

09

Усиление электрической площади импульса при отражениях от движущегося зеркала

© Н.Н. Розанов

ФТИ имени А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: nnrosanov@mail.ru

Поступила в редакцию 06.07.2022 г.

В окончательной редакции 06.07.2022 г.

Принята к публикации 20.07.2022 г.

Проведен анализ преобразования электрической площади электромагнитного импульса при отражении от движущегося зеркала. Найдены условия, при которых отражение приводит к увеличению (по модулю) электрической площади. Для динамического резонатора, одно из зеркал которого периодически колеблется, получено выражение для порога генерации импульсов со все возрастающей площадью. Обсуждены нелинейные факторы, ограничивающие экспоненциальный рост электрической площади импульса.

Ключевые слова: электрическая площадь импульса, униполярный импульс, динамический резонатор.

DOI: 10.21883/OS.2022.09.53302.44-22

Введение

Предельно короткие униполярные или полуволновые электромагнитные импульсы представляют значительный интерес в задачах воздействия на микрообъекты [1–3]. Это вызвано однонаправленным характером такого воздействия с мгновенной передачей механического импульса зарядам объекта, тогда как „толчки“ объекта на различных полупериодах биполярных импульсов направлены в противоположные стороны и тем самым компенсируют друг друга.

Предельно короткие импульсы могут быть получены переходом в рентгеновскую область спектра или фазированием импульсов различных оптических гармоник [4–6]. Однако такие импульсы будут биполярными с ограниченной эффективностью воздействия на микрообъекты. В то же время укорочение импульсов возможно и без перехода в область высоких частот за счет уменьшения числа осцилляций поля на протяжении импульса, вплоть до субцикловой. Тем самым предельной стадией укорочения импульсов служат именно униполярные импульсы.

Видимо, первой публикацией об электромагнитных импульсах с ненулевой электрической площадью

$$\mathbf{S}_E = \int \mathbf{E} dt, \quad (1)$$

где \mathbf{E} — напряженность электрического поля и t — время, была статья Бессонова [7]. Хотя в литературе часто встречаются утверждения о невозможности электромагнитных импульсов с ненулевой площадью, см., например, [8], доводы этих работ нельзя считать, по нашему мнению, состоятельными и корректными. В то же время следует признать, что практически генерация предельно коротких униполярных или квазиуниполярных импульсов представляет серьезную проблему, тогда

как сравнительно нетрудно получить более длинные униполярные импульсы. Обзор различных методов генерации подобных импульсов содержится в [2,3].

Еще одна проблема заключается в том, что невозможно усиление (увеличение) электрической площади импульсов стандартными методами. Действительно, непосредственно из уравнений Максвелла электродинамики сплошных сред [9] для одномерной (плосковолновой) геометрии с распространением излучения вдоль оси следует правило сохранения электрической площади [10]:

$$\frac{d}{dz} \mathbf{S}_E = 0. \quad (2)$$

Это правило справедливо безотносительно к виду материальных соотношений для среды, т.е. и для лазерных (усиливающих) сред тоже. Поэтому лазерное усиление электрической площади импульсов оказывается невозможным.

В настоящем сообщении анализируется возможность усиления и генерации электрической площади импульсов за счет использования их отражений от движущихся зеркал или неоднородностей среды.

Отражение от движущегося зеркала

Пусть электромагнитный импульс распространяется в вакууме вдоль оси z из области $z = -\infty$ к зеркалу, движущемуся со скоростью V вдоль той же оси. Если зеркало идеальное с амплитудным коэффициентом отражения $r = -1$ для всех частот, то импульс отраженного излучения будет обладать той же формой, что и падающий, но с амплитудой, измененной в $-(1 - V/c)/(1 + V/c)$ раз [11,12] (c — скорость света в вакууме).

Поскольку электрическая площадь импульса (1) является нуль-частотной компонентой его спектра, то это

относится и к соотношению площадей падающего $S_{E,in}$ и отраженного $S_{E,r}$ импульсов:

$$S_{E,r} = -\frac{1 - V/c}{1 + V/c} S_{E,in}. \quad (3)$$

Поэтому для встречного по направлению к падающему импульсу движения зеркала ($V < 0$) электрическая площадь отраженного импульса по модулю будет превосходить площадь падающего импульса, т.е. произойдет усиление электрической площади. Это релятивистский эффект, имеющий место в лабораторной системе координат, тогда как в системе координат, связанной с зеркалом, площади падающего и отраженного импульсов отличаются только знаком.

