

УДК 533.9.082

РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ШИРОКОЗОННЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ

© 2022 г. И. А. Барыков^{a, d}, И. Ю. Вичев^b, В. И. Зайцев^a,
В. М. Каневский^c, И. А. Тараканов^b, В. А. Федоров^{c, *}

^aАО “ГНЦ РФ ТРИНИТИ”, Троицк, 142092 Россия

^bИнститут прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, 125047 Россия

^cФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, 119333 Россия

^dРоссийский университет дружбы народов, Москва, 117198 Россия

*e-mail: fedorov-metrology@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.01.2022 г.

После доработки 07.02.2022 г.

Принята к публикации 07.02.2022 г.

Изучены эффекты, возникающие в диэлектриках (Al_2O_3 и SiO_2) в поле “мягкого” рентгеновского излучения высокой мощности. Экспериментальные исследования проводили на установке “Ангара-5-1”, в которой возможно достижение импульсной плотности мощности излучения источника вблизи расположения исследуемых образцов до 5 МВт/см^2 . Показано, что в приповерхностном слое облучаемой поверхности диэлектрика генерируются носители зарядов, что приводит к возникновению тока в цепи, включающей диэлектрик. Необходимым условием возникновения тока является наличие “горячих” электронов, которые обеспечивают поверхностную проводимость. Предложена математическая модель, описывающая процесс токовой генерации в диэлектриках при воздействии импульсного мощного рентгеновского излучения. Модель основана на совместном решении кинетических уравнений для рентгеновских фотонов, фотоэлектронов, электронов проводимости и дырок в валентной зоне и самосогласованных уравнений Максвелла. В уравнениях Максвелла вместо стороннего тока вторичных носителей заряда использован ток радиационной проводимости.

Ключевые слова: диэлектрики, поверхность, облучение, рентгеновское излучение, детекторы, проводимость, численное моделирование.

DOI: 10.31857/S1028096022090023

ВВЕДЕНИЕ

Развитие новых технологий, таких как, например, рентгеновская литография, управляемый термоядерный синтез, стимулировали интерес к процессам, возникающим под действием “жесткого” ультрафиолетового и “мягкого” рентгеновского излучения, в частности, к изменению электрических свойств материалов. В работах [1, 2] исследовано влияние достаточно “жесткого” рентгеновского излучения (100–300 кэВ) на электрические свойства таких типичных диэлектриков как сапфир и кварцевое стекло, которые часто используют в качестве изолирующих, конструктивных и оптических материалов. Было показано, что в процессе воздействия излучения в этих материалах возникает радиационная электропроводность, которая может быть объяснена на основе зонной теории. Получены значения энергетических затрат для возникновения пары носителей заряда в зоне проводимости. Они составили $\sim 75 \text{ эВ}$ в Al_2O_3 и около 150 эВ в образце аморфного SiO_2 . Спектральный состав и интенсивность потока рентгеновского излучения в этих работах не

были указаны. Влияние “мягкого” рентгеновского излучения на электрические свойства изоляторов остаются неизвестны.

В настоящей работе исследованы радиационно-стимулированные эффекты возникновения тока в образцах кристаллического сапфира и аморфного кварца под действием рентгеновского излучения большой плотности мощности ($1\text{--}5 \text{ МВт/см}^2$). Было использовано излучение с энергией квантов $50\text{--}5000 \text{ эВ}$, которое поглощается на сравнительно малой глубине вещества, что вместе с большой мощностью излучения приводит к высокой концентрации носителей заряда в приповерхностном слое облучаемого образца. В работе [3] показано, что при таких параметрах облучения между контактным покрытием и диэлектриком возникает ЭДС, величина которой определяется плотностью и температурой возникающих носителей заряда; обсужден механизм и приведены качественные оценки возникающего эффекта. Настоящая работа посвящена дальнейшему исследованию процессов взаимодействия “мягкого” рентгеновского излучения с диэлектрическими

