

Винахід відноситься до релятивістської електроніки, в особливості до супергетеродинних параметричних лазерів на вільних електронах, і може бути використаним як генератор чи підсилювач електромагнітних сигналів, у тому числі, в технологічних системах комерційного призначення, зокрема, в системах побудованих на принципі стимулювання хімічних реакцій лазерним випромінюванням і системах лазерної різки та зварювання матеріалів.

Відомий пристрій, здатний працювати як параметричний лазер на вільних електронах (ПЛВЕ) [Силин Р.А., Кулиш В.В., Клименко Ю.И. Электронный прибор. \А.с. (СССР), №705914. Приоритет от 18.05.72, Kulish V.V. Hierarchical methods. Vol.1. Hierarchy and Hierarchical Asymptotic Undulative Electrodynamical systems, Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 2002, pp.89-107]. Пристрій складається із інжектора та прискорювача релятивістського електронного пучка (що утворюють джерело релятивістського електронного пучка), системи накачки, електродинамічної системи електромагнітного сигналу та електронного колектору. В основу базового робочого механізму даного пристрою покладено ефект параметричного трихвильового резонансу (поперечних електромагнітних хвиль накачки і сигналу та повздовжньої комбінаційної електронної хвилі, відповідно), який, як відомо, характеризується відносно невисокими значеннями коефіцієнту підсилення. В зв'язку з цим, основним недоліком даного пристрою є відносно низькі рівні підсилення електромагнітного сигналу за один прохід. Як наслідок, відомі ПЛВЕ, особливо ті, що працюють у режимі підсилення сигналу за один прохід, характеризуються надмірними габаритами, вартістю виготовлення та експлуатації. Зазначений недолік є основною перешкодою для створення конструкційно простих і відносно недорогих та компактних супергетеродинних лазерів на вільних електронах комерційного призначення.

Відомий також пристрій, здатний працювати як супергетеродинний лазер на вільних електронах - плазма-пучковий супергетеродинний лазер на вільних електронах (ППСЛВЕ) [Коцаренко Н.Я., Кулиш В.В. Об эффекте супергетеродинного усиления электромагнитных волн в системе плазма -пучок. \Радиотехника и электроника, т. 25, №11, 1980, с.2470-2471]. Пристрій складається із інжектора та прискорювача релятивістського електронного пучка (що утворюють джерело релятивістського електронного пучка), системи накачки, електродинамічної системи електромагнітного сигналу, електронного колектору та підсилювача комбінаційної електронної хвилі. В основу базового робочого механізму даного пристрою покладено ефект супергетеродинного підсилення електромагнітних хвиль. Даний ефект реалізується за рахунок того, що у робочий об'єм ППСЛВЕ на відміну від ПЛВЕ введено додатковий сторонній (непараметричний) механізм ефективного підсилення комбінаційної електронної хвилі. У даному випадку роль цього додаткового механізму виконує ефект плазма-пучкової нестійкості.

Таким чином, головною конструкційною відмінністю даного пристрою (ППСЛВЕ) від попереднього аналогу (ПЛВЕ) є введення у його склад спеціального підсилювача комбінаційної електронної хвилі, виконаного на базі ефекту плазма-пучкової нестійкості. Дана версія ефекту супергетеродинного підсилення характеризується рекордно високими значеннями коефіцієнту підсилення електронних хвиль. Це, у свою чергу, дозволяє суттєво підвищити коефіцієнт підсилення електромагнітного сигналу за один прохід даному в ППСЛВЕ, у порівнянні з ПЛВЕ. Таким чином, головний недолік ПЛВЕ (малий коефіцієнт підсилення хвилі сигналу) вдається усунути в ППСЛВЕ.

Головними недоліками ППСЛВЕ є його надмірна конструкційна складність і ненадійність роботи. Це, в основному, пов'язано із конструкційними і технологічними проблемами, які виникають при забезпеченні ефективної та надійної ізоляції джерела сильнострумового релятивістського електронного пучка (що складається із електронного інжектора та прискорювача) від плазми та нейтрального газу, якими заповнено робочий об'єм плазма-пучкового підсилювача електронних хвиль. Вказаний недолік є головною причиною того, що в процесі роботи збільшується імовірність електричного пробоя у катодному проміжку інжектора та в прискорювальних проміжках прискорювача, де за технологічними вимогами повинен підтримуватись високий вакуум. Крім того, попадання іонів плазми у прискорювальні канали прискорювача та робочий об'єм інжектора призводить до появи там зустрічного потоку прискорених іонів. Ці іони інтенсивно бомбардують поверхню катоду та інших елементів конструкції прискорювача, що, в свою чергу, приводить до значного зниження надійності та довговічності роботи джерела релятивістського електронного пучка у цілому. Традиційні технологічні засоби нейтралізації вказаних явищ дозволяють лише пом'якшити їх вплив, але не вирішують проблему кардинально. Усе це, у кінцевому підсумку, приводить до суттєвого ускладнення конструкції пристрою, збільшує витрати на виготовлення та експлуатацію і, відповідно, погіршує перспективи його комерційного застосування. Зазначені недоліки і є основною перешкодою для створення конструкційно простих і відносно недорогих супергетеродинних лазерів на вільних електронах комерційного призначення.

