

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ

На правах рукопису

Гончаров Ілля Олексійович

**АВТОФАЗНИЙ ЛАЗЕР  
НА ВІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОНАХ**

01.04.04. - фізична електроніка

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

КИЇВ - 1997



Дисертацією є рукопис

Робота виконана в науково-дослідному Інституті "Оріон".

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук  
професор **Белявський Євген Данилович**

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук  
**Коваленко Віталій Петрович**

кандидат фізико-математичних наук  
**Клименко Володимир Олександрович**

Провідна організація: Інститут ядерних досліджень  
НАН України

Захист відбудеться *"17 квітня"* 1997 р. о *15<sup>00</sup>* годині на  
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.96.01 при Інституті  
Фізики НАН України. 252650, МСП. м. Київ - 22, пр. Науки  
46.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотечі Інституту  
Фізики НАН України.

Автореферат розіслано *"17 березня"* 1997 р.

Вчений секретар  
Спеціалізованої Ради  
кандидат фізико-математичних наук

**Ішук В.А.**

### Актуальність теми

За останні роки досягнуто значний прогрес у вирішенні проблеми створення потужних перестроюваних по частоті підсилювачів та генераторів електромагнітного випромінювання в інфрачервоному, субміліметровому та міліметровому діапазонах завдяки створенню так званих лазерів на вільних електронах (ЛВЕ). Така назва закріпилася за цими приладами, тому що вони можуть працювати в діапазонах довжин хвиль, що є характерними для квантових генераторів, а також завдяки унікально великій густині випромінювання на виході.

Лазери на вільних електронах складаються з трьох головних вузлів: джерело електронів, система накачування та електродинамічна система. Як джерело електронів використовують електронний прискорювач, як систему накачування за теперішнього часу використовують, як правило, поперечне магнітостатичне поле, поляризоване по колу (так званий вігглер). Вид електродинамічної системи визначається робочим діапазоном: це може бути оптичний або квазіоптичний резонатор, відрізок гладкого хвилеводу з рупорним випромінювачем і так далі.

В останній час активно досліджується проблема оптимізації енергообміну та підвищення коефіцієнта корисної дії ЛВЕ, що є загальною для більшості електронних приладів з тривалою взаємодією, використовуючих як робоче тіло електронний пучок. Традиційний підхід полягає у тому, щоб забезпечити такі умови, при яких електронний згусток, що формується у процесі взаємодії з електромагнітною хвилею, залишався як можна довше у сповільнюючій фазі електромагнітної хвилі. Для цього використовують змінення параметрів електродинамічної системи, в якій розповсюджується електромагнітна хвиля, уздовж області взаємодії. Як хвилеводна система у ЛВЕ використовується надрозмірний хвилевод або квазіоптичні резонатори, тому в них така можливість практично не може бути реалізована.

Аналогічного результату можна досягти, змінюючи уздовж області взаємодії амплітуду поля вігглера або/та фокусуєного поля. За рахунок змінення співвідношення між напруженостями магнітних полів уздовж області взаємодії можна зкомпенсувати зменшення поздовжньої швидкості електронного пучка, яка виникає у процесі енергообміну. Існують достатньо вдалі експериментальні перевірки такого методу підвищення ккд. Важливим в усіх цих дослідженнях є те, що в них була продемонстрована можливість значного підвищення ккд за рахунок профілювання параметрів ЛВЕ, але в них відсутні принципово важливі результати, що можна узяти за основу для синтезу оптимального закону профілювання.

За останні роки предметом активних досліджень стали також ЛВЕ із зустрічним фокусуєним магнітним полем. Лінійна теорія не дає значних розбіжностей для конфігурацій ЛВЕ із супутним та зустрічним напрямками фокусуєного поля. Однак, вже перша реалізація ЛВЕ із зустрічним ведучим полем вказала на необхідність більш ретельних досліджень, оскільки в режимі посилення було досягнуто ккд 25%, що в декілька разів перевищувало ефективність приладу з традиційною конфігурацією. Незважаючи на те, що теоретично були з'ясовані деякі особливості експерименту, причини значного підвищення ккд в ЛВЕ із зустрічним фокусуєним полем у порівнянні з ЛВЕ звичайної конфігурації так і не були з'ясовані.