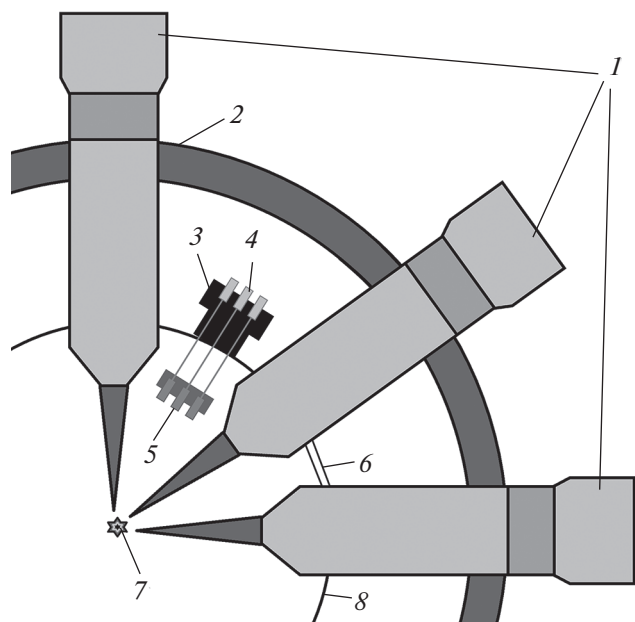


Рис. 1. Схема установки: 1 – генераторы импульсного напряжения с подводящей линией, расположенные радиально, равномерно по окружности (в общей сложности 8 шт.); 2 – бетонная защита от излучения толщиной ~1 м; 3 – диагностический фланец; 4 – вакуумные разъемы; 5 – диэлектрические датчики; 6 – область излучения; 7 – плазменный источник рентгеновского излучения; 8 – стенка вакуумной камеры диаметром 4 м, высотой 2.5 м.

материалами. Для описания происходящих в экспериментах физических процессов предложена математическая модель взаимодействия мощного рентгеновского излучения с кристаллическими диэлектриками. Математическое описание генерации тока в диэлектриках включает в себя модель рождения и динамики электронов проводимости и дырок в валентной зоне и модель радиационно-индуцированной проводимости. Аморфный кварц выбран в качестве реперного образца для верификации предложенной математической модели.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперименты проводили на установке “Ангара-5-1” [4], где под действием тока нагрузка превращается в нагретое плазменное образование, являющееся источником излучения. Установка построена по модульному принципу, где токи восьми модулей складываются до величины 3–4 МА в центре общей цилиндрической вакуумной камеры диаметром 4 м, на общую нагрузку. Подбор различных нагрузок позволяет регулировать мощность и спектральный состав излучения [5–7]. В установке, соответственно, есть 8 межмодульных областей, пригодных для диагностических целей и экспериментов с излучением нагрузки. Принципиальная схема установки с указанием

расположения диагностического оборудования приведена на рис. 1.

Эксперименты проводили с нагрузками в виде цилиндрических лайнеров, образованных из сорока вольфрамовых проволок диаметром 6 мкм. Такая нагрузка обеспечивает формирование Z-пинча на конечном этапе сжатия которого образуется плазма, являющаяся источником импульсного излучения с длительностью импульса 10 нс на половине высоты его интенсивности и пиковой плотностью мощности в месте расположения детекторов 1–5 МВт/см². Энергия квантов полученного таким образом излучения составляла 50–5000 эВ [8]. Спектральное распределение излучения для лайнера из вольфрама [9] показано на рис. 2а. Ему соответствует сравнительно небольшая глубина поглощения в твердом теле, в частности, в изученных диэлектриках. На рис. 2б продемонстрирована глубина проникновения излучения плазмы вольфрамового лайнера в кристаллические диэлектрики Al₂O₃ и SiO₂. Расчет прохождения и поглощения энергии в слоях SiO₂ и Al₂O₃ основан на данных [10] и экспериментально полученном спектре излучения. Для каждого из материалов SiO₂ и Al₂O₃ рассматривали диапазоны энергии излучения от 10 до 1000 эВ с шагом 10 эВ и толщины поглощающего слоя от 0.1 до 10 мкм. Затем по данным спектра излучения и полученным из таблиц работы [10] данным прохождения вычисляли интегральные значения прохождения энергии в каждом слое материала.

Видно, что для исследуемых диэлектриков излучению плазмы подвергается сравнительно малая часть их толщины (~1 мкм). Данное обстоятельство позволяет наряду с традиционным методом регистрации излучения путем измерения тока электронов ионизации (токовый метод) применять измерение электрического поля ионов, образовавшегося в результате оттока возникающих электронов (потенциальный метод) [11].

