Zr(C,N) в поверхностном слое, которая уменьшается при увеличении числа импульсов.

Таким образом, установлено, что воздействие компрессионных плазменных потоков на систему Si/Zr/У9 приводит к легированию поверхностного слоя стали атомами Zr и Si. В легированном слое формируются интерметаллид Fe2Zr, карбонитрид Zr(C,N) и твердый раствор на основе γ-Fe. Показано, что с увеличением количества импульсов концентрация Zr и Si уменьшается, что ведет к уменьшению объемной доли цирконий-содержащих фаз. Легирование приводит к увеличению микротвердости. Максимальная микротвердость (10 МПа) наблюдается при одном импульсе воздействия КПП. С увеличением количества импульсов микротвердость поверхностного слоя уменьшается.

Литература

1. *Мрочек. Ж. А., Логвин В. А.* Ионная имплантация и структурно-фазовое состояние материалов // Минск: БНТУ. 2012. 206 с.
2. *Погребняк А. Д., Базыль Е. А., Свириденко Н. В.* Влияние облучения электронными и ионными пучками на физико-механические свойства титановых сплавов // Успехи физики металлов. Сумы. 2004. С. 257–281.
3. *Григорьев С .В., Коваль Н. Н., Иванов Ю. Ф., Девятков В. Н., Тересов А. Д., Колубаева Ю. А.* Электронно-пучковая модификация стали и твердых сплавов // Томск. 2006. 8 с.
4. *Анищик В. М., Углов В. В.* Модификация инструментальных материалов ионными и плазменными пучками // Минск: Издательство БГУ 2003. 176 с.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫМ ПУЧКОМ В МНОГОПОЛОСТНЫХ РЕЗОНАТОРАХ

И. В. Мороз

ВВЕДЕНИЕ

Получение мощных импульсов сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения является важной областью технических и научных исследований, так как такие импульсы являются хорошим инструментом для научных исследований и практического применения. В статье [1] было предложено использовать для модуляции электронного пучка и последующей генерации СВЧ излучения систему связанных цилиндрических резонаторов (Split Cavity Oscillator (SCO)). В данной работе найдено аналитическое решение для энергетических потерь электронного пучка для несимметричной системы с учетом объемного заряда. Также рассмотрена

работа SCO при релятивистских энергиях пучка. На основе полученных теоретических результатов было проведено моделирование.

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ SCO С НЕРАВНЫМИ СЕКЦИЯМ С УЧЕТОМ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА

SCO представляет собой цилиндрический резонатор, разделенный проводящей изолированной сеткой (*Рис. 1*). В результате переходного излучения при прохождении пучка электронов через SCO в нем создается электромагнитное поле. Рабочей модой такой системы является π-мода – продольная компонента электрического поля аксиально симметрична, но направлена в разные стороны в каждом резонаторе.

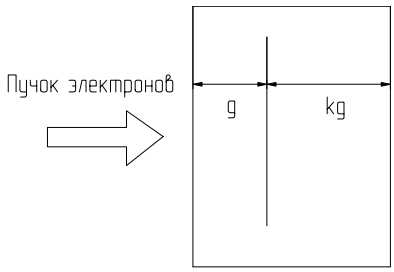


Рис. 1. Система связанных резонаторов

Необходимое условие усиления электромагнитной волны – наличие потерь энергии проходящим электроном. Для нахождения энергетических потерь необходимо решить уравнения движения для электрона, определить изменение энергии после прохождения системы и усреднить ее по начальной фазе поля.

Запишем уравнения движения и начальные условия:

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -\frac{e}{m_e}\left(E_0 \sin(\omega t + \theta) - \frac{\omega_p{}^2 m_e g}{2e}\left(\frac{2z}{g} - 1\right)\right), \quad (1)$$

$$\begin{cases} z\big|_{t=0} = 0 \\ \dfrac{dz}{dt}\Big|_{t=0} = v_0 \end{cases}, \quad (2)$$

где, z – координата по оси симметрии системы, t – время, e – элементарный заряд, m_e – масса электрона, E_0 – напряженность электрического поля, ω – частота излучения, g – продольный размер резонатора SCO, v_0 – начальная скорость электрона, ω_p – плазменная частота, θ – начальная фаза поля.

