростом напряжения разряда. Прослеживается явная зависимость направленности от напряжения поджига.

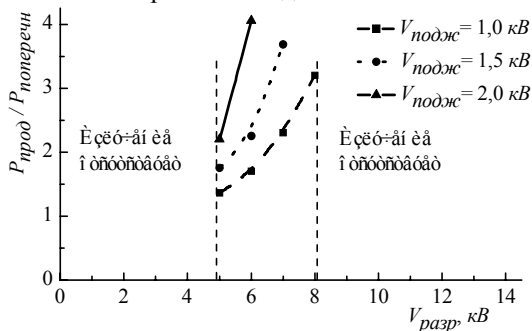


Рис.5. Зависимость отношения продольной и поперечной составляющих интенсивности излучения от напряжения разряда и напряжений поджига для пика-спутника во втором полупериоде при  $d_a = 0,25$  см

В третьем полупериоде для всех трех анодов вблизи максимума разрядного тока, как правило, наблюдался пиковый импульс сверхизлучения практически изотропной направленности с меньшей, по сравнению с предыдущими полупериодами, амплитудой. Его интенсивность также возрастала с увеличением разрядного напряжения и слабо зависела от напряжения поджига.

Зависимости от разрядного напряжения отношений суммарных за разрядный импульс продольной и поперечной составляющих интенсивности излучения приведены на Рис.6 для различных диаметров анодов. Максимальная продольная направленность суммарного излучения достигается для анода наименьшего диаметра (0,15 см). При этом продольная направленность увеличивается с ростом разрядного напряжения. Минимальная продольная направленность соответствует аноду наибольшего диаметра (0,5 см) и с изменением разрядного напряжения,

практически, не меняется. В случае анода промежуточного диаметра (0,25 см) продольная направленность снижается с ростом разрядного напряжения.

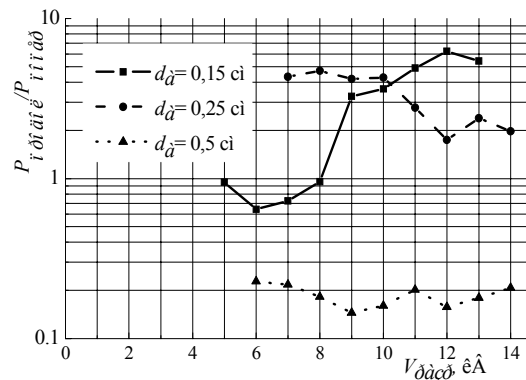


Рис.6. Зависимость отношения суммарных продольной и поперечной составляющих интенсивности излучения от напряжения разряда для анодов разного диаметра

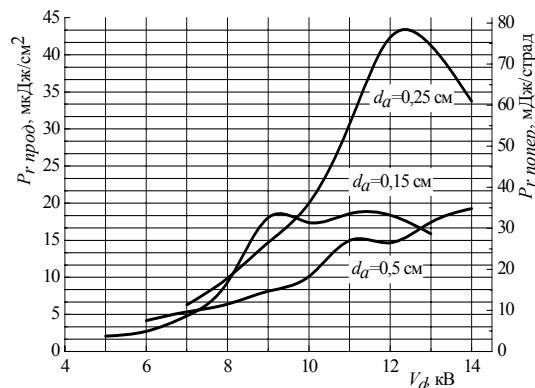


Рис.7. Зависимость суммарной продольной составляющей интенсивности излучения от напряжения разряда для анодов разного диаметра

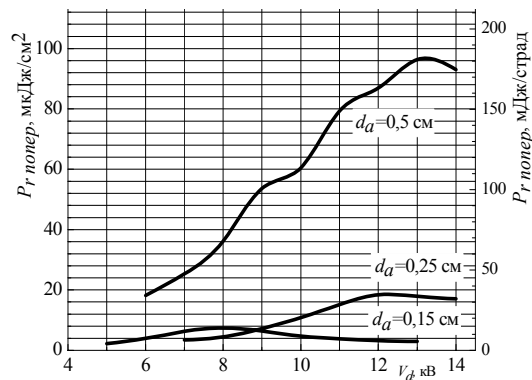


Рис.8. Зависимость суммарной поперечной составляющей интенсивности излучения от напряжения разряда для анодов разного диаметра

Зависимость от разрядного напряжения суммарной за разрядный импульс интенсивности сверхизлучения в продольном направлении приведена на Рис.7. Видно, что наибольшая продольная интенсивность излучения достигается при использовании анода диаметром 0,25 см. Кроме того, на общем фоне увеличения продольной интенсивности излучения с ростом разрядного напряжения для анодов диаметром 0,15 и 0,25 см в исследуемом диапазоне разрядных напряжений имеется предел по интенсивности излучения.

Зависимость суммарной поперечной интенсивности излучения от разрядного напряжения приведена на Рис.8. Максимальная поперечная интенсивность излучения наблюдается при использовании анода диаметром 0,5 см. Как и в случае продольной интенсивности излучения, для всех анодов имеется предел на рост поперечной составляющей интенсивности излучения по разрядному напряжению.