Чувствительным элементом служит пластинка диэлектрика (образец) толщиной 0.5 мм и диаметром 18 мм. Контакты обеспечены покрытием Au толщиной 30–50 нм. Переднее покрытие, имеющее форму кольца с отверстием диаметром 6 мм, обеспечивает облучение поверхности образца и создает надежный контакт с корпусом установки и оплеткой коаксиального кабеля длиной ~100 м. Сигнальный отклик регистрировали осциллографом TDS 2024 с полосой частот 200 МГц. Конструктивно образец базируется на коаксиальном разьеме “РК-50”, что упрощает реализацию измерений на установке. Измерительная схема показана на рис. 3.

Форма импульса излучения, измеренная детекторами различных типов (на основе вторичной эмиссии и опытных диэлектрических), показана на рис. 4. Некоторое несоответствие в форме сигналов вызвано различием в спектральной чувствительности детекторов. Полный выход излучения за импульс измерен с помощью калоримет-

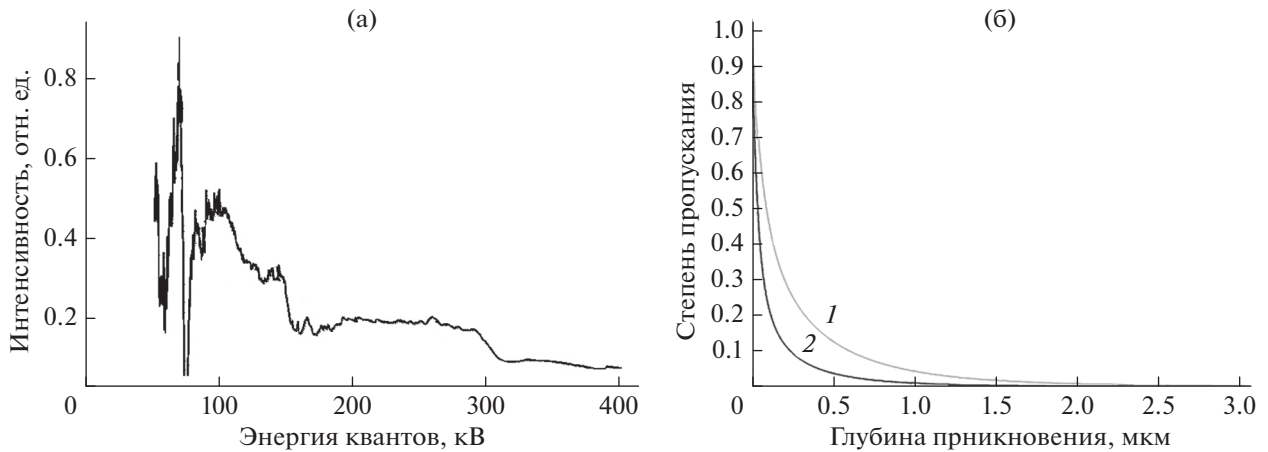


Рис. 2. Параметры излучения и глубина проникновения в материалы: а – типичный спектральный состав излучения установки “Ангара-5-1”; б – глубина проникновения излучения в кварце и сапфире.

ра и составил 30 кДж, что соответствует средней плотности мощности в месте расположения детектора (2 м от мишени) около 2 МВт/см² [12, 13].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦИИ ТОКА В ДИЭЛЕКТРИКАХ

Ток по поверхности кварца, измеренный экспериментально при воздействии на диэлектрические образцы мощного рентгеновского излучения, обусловлен генерацией неравновесных электронов проводимости и дырок в валентной зоне и появлением в диэлектрике радиационной проводимости. Неравновесное распределение избыточных носителей заряда в таких условиях образуется вследствие переноса и рассеяния фотоэлектронов. В результате столкновения рентгеновских квантов с атомами вещества происходит когерентное рассеяние и фотопоглощение [14]. Образующиеся при рассеянии рентгеновских квантов электроны испытывают упругое рассеяние. Эти электроны также участвуют в процессе ударной ионизации атомов [15]. Так образуется электрон-фотонный каскад. Этот процесс может быть описан классическими уравнениями переноса фотонов и электронов. В квазистационарном приближении интегро-дифференциальное уравнение плотности потока частиц сводится к интегральному уравнению Фредгольма второго рода.