Метою роботи є дослідження особливостей нелінійних режимів роботи ЛВЕ із зустрічним фокусуєним магнітним полем; вивчення можливостей оптимізації енергообміну в ЛВЕ шляхом захоплення електронних осциляторів; дослідження можливості оптимізації енергообміну в ЛВЕ для випадку неадіабатичної зміни параметрів; розвиток теорії об'ємного заряду в ЛВЕ з аксиально-симетричним електронним потоком та зовнішніми полями з метою дослідження явища випадання електронів на стінки хвилеводу в режимах великого посилення.

Наукова новизна проведених досліджень полягає у тому, що в дисертації на основі чисельного моделювання показані та з'ясовані причини більшої ефективності конфігурації ЛВЕ із зустрічним ведучим полем, у порівнянні з ЛВЕ із супутнім фокусуючим полем. За допомогою теорії стійкості Ляпунова виведені критерії захоплення електронних згустків електромагнітним полем, на основі яких отримані оптимальні закони профілювання статичних магнітних полей в ЛВЕ, забезпечуючи досягнення максимального ккд ЛВЕ. Це дозволило запропонувати ЛВЕ нового типу - автофазний ЛВЕ (АЛВЕ). Аналітично та чисельно показана можливість захоплення електронних згустків при неадіабатичному профілюванні параметрів АЛВЕ. Побудована двовірна нелінійна теорія поля об'ємного заряду в ЛВЕ з'аксимально-симетричними статичними полями, що дозволяє оцінити динамічне поперечне поле об'ємного заряду та дослідити явище випадання електронів на стінки хвилеводу в режимах великого підсилення у двовірній нелінійній теорії ЛВЕ.

Практична цінність роботи полягає у тому, що запропоновано автофазний ЛВЕ із високим ккд, теоретично обґрунтована можливість реалізації автофазного ЛВЕ, розроблена методика аналізу та розрахунку АЛВЕ в нелінійному режимі роботи на ЕОМ. Результати роботи упроваджені у науково-дослідному проекті № 2.3/71, що проводився згідно плану фундаментальних досліджень ДКНТ України у 1994-1995 рр.

## ГОЛОВНІ ПОЛОЖЕННЯ І РЕЗУЛЬТАТИ, ЩО ВІНОСЯТЬСЯ НА ЗАХИСТ

1. Конфігурація ЛВЕ із зустрічним фокусуючим полем є більш ефективною у порівнянні з ЛВЕ із супутнім ведучим полем. Для неї існують великі можливості по оптимізації взаємодії шляхом профілювання параметрів ЛВЕ.

2. Профілювання магнітних полей згідно законів, отриманих з критеріїв захоплення електронних згустків полем електромагнітної хвилі, надає можливостей досягти значення ккд ЛВЕ, близькі до гранично можливих; достатньо сильні критерії захоплення згустків знайдені на основі теорії стійкості Ляпунова.

3. Динамічне поперечне поле об'ємного заряду в ЛВЕ більш ніж в 2 рази перевищує його статичне значення і є однією з головних причин випадання електронів на стінки хвилеводу.

**Апробація роботи.** Основні результати роботи доповідалися та обговорювалися на конференціях та семінарах: Всеукраїнській конференції молодих вчених (фізика, Київ, 1994); Конференції "Наукомісткі технології подвійного призначення" (Київ, 1994); International Symposium "Physics and Engineering of MM and SubMM waves" (Kharkov, 1994); 16-th International Free Electron Laser Conference (Stanford University, 1994); Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми фізичної та біомедичної електроніки" (Київ, 1995); 17-th International Free Electron Laser Conference (New York, 1995); Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми фізичної та біомедичної електроніки" (Київ, 1996); 18-th International Free Electron Laser Conference (Roma, 1996).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 16 праць, головні з яких приведені у списку літератури.

