

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.384.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО
СГУСТКА В ФОТОПУШКАХ

© 2023 г. С. М. Полозов^а, В. И. Ращиков^а, *

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: VIRashchikov@mephi.ru

Поступила в редакцию 18.07.2022 г.

После доработки 29.07.2022 г.

Принята к публикации 31.07.2022 г.

С помощью разработанной модели фотоэмиссии электронных сгустков пикосекундной длительности с большим зарядом в сильных ВЧ полях, в которой учтен процесс переноса заряда в полупроводниковой пленке фотокатода, проведен детальный анализ процесса формирования электронного сгустка в ВЧ фотопушке. Исследуются эффекты, оказывающие доминирующее влияние на формирование его эмиттанса и энергетического спектра.

Ключевые слова: фотоэмиссии, ВЧ пушка, моделирование, ускорители заряженных частиц, интенсивные пучки, пространственный заряд

DOI: 10.56304/S2079562922050360

ВВЕДЕНИЕ

Для работы современных установок, таких как источники синхротронного излучения, лазеры на свободных электронах, плазменные ускорители и т.д., требуются короткие (~1–20 пс) электронные сгустки с большим зарядом (сотни пикокулон – единицы нанокулон), малым поперечным эмиттансом (<1 мм мрад) и узким энергетическим спектром (<1%). Наиболее распространенным источником таких пучков с высокой плотностью фазового пространства в настоящее время являются высокочастотные (ВЧ) фотопушки. Характеристики пучка, полученные в фотопушке, оказывают определяющее влияние на его параметры на выходе установки. В этой связи детальный анализ процесса формирования сгустка электронов в фотопушке является весьма актуальной задачей.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В качестве образца будем использовать фотопушку, разрабатываемую в лаборатории DESY в Цойтене, Германия (PITZ) [1], и являющуюся тестовой установкой для фотопушек, используемых в составе Европейского лазера на свободных электронах (European-XFEL), поскольку параметры, создаваемых ею пучков наиболее близки к выше упомянутым, а обширный набор экспериментальных данных, полученных в ходе оптимизации таких пушек в PITZ, позволяет нам проводить

сравнительный анализ наших расчетов с результатами эксперимента.

Пушка (рис. 1) работает в сантиметровом диапазоне длинна волн (частота 1.3 ГГц) на π -типе колебаний и представляет собой резонатор с двумя связанными ячейками с общей длиной 1.6λ , где λ – длина волны. Фотокатод размещен на левом торце резонатора, где ускоряющее электрическое поле оказывается максимальным (60 МВ/м). Магнитное поле создается двумя соленоидами и необходимо для ограничения эмиттанса инжектируемого пучка. Фотокатод представляет собой тонкую пленку теллурида цезия Cs₂Te, нанесенную на металлическую подложку, в качестве которой выступает молибден. Толщина пленки теллурида колеблется в пределах от 5 до 15 нм, а цезия

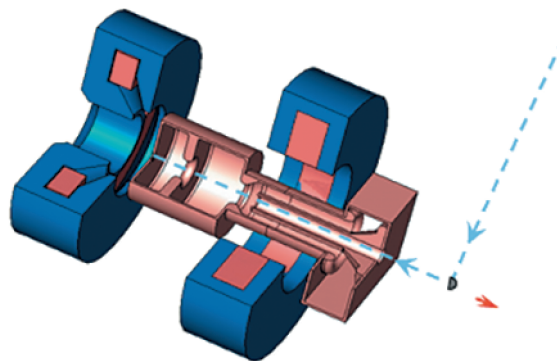


Рис. 1. Фотопушка PITZ.

