

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Н. С. Гинзбург, М. И. Петелин, А. С. Сергеев, Совмещение высокого КПД и высокого инкремента в ЛСЭ профилированием параметра инерционной группировки электронов,
Письма в ЖТФ, 1986, том 12, выпуск 11, 685–689

<https://www.mathnet.ru/pjtf161>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.83

16 мая 2025 г., 14:24:00



- [3] Закурдаев И.В., Чернобродов Е.Г., Черняк Е.Я., Шероэия Г.А. Лазерный атомно-флуоресцентный спектрометр. — Электронная промышленность, 1982, вып. 10-11, с. 81-83.
- [4] Распыление твердых тел ионной бомбардировкой: Физическое распыление одноэлементных твердых тел. Под редакцией Бернша Р. М.: Мир, 1984, 336 с.
- [5] Шероэия Г.А., Шишляков В.А. Лазерный атомно-ионизационный спектрометр. Тезисы докладов Всесоюзного совещания-семинара молодых ученых „Диагностика поверхности ионными пучками“. Ужгород, 1985, с. 57.

Поступило в Редакцию
9 декабря 1985 г.

Письма в ЖТФ, том 12, вып. 11 12 июня 1986 г.

СОВМЕЩЕНИЕ ВЫСОКОГО КПД И
ВЫСОКОГО ИНКРЕМЕНТА В ЛСЭ
ПРОФИЛИРОВАНИЕМ ПАРАМЕТРА
ИНЕРЦИОННОЙ ГРУППИРОВКИ ЭЛЕКТРОНОВ

Н.С. Гинзбург, М.И. Петелин,
А.С. Сергеев

1. Известно, что в СВЧ-приборах, с инерционной группировкой частиц (в том числе в лазерах на свободных электронах), имеющих строго регулярные или строго периодические электродинамические и электронно-оптические системы, режимы с максимальным линейным инкрементом и максимальным КПД несовместимы [1-3]. Это противоречие может быть в значительной степени снято в приборах, в которых имеется возможность профилирования параметра инерционной группировки электронов. К числу таких приборов относятся мазеры на циклотронном авторезонансе (МЦАР) [4, 5], убитроны с фокусирующим продольным магнитным полем [6, 7] и черенковские ЛБВ с подускорением электронов в пространстве взаимодействия [8] и другие.¹ Представляется целесообразным иметь большую величину параметра группировки во входной секции усилителя и малое значение этого параметра в выходной секции. В ре-

¹ В МЦАР величина параметра группировки регулируется отстройкой фазовой скорости усиливаемой волны от скорости света, в убитронах — вариацией напряженности продольного магнитного поля, а также амплитуды ондуляторного поля. Для убитронов возможность изменения параметра группировки на уровне оценок впервые обсуждалась в работе [6].

зультате входная секция обеспечит высокий коэффициент линейного усиления, а выходная - эффективный отбор энергии у электронного пучка.

2. Докажем такую возможность на основе асимптотических „длиноприборных“ уравнений, описывающих в любых приборах с инерционной группировкой процесс взаимодействия электронного пучка с электромагнитной волной при не слишком больших изменениях энергии электронов ($|\omega| \ll 1$) [3]

$$\frac{da}{dz} = \frac{eI_0 \alpha}{mc^3 \gamma_0 N} J, \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{dz} = \delta - \mu \omega, \quad \frac{d\omega}{dz} = \text{Re}(\alpha e^{i\theta}),$$

$$\gamma|_{z=0} = \alpha_0, \quad \theta|_{z=0} = \theta_0 \in [0, 2\pi], \quad \omega|_{z=0} = 0.$$

В (1) $z = \frac{\omega}{c} z$ - безразмерная продольная координата, $\alpha = \frac{eE}{mc\omega\gamma_0}$ - безразмерная амплитуда волны, $\omega = 1 - \mathcal{E}/\mathcal{E}_0$, $\mathcal{E} = mc^2\gamma$ - энергия электронов, θ и θ_0 - текущая и начальная фаза электронов относительно синхронной волны, $J = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0$ - амплитуда основной гармоники ВЧ-тока, I_0 - невозмущенный ток пучка, N - норма волны, δ - кинематическая расстройка синхронизма электронов с волной, α - коэффициент связи электронов с волной, μ - параметр инерционной группировки электронов, характеризующий степень смещения фазы частицы при изменении ее энергии. Значения параметров α , μ и δ для ЛСЭ, основанных на различных типах индуцированного излучения приведены в [3, 7].