**Особистий внесок дисертанта** в роботах, виконаних у співавторстві, полягає у наступному: участь у постановці задач; отримання усіх рівнянь, необхідних для теоретичного аналізу; складання усіх алгоритмів; створення програм розрахунків; інтерпретація результатів; написання та апробація статей.

**Достовірність результатів та висновків** визначається їх відтворюваністю, відсутністю протиріч між даними, одержаними різними методами, використанням сучасних засобів та методів дослідження, проведенням порівняння (де це можливо) експериментальних даних з результатами моделювання та теоретичними висновками.

## СТРУКТУРА ТА ОБСЯГ ДИСЕРТАЦІЇ

Дисертаційна робота складається з *Вступу*, 4 розділів, *Висновків*, *Списку цитованої літератури* та *Списку робіт*, що опубліковано за матеріалами дисертації, і *Додатку*. Містить 139 сторінок машинописного тексту, 18 малюнків, 16 сторінок літератури (124 найменування).

У *Вступі* наведена коротка історична довідка розвитку ЛВЕ, обґрунтована актуальність роботи, наукова новизна та практична цінність. Приведені головні положення, що винесені на захист, короткий зміст та апробація роботи.

У *першому розділі* представлена одновимірна нелінійна теорія взаємодії релятивістського електронного пучка з ВЧ електромагнітним полем в ЛВЕ. Отримана система рівнянь, що дозволяє провести чисельне моделювання процесів енергообміну у конфігураціях мікрохвильових ЛВЕ - підсилювачів як із супутним, так і з зустрічним напрямками фокусуємого магнітного поля:

$$\frac{dp_1}{dZ} = \left( \frac{\pm \Omega_0}{k_w c p_3} - 1 \right) p_2 - \alpha_s \left( \frac{\gamma}{p_3} - \frac{ck}{\omega} \right) \sin \theta,$$

$$\frac{dp_2}{dZ} = - \left( \frac{\pm \Omega_0}{k_w c p_3} - 1 \right) p_1 + \frac{\Omega_w}{k_w c} - \alpha_s \left( \frac{\gamma}{p_3} - \frac{ck}{\omega} \right) \cos \theta,$$

$$\frac{dy}{dZ} = - \frac{1}{p_3} \alpha_s (p_1 \sin \theta + p_2 \cos \theta),$$

$$\frac{d\theta}{dZ} = g \left( \frac{\gamma}{p_3} - \frac{ck}{\omega} \right) - 1,$$

$$\frac{d\alpha_s}{dZ} = \frac{j_0 e}{mc^3 k_w^2} \frac{\omega}{ck} \int_0^{2\pi} \frac{p_1 \sin \theta + p_2 \cos \theta}{p_3} d\theta_0,$$

де  $Z = k_w z$ ,  $\theta = \omega t - (k + k_w)z$ ,  $\Omega_{0,w} = \frac{eB_{0,w}}{mc}$ ,  $B_0$ ,  $B_w$  -

амплітуди фокусуєчого поля та поля вігглера,  $k_w = 2\pi/\lambda_w$ ,  $\lambda_w$  - просторовий період поля вігглера;  $c$ ,  $\omega$ ,  $k$  - швидкість світла, кругова частота та постійна розповсюдження електромагнітної хвилі відповідно;  $e$ ,  $m$  - заряд та маса спокою електрона;  $\theta_0 \in [0, 2\pi]$  - початкові фази електронів по відношенню до

електромагнітної хвилі,  $\alpha_s = \frac{eA}{k_w mc^2} \cdot \frac{\omega}{c}$  - безрозмірна

амплітуда електромагнітної хвилі;  $p_i = \gamma v_i / c$  - нормовані електронні імпульси ( $i=1,3$ ),  $\gamma$  - релятивістський фактор;

$p_3 = \left[ \gamma^2 - 1 - p_1^2 - p_2^2 \right]^{1/2}$ ;  $j_n = en_n v_n$  - густина струму пучка,  $g = \omega / ck_w$  - коефіцієнт перетворення частоти. Верхній знак відповідає ЛВЕ із супутним ведучим полем, нижній - із зустрічним фокусуєчим полем.

