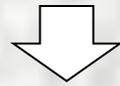


Лазеры на свободных электронах

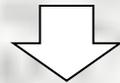
Механизм возникновения излучения

Электронный пучок пропускается через постоянно-периодическое магнитное поле, создаваемое магнитами

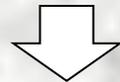


ондуляторы или вигглеры

В процессе движения электрона в магнитном поле на него действует периодическая сила

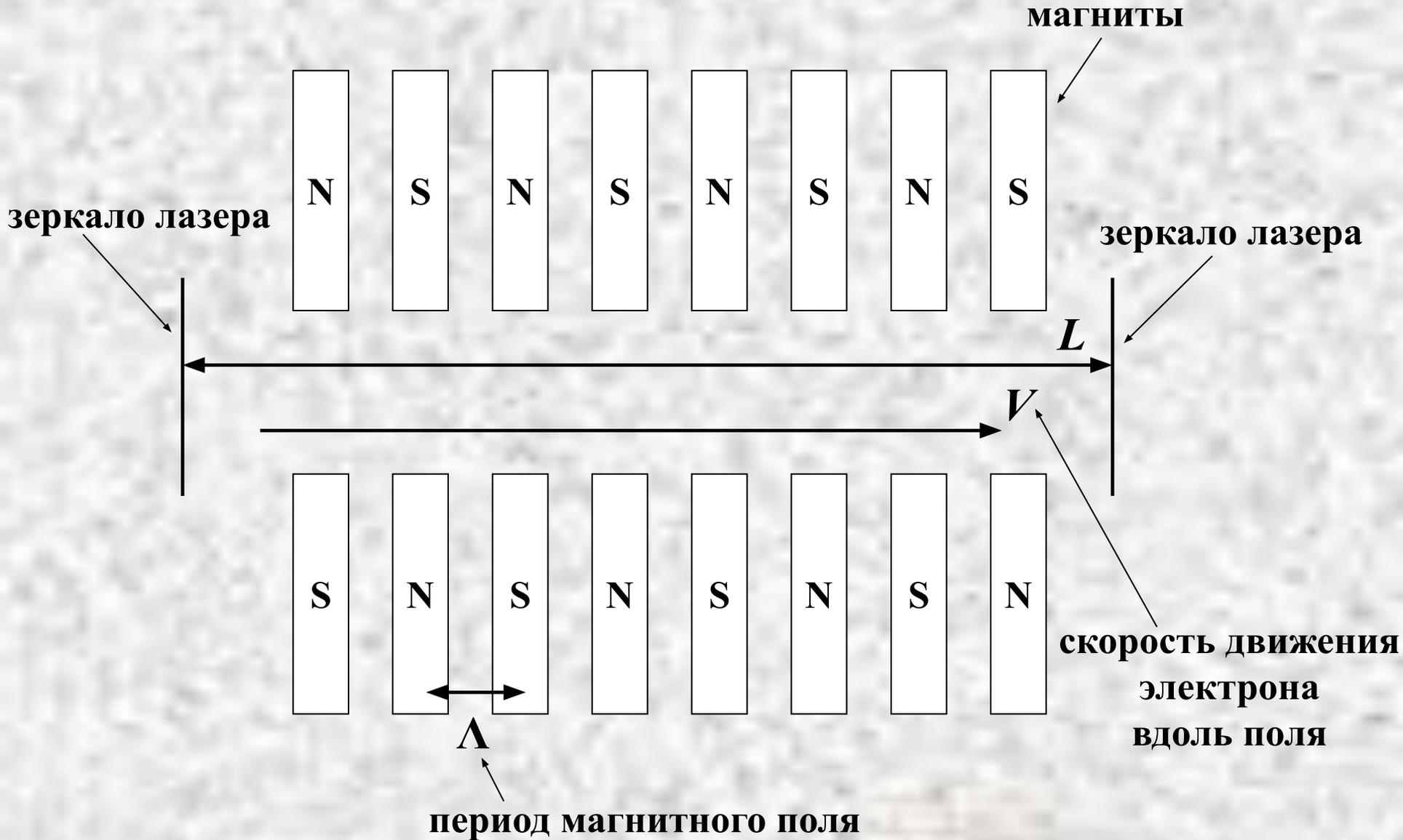


Ускорение электрона периодически меняется, и электрон движется по пространственно-периодической траектории



Такое движение сопровождается излучением в направлении движения электрона

Лазеры на свободных электронах



Лазеры на свободных электронах

Временной период действующей на электрон силы

$$T = \Lambda/V$$

Частота изменения ускорения электрона

$$T^{-1} = V/\Lambda$$

При движении электрона со скоростью много меньшей скорости света частота излучения электрона совпадает с частотой периодической структуры

$$\lambda = \frac{c\Lambda}{V}$$

При периоде магнитного поля несколько сантиметров длина волны излучения нерелятивистского случая попадает в радиодиапазон

Если скорость электрона существенно возрастает до скоростей, практически равных скорости света, то начинают работать релятивистские поправки специальной теории относительности

Лазеры на свободных электронах

$$\gamma = \left(1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2\right)^{-1/2} \Rightarrow \Lambda' = \frac{\Lambda}{\gamma} \quad \text{- изменение периода магнитного поля}$$