Відомий також пристрій, здатний працювати як супергетеродинний лазер на вільних електронах - двопучковий супергетеродинний лазер на вільних електронах (ДСЛВЕ) [Болонин О.Н., Кулиш В.В., Пугачев В.П. Супергетеродинное усиление электромагнитных волн в системе двух релятивистских электронных потоков. \Укр. физ. журнал №10, 1988, т. 33, с.1465-1468]. Пристрій складається із інжектора та прискорювача релятивістського електронного пучка (що утворюють джерело релятивістського електронного пучка), системи накачки, електродинамічної системи електромагнітного сигналу, електронного колектору та підсилювача комбінаційної електронної хвилі. Особливістю даного пристрою є те, що підсилювач комбінаційної електронної хвилі тут виконаний у формі двопучкового підсилювача електронних хвиль. Для цього джерело релятивістського електронного пучка (інжектор та прискорювач) виконано за двопучковою конструкційною схемою, яка дозволяє формування двошвидкісного пучка у робочому об'ємі ДСЛВЕ. Завдяки тому, що роль плазми у даному пристрою функціонально виконує плазма другого сильнострумового електронного пучка, то вдається вирішити принаймні частину вище описаних технологічних проблеми, характерних для ППСЛВЕ. В свою чергу, слід зазначити, що вказаний прогрес досягається ціною суттєвого ускладнення конструкції джерела релятивістського сильнострумового електронного пучка, яке, як відзначалось, у даному випадку повинно бути двошвидкісним. Останнє, в свою чергу, приводить до суттєвого ускладнення конструкції пристрою у цілому, збільшує витрати на його виготовлення та експлуатацію і, відповідно, погіршує перспективи комерційного застосування.

Таким чином, як і у випадку ППСЛВЕ, зазначений вище недолік, що пов'язаний із особливостями конструкції підсилювача комбінаційної електронної хвилі, є основною перешкодою для створення конструкційно простих і відносно недорогих ДСЛВЕ комерційного призначення.

Саме ДСЛВЕ є найбільш близьким до запропонованого винаходу за технічною суттю та результату, що досягається, і його прийнято за прототип.

Завданням винаходу є створення супергетеродинного лазера на вільних електронах комерційного типу, що характеризується помірними габаритами та відносними простотою конструкції і зниженою вартістю виготовлення та експлуатації, тобто, технологічною та комерційною адекватністю умовам, що є характерними для цивільних галузей індустрії, таких наприклад, як хімічна промисловість чи машинобудування.

Поставлене завдання вирішується тим, що в супергетеродинному параметричному лазері на вільних електронах з повздовжнім електричним ондулятором, який містить інжектор, прискорювач релятивістського електронного пучка, що складається з однієї та більше секції, систему накачки, що складається з однієї або більше секцій, електродинамічну систему електромагнітного сигналу, електронний колектор та підсилювач комбінаційної електронної хвилі, який згідно винаходу виконаний у формі повздовжнього електричного ондулятора. При цьому передбачено тринадцять конструкційних варіантів виконання даної конструкції та варіанти їх комбінацій.

У першому з них підсилювач комбінаційної електронної хвилі розміщений у робочому об'ємі системи накачки на осі релятивістського електронного пучка.

У другому - підсилювач комбінаційної електронної хвилі розміщений між вхідною та вихідною секціями системи накачки на осі релятивістського електронного пучка.

У третьому - принаймні одну секцію прискорювача релятивістського електронного пучка розміщено на осі релятивістського електронного пучка між вхідною секцією системи накачки та підсилювачем комбінаційної електронної хвилі.

У четвертому - принаймні частину електродинамічної системи електромагнітного сигналу виконано у формі оптичного (квазіоптичного) резонатора.