Чисельні розрахунки проведені для параметрів ЛВЕ, близьких до експериментально реалізованих: для супутнього ведучого поля  $B_w = 0.63$  кГс,  $B_0 = 10.9$  кГс; для зустрічного фокусуєчого поля:  $B_w = 1.47$  кГс,  $B_0 = -10.9$  кГс. Густина струму в обох випадках  $j_n = 1.5$  кА/см<sup>2</sup>, початкова безрозмірна амплітуда сигнальної хвилі  $\alpha_s(0) = 0.02$ , робоча частота випромінювання  $\nu = 33.39$  ГГц, початкова енергія електронів  $0.75$  МеВ (що відповідає  $\gamma_n = 2.5$ ),  $k_w = 2$  см<sup>-1</sup>.

Показано, що коли частинки влітають в область взаємодії на стаціонарних траєкторіях, ккд ЛВЕ із зустрічним та супутнім напрямками фокусуєчого магнітного поля близькі. Врахування розбросу поперечних швидкостей електронів на вході в область взаємодії, що виникає внаслідок, наприклад, неадиабатичного наростання поля вігглера, призводить до значного падіння ефективності ЛВЕ із супутнім фокусуєчим

полем та незначному зменшенню ккд для ЛВЕ із зустрічним полем. Ааналіз руху електронів показує, що при цьому при зустрічному напрямку магнітного поля період та амплітуда бетатронних осциляцій значно менші, ніж при супутньому напрямку. Оскільки електрони знаходяться достатньо далеко від своїх стаціонарних траєкторій, вони не можуть ефективно приймати участь у процесі енергообміну з електромагнітною хвилею, що, в свою чергу, приводить до меншої ефективності та стабільності ЛВЕ такої конфігурації. Це і призводить до значних змін у взаємодії для двох випадків. Оскільки конфігурація ЛВЕ із зустрічним фокусуєчим полем є стійкою та ефективною навіть при різкому зростанні поля вігглера на вході в область взаємодії, для неї існують великі можливості по оптимізації взаємодії шляхом профілювання параметрів ЛВЕ.

У другому розділі розглянуті питання оптимізації енергообміну у ЛВЕ шляхом захоплення електронних осциляторів високочастотним електромагнітним полем. Головна ідея підходу полягає у тому, що пропонується зформувати відносно "пухкий" електронний згусток, а потім за допомогою профілювання магнітних полей змістити положення стійкої рівноваги цього згустка у гальмуючу фазу електромагнітної (комбінаційної) хвилі. При цьому кожний електрон у згустку не знаходиться у точному синхронізмі з електромагнітною хвилею, а коливається у межах фазового розміру згустку, який може бути достатньо великим. Електрони не можуть покинути межі фазового розміру згустку з-за достатньо високого потенційного бар'єру у полі електромагнітної хвилі, і, завдяки цьому, усі електрони згустку захоплюються електромагнітною хвилею. Таким чином досягається передача енергії від електронного згустку в цілому до електромагнітної хвилі.

При рішенні задачі, що поставлена, обмежимося параксимальними наближенням (не будемо враховувати поперечної залежності статичних полей ЛВЕ). Обмежимося випадком, коли можна знехтувати силами високочастотного

об'ємного заряду в електронному пучку у порівнянні з силами статичних магнітних полей та електромагнітного поля. Проведемо аналіз умов стійкості руху електронних осциляторів у згустку в полях ЛВЕ у припущенні, що високочастотною модуляцією поперечних швидкостей електронів можна знехтувати, тобто вважаємо, що