Реальные зеркала, в отличие от идеального, обладают частотной дисперсией. Применительно к вопросу об усилении электрической площади важно значение коэффициента отражения неподвижного зеркала в пределе нулевой частоты излучения r_0 ; этот коэффициент может быть вычислен по формулам типа френелевских [9,13], в которых используются статические значения оптических постоянных. Тогда вместо (3) получим

$$S_{E,r} = r_0 \frac{1 - V/c}{1 + V/c} S_{E,in}. \quad (4)$$

Теперь усиление площади при отражении будет иметь место при условии

$$|r_0| > \frac{1 - |V|/c}{1 + |V|/c} \quad (5)$$

или

$$\frac{|V|}{c} > \frac{1 - |r_0|}{1 + |r_0|} \quad (6)$$

(движение встречное). При высоком коэффициенте отражения $1 - |r_0| \ll 1$ эти условия упрощаются

$$|r_0| > 1 - |V|/c, \quad \frac{|V|}{c} > \frac{1}{2}(1 - |r_0|). \quad (7)$$

В настоящее время доступны зеркала с коэффициентом отражения, весьма близким к 100%. В частности, интенсивен поток публикаций по средам с „колоссальной“ диэлектрической постоянной, в том числе более 10^7 [14], что обеспечивает почти идеальное отражение и, соответственно, низкие требования к скорости движения зеркала. Возможными вариантами служат отражение от плазменных зеркал [15] или от быстро движущихся неоднородностей среды. Отметим также, что при отражениях не происходит сдвига нулевой частоты, для нее эффект Доплера отсутствует (но амплитуда компоненты изменяется).

Динамический резонатор

Указанная выше возможность усиления электрической площади импульса означает и возможность генерации

импульсов с большой электрической площадью при условии многократных отражений, доступных в резонаторных схемах. Схемы резонатора с движущимся зеркалом традиционно рассматриваются применительно к динамическому эффекту Казимира, см. обзор [16] (его классический аналог качественно анализировался в [17] еще до первого квантового рассмотрения [18]) и в задачах резонаторной оптики, см. обзор [19]. Мы остановимся на классическом подходе, поскольку он позволяет количественно учесть многие факторы, что затруднительно сделать при квантовом рассмотрении электромагнитного поля [20].

Рассматриваем, также в плосковолновом приближении, двухзеркальный резонатор, одно из зеркал которого периодически колеблется около среднего положения z_{right} . Другое зеркало считаем неподвижным с координатой z_{left} . При точной настройке средней длины резонатора $L_1 = z_{right} - z_{left}$ время пробега света в резонаторе $2L_0/c$ совпадает с периодом осцилляций зеркала. Тогда наиболее благоприятная для возникновения (из затравки с ненулевой электрической площадью) ситуация отвечает отражению короткого импульса от правого зеркала в моменты, когда скорость зеркала максимальна по модулю и направлена к центру резонатора, $V = V_{max}$. Условие для порога генерации с усилением электрической площади импульса можно считать совпадающим с (5) или (6), если понимать под V величину V_{max} , а под r_0 — произведение амплитудных коэффициентов отражения зеркал резонатора (при $V = 0$) при нулевой частоте (статический предел). Оговорим, что в условиях периодической генерации импульсов использовать понятие их электрической площади можно лишь приближенно, считая длительность импульсов много меньшей времени пробега света через резонатор и ограничиваясь при интегрировании в (1) интервалом, равным времени этого пробега.

Рост электрической площади импульса в условиях выше порога генерации на начальной стадии является экспоненциальным, он ограничивается нелинейными факторами. В оптике таким фактором служит обычно давление света на зеркало [19]. Другим фактором может выступать изменение оптических характеристик материала зеркал в сильных электромагнитных полях. Анализ этих факторов требует конкретизации способа реализации движения зеркала и его материала, что выходит за рамки настоящего сообщения.

Выводы

Релятивистские эффекты при отражении импульса от движущегося зеркала позволяют достичь усиления электрической площади импульса при превышении порогового значения скорости зеркала или коэффициента его отражения (в отсутствие движения). Последний определяется статическими характеристиками материала зеркала (значениями статической диэлектрической постоянной и

проводимости). Использование квазиодномерного (плосковолнового) приближения для униполярных импульсов оправдано, например, в случае коаксиальных волноводов, не обладающих частотой отсечки [21].

Переход от усиления к генерации импульсов с высокой электрической площадью достижим в резонаторной схеме с периодически движущимся зеркалом при затравке импульсом с ненулевой площадью. Значение порога генерации получается естественным обобщением выражения для порога усиления площади при единичном отражении импульса.