У п'ятому - принаймні частину електродинамічної системи електромагнітного сигналу виконано у формі оптичної (квазіоптичної) лінзової системи.

У шостому - принаймні частину вхідної секції системи накачки виконано у формі нерезонансного модулятора релятивістського електронного пучка.

У сьомому - принаймні частину системи накачки виконано у формі електромагнітного ондулятора.

У восьмому - принаймні одну секцію системи накачки виконано у формі магнітного ондулятора.

У дев'ятому - принаймні одну секцію системи накачки виконано у формі поперечного електричного ондулятора.

У десятому - принаймні частину системи накачки з розміщенням в її робочому об'ємі підсилювачем комбінаційної електронної хвилі, виконано у формі косого повздовжньо-поперечного електричного ондулятора.

В одинадцятому - підсилювач комбінаційної електронної хвилі суміщено принаймні з однією секцією прискорювача електростатичного типу, кожну пару сусідніх електродів прискорювальної трубки якого підключено до джерел електричного потенціалу протилежного знаку.

У дванадцятому підсилювач комбінаційної електронної хвилі суміщено принаймні з однією секцією прискорювача індукційного типу, кожну пару сусідніх груп магнітних індукторів якого підключено до джерел електричного струму таким чином, що вектори електричних полів, які вони генерують на осі прискорювального каналу, орієнтовані взаємно протилежно.

У тринадцятому - підсилювач комбінаційної електронної хвилі виконано у формі індукційного прискорювача з екранованими магнітними індукторами, кожну сусідню пару яких підключено до джерел електричного струму, таким чином, що вектори електричних полів, які вони генерують в прискорювальних проміжках екранів індукторів, орієнтовані взаємно протилежно.

Виконання супергетеродинного параметричного лазера на вільних електронах з повздовжнім електричним ондулятором (СПЛВЕ) у сукупності з усіма суттєвими ознаками дозволяє реалізувати ситуацію, коли в процесі руху сильнострумowego електронного пучка в об'ємі повздовжнього електричного ондулятора реалізується ефект параметричного трихвильового резонансу для трьох повздовжніх електричних хвиль (поля повздовжнього ондулятора, комбінаційної та холостої електронних хвиль, відповідно). Завдяки цьому досягається суттєве підсилення комбінаційної електронної хвилі. В прототипі аналогічний ефект підсилення комбінаційної електронної хвилі досягається за рахунок реалізації двопотокової нестійкості (непараметричного механізму). Але, оскільки конструкція повздовжнього електричного ондулятора є значно простішою за конструкцію джерела двошвидкісного сильнострумowego електронного пучка у прототипі, то це, в свою чергу, дозволяє суттєво спростити конструкцію ДСЛВЕ у цілому, зменшити її габарити та вартість виготовлення і експлуатації.

Рішення зі схожими ознаками при патентному пошуку заявником не виявлені і також не виявлені відомості про впливи, передбачені суттєвими ознаками винаходу, що заявляється, на досягнення вказаного технічного результату. Це дозволяє зробити висновок, що технічне вирішення, що заявляється, відповідає критеріям патентоспроможності "новизна" та "винахідницький рівень".

Суть винаходу пояснюється кресленнями, де на фіг. 1 показано загальну конструкцію СПЛВЕ, на фіг. 2 проілюстровано варіант конструкції багатосекційного СПЛВЕ, на фіг. 3 проілюстровано варіант конструкції багатосекційного СПЛВЕ з проміжним прискоренням електронного пучка, на фіг. 4 проілюстровано варіант конструкції односекційного СПЛВЕ з електродинамічною системою електромагнітного сигналу, яка виконана у формі оптичного (квазіоптичного) резонатора, на фіг. 5 проілюстровано варіант конструкції односекційного СПЛВЕ з електродинамічною системою електромагнітного сигналу, яка виконана у формі оптичної (квазіоптичної) лінзової системи, на фіг. 6 проілюстровано варіант конструкції багатосекційного СПЛВЕ, в якому обидві секції накачки виконано у формі магнітних ондуляторів (у тому числі, і мультигармонічних), на фіг. 7 проілюстровано