Электронный КПД прибора определяется соотношением

$$\eta = \frac{1}{1-\gamma_0^{-1}} \int_0^{2\pi} \omega d\theta_0.$$

Рассмотрим сначала случай постоянного значения параметра инерционной группировки, когда заменой переменных $u = \mu \omega c^{-1}$, $\alpha = \alpha \mu c^{-2} a$, $\zeta = z c$ система уравнений (1) сводится к виду

$$\frac{d\alpha}{d\zeta} = J, \quad \frac{d\theta}{d\zeta} = \Delta - u, \quad \frac{du}{d\zeta} = \text{Re}(\alpha e^{i\theta}), \quad (2)$$

содержащему один независимый параметр: $\Delta = \delta c^{-1}$. Электронный КПД при этом выражается следующими соотношениями

$$\eta = \frac{1}{1-\gamma_0^{-1}} \frac{c}{\mu} \hat{\eta}, \quad \hat{\eta} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u d\theta_0, \quad (3)$$

где $C = G \mu^{1/3}$ - параметр усиления (обобщенный параметр Пирса), $G = (eI_0 \alpha^2 / mc^3 \gamma_0 N)^{1/3} \ll 1$.

Линеаризуя (2) и представляя решение в виде $\alpha \sim e^{i\Gamma \zeta}$, переходим к дисперсионному уравнению

$$\Gamma^2(\Gamma - \Delta) = -1, \quad (4)$$

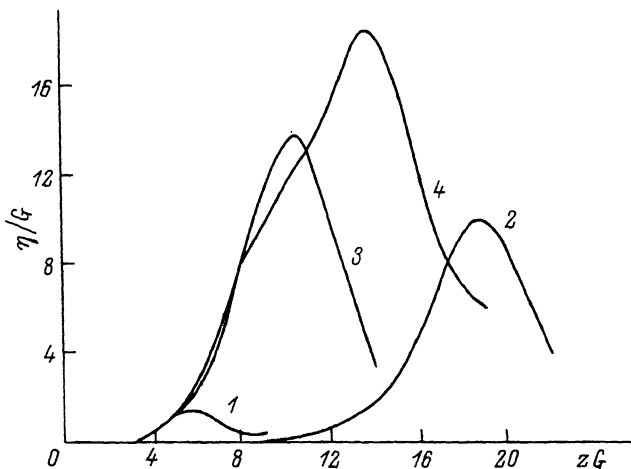


рис. 1. Зависимость нормализованного КПД η/G от продольной координаты в случае моноскоростного электронного пучка
 1) $\mu = 1$, $\delta = 0$; 2) $\mu = 0.05$, $\delta = 0$; 3) $\mu = 1$, $\delta = 0$ при $zG < 5$ и $\mu = 0.05$, $\delta = 0$ при $zG > 5$; 4) $\mu = 1$, $\delta = 0$ при $zG < 5$ и $\mu = 0.05$, $\delta = G$ при $zG > 5$.

согласно которому максимум инкремента $J_m \Gamma_{max} = \sqrt{3}/2$ достигается при $\Delta = 0$. Соответственно в размерных обозначениях максимальное значение инкремента пропорционально параметру Пирса

$$J_m \Gamma = \frac{\omega}{c} L \frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (5)$$

Из соотношений (3), (5) следует, что с ростом параметра группировки линейный инкремент увеличивается как $\mu^{1/3}$, а КПД падает как $\mu^{-2/3}$. Этот вывод иллюстрируется приведенными на рис. 1 зависимостями КПД от длины пространства взаимодействия, рассчитанными по уравнениям (1) при $\mu = 1$ и $\mu = 0.05$ ($\delta = 0$). Очевидно при $\mu = 1$ (кривая 1) быстро достигается максимум КПД, значение которого, однако, существенно ниже, чем при $\mu = 0.05$ (кривая 2).

Предположим теперь, что до момента насыщения роста КПД значение параметра группировки $\mu = 1$, а далее при $zG = 5$ параметр группировки принимает значение $\mu = 0.05$ (кривая 3). В результате такого переключения на вдвое меньшей длине достигается КПД даже несколько больший, чем на кривой 2. Максимальное значение КПД можно еще более увеличить, если одновременно с профилированием μ профилировать и параметр расстройки δ (см. кривую 4).

