

Ондуляторный эффект на изгибной акустической волне

И.Л. Шейнман

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: Рассмотрена возможность создания кильватерного ондулятора на изгибной акустической волне в ускорительной структуре с диэлектрическим заполнением. Предложенная конструкция обладает более гибкими возможностями перестройки по сравнению с традиционными ондуляторами.

Ключевые слова: лазер на свободных электронах, ондулятор, кильватерная ускорительная структура, кильватерный ондулятор

1. Введение

Ондуляторы являются ключевыми элементами лазеров на свободных электронах [1]. Они представляют собой устройства, в которых электронный пучок в процессе движения испытывает на себе действие поперечной периодической силы. Возникающие под действием силы колебания частиц в поперечном направлении сопровождаются ускоренным движением частиц, которое, в свою очередь, порождает электромагнитное излучение в направлении движения пучка. Для создания поперечной силы используются электромагнитные поля, создаваемые периодически расположенными дипольными магнитами. Ондуляторное излучение возникает также при движении частиц через периодическую решетку кристаллов, где роль отклоняющих полей играют локальные поля атомов.

Ондуляторы имеют ряд особенностей, которые делают их привлекательными для создания лазеров на свободных электронах: большую апертуру пучка; короткий ондуляторный период, способность генерировать волны как круговой, так и плоской поляризации, динамический контроль длины волны и ондуляторного коэффициента. К недостаткам относится ограниченная возможность по перестройке – ограниченный диапазон значений ондуляторного коэффициента.

В качестве источников последовательностей электронных сгустков для лазеров на свободных электронах используются линейные ускорители заряженных частиц. Интенсивно развивающимся направлением в последние годы является использование линейных кильватерных ускорительных структур с диэлектрическим заполнением. Они основаны на принципе возбуждения черенковского излучения в диэлектрических волноводах сильнооточным релятивистским пучком электронов, рисунки 1, 2. Ведущий сгусток (драйвер) с большим зарядом, движущийся вдоль оси вакуумного канала диэлектрического волновода, генерирует за собой кильватерную электромагнитную волну черенковского излучения, фазовая скорость которой равна скорости драйвера. Эта волна имеет продольную компоненту поля, используемую для ускорения ведомого сгустка.

Наряду с продольной компонентой поля при смещении ведущего сгустка от оси волновода в кильватерной волне возникают поперечные компоненты полей. Использование генерируемых сгустком собственных поперечных полей в микроволновом резонаторе для создания ондуляторного эффекта было предложено в [2]. В [3] переменное поперечное электромагнитное поле для генерации ондуляторного излучения предлагалось создавать при встречном движении

генераторного и ондуляторного сгустков. Однако вследствие значительных отклоняющих полей, действующих на генераторный сгусток, дальность его полета оказывается ограниченной [4], что несколько снижает эффективность метода.