варіант конструкції багатосекційного СПЛВЕ, в якому вхідну секцію системи накачки виконано у формі нерезонансного модулятора релятивістського електронного пучка, на фіг. 8 проілюстровано варіант конструкції багатосекційного СПЛВЕ, вхідну секцію системи накачки якої виконано у формі електромагнітного ондулятора. На фіг. 9 проілюстровано варіант конструкції підсилювача комбінаційної електронної хвилі, який суміщено з секцією прискорювача електростатичного типу, кожну пару сусідніх електродів прискорювальної трубки якого підключено до джерел електричного потенціалу протилежного знаку. На фіг. 10 та фіг. 11 проілюстровано варіанти конструкції підсилювача комбінаційної електронної хвилі, що виконані у формі секції індукційного прискорювача із спільним електричним екраном (фіг. 10). На відміну від власне індукційних прискорювачів, тут кожну пару сусідніх груп магнітних індукторів підключено до джерел електричного струму таким чином, що вектори електричних полів, які вони генерують на осі прискорювального каналу, орієнтовані взаємно протилежно. На фіг. 11 проілюстровано варіант подібної конструкції підсилювача комбінаційної електронної хвилі, який виконаний у формі періодично-реверсивної серії екранованих прискорювальних секцій індукційного прискорювача, де магнітні індуктори кожної пари сусідніх секцій підключено до джерел електричного струму так, що вектори електричних полів, які вони генерують в прискорювальних проміжках екранів індукторів, орієнтовані взаємно протилежно. На фіг. 12 проілюстровано варіант конструкції підсилювача комбінаційної електронної хвилі, який виконаний на базі індукційного прискорювача у формі косого поздовжньо-поперечного електричного ондулятора.

Супергетеродинний лазер на вільних електронах з поздовжнім електричним ондулятором (СПЛВЕ) (див. фіг. 1) містить вхідну частину 1 електродинамічної системи електромагнітного сигналу, джерело 2 релятивістського електронного пучка (у складі електронного інжектора та прискорювача), вакуумний канал 3 з електронним пучком, систему 4 накачки, підсилювач 5 комбінаційної електронної хвилі у формі поздовжнього електричного ондулятора, вихідну частину 6 електродинамічної системи електромагнітного сигналу та електронний колектор 7. Джерело 2 релятивістського електронного пучка підключено до вакуумного каналу 3 електронного пучка, який, у свою чергу, підключено до електронного колектора 7. Підсилювач 5 комбінаційної електронної хвилі розміщено у робочому об'ємі системи 4 накачки таким чином, що вони не затіняють робочі об'єми вхідної частини 1 та вихідної частини 6 електродинамічної системи електромагнітного сигналу та вакуумний канал 3 з електронним пучком.

Приклади конструкційної версії СПЛВЕ, за схемою, наведеною на фіг. 1, показано на фіг. 2 - фіг. 8. Особливістю конструкційної версії наведеної на фіг. 2 (багатосекційний СПЛВЕ) є те, що тут підсилювач 5 комбінаційної електронної хвилі розміщено між двома секціями системи 4 накачки, а саме між вхідною (модулятором) та вихідною секціями 8, 9, відповідно. Інший варіант даної конструкційної версії наведено на фіг. 3. Тут секцію 10 електронного прискорювача (як складову джерела 2 релятивістського електронного пучка) розміщено у проміжку між підсилювачем 5 комбінаційної електронної хвилі та вихідною секцією 9 накачки.

Приклади версій, що наведено на фіг. 4 та фіг. 5 ілюструють дві конструкційні можливості виконання вхідної та вихідної частин 1, 6 електродинамічної системи електромагнітного сигналу. У тому числі, у версії, представлений на фіг. 4, вхідну частину 1 системи електромагнітного сигналу виконано у формі суцільного дзеркала 11, вихідну частину 6 - напівпрозорого (чи із спеціальним вікном для виводу енергії) дзеркала 12. Дзеркала 11, 12 розміщено таким чином, що вони утворюють оптичний (чи квазіоптичний) резонатор для хвилі сигналу. У конструкційній версії, представлений на фіг. 5, вхідна та вихідна частини 1, 6 системи електромагнітного сигналу виконано у формі оптичних (квазіоптичних) лінз 13, 14, відповідно.