$$v_x = v_{\perp}(z) \cos(k_w z), \quad v_y = v_{\perp}(z) \sin(k_w z),$$

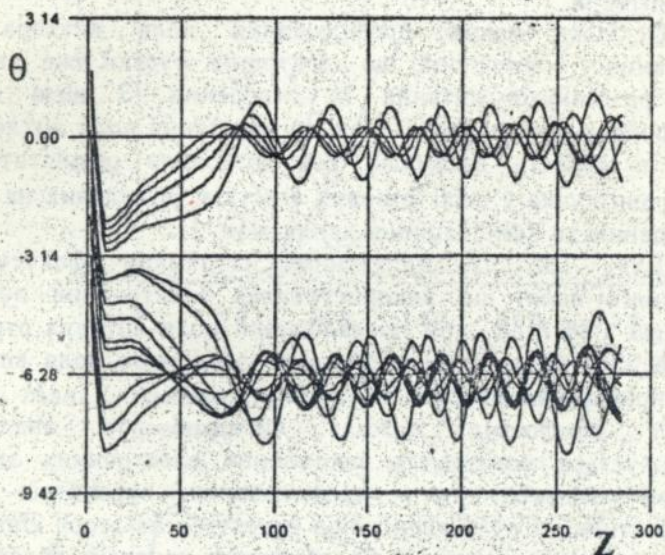
де  $v_{\perp}(z)$  внаслідок профілювання параметрів лазера на вільних електронах є повільною функцією поздовжньої координати. Для дослідження стійкості руху електронів у згустку отримаємо систему рівнянь:

$$\frac{dy}{dt} = -\alpha_s k_w v_{\perp} \sin \theta,$$

$$\frac{d\theta}{dt} = h_0 (v_{ph} - v_z),$$

де  $v_{ph} = \omega / h_0$  - фазова швидкість комбінаційної хвилі,  $h_0 = k + k_w$ ,  
 $v_z = c \cdot \sqrt{\mu - \gamma^{-2}}$ ,  $\mu = 1 - v_{\perp}^2 / c^2$ .

Для дослідження стійкості рішень цієї системи (для виявлення режимів захоплення електронних осциляторів) користувалися теорією Ляпунова для автономних систем. На основі критеріїв стійкості руху показана можливість захоплення електронних згустків за рахунок профілювання параметрів ЛВЕ. Із критеріїв стійкості вдається отримати оптимальні закони профілювання магнітних полей в автофазному лазері на вільних електронах (АЛВЕ). Чисельне моделювання методом крупних частинок проведене для випадку профілювання поля вігглера, оскільки значення поперечної швидкості найбільш чутливе до нього і потребуєміи результат досягається при відносно невеликій зміні цього поля. Отриманий закон профілювання поля вігглера має наступний вигляд:



Мал. 1. Залежність фаз  $\theta$  електронів від безрозмірної довжини  $Z$  ( $\xi = 0.01$ ).

$$\frac{df_w}{dZ} = \xi \cdot \frac{\alpha_s}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{\gamma_1}{P_{ph}} \frac{f_0 - p_3 + \frac{p_1}{p_3} \cdot (p_1 + f_w)}{p_3} d\theta_0.$$

де  $f_w = \frac{\Omega_w}{k_w c}$ ,  $f_0 = \frac{\Omega_0}{k_w c}$ ,  $0 < \xi < 1$  - параметр, що треба встановити у процесі чисельного моделювання. Слід відзначити, що це рівняння не залежить від способу групування. Від фазової ширини згустка залежить тільки

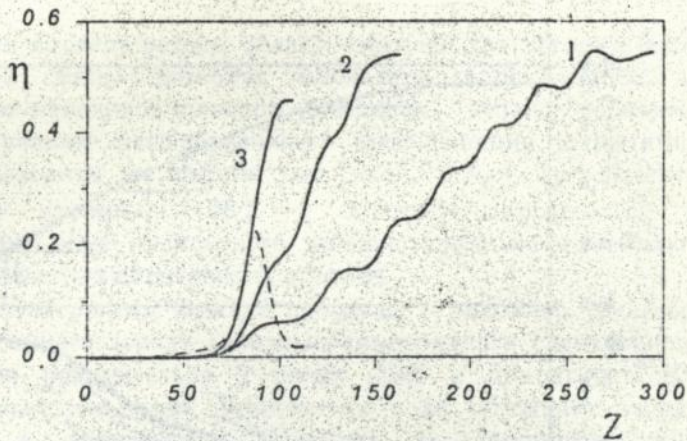
параметр  $\xi$ , що визначає оптимальний закон профілювання поля вігглера.