Энергия фотоэлектронов служит источником для генерации электрон-дырочных пар. Электроны и дырки взаимодействуют при помощи самоогласованного электрического поля и рассеиваются на атомах диэлектрика. При воздействии мощного рентгеновского излучения возникает достаточное количество носителей заряда для того, чтобы можно было считать, что возникает радиационная проводимость такой же физической природы, как и в полупроводниках [16, 17]. Тогда для описания процессов переноса заряда оказываются пригодными методы, традиционные для газовой

плазмы. Полное кинетическое уравнение должно учитывать рассеяние электронов проводимости или дырок в валентной зоне на дефектах решетки:

$$\frac{\partial f_{e,h}}{\partial t} + \mathbf{v} \frac{\partial f_{e,h}}{\partial \mathbf{r}} - e\mathbf{E} \frac{\partial f_{e,h}}{\partial \mathbf{p}} = I[f, f] + Q_{e,h}, \quad (1)$$

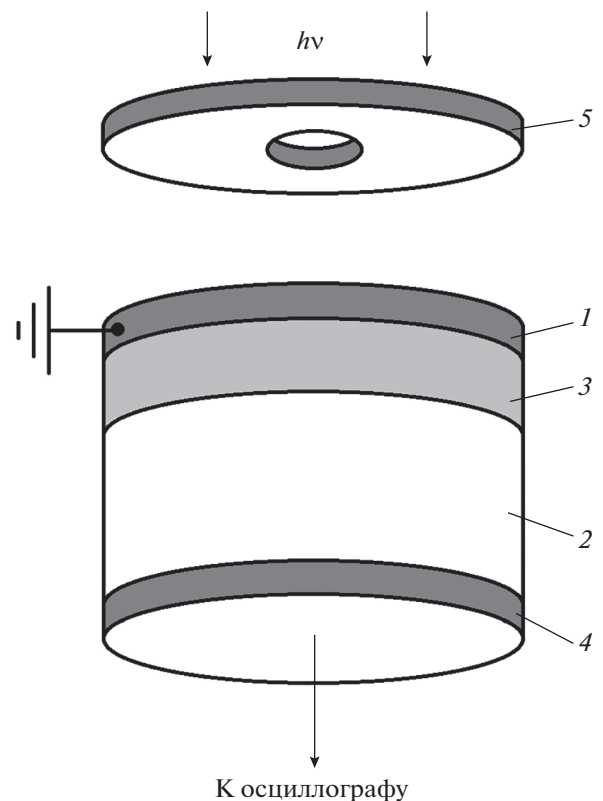


Рис. 3. Схема облучения диэлектрика: 1 – “входное покрытие” (кольцо Au); 2 – диэлектрический образец; 3 – область поглощения излучения; 4 – “контактное” покрытие; 5 – коллиматор, препятствующий облучению “входного покрытия”.

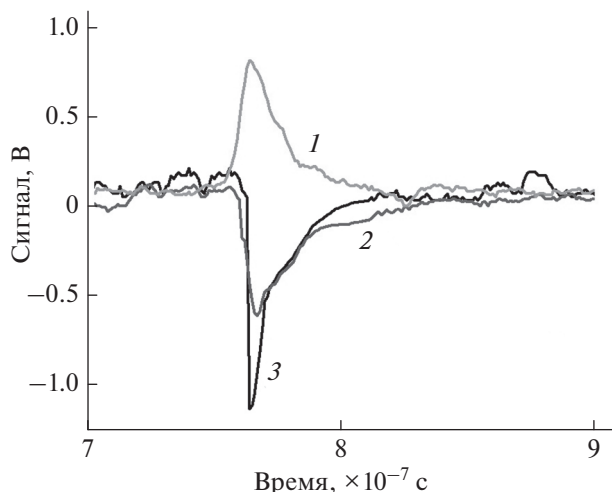


Рис. 4. Сигналы с вакуумного эмиссионного детектора (1), кварца (2) и сапфира (3). Плотность мощности излучения в месте расположения детекторов составила ~ 2 МВт/см².

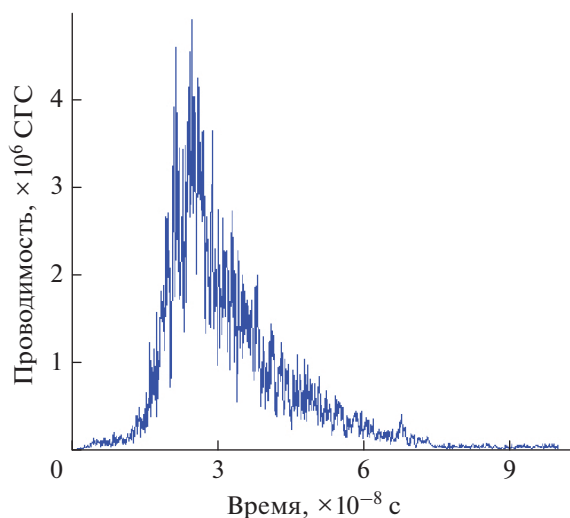


Рис. 5. Зависимость рассчитанной радиационной проводимости от времени в приповерхностном слое кварца.