Приклади версій, що наведено на фіг. 6 - фіг. 8 ілюструють різні конструкційні можливості при виконанні системи 4 накачки. У тому числі, на фіг. 6 наведено варіант конструкційної версії багатосекційного СПЛВЕ за схемою, поданою на фіг. 2. А саме, тут як вхідну секцію 8, так і вихідну секцію 9 системи 4 накачки виконано у формі монохроматичних чи мультигармонічних магнітних ондуляторів 15, 16. Особливістю даної версії є також і те, що тут між ондулятором 15 та підсилювачем 5 комбінаційної електронної хвилі додатково введено систему 17 поглинання вхідного електромагнітного сигналу. В конструкційній версії, наведеній на фіг. 7, блок, до складу якого входять вхідна секція 8 системи накачки та вхідна частина 1 електродинамічної системи електромагнітного сигналу, виконані у формі нерезонансного модулятора електронного пучка, який складається, наприклад, з бочкоподібного оптичного (квазіоптичного) резонатора 18, до якого підключено джерело 19 вхідного сигналу. Нерезонансний модулятор, який складається з бочкоподібного оптичного (квазіоптичного) резонатора 18, до якого підключено джерело 19 вхідного сигналу, розміщено між джерелом 2 релятивістського електронного пучка та системою 17 поглинання вхідного електромагнітного сигналу таким чином, що його елементи конструкції не затіняють робочого об'єму вакуумного каналу 3. Особливістю конструкційної версії, яка наведена на фіг. 8 є те, що тут принаймні одну із секцій системи 4 накачки, наприклад, вхідну секцію 8, як у даному випадку, виконано у формі електромагнітного ондулятора. Наприклад, у формі уповільнюючої електродинамічної системи 20, до входу якої підключено НВЧ-генератор 21.

Передбачено також і інші конструкційні версії, які відрізняються тою чи іншою комбінацією відомих форм виконання ключових конструкційних елементів (вхідної та вихідної частин 1, 6 електродинамічної системи електромагнітного сигналу, джерела 2 релятивістського електронного пучка, вакуумного каналу 3 електронного пучка, системи 4 накачки та електронного колектора 7. Відмінності цих версій, однак, не є суттєвими, тобто вони не торкаються головної конструкційної відмінності запропонованого винаходу, що складає його суть.

Приклади, що наведено на фіг. 9 - фіг. 12 ілюструють різні конструкційні версії виконання підсилювача 5 комбінаційної електронної хвилі. У тому числі, конструкцію наведену на фіг. 9 побудовано на базі прискорювальної секції електростатичного прискорювача. Тут електронний пучок 22 розміщено у вакуумному каналі, сформованому ізоляторами 23 та електродами 25, які виконано у формі відрізків пролітних труб. Електроди 25 закріплено в ізоляторах 23 виводами 26. В свою чергу, виводи 26 приєднано до джерела високої напруги (тут не показаного) таким чином, що електричні поля 27 між будь-яким із електродів 25, з одного боку, та його сусідами зліва та справа, з другого, направлені колінеарно осі електронного пучка 22 у взаємно протилежних напрямках. Таким чином, результуюче електричне поле 27 в об'ємі електронного пучка 22 сформовано за поздовжньо-ондуляторним законом.

Передбачено два конструкційні варіанти даної версії, що на фіг. 9. Перший із них характеризується тим, що амплітуди електричного поля 27 на гальмівних і прискорювальних проміжках між електродами 25 підбрано однаковими. У другому варіанті вони відрізняються за величиною, так що результуюче електричне поле 27 крім чисто осциляторної складової має також постійну складову (гальмуючу чи прискорюючу електронний пучок 22 як ціле).

Приклад конструкції підсилювача 5 комбінаційної електронної хвилі, наведений на фіг. 10, побудовано на базі лінійного індукційного прискорювача з неекранованим прискорювальним каналом. Тут поздовжньо-ондуляторне вихрове електричне поле 28 у об'ємі електронного пучка 22 сформовано завдяки магнітним індукторам 29. Зовнішній екран 30 виконаний таким чином, що він безпосередньо не приймає участі у формуванні поздовжньо-ондуляторного вихрового електричного поля 28. При цьому індуктори 29 приєднані до джерел живлення (тут не показаних) таким чином, що, як і у попередньому випадку наведеному на фіг. 9, результуюче вихрове електричне поле 28 в об'ємі пучка 22 виявляється поздовжньо-ондуляторним.

Приклад конструкції підсилювача 5 комбінаційної електронної хвилі, наведений на фіг. 11, також побудовано на базі лінійного індукційного прискорювача, але на цей раз - з екранованим прискорювальним каналом. Головна відмінність від конструкції, що наведена на фіг. 9, тут полягає у формі виконання екрану 30, який у даному випадку розбито на кілька окремих секцій. У випадку конструкції, що на фіг. 10, кожна секція екрану 30 охоплює тільки одну прискорювальну секцію, яка може містити більше чим один магнітний індуктор 29. Прискорювальні секції з екранами розміщено одну по відношенні до другої таким чином, що частини 31 екранів 30 створюють в об'ємі електронного пучка 22 поздовжньо-ондуляторне електричне поле.