### ВЫВОДЫ

В работе экспериментально показано, что при превышении определенного уровня энергозапаса питающего конденсатора в сильноточном импульсном плазменном диоде в парах олова в индуктивной стадии при плотностях анодного тока  $0,1 \dots 0,7 \text{ MA/cm}^2$  на фоне обычного рекомбинационного излучения происходит генерация сверхизлучения в диапазоне длин волн  $12,2 \dots 15,8 \text{ nm}$  в виде серии острых пиков длительностью  $50 \dots 100 \text{ ns}$ .

Показано, что интенсивность и преимущественная направленность отдельных пиков зависят от разрядного напряжения и диаметра анода. В первом полупериоде разрядного тока пик излучения имеет продольную направленность. Во втором полупериоде на максимуме тока наблюдается основной пик излучения поперечной направленности, после которого следует пик-сателлит продольного излучения. В третьем полупериоде имеется пик изотропного излучения.

Измерение суммарной интенсивности излучения за полный разрядный импульс показало, что при малых анодах ( $d_a \sim 0,15 \text{ cm}$ ) излучение имеет острую продольную направленность, но интенсивность из-

лучения относительно невелика. Наибольшее излучение в продольном направлении достигается для анодов среднего размера ( $d_a \sim 0,25 \text{ cm}$ ), однако продольная направленность при этом снижается. Наибольшую интенсивность излучения обеспечивают аноды большого размера ( $d_a \sim 0,5 \text{ cm}$ ), когда излучение происходит преимущественно в поперечном направлении.

Зависимость параметров излучения от размеров анода позволяет сделать вывод о влиянии формы и размеров излучающей плазмы на интенсивность и направленность излучения отдельных пиков.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Сейсян. Нанолитография СБИС в экстремальном дальнем вакуумном ультрафиолете (Обзор) // *ЖТФ*. 2005, т.75, №5, с.1-13.
2. А.Ф. Целуйко, В.Т. Лазурик, Д.Л. Рябчиков, В.И. Маслов, И.Н. Серeda. Исследование излучения в диапазоне длин волн  $12,2 \dots 15,8 \text{ nm}$  из плазмы сильноточного импульсного плазменного диода // *Физика плазмы*. 2008, т.34, №11, с.1041-1046.
3. A.F. Tseluyko, V.T. Lazuryk, D.V. Ryabchikov, V.I. Maslov, N.A. Azarenkov, I.N. Sereda, D.V. Zinov'ev, N.N. Yunakov, A.A. Makienko. The Dynamics and Directions of Extreme Ultraviolet Radiation from Plasma of the High-Current Pulse Diode // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Plasma physics»*. 2009, №1, p.165-167.

*Статья поступила в редакцию 31.05.2010 г.*

### ORIENTATION OF SUPERRADIATION FROM PLASMA OF HIGH-CURRENT PULSE PLASMA DIODE

*A.F. Tseluyko, V.T. Lazuryk, D.V. Ryabchikov, I.N. Sereda, D.V. Zinov'ev, E.V. Borgun*

In this article the intensity and orientation of superradiation in the range of wavelengths  $12,2 \dots 15,8 \text{ nm}$  are investigated. The superradiation is observed as the series of the high-power peaks ( $\tau_{pulse} \sim 50 \dots 100 \text{ ns}$ ) against a background of the recombination radiation from the high-current pulse plasma diode, which works on the tin vapor. A near anode area is the region of the superradiation generation from dense plasma at the anode current density  $0,1 \dots 0,7 \text{ MA/cm}^2$  in inductive stage of the discharge. It is shown, that the intensity radiation and preferred orientation of radiation depend on a discharge voltage, a diameter of the anode and are various for different peaks.

### СПРЯМОВАНІСТЬ НАДВИПРОМІНЮВАННЯ З ПЛАЗМИ СИЛЬНОСТРУМНОГО ІМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМОВОГО ДІОДА

*О.Ф. Целуйко, В.Т. Лазурик, Д.Л. Рябчиков, І.М. Серeda, Д.В. Зінов'єв, Є.В. Боргун*

Досліджується інтенсивність та спрямованість надвипромінювання в діапазоні довжин хвиль  $12,2 \dots 15,8 \text{ nm}$ , що спостерігається у вигляді серій потужних піків тривалістю  $50 \dots 100 \text{ ns}$  на фоні рекомбінаційного випромінювання в сильноточному імпульсному плазмовому діоді, що працює на парах олова. Генерація надвипромінювання відбувається в щільній прианодній плазмі при щільності анодного струму  $0,1 \dots 0,7 \text{ MA/cm}^2$  в індуктивній стадії розвитку розряду. Показано, що інтенсивність та переважна спрямованість надвипромінювання залежать від розрядної напруги, діаметру анода і різні для різних піків.