Сделав все необходимые вычисления в приближении $\varepsilon = \frac{eE_0}{m_e v_0 \omega} \ll 1$ и $S = \frac{\omega_p}{\omega} \ll 1$, можно получить энергетические потери электрона (ΔK), нормированные на всю энергию электрического поля в системе и начальную энергию электрона:

$$\Delta K = \frac{\varepsilon^2}{4k_2{}^2\left(1+k/k_2{}^2\right)x}(-4(-2-2k_2-2k_2{}^2+2k_2(1+k_2)\cos(2\pi x)+$$

$$+2(1+k_2)\cos(2k\pi x)-2k_2\cos(2(1+k)\pi x)+2k_2\pi x\sin(2\pi x)+$$

$$+2k_2{}^2\pi x\sin(2\pi x)+2k\pi x\sin(2k\pi x)+2kk_2\pi x\sin(2k\pi x)-$$

$$-2k_2\pi x\sin(2(1+k)\pi x)-2kk_2\pi x\sin(2(1+k)\pi x))-S^2(16+16k_2+$$

$$+16k_2{}^2-8k^2\pi^2x^2-8k_2\pi^2x^2-8k_2{}^2\pi^2x^2+k_2(-16-$$

$$-8(-2+k)\pi^2x^2+16\pi^4x^4+k_2(-16+24\pi^2x^2+$$

$$+16\pi^4x^4))\cos(2\pi x)+(-16+24k^2\pi^2x^2+16k^4\pi^4x^4+k_2(-16+8(1-$$

$$-k+k^2)\pi^2x^2+16k^4\pi^4x^4))\cos(2k\pi x)+16k_2\cos(2(1+k)\pi x)-$$

$$-16k_2\pi^2x^2\cos(2(1+k)\pi x)-16kk_2\pi^2x^2\cos(2(1+k)\pi x)-$$

$$-8k^2k_2\pi^2x^2\cos(2(1+k)\pi x)-16k_2\pi^4x^4\cos(2(1+k)\pi x)-$$

$$-16kk_2\pi^4x^4\cos(2(1+k)\pi x)-16k^3k_2\pi^4x^4\cos(2(1+k)\pi x)-$$

$$-16k^4k_2\pi^4x^4\cos(2(1+k)\pi x)-20k_2\pi x\sin(2\pi x)+4kk_2\pi x\sin(2\pi x)-$$

$$-24k_2{}^2\pi x\sin(2\pi x)+8k_2\pi^3x^3\sin(2\pi x)+8k_2{}^2\pi^3x^3\sin(2\pi x)-$$

$$-24k\pi x\sin(2k\pi x)+4k_2\pi x\sin(2k\pi x)-20kk_2\pi x\sin(2k\pi x)+$$

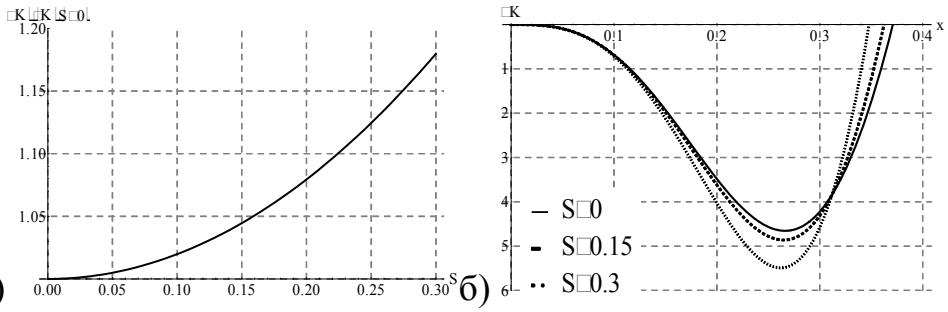
$$+8k^3\pi^3x^3\sin(2k\pi x)+8k^3k_2\pi^3x^3\sin(2k\pi x)+$$

$$+20k_2\pi x\sin(2(1+k)\pi x)+20kk_2\pi x\sin(2(1+k)\pi x)-$$

$$-8k_2\pi^3x^3\sin(2(1+k)\pi x)-8k^3k_2\pi^3x^3\sin(2(1+k)\pi x)), \qquad (3)$$

где, k – отношение длины второй секции к первой, k_2 – отношение амплитуды поля в первой секции к полю второй, $x=\frac{\omega g}{v_0}$, c – скорость света.

Анализ показывает, что оптимальной является конфигурация с равными камерами. Из *Рис. 2* видно, что с ростом объемного заряда (тока пучка) увеличивается по модулю ΔK. Также видно, что максимальные потери происходят при $x = 0{,}26$. Необходимо заметить, что $\varepsilon \sim \frac{1}{\omega}$, поэтому с уменьшением частоты абсолютные потери энергии электрона при одинаковых электрических полях в SCO увеличиваются.



а) б)

Рис. 2. а) зависимость отношения энергетических потерь к потери пучком энергии при S=0 от S, б) зависимость энергетических потерь от x для различных S.