Передбачено також варіант комбінованої конструкції, у якій одні прискорювальні секції з екранами виконано за схемою, що наведена на фіг. 10, а інші - за схемою на фіг. 11.

Приклад конструкції підсилювача 5 комбінаційної електронної хвилі, просторово суміщеного з системою 4 накачки, яку, в свою чергу, виконано у формі електричного ондулятора, наведено на фіг. 12. Головна відмінність від попередньої конструкції, що подана на фіг. 11, у даному випадку полягає у тому, що тут прискорювальні проміжки сусідніх прискорювальних секцій не є перпендикулярними до осі пучка 22, а орієнтовані під кутом меншим за 90° . Останнє досягається за рахунок спеціальної форми частин 31 екрану, які в конструкції використано у якості елементів прискорювального проміжку. А саме, ці частини 31 виконано у формі відрізків пролітних труб з «косими» торцями, як це показано на фіг. 12. Як наслідок результуюче ондуляторне електричне поле в об'ємі електронного пучка має як поздовжню (поле підсилювача 5), так і поперечну (поле системи 4 накачки) складові.

Передбачено також комбінований варіант конструкції із просторово суміщеними підсилювачем 5 та системою 4 накачки, у якому частину прискорювальних проміжків виконано за «прямою» схемою, що наведено на фіг. 11, а решта за «косою» схемою, як на фіг. 12. За рахунок цього забезпечено можливість реалізації таких просторово суміщених систем 4 та 5, у яких періоди ондуляції поперечного і поздовжнього електричних ондуляторів не співпадають.

Робота передбачуваного винаходу полягає у наступному. Джерело 2 релятивістського електронного пучка (у складі електронного інжектора та прискорювача) формує одношвидкісний пучок, який далі направляють у вакуумний канал 3 електронного пучка, який виконаний у робочому об'ємі підсилювача 5 комбінаційної електронної хвилі (поздовжнього ондулятора). Цей же робочий канал охоплено системою 4 накачки (магнітним, електричним чи електромагнітним поперечним ондулятором). Одночасно за допомогою вхідної частини 1 електродинамічної системи в той же вакуумний канал 3 вводять електромагнітний сигнал, що підлягає підсиленню. Підсилений електромагнітний сигнал виводять назовні через вихідну частину 6 електродинамічної системи електромагнітного сигналу, а відпрацьований електронний пучок осаджують у об'ємі електронного колектору 7 (з рекуперацією його енергії чи без). Підсилення електромагнітного сигналу при цьому здійснюють за рахунок ефекту супергетеродинного підсилення. Даний ефект реалізують за рахунок нелінійного накладання двох параметричних механізмів підсилення. Першим із них є традиційний для ПЛВЕ ефект параметричної нестійкості хвиль в плазмі електронного потоку, а саме, поперечних хвиль накачки і сигналу та поздовжньої хвилі просторового заряду (ХПЗ) (більш детально про цей ефект див. в монографії [Kulish V.V. Hierarchical methods. Vol.11. Undulative electrodynamic systems, Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 2002]). Другим є ефект параметричної нестійкості трьох поздовжніх електричних хвиль - повільної і швидкої ХПЗ та хвилі поздовжнього електричного ондулятора (про ефект параметричної нестійкості поздовжніх хвиль більш детально див. у монографії [Weiland J. and Wilhelmsson H. Coherent nonlinear interactions of waves in plasmas. Oxford: Pergamon Press., 1977]). Нелінійний (супергетеродинний) перенос підсилення від другого із механізмів (поздовжнього) до першого (ЛВЕ-йного) здійснюється за рахунок того, що одна із ХПЗ (повільна чи швидка) виявляється спільною для обох вище згаданих трійок параметрично зв'язаних хвиль. Таким чином, характерною фізичною особливістю базового робочого механізму СПЛВЕ, на відміну від прототипу, є також і те, що тут обидва механізми підсилення, як основний, так і додатковий, носять параметричну природу.

Описаний робочий механізм супергетеродинного підсилення використано у даному винаході у формі двох його модифікацій. А саме, у формі просторово суміщеної та просторово рознесеної. Відповідно, даний пристрій запропоновано у формі двох типів конструкційних версій - односекційної і багатосекційної (клістронної). У першому випадку обидва параметричні механізми (ЛВЕ-йного та поздовжній, відповідно) є просторово суміщеними, як це проілюстровано на прикладі наведеному на фіг. 1. Характерною особливістю такої конструкційної версії, як легко бачити, є те, що тут підсилювач 5 комбінаційної електронної хвилі розміщено у робочому об'ємі системи накачки 4 на осі релятивістського електронного пучка. Це означає, що основний та додатковий механізми підсилення працюють одночасно в одному і тому ж робочому об'ємі.