Оскільки закон профілювання поля вігглера був отриманий у припущенні, що електронні згустки вже існують, було розглянуто питання їх створення. З цією метою запропоновано спеціальне правило зростання поля вігглера на вході в область взаємодії, що дозволило розмістити усі електрони пучка у серії фазових згустків, розділених на  $2\pi$  по відношенню до комбінаційної хвилі (мал. 1).

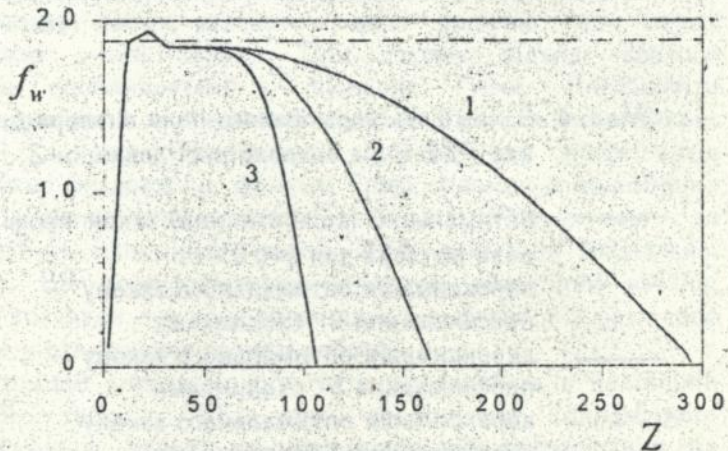
Для ЛВЕ із зустрічним напрямком фокуруючого магнітного поля, що використовував електронний пучок з енергією 1.88 МеВ, при профілюванні поля вігглера отримані ккд до 55% (мал. 2, 3) (22% для однорідного поля вігглера, пунктирна лінія на мал. 2).

У третьому розділі чисельно та аналітично досліджується можливість захоплення електронних згустків шляхом неадіабатичного профілювання параметрів ЛВЕ. Аналіз стійкості руху електронів базується на теорії Ляпунова для неавтономних систем. З отриманих критеріїв захоплення електронних осциляторів випливає, що навіть при неадіабатичних змінах (достатньо швидких, але не стрибкоподібних) параметрів можливий стійкий рух електронів у профільованому АЛВЕ при відсутності їх зупинок.

Для перевірки запропонованої теорії було проведено чисельне моделювання для параметрів, близьких до експериментально реалізованих для випадку профілювання поля вігглера, а саме: енергія пучка  $\epsilon = 1.88$  МзВ ( $\gamma = 4.75$ ), фокууюче магнітне поле  $B_0 = -1.4$  кГс, номінальне значення поля вігглера  $B_w = 2.8$  кГс, просторовий період поля вігглера  $\lambda_w = 7.2$  см, робоча довжина хвилі  $\lambda = 6.2$  мм. На мал. 4 приведені результати апроксимації оптимального закону профілювання поля вігглера, що відповідає параметру  $\xi = 0.05$  (коли ккд ЛВЕ при адіабатичній зміні поля вігглера 51%, а довжина області взаємодії близько 1.6 м). Крива адіабатичної



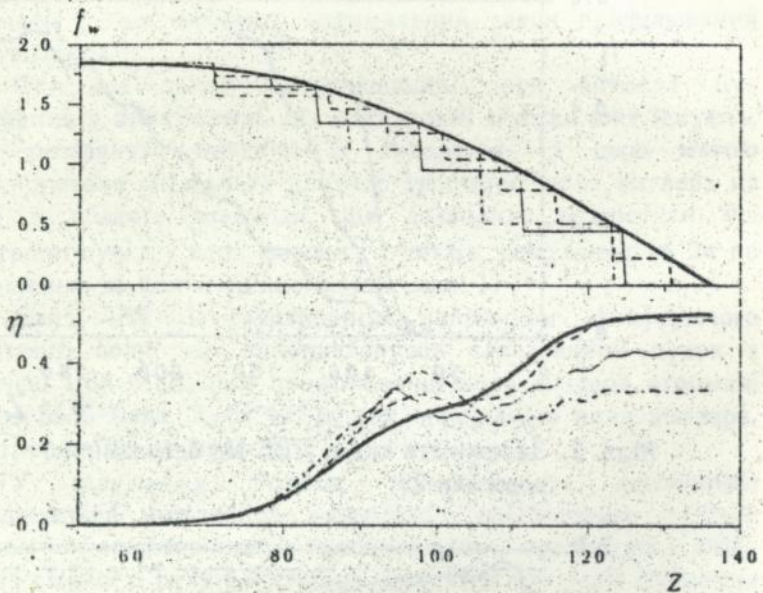
Мал. 2. Залежність ккд  $\eta$  ЛВЕ від безрозмірної довжини  $Z$ :