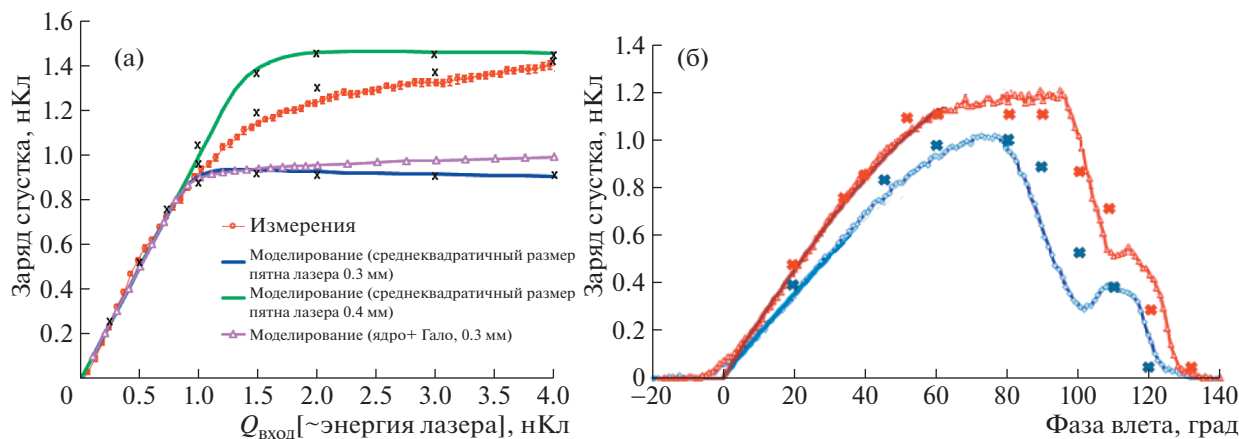


Рис. 2. Эмиссионные кривые.

от 20 до 80 нм и в сумме толщина фотоатода не превышает 0.1 мкм.

Для моделирования эмиссии, формирования и ускорения электронов использовался код СУМА [2]. Часть кода, отвечающая за эмиссию частиц, была полностью модернизирована исходя из следующих соображений. В стационарных моделях эмиссия ограничена пространственным зарядом, плотность заряда частиц, покидающих поверхность катода, определяется из решения уравнения Пуассона, где в качестве действующего на электроны значения электрического поля берется внешнее поле на поверхности катода в суперпозиции с собственным полем уже вылетевших зарядов. В предложенной нами модели кроме плотности заряда покинувших катод фотоэлектронов, также учитывается положительный заряд, возникающий на тонкой полупроводниковой пленке теллурида цезия и динамически изменяющийся вследствие конкурирующих процессов фотоэмиссии и диффузии из подложки. Уточненная таким образом модель фотоэмиссии позволила значительно улучшить согласие результатов расчета с экспериментальными данными.

Сравнение эмиссионных кривых, снятых на установке PITZ и рассчитанных с помощью кода ASTRA [3], традиционно используемого для моделирования динамики пучка в ВЧ фотопушках, с результатами расчета на новой модели (рис. 2а) [4, 5], позволили сделать вывод, что предлагаемая модель гораздо точнее описывает процесс фотоэмиссии в режиме ограничения пространственным зарядом. Рисунок 2б иллюстрирует сравнение экспериментально полученной (сплошные линии) и рассчитанной кодом СУМА (точки) зависимости эмиттируемого заряда от амплитуды и фазы ВЧ поля в пушке для сгустка с разным зарядом. В обоих случаях видно достаточно хорошее согласие результатов [6].

Экспериментальные результаты на PITZ и European-XFEL также показали, что код ASTRA дает заниженную величину энергетического разброса в сгустке. Для сравнения было проведено детальное моделирование процесса формирования сгустка в фотопушке модернизированным кодом СУМА. На рис. 3 представлены результаты моделирования.

На начальном этапе эмиссии до значения продольной координаты $z = 1$ см (точки 1–2 синей кривой рис. 3, ноль продольной координаты соответствует поверхности катода), когда скорости электронов еще много меньше скорости света, формирование сгустка идет под действием сильного поля пространственного заряда, которое в продольном направлении частично компенсируется продольной компонентой внешнего электрического поля. Такая компенсация возникает из-за того, что частицы хвоста сгустка, испытывающие максимальный тормозящий эффект от действия кулоновского поля ранее вылетевшей (головной) части сгустка, оказываются в большем внешнем продольном электрическом поле. Это достигается за счет выбора фазы инжекции, которая находится в растущем во времени электромагнитном поле резонатора. В рассматриваемом на рис. 3 варианте фаза инжекции равна 42° , а вылетевший с катода сгусток находится в точке 1 фазовой кривой (синяя кривая рис. 3), причем хвост сгустка расположен выше по фазам.