У другому випадку обидва механізми рознесено у просторі (багатосекційні СПЛВЕ), тобто для однієї і тієї ж групи електронів вони працюють «по черзі». При цьому, може бути реалізовано принаймні два конструкційні варіанти такого просторового рознесення, як це проілюстровано на фіг. 2 та фіг. 3, відповідно. У першому із них

(фіг. 2) підсилювач 5 комбінаційної електронної хвилі розміщено між вхідною та вихідною секціями 8, 9 системи 4 накачки на осі релятивістського електронного пучка. Зазначимо, як вхідна та вихідна секції 8, 9 системи 4 накачки, так і підсилювач 5 комбінаційної електронної хвилі, можуть бути виконані як за монохроматичними, так і за мультигармонічними конструкційними схемами. Крім того, число секцій системи накачки може бути більше, ніж два, а число підсилювачів комбінаційної електронної хвилі (розміщених між такими секціями) може бути більше, ніж один.

Особливості роботи даного типу багатосекційних (клістронних) схем (фіг. 2) полягає у наступному. У вхідній секції 8 системи 4 накачки разом із підсиленням вхідного сигналу, згідно до теорії лазерів на вільних електронах, також відбувається збудження ХПЗ комбінаційної частоти (тобто модуляція електронного пучка за густиною). Далі промодульований таким чином пучок направляють до робочого об'єму підсилювачів 5 комбінаційної електронної хвилі, де збуджену у попередній секції ХПЗ далі підсилюють за рахунок ефекту параметричної нестійкості поздовжніх хвиль. В той же час, вхідний електромагнітний сигнал (який на даному етапі процесу взаємодії вважають вже відпрацьованим) поглинається у спеціальній системі поглинання (тут, задля простоти не показаний). Значно підсилену ХПЗ далі спрямовують у вихідну секцію накачки 9, де відбувається подальше підсилення ХПЗ і перетворення її із форми поздовжньої електростатичної хвилі у форму вихідного електромагнітного сигналу. У випадку, коли підсилювач 5 виконаний згідно із одною із мультигармонічних схем, вихідний сигнал може бути збуджений на одній із вищих гармонік вхідного сигналу. Завдяки цьому, перш за все, суттєво підвищується рівень електромагнітної розв'язки виходу пристрою із його входом. По друге, значно збільшується коефіцієнт підсилення. Останнє пояснюється тим, що ефективність поздовжнього параметричного механізму різко зменшується із збільшенням релятивістського фактора пучка, або, що у даному випадку - із збільшенням частоти вхідного сигналу. Перехід на вищі гармоніки вхідного сигналу у вихідній секції 9 системи 4 накачки дозволяє підвищити частоту вихідного сигналу без зниження коефіцієнту підсилення пристрою. Пристрій, що працює у такому режимі гармонік, можна трактувати як СЛВЕ-клістрон-підсилювач з перетворенням робочої частоти.