Мал. 3. Залежність нормованого поля вігглера  $f_w$  від безрозмірної довжини  $Z$ .

----- номінальне значення  $f_w$ .

1.-  $\xi=0.01$ ; 2.-  $\xi=0.04$ ; 3.-  $\xi=0.07$ .  $\alpha_s(0) = 0.02$ .



Мал. 4. Залежність нормованого поля віггера  $f_w$  та ккд ЛВЕ  $\eta$  від безрозмірної довжини  $Z$ :

- оптимальний (адіабатичний) закон профілювання поля віггера для  $\xi=0.05$ ;
- - - - - апроксимація оптимального закону профілювання 9 "сходінками";
- апроксимація оптимального закону профілювання 5 "сходінками";
- - - - - апроксимація оптимального закону профілювання 4 "сходінками";

зміни поля вігглера уздовж області взаємодії для такого  $\xi$  (мал. 4, жирна лінія) дозволяє проводити апроксимацію за допомогою невеликої кількості "сходинок". Можна побачити, що врахування неадіабатичності профілювання параметрів ЛВЕ призводить до падіння ккд, який, однак, залишається достатньо високим ( $\approx 38\%$  у випадку апроксимації 4 сходинками) для практичного використання запропонованої теорії захоплення електронних згустків.

У четвертому розділі побудована нелінійна двомірна теорія об'ємного заряду аксиально-симетричного електронного пучка, що поширюється у полях ЛВЕ у присутності ВЧ електромагнітного поля. Компоненти поля об'ємного заряду записані в координатах Лагранжа за допомогою двічі усереднених функцій Гріна двох однаково заряджених нескінченно тонких дисків. Для цього використовувався метод "компенсуючих зарядів", в якому модель електронного кільця замінювалась двома дисками різних радіусів, що мають протилежні знаки заряду. При такому підході вдалося запобігти особливостей в функціях Гріна. Коефіцієнти розкладання двічі усереднених функцій Гріна в ряди Фур'є отримані з використанням відповідних коефіцієнтів розкладання поздовжніх функцій Гріна, відомих з одномірних теорій надвисокочастотних приладів. Розрахунки за результатами одномірної теорії ЛВЕ величини радіальної складової ВЧ поля об'ємного заряду в нелінійній частині приладу показали, що вона перевищує більш ніж у 2 рази своє значення у статичному режимі роботи.

Отримані вирази можуть бути використані в нелінійній двомірній теорії ЛВЕ при дослідженні динамічного розфокусування пучка, що призводить до токоосідання на стінки хвилеводу в режимах великого підсилення. Це особливо важливо для ЛВЕ, що працюють в міліметрових та субміліметрових діапазонах.