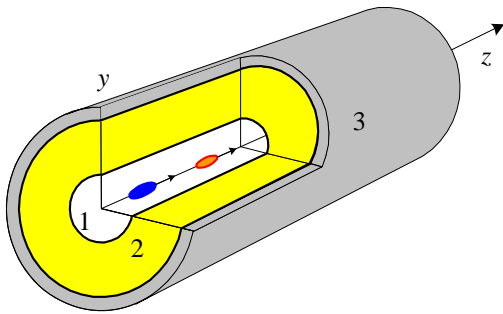


Рисунок 1. Цилиндрическая структура

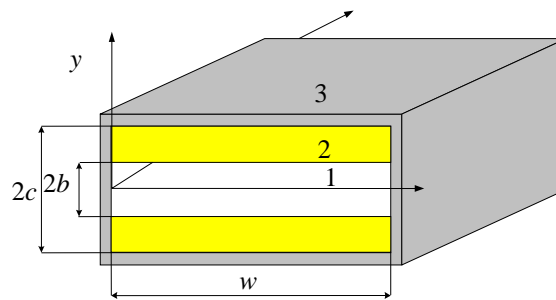


Рисунок 2. Прямоугольная ускорительная структура

2. Ондуляторный эффект на изгибающей волне

Поперечное кильватерное поле, генерируемое головной частью электронного сгустка в ускорительной волноводной структуре с диэлектрическим заполнением оказывает значительное отклоняющее воздействие на последующие частицы пучка. Сама же головная часть сгустка по сравнению с центральной и хвостовой его частями практически не испытывает отклоняющего воздействия и смещается незначительно. Отклонение пучка происходит по направлению к ближайшей диэлектрической стенке волновода, причем при малых смещениях от оси поперечная сила, действующая на некоторую выбранную частицу со стороны предшествующей ей частицы, пропорциональна расстоянию передней частицы от оси волновода, рисунок 3 (прямоугольный волновод $b=1$ мм, где b – полуширина вакуумного канала, $f=300$ ГГц, $q=10$ нКл, диэлектрическое заполнение – кварц).

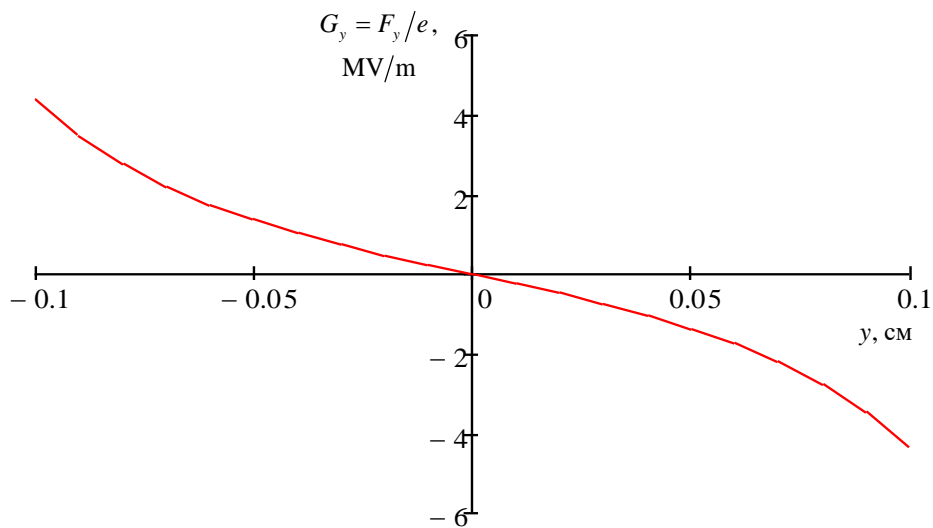


Рисунок 3. Напряженность поперечного поля в зависимости от смещения частицы от оси

Как правило, в кильватерных ускорительных структурах поперечные поля рассматриваются как негативный фактор, приводя к отклонению частиц от оси волновода и оседанию частиц на его стенках.

В то же время напрашивается мысль, что поперечные кильватерные поля можно было бы использовать для создания осцилляции электронов пучка и генерации ондуляторного излучения. Для этого необходимо, чтобы ось волновода имела бы форму синусоиды, тем самым периодически меняя смещение головной части пучка

относительно оси волновода и относительно диэлектрика по закону $y_0 = A \sin(2\pi z/\Lambda)$, где Λ – длина изгибной волны. Изгиб оси волновода может быть выполнен как стационарно, так и создаваться динамически, рисунок 4. В последнем случае представляет интерес формирование механических изгибных колебаний ускорительной структуры путем генерации поперечной бегущей вдоль волновода или стоячей акустической волны с помощью установленного на боковой поверхности волновода акустического излучателя.

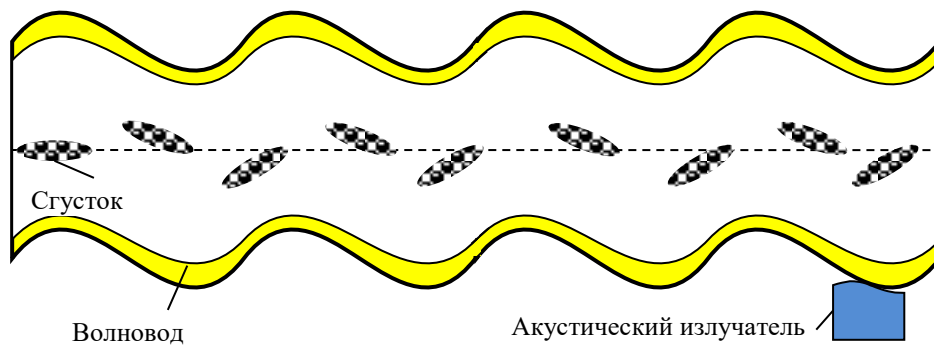


Рисунок 4. Колебания хвостовой части сгустка в изогнутом волноводе

Тогда кильватерное поле, действующее на хвостовую часть пучка, будет носить знакопеременный характер, заставляя частицы хвостовой части пучка осциллировать, рисунок 5, при $A = b/2$, $\Lambda = 5$ см.

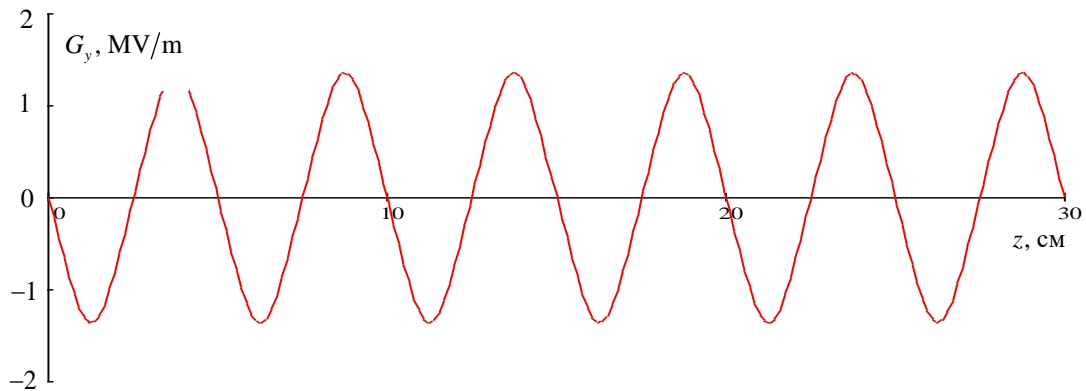


Рисунок 5. Кильватерное поле, действующее на среднюю часть сгустка

Ондуляторный коэффициент может быть найден как $K = eG_y\Lambda / (2\pi mc^2)$.

При поперечных смещениях оси волновода, составляющих 10–50% от полуширины зазора вакуумного канала в диэлектрике достигается сочетание генерации достаточно большого для создания ондуляторного эффекта поля без значительных потерь частиц за счет оседания на стенки волновода.

3. Заключение

Изменения частоты и амплитуды акустической волны дают возможность управлять величиной поперечного поля, и, следовательно, ондуляторным коэффициентом. Изменение частоты акустической волны позволяет управлять частотой генерируемой в ондуляторе электромагнитной волны. Следует отметить, что

изгибная волна в стержнях обладает дисперсией, скорость ее распространения зависит от частоты.

Список литературы

1. C. Pellegrini, A. Marinelli, and S. Reiche. The physics of x-ray free-electron lasers Rev. Mod. Phys. 88, 015006, 2016
2. S. Tantawi et al. Experimental Demonstration of a Tunable Microwave Undulator. Phys. Rev. Lett. 112, 164802, 2014
3. C. Jing, S. S. Baturin, A. Kanareykin, P. Schoessow, A. Zholents A beam-driven microwave undulator for FEL Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany. 1956-1958 2014.
4. I. L. Sheinman. Beam Dynamics in Dielectric Structure when Using it as Undulator // 2015 International Conference "Stability and Control Processes" in Memory of V. I. ZUBOV (SCP) Joined with 21st International Workshop on Beam Dynamics and Optimization (BDO) Saint-Petersburg, 05-09 October 2015. Published by IEEE SCP 2015 – Proceedings p. 201-204.