РЕЛЯТИВИСТСКИЙ СЛУЧАЙ

В работе [2] было показано, что с ростом энергии эффект модуляции пучка уменьшается и исчезает при энергиях порядка 300 кэВ. Однако выводы были сделаны для величины Δp^2. Проведенный анализ для изменения полной энергии ΔK_{rel} показывает, что $\Delta K_{rel} \sim \gamma^{-4} \Delta K$ (*Рис. 3*). Таким образом, с ростом энергии электрона эффект модуляции уменьшается, но полностью не пропадает.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Исходными данными для моделирования были энергия электронного пучка 300 кэВ, ток порядка 2 кА и диаметр трубы дрейфа 120 мм. Анализ проводился для 3 частот: 3,0 ГГц, 2,8 ГГц и 2,6 ГГц. Согласно проведенному выше теоретическому анализу этим частотам соответствуют: длины секций SCO 22 мм, 24 мм и 26 мм соответственно; диаметр средней сетки SCO 90 мм, 100 мм и 100 мм с дополнительными диафрагмами в секциях.

В результате моделирования получены следующие мощности: 10 МВт, 30 МВт, 60 МВт соответственно.

ВЫВОДЫ

Таким образом, SCO представляет собой источник мощных импульсов СВЧ излучения с возможностью простой перестройки частоты. На основании теоретического анализа показано, что в рассматриваемом приближении оптимальной является симметричная конфигурация системы, и с ростом тока пучка увеличиваются относительные энергетические потери электрона. Показано также, что с ростом энергии электронов относительные энергетические потери пропорциональны γ^{-4}. Моде-

лирование простейших конфигураций SCO показало, что эффективность преобразования энергии пучка в СВЧ излучение составляет порядка 5 %

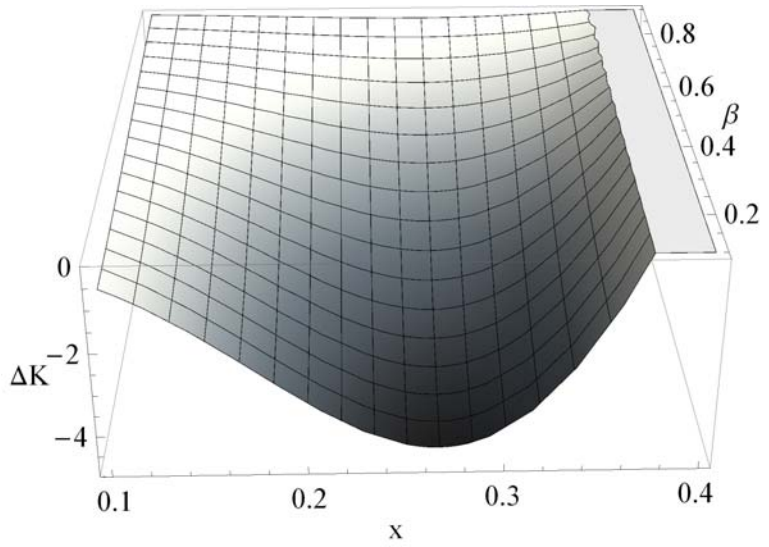


Рис. 3. Зависимость энергетических потерь от x и β.

Литература

1. *Marder M., Collins Clark M., Larry D. Bacon, James M. Hoffman, Raymond W. Lemke, P. Dale Coleman* The Split-Cavity Oscillator: A High-Power E-Beam Modulator and Microwave Source Barry/ // IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE. 1992. V20. №3 С.312–331.
2. *Baryshevsky V.G*. Relativistic Split-Cavity Oscillator // Research Institute for Nuclear Problems. 2014. Mode of access: arxiv.org/abs/1402.3403 Date of access: 05.01.2015.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ МЕТАМАТЕРИАЛАХ С БЛИЗКОЙ К НУЛЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

Нгуен Фам Куинь Ань

Гиперболические метаматериалы (ГММ)– это искусственно созданные материалы, структурированные на нано уровне [1]. В приближении эффективной среды ГММ описываются одноосным тензором диэлектрической проницаемости, главные значения которого имеют разные знаки. Возможна реализация случая, когда одна из главных диэлектрических проницаемостей оказывается близкой к нулю (epsilon-near-zero (ENZ) regime). Гиперболические метаматериалы, для которых продольная диэлектрическая проницаемость близка к нулю, называются ГММ I типа; для гиперболических метаматериалов с близкой к нулю поперечной диэлектрической проницаемостью принято название ГММ II типа.