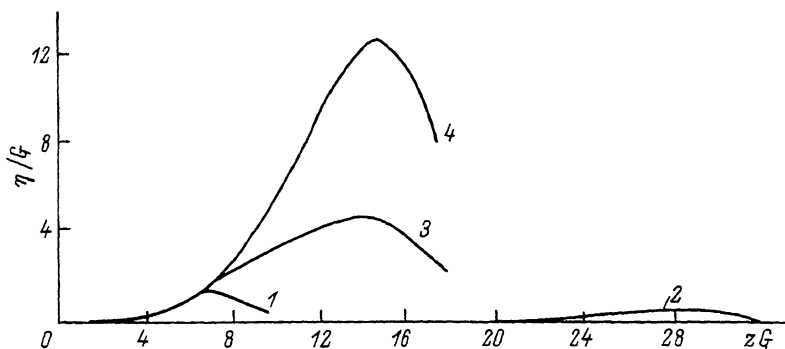


Рис. 2. Зависимость нормализованного КПД η/G от продольной координаты в случае электронного пучка с разбросом параметров: $D/G = 0.5$. 1) $\mu = 1$, $\delta = 0$; 2) $\mu = 0.05$, $\delta = 0$; 3) $\mu = 1$, $\delta = 0$ при $zG < 6.45$ и $\mu = 0.05$, $\delta = 0$ при $zG > 6.45$; 4) $\mu = 1$, $\delta = 0$ при $zG < 6.45$ и $\mu = 0.05$, $\delta = 0.5G$ при $zG > 6.45$.

3. Очевидно, что сокращение оптимальной длины приборов должно благоприятно сказываться на их чувствительности к разбросу параметров электронного пучка. Учитывая разброс параметров введением функции распределения электронов по начальным расстройкам $f(\delta)$, представим уравнение возбуждения в виде

$$\frac{da}{dz} = \frac{e I_0 z}{mc^3 \gamma_0 N} \int_{-\infty}^{\infty} f J d\delta.$$

Для гауссовой функции распределения $f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}D} e^{-(\delta-\bar{\delta})^2/2D^2}$

при параметре дисперсии $D = 0.5G$ зависимость КПД от продольной координаты приведена на рис. 2 в двух случаях: $\mu = 1$ и $\mu = 0.05$ (кривые 1, 2). Сравнение с соответствующими кривыми рис. 1 показывает, что выбранная дисперсия практически не влияет на процесс усиления в первом случае и существенно снижает КПД во втором. Вместе с тем, если при $zG = 6.45$ переключить параметр группировки с $\mu = 1$ на $\mu = 0.05$ (кривая 3), то удастся повысить максимальное значение КПД примерно в 10 раз по сравнению с максимумом на кривой 2. Дальнейшее увеличение КПД может быть достигнуто путем одновременного переключения среднего значения расстройки с $\bar{\delta} = 0$ на $\bar{\delta} = 0.5G$ (кривая 4).

Таким образом, если инкремент входной секции достаточно высок: $C \gg D$, так, что разброс параметров пучка не оказывает

существенного влияния на линейный режим взаимодействия, то в дальнейшем влияние разброса уже не столь значительно и для секции торможения, на вход которой поступает хорошо сгруппированный электронный пучок и волна сравнительно большой амплитуды.

Л и т е р а т у р а

- [1] В а й н ш т е й н Л.А., С о л н ц е в В.А. Введение в сверхвысокочастотную электронику. М.: Сов. радио, 1973.
- [2] Р о у Д. Теория нелинейных явлений в приборах СВЧ. Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1969.
- [3] Б р а т м а н В.Л., Г и н з б у р г Н.С., К о в а л е в Н.Ф. и др. Общие свойства коротковолновых приборов с длительной инерционной группировкой электронов. - В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника, вып. 1, Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 249.
- [4] П е т е л и н М.И. К теории ультрарелятивистских мазеров на циклотронном авторезонансе. - Изв. вузов, Радиофизика, 1974, т. 17, № 6, с. 902-908.
- [5] Б р а т м а н В.Л., Г и н з б у р г Н.С., Н у с и н о в и ч Г.С. и др. Циклотронные и синхротронные мазеры. - В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника, вып. 1, Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 157.
- [6] К о н д р а т е н к о А.М., С а л д и н Е.Л. Генерация когерентного излучения пучком релятивистских электронов в ондуляторе. - ЖТФ, 1981, т. 51, № 8, с. 1633-1640.
- [7] Г и н з б у р г Н.С., П е т е л и н М.И. Теория релятивистских убитронов с сильноточными электронными пучками. - В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника, вып. 4. Горький: ИПФ АН СССР, 1984, с. 49
- [8] Б е л я в с к и й Е.Д. О режиме работы приборов Q-типа с захватом сгустков полем электромагнитной волны. - Радиотехника и электроника, 1971, т. 16, № 1, с. 208-210.

Поступило в Редакцию
11 марта 1986 г.