Инжекция сгустка в нарастающее магнитное поле (зеленая кривая), приводит к перекачке энергии поперечного движения в продольное, что следует из поведения эмиттанса пучка на этом участке (фиолетовая кривая рис. 3), которое также способствует росту продольного размера сгустка и, как следствие, росту разброса по энергии.

В дальнейшем, по мере ускорения, частицы головной и хвостовой части сгустка будут посто-

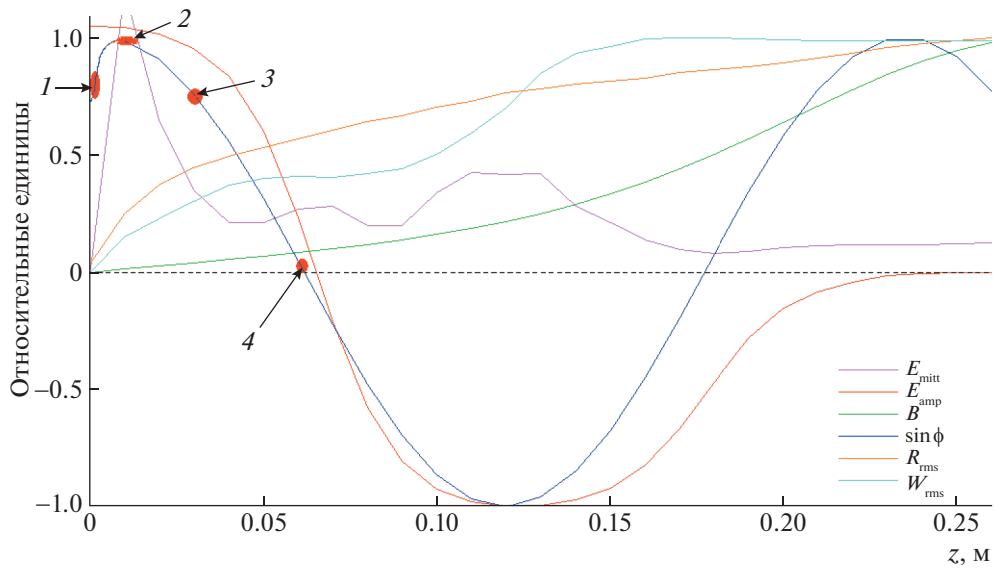


Рис. 3. Зависимость нормированных поперечного эмиттansa E_{mitt} , внешнего продольного магнитного поля B , амплитуды E_{amp} и синуса фазы $\sin \phi$, средней энергии и радиуса сгустка от продольной координаты вдоль пушки.

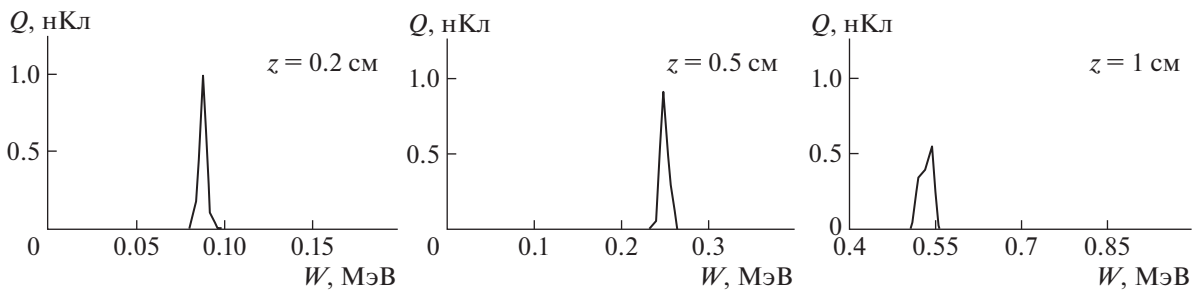


Рис. 4. Энергетический спектр сгустка в начальной стадии.