где c — скорость света, \mathbf{E} — напряженность электрического поля, $\int f, \int$ — интеграл рассеяния. Правая часть уравнения (1) описывает изменение функции распределения за счет рассеяния.

Уравнения (1) решают совместно с уравнениями Максвелла (2)–(4) с соответствующими начальными условиями:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{\varepsilon \partial \mathbf{E}}{c \partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \quad (2)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{j}_0. \quad (4)$$

Выражение $\sigma \mathbf{E}$ (4) описывает плотность тока как электронной, так и дырочной проводимости.

Свободные фотоэлектроны генерируют в диэлектрике ток плотностью \mathbf{j}_0 ; ε — диэлектрическая проницаемость кристалла.

Так как на диэлектрик действует электрическое поле, созданное фотоэлектронами, после генерации электроны проводимости сразу начинают удаляться от дырок валентной зоны. Подвижность дырок на несколько порядков меньше, чем подвижность электронов, поэтому кинетикой дырок на временах порядка 10^{-7} с (время воздействия импульсного рентгеновского излучения установки “Ангара-5-1”) можно пренебречь. Однако часть электронов успевает рекомбинировать с дырками в валентной зоне. Оставшиеся электроны проводимости свободно дрейфуют под воздействием радиационного электрического поля и рассеиваются на неоднородностях кристаллической решетки. Начальная рекомбинация сильно зависит от напряженности электрического поля в диэлектрике.

Некоторые типы рассеяния удобно представлять, как взаимодействие носителей заряда с фононами в кристалле. Например, в кристаллическом диоксиде кремния таким образом можно выделить следующие процессы: упругое рассеяние на акустических фононах; неупругое рассеяние на полярных оптических фононах; неупругое рассеяние на неполярных оптических фононах [13, 14].

Математическая модель радиационной проводимости в кристаллических диэлектриках применена для расчета тока по поверхности кристаллического кварца (SiO_2) при воздействии рентгеновского излучения со спектральным составом, представленным на рис. 2. Рассчитанная радиационная проводимость в приповерхностном слое диэлектрика (рис. 5), возникающая при воздействии мощного рентгеновского излучения (плотность мощности потока рентгеновского излучения вблизи поверхности ~ 2 МВт/см²) достигает значений, характерных для собственной проводимости в типовых полупроводниках (Si, Ge). Форма зависимости проводимости от времени повторяет собой форму импульса рентгеновского излучения.

Исходя из полученных результатов моделирования радиационной проводимости в кристаллическом кварце, можно сделать вывод, что предложенная математическая модель генерации и динамики электронов проводимости и дырок в валентной зоне применима для описания процессов, происходящих в различных кристаллических диэлектриках, в частности, в монокристаллах лейкосапфира (Al_2O_3). В модели должны быть использованы плотности состояния и групповые скорости носителей заряда, а также константы, определяющие взаимодействие электронов и дырок с колебаниями решетки в диэлектрике. В том числе, численное моделирование позволяет получить зависимость тока по поверхности диэлектрика от времени. Эту зависимость можно сравнить с экспериментальными данными [20].