**Перелік основних публікацій по темі дисертації**

1. Белявский Е.Д., Гончаров И.А., Силिवра А.А. *Улучшение энергообмена в лазере на свободных электронах путем захвата электронных осцилляторов // ЖЭТФ.* -1995, Т. 108, №10, С. 1318-1327.
2. Silivra A.A., Goncharov I.A. *Features of operation of a FEL with reversed guide field // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 358 (1995) pp. 452-454.*
3. Silivra A.A., Belyavskiy E.D., Goncharov I.A. *Optimization of the free electron laser interaction via electron bunch trapping // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 358 (1995) pp. 512-515.*
4. Белявский Е.Д., Гончаров И.А. *Новые механизмы усиления, генерации и преобразования электромагнитных колебаний в электронике СВЧ // Электроника и связь (1996), В. 1, сс. 36-44.*
5. Белявский Е.Д., Гончаров И.А. *Поле объемного заряда в лазере на свободных электронах с аксиально-симметричными внешними полями и током // В сб. докл. межд. н.-т. конф. "Проблемы физической и биомедицинской электроники". Киев, (1996 г.), сс. 246-249.*
6. Белявский Е.Д., Гончаров И.А. *Автофазные лазеры на свободных электронах // В сб. докл. межд. н.-т. конф. "Проблемы физической и биомедицинской электроники". Киев, (1995 г.), сс. 250-251.*
7. Goncharov I.A., Silivra A.A. *Efficiency enhancement of a FEL with reversed guide field // Proc. from International Symposium "Physics and Engineering of MM and SubMM waves". Kharkov (1994) v.3, pp. 301-303.*
8. Silivra A.A., Belyavskiy E.D., Goncharov I.A. *Optimization of the free electron laser interaction via electron bunch trapping // Proc. from 16-th International FEL Conference. Stanford University (USA) - 1994, Mo3-34, p. 40.*
9. Goncharov I.A., Belyavskiy E.D., Silivra A.A. *Efficiency optimization in a FEL with fields nonadiabatic tapering*

// Proc. from 17-th International FEL Conference. New York (USA) -1995, Th3-10.

10. Belyavskiy E.D., Goncharov I.A. *Space charge field in a FEL with axially symmetric electron beam* // Proc. from 17-th International FEL Conference. New York (USA) -1995, Th3-24.
11. Goncharov I.A., Belyavskiy E.D. *An effect of bipolar electromagnetic impulses parametric amplification by electron beam in the periodic magnetic field* // Proc. from 18-th International FEL Conference. Roma (Italy) -1996, Th P15.
12. Гончаров І.О. *Дослідження нелінійних режимів лазерів на вільних електронах* // Праці Всеукраїнської конференції молодих вчених (фізика). Київ (1994) сс. 25-33.

#### **Goncharov I.A. An autophase free-electron laser.**

Thesis for a Physics and Mathematics candidate's degree on the speciality 01.04.04 - Physical Electronics, Institute of Physics of NAS of Ukraine, Kyiv, 1997.

Processes of a relativistic electron beam and HF electromagnetic field interaction in a FEL are investigated. It is shown and substantiated theoretically more efficiency of the FEL with reversed guide magnetic field. The optimum rules of magnetic fields tapering are obtained in order to achieve the maximum FEL efficiency. To estimate dynamical defocusing of a beam in the high-gain regimes the nonlinear two-dimensional theory of a space charge in a FEL is created.

#### **Гончаров І.А. Автофазний лазер на свободних електронах.**

Дисертація на соискание ученої ступені кандидата фізико-математических наук по спеціальності 01.04.04 - фізическая

електроніка, Інститут Фізики НАН України, г. Київ, 1997. Исследованы процессы энергообмена релятивистского электронного пучка и ВЧ электромагнитной волны в ЛСЭ. Теоретически показана и обоснована большая эффективность ЛСЭ со встречным направлением фокусирующего магнитного поля. С целью достижения предельно возможных кпд ЛСЭ при помощи теории устойчивости Ляпунова получены оптимальные законы профилирования магнитных полей. Для оценки динамической расфокусировки пучка в режимах большого усиления построена нелинейная двумерная теория поля объемного заряда в ЛСЭ.

**Ключові слова:** лазер (мазер) на вільних електронах, оптимізація енергообміну, релятивістський електронний пучок.

**Гончаров Ілля Олексійович**

**АВТОФАЗНИЙ ЛАЗЕР НА ВІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОНАХ**

Підписано до друку 04.03.97. Формат паперу  
60×84/16. Офсетний друк. Ум. друк. арк. 1.0. Обл.  
вид. арк. 0.8. Тираж 100. Зам. №13.  
Безкоштовно.

---

252022

Інститут Фізики НАН України, ВНТІ  
Київ, пр. Науки 46

435147

Ar 37.745  
**AB 37.745**

БЕЗКОШТОВНО