янно испытывать действие кулоновского поля, ослабевающего из-за релятивистского эффекта, но, тем не менее приводящего к росту энергетического спектра сгустка. В зависимости от фазы поля резонатора, в которой будет находиться сгусток, оно будет либо уменьшать этот разброс, если сгусток находится в растущем во времени поле (рис. 3, точки 1, 2), либо увеличивать его в спадающем поле (рис. 3, точки 3, 4). Как уже отмечалось ранее, на рис. 3 головная часть сгустка находится в меньшей по сравнению с хвостом фазе (слева от хвоста), так как хвостовые частицы имитируются позже головных.

Вследствие вышесказанного, на начальной стадии формирования (рис. 3, точки 1, 2) энергетический спектр и эмиттанс растут (рис. 4, продольная координата хвоста сгустка в сантиметрах приведена в правом верхнем углу каждого рисун-

ка), поскольку влияние поля пространственного заряда оказывается преобладающим.

Замедление роста энергетического спектра в начале участка спада поля (точки 2–3 рис. 3, спектры на рис. 5) объясняется эффектом группировки пучка, так как хвостовые частицы получают больше энергии от внешнего поля, а перекачка энергии из поперечного движения ослабевает (эмиттанс уменьшается – фиолетовая кривая рис. 3).

Когда сгусток переходит в спадающее во времени поле (рис. 3, точки 3, 4), разброс по энергии частиц головы и хвоста сгустка будет расти не только из-за действия поля пространственного заряда, но и из-за внешнего поля, поскольку хвост сгустка на этом участке будет двигаться в меньшем ускоряющем поле (рис. 6). Этот эффект немного сглаживается тем, что на этом участке

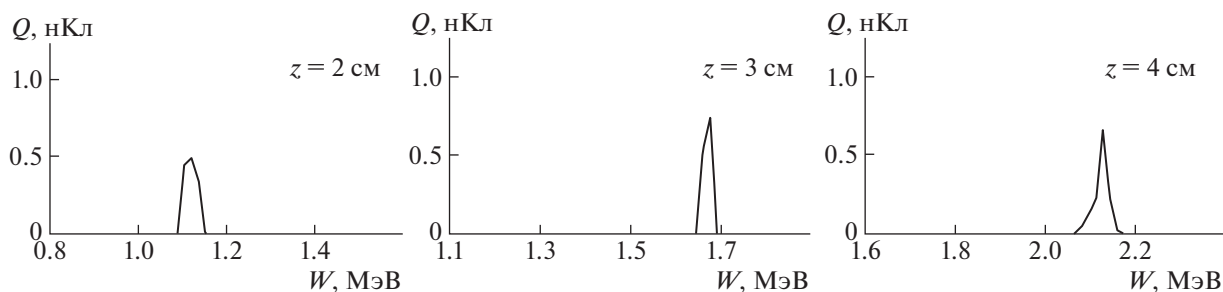


Рис. 5. Энергетический спектр сгустка на начале участка спада поля.

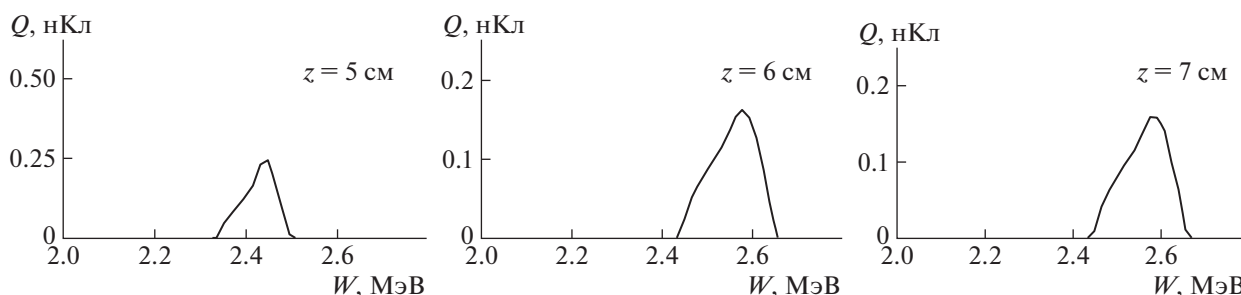


Рис. 6. Энергетический спектр сгустка в спадающем поле.