ВЫВОДЫ

Установлено, что в поле “мягкого” рентгеновского излучения вблизи поверхности диэлектриков возникают носители зарядов, температура и плотность которых определяется параметрами излучения (мощность, спектральный состав). Такие носители могут генерировать ток во внешних цепях, что служит основанием для разработки детекторов потоков излучения большой мощности. Также показано, что предложенная математическая модель применима для моделирования радиационной проводимости, возникающей при облучении диэлектрических кристаллических детекторов мощным рентгеновским излучением установки “Ангара-5-1”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hughes R.C. // Phys. Rev. Lett. 1973. V. 30. № 26. P. 1333.
2. Hughes R.C. // Phys. Rev. B. 1979. V. 19. № 10. P. 5318.
3. Зайцев В.И., Барыков И.А., Карташов А.В., Терентьев О.В., Родионов Н.Б. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 22. С. 72. <https://doi.org/10.21883/pjtf.2016.22.43941.16377>
4. Альбинов З.А., Велихов Е.П., Веретенников А.И. и др. // Атомная энергия. 1990. Т. 68. Вып. 1. С. 36.
5. Бехтев М.Б., Вихарев В.Д., Захаров С.В., Смирнов В.П., Тулунов М.В., Царфин В.Я. // ЖЭТФ. 1989. Т. 95. С. 1653.
6. Батюнин А.В., Булатов А.Н., Вихарев В.Д. и др. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. Вып. 9. С. 1027.
7. Акунец А.А., Ананьев С.С., Бакшаев Ю.Л., Блинов П.И., Брызгунов В.А., Вихрев В.В., Волобуев И.В., Данько С.А., Зеленин А.А., Казаков Е.Д., Королев В.Д., Мещеров Б.Р., Недосеев С.Л., Пименов В.Г., Смирнова Е.А., Устроев Г.И., Черненко А.С., Щагин В.А. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. Вып. 8. С. 747.
8. Айвазов И.К., Волков Г.С., Вихарев В.Д., Зайцев В.И. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: термоядерный синтез. 1987. Вып. 3. С. 31.
9. Вичев И.Ю., Новиков В.Г., Соломянная А.В. // Матем. Моделирование. 2008. Т. 20. № 7. С. 93.
10. Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C. // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1993. V. 54. № 2. P. 181.
11. Барыков И.А., Грицук А.Н., Мещанинов С.А., Данько С.А., Зайцев В.И., Карташов А.В., Родионов Н.Б., Терентьев О.В. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: термоядерный синтез. 2018. Вып. 1. С. 70. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2017-41-1-70-74>
12. Грабовский Е.В., Воробьев О.Ю., Дябилин К.С. и др. // ЖЭТФ. 1996. Т. 109. В. 3. С. 1–11.
13. Волков Г.С., Грабовский Е.В., Зайцев В.И., Зукакишвили Г.Г., Зурин М.В., Митрофанов К.Н., Недосеев С.Л., Олейник Г.М., Порофеев И.Ю., Смирнов В.П., Фролов И.Н. // ПТЭ. 2004. № 2. С. 74.
14. Жуковский М.Е., Скачков М.В., Егорушкин А.А. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2005. № 85. С. 26.
15. Натерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии. М.: Мир, 1990.
16. Радиационная стойкость изделий ЭКБ: Научное издание. / Ред. Чумаков А.И. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. 512 с.
17. Березин А.В., Волков Ю.А., Марков М.Б., Тараканов И.А. // Матем. моделирование. 2016. Т. 28. Вып. 6. С. 18.
18. Jacoboni C., Reggiani L. // Rev. Mod. Phys. 1983. V. 55(3). P. 645.
19. Fischetti M.V., Laux S.E. // Phys. Rev. B. 1988. V. 38. P. 9721.
20. Барыков И.А., Вичев И.Ю., Волков Ю.А., Зайцев В.И., Заложный Н.В., Каневский В.М., Тараканов И.А., Федоров В.А. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2021. № 18. С. 26.

Radiation-Induced Processes in Wide-Gap Dielectrics

I. A. Barykov^{1,4}, I. Yu. Vichev², V. I. Zaitsev¹, V. M. Kanevsky³, I. A. Tarakanov², V. A. Fedorov^{3, *}

¹The Joint Stock Company State Research Center of the Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, Troitsk, 108840 Russia

²Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow, 125047 Russia

³FSRC “Crystallography and Photonics” of RAS, Moscow, 119333 Russia

⁴RUDN University, Moscow, 117198 Russia

*e-mail: fedorov-metrology@yandex.ru

The phenomena occurring in dielectrics (Al_2O_3 and SiO_2) in the field of soft X-ray radiation of high power have been investigated. Experimental studies were carried out at the Angara-5-1 facility, which allows to reach the pulsed radiation power density of the source up to 5 MW/cm^2 at the location of the examined samples. It was revealed that the charge carriers were generated in the near-surface layer of an irradiated dielectric surface, which caused the current generation in a circuit including the dielectric. A necessary condition for current generation is the presence of “hot” electrons, which provide the surface conductivity. A mathematical model was proposed to describe the process of current generation in dielectrics during exposure to pulsed powerful X-ray radiation. The model is based on the joint solution of the kinetic equations for X-ray photons, photoelectrons, conduction electrons and holes in the valence band and self-consistent Maxwell equations. In Maxwell’s equations, instead of the external current of secondary charge carriers, the radioactive conduction current was used.

Keywords: dielectrics, surface, irradiation, X-ray radiation, high power, detectors, conductivity, numerical simulation.