Ограничение первоначального экспоненциального роста электрической площади импульса с ростом числа его отражений от движущегося зеркала происходит вследствие таких нелинейных эффектов как давление света на зеркала и изменение свойств материала зеркал в сильном электромагнитном поле. Экспериментально проще реализация сравнительно длительных импульсов со значительной электрической площадью, поскольку для этого не требуется большая ширина спектрального контура коэффициента отражения зеркал.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Dimitrovski, E.A. Solov'ev, J.S. Briggs. *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 083003 (2004).
- [2] Н.Н. Розанов, Р.М. Архипов, М.В. Архипов. *УФН*, **188**, 1347 (2018). [N.N. Rosanov, R.M. Arkhipov, M.V. Arkhipov. *Phys. Usp.*, **61**, 1227 (2018)].
- [3] Р.М. Архипов, М.В. Архипов, Н.Н. Розанов. *Квант. электрон.*, **50**, 801 (2020). [R.M. Arkhipov, M.V. Arkhipov, N.N. Rosanov. *Quantum Electronics*, **50**, 801 (2020)].
- [4] F. Krausz, M. Ivanov. *Rev. Mod. Phys.*, **81**, 163–234 (2009).
- [5] U. Keller. *Appl. Phys. B*, **100**, 15–28 (2010).
- [6] М.Ю. Рябикин, М.Ю. Емелин, В.В. Стрелков. *УФН*, принята к публикации. DOI: 10.3367/UFN.2021.10.039078 [M.Yu. Ryabikin, M.Yu. Emelin, V.V. Strelkov. *Phys. Usp.*, accepted. DOI: 10.3367/UFN.2021.10.039078].
- [7] Е.Г. Бессонов. *ЖЭТФ*, **80**, 852 (1981). [E.G. Bessonov, *Sov. Phys. JETP*, **53**, 433 (1981)].
- [8] D. Sugny, S. Vranckx, M. Ndong, N. Vaeck, O. Atabek, M. Desouter-Lecomte. *Phys. Rev. A*, **90**, 053404 (2014).
- [9] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Электродинамика сплошных сред* (Наука, М., 1982). [L.D. Landau, E.M. Lifshitz. *Course of Theoretical Physics, Vol. 8: Electrodynamics of Continuous Media* (Pergamon, New York, 1984)].
- [10] Н.Н. Розанов. *Опт. и спектр.*, **107**, 761 (2009). [N.N. Rosanov. *Opt. Spectrosc.*, **107**, 721 (2009)].
- [11] А. Эйнштейн. *Собрание научных трудов*. Т. 1 (Наука, М., 1965), с. 7.
- [12] Б.М. Болотовский, С.Н. Столяров. *УФН*, **159**, 155 (1989).
- [13] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики* (Наука, М., 1973). [M. Born, E. Wolf. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light* (Pergamon Press, Oxford, 1980)].
- [14] N. Humera, S. Riaz, N. Ahmad, F. Arshad, R. Zafar, S. Ali, S. Idrees, H. Noor, S. Atiq, S. Naseem. *J. Mater. Sci.: Materials in Electronics*, **31**, 5402–5415 (2020).
- [15] С.В. Буланов, Т.Ж. Есиркепов, М. Кандо, А.С. Пирожков, Н.Н. Розанов. *УФН*, **183**, 449–486 (2013) [S.V. Bulanov, T.Zh. Esirkepov, M. Kando, A.S. Pirozhkov, N.N. Rosanov. *Phys. Usp.*, **56**, 429–464 (2013)].
- [16] V.V. Dodonov. *Physics*, **2**, 67 (2020).
- [17] В.Н. Красильников, А.М. Панкратов. В сб. „Проблемы дифракции и распространения волн“ (Л.: ЛГУ, вып. 8, 1968, с. 59).
- [18] G.T. Moore. *J. Math. Phys.*, **11**, 2679 (1970).
- [19] M. Aspelmeyer, T.J. Kippenberg, F. Marquardt. *Rev. Modern Phys.*, **86**, 1391–1452 (2014).
- [20] Н.Н. Розанов, Э.Г. Федоров, А.А. Мацковский. *Квант. электрон.*, **46**, 13 (2016) [N.N. Rosanov, E.G. Fedorov, A.A. Matskovskii. *Quantum Electronics*, **46**, 13 (2016)].
- [21] Н.Н. Розанов. *Опт. и спектр.*, **127**, 960 (2019) [N.N. Rosanov. *Optics and Spectroscopy*, **127**, 1050 (2019)].