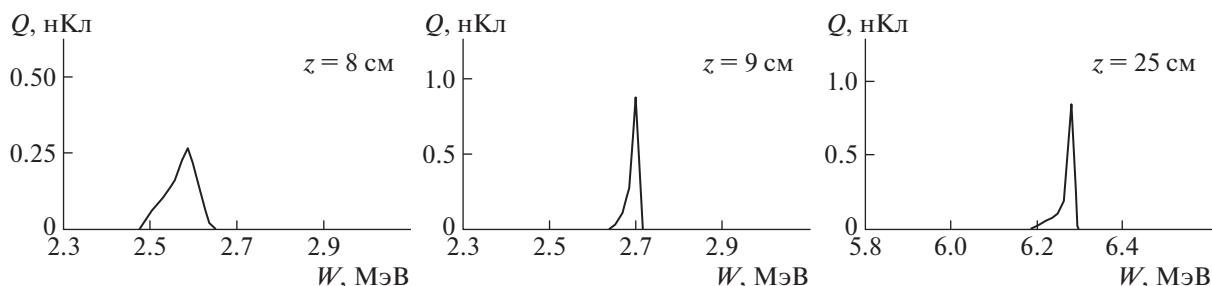


Рис. 7. Энергетический спектр сгустка в растущем поле.

резонатора амплитуда поля уменьшается (красная кривая рис. 3).

На следующем участке (рис. 3, за точкой 4) поле растёт во времени (амплитуда отрицательная – красная кривая рис. 3) и внешнее поле снова противодействует кулоновскому, что и приводит к уменьшению энергетического разброса (рис. 7, $z = 8, 9$ см).

Далее процесс повторяется при постоянном обмене энергии в продольном и поперечном движениях. В результате, на выходе пушки размер энергетического спектра сгустка с зарядом 1 нКл на полувысоте оказывается порядка 40 кэВ (рис. 7, $z = 25$ см) при эмиттансе 0.85 мм мрад.

Завышенные значения эмиттанса и заниженный энергетический разброс, полученные кодом ASTRA, можно было бы объяснить не вполне кор-

ректным описанием процесса перекачки энергии поперечного движения в продольное, особенно важным на начальной стадии формирования пучка, когда его энергия мала, а разброс скоростей, вызванный влиянием сил пространственного заряда, особенно велик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, сравнение проведенных по уточненной модели фотоэмиссии расчетов эмиттанса и энергетического спектра электронного сгустка в фотопушке с экспериментальными результатами и результатами моделирования кодом ASTRA показало, что предлагаемая модель точнее описывает исследованные процессы, что, как мы надеемся, позволит нам в дальнейшем лучше

оптимизировать параметры проектируемых нами фотопушек.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 19-29-12036.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Krasilnikov M.M. et al.* // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2012. V. 15. P. 100701.
2. *Ращиков В.И.* // ВАНТ. Сер.: ядерно-физические исследования. 1990. № 10 (18). С. 50.
3. *Floettmann K.* // Using ASTRA at DESY-Hamburg.
4. *Polozov S.M., Rashchikov V.I.* // Cybern. Phys. 2020. V. 9 (2). P. 103.
5. *Polozov S.M., Rashchikov V.I., Krasilnikov M.* // Proc. 12th Int. Particle Accelerator Conf. IPAC'21. 2021. P. 2829–2832. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-WEPAВ101>
6. *Красильников М., Полозов С.М., Ращиков В.И.* // Ядерная физика и инжиниринг. 2022. Т. 13 (1). С. 73–78. [*Krasilnikov M., Polozov S.M., Rashchikov V.I.* // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84. P. 1881–1885. <https://doi.org/10.1134/S1063778821100197>. <https://doi.org/10.56304/S2079562922010195>

Simulation of Electron Bunch Formation Process in Photoguns

S. M. Polozov¹ and V. I. Rashchikov¹, *

¹*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

**e-mail: VIRashchikov@mephi.ru*

Received July 18, 2022; revised July 29, 2022; accepted July 31, 2022

Abstract—The previously developed improved photoemission model has been applied to a detailed analysis of the process of high-brightness electron bunch formation process in the RF photogun. Space charge-dominated photoemission has a significant influence on the formation of transverse emittance as well as on the energy distribution within the emitted electron bunch.

Keywords: photoemission, RF gun, simulation, charged particle accelerators, high intensity beams, space charge