Передбачено також і інший варіант роботи пристрою у мультигармонічному режимі. У свою чергу, тут можна виділити два окремі підваріанти. Перший із них характеризується тим, що, як у вище описаних випадках на вхід вхідної секції 8 системи 4 накачки спрямовують монохроматичний електромагнітний сигнал. В робочому об'ємі підсилювача 5 комбінаційної електронної хвилі одночасно із підсиленням ХПЗ відбувається також і генерація її вищих гармонік. Вихідна секція 9 системи 4 накачки виконана у формі мультигармонічного ондулятора, завдяки чому вихідний сигнал у її об'ємі формується як мультигармонічний. Це означає, що вихідний сигнал у реальному часі (результат зворотного перетворення Фур'є) вже не є сіносоподібним, а має складну задану форму знакозмінної послідовності імпульсів поля. Керування цієї формою у випадку даного підваріанту здійснюють за рахунок спеціального підбору Фур'є-спектрів робочих полів ондулятора вихідної секції 9 системи 4 накачки та підсилювача 5 комбінаційної електронної хвилі. У випадку другого підваріанту, як джерело 1 вхідного сигналу, так і ондулятор вхідної секції 8 системи 4 накачки виконано за мультигармонічними схемами. Це означає, що генерація мультигармонічної ХПЗ тут відбувається не у підсилювачі 5, як у першому випадку, а в об'ємі вхідної секції 8 системи 4 накачки. Це, в свою чергу, дає ще два додаткові параметри керування формою вихідного сигналу. А саме, за рахунок форми спектру ондулятора вхідної секції 8 системи 4 накачки та шляхом підбору спектру вхідного електромагнітного сигналу. Підбираючи спеціальним чином амплітуди гармонік вхідного сигналу, ондуляторних полів обох накачок та підсилювача комбінаційної електронної хвилі, можна, в принципі, реалізувати ситуацію, коли принаймні перших десять гармонік вихідного сигналу мають приблизно одну і ту ж амплітуду. У такому випадку мультигармонічний вихідний сигнал у реальному часі має вигляд послідовності дуже вузьких дельта-подібних (наприклад, фемтосекундних) знакозмінних імпульсів. Як відомо, такі імпульси можуть поширюватись в середовищі практично без загасання, що відкриває для таких мультигармонічних СПЛВЕ широке поле унікальних технологічних застосувань. Таких, наприклад, як лазерні системи для різання масивних злитків металу (слябів на металургійних підприємствах), космічні системи для передачі енергії від орбітальних сонячних електростанцій на землю тощо. Характерні особливості другої групи конструкційних версій багатосекційних СПЛВЕ (СПЛВЕ-клістронів) проілюстровано на фіг. 3. Тут, на відміну від версій типу тих, що наведені на фіг. 2, у проміжку між підсилювачем 5 комбінаційної електронної хвилі та вихідною секцією 9 системи 4 накачки розміщено одну (чи кілька) прискорювальних секцій 10 джерела 2 релятивістського електронного пучка. Це дозволяє суттєво підвищити коефіцієнт підсилення пристрою, особливо у випадку його роботи в субміліметровому - 14 діапазоні довжин частот. Пояснення даного ефекту полягає у наступному. Як показує комп'ютерне моделювання процесу параметричного підсилення ХПЗ у робочому об'ємі підсилювача 5, оптимальним для роботи діапазон частот лежить в міліметровому - нижній частині субміліметрового діапазонах частот. Із зростанням частоти сигналу (що у випадку лазерів на вільних електронах еквівалентно зростанню релятивістського фактора електронного пучка) коефіцієнт підсилення робочої ХПЗ у поздовжньому параметричному механізмі різко падає. Як наслідок, вже в 12 діапазоні вклад поздовжнього механізму в загальний супергетеродинний коефіцієнт підсилення стає незначним. Ідея методу подолання цього технологічного утруднення в конструкції, що показана на фіг. 3, полягає у наступному. Первинна модуляція електронного пучка (тобто збудження вхідної ХПЗ, спільної як для ЛВЕ-йного, так і поздовжнього параметричних механізмів) тут, як і у конструкційному варіанті наведеному на Фіг. 2, здійснюється у вхідній секції накачки 8. Але, на відміну від варіанту на фіг. 2, даний конструкційний варіант (що на фіг. 3) призначено для роботи в 14 - оптичному діапазоні. Як вже відзначалось, намагання здійснити ефективне підсилення з допомогою конструкційного варіанту, що на фіг. 2, виявляється технологічно утрудненим, оскільки перехід у даний частотний діапазон там означав необхідність використання суттєво релятивістських електронних пучків. Для уникнення такої перспективи на вхід пристрою направляють слабо релятивістський електронний пучок, який формують за допомогою частини джерела 2. В робочий об'єм вхідної системи накачки одночасно вводять електромагнітний сигнал (14 - оптичного діапазону). З метою забезпечення умови параметричного резонансу вхідну секцію системи накачки виконують з використанням однієї із конструкцій з

малим періодом ондуляцій. Це можуть бути як магнітні, так і електромагнітні дрібноперіодні ондулятори (більш детально про їх конструкції див. в монографії [Т. Маршалл. Лазеры на свободных электронах. Москва, Мир, 1987]). Незважаючи на те, що у даному випадку така система накачки не здатна забезпечити ефективне підсилення хвилі сигналу, вона успішно здатна виконати завдання первинної модуляції пучка (тобто збудження у ньому вхідної ХПЗ). Збуджену ХПЗ далі підсилюють у підсилювачі 5. Таким чином, на вхід прискорювальної секції 10 подають сильно промодульований за густиною слабо релятивістський пучок, тоді як на її виході отримують вже пучок із суттєво більшою енергією, який далі направляють в робочий об'єм вихідної секції 9 системи накачки. Процес зворотної трансформації підсиленої ХПЗ в електромагнітну форму (тобто, у