Частота периодического воздействия на электрон увеличивается до величины

$$\gamma V / \Lambda$$

Возникающий в лабораторной системе отсчета релятивистский доплеровский эффект приводит к увеличению частоты излучения электрона в направлении его движения в $\gamma(1+V/c)$ раз

Выражение для длины излучения релятивистского электрона:

$$\lambda = \frac{\Lambda}{\gamma^2 \left(1 + \frac{V}{c}\right)}$$

Лазеры на свободных электронах

Если скорость электрона приблизительно равна скорости света:

$$1 + v/c \approx 2$$

Энергия электрона: $W = eU$

напряжение электрического поля, которое необходимо приложить, для того чтобы разогнать электрон до скорости v

Тогда: $\gamma = \frac{eU}{m_0 c}$

← масса покоя электрона

При изменении энергии электронов eU в диапазоне от сотен до тысяч МэВ длины волн излучения электрона попадают в спектральные области от ультрафиолетовой до инфракрасной

Время тормозного излучения электрона определяется выражением:

$$\tau = \frac{L}{c\gamma}$$

Лазеры на свободных электронах

За время пролета через магнитное поле количество циклов излучения равно числу периодов магнитного поля:

$$N = L/\Lambda$$

Спектр импульса излучения имеет вид:

$$F(\nu) = \left[\frac{\sin(\nu \delta / 2)}{\delta / 2} \right]^2, \quad \delta = \frac{2\pi N v_0}{\nu}$$

центральная частота линии излучения

Выражение для ширины линии излучения, оцененной на уровне половины от максимального значения, имеет вид:

$$\frac{\Delta \nu_0}{\nu_0} = \frac{1}{2N}$$

При одной и той же скорости всех электронов, движущихся в магнитном поле в одном направлении, форма линии одинакова



Форма линии излучения соответствует однородному уширению

Лазеры на свободных электронах

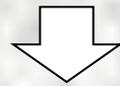
Неоднородные эффекты проявляются достаточно слабо и связаны с неоднородностью магнитного поля, угловой расходимости электронного пучка и разбросом энергий электронов

Источники электронных пучков - ускорители электронных пучков

Режим работы - импульсный

Пикосекундные импульсы представляют собой регулярную последовательность электронных пакетов

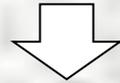
Временной интервал между электронными пакетами, поступающими на вход системы магнитов, должен быть кратен времени двойного прохода через резонатор лазера



В этом случае электромагнитное поле в резонаторе имеет вид волновых пакетов, которые синхронизированы с электронными пакетами и усиливаются в течение времени существования электронного пакета

Лазеры на свободных электронах

Излучение лазера на свободных электронах имеет вид последовательности коротких импульсов, расстояние между которыми кратно времени двойного прохода волнового пакета через резонатор



Этот режим генерации практически является режимом синхронизации мод

Для обеспечения достаточной величины коэффициента усиления напряженность магнитного поля должна быть достаточно большой

Параметры лазера на свободных электронах

Индукция магнитного поля – несколько килогаусс

Энергия электронов в пучке – 20-30 МэВ

Концентрация электронов в пучке - 10^{11} см⁻³

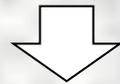
Электронные токи – 10-100 А

Коэффициент усиления за один проход – до 10%

Выходная мощность импульса излучения – 10 кВт

Лазеры на свободных электронах

Использование в качестве источников электронных пучков линейных ускорителей обеспечивает электронные токи, состоящие из тысяч электронных пакетов длительностью каждого пакета в десятки пикосекунд при общей длительности электронного тока в сотни микросекунд с частотой повторения порядка 1 Гц



В этом случае максимальная выходная мощность импульса излучения достигает 10 МВт

Рамановские лазеры на свободных электронах

Энергия электронного пучка заметно ниже – порядка 1-2 МэВ

Электронные токи существенно больше – 10-20 кА

Становится сильным электрон-электронное взаимодействие, приводящее к возникновению коллективных колебаний в электронном пучке, которые называются плазменными волнами

Излучение возникает из-за рассеяния на плазменных волнах

Частота излучения смещается в область больших длин волн на величину, соответствующую длине волны колебаний в плазменной волне, аналогично тому, как это происходит в случае комбинационного рамановского рассеяния

Лазеры на свободных электронах

Основные достоинства лазеров на свободных электронах

- 1. В таких лазерах можно перестраивать длины волн излучения в широких диапазонах – от миллиметровых диапазонов до ультрафиолетовой области. Это позволяет их использовать в таких спектральных диапазонах, в которых не имеется других лазеров, в частности, в дальней инфракрасной области или в области глубокого ультрафиолета**
- 2. В лазерах на свободных электронах достигаются высокие значения КПД, что приводит к большим мощностям лазерной генерации**
- 3. Излучение лазеров на свободных электронах имеет высокое качество. Это обусловлено прежде всего высокой однородностью активной среды, а также низким уровнем дифракционных потерь. Пучок лазерного излучения имеет размеры, лишь в малой степени (на несколько процентов) превышающие величину дифракционного предела**

Существенный недостаток лазеров на свободных электронах состоит в том, что установки являются очень сложными и громоздкими, поскольку для инжектирования электронных пучков в магнитное поле требуются мощные и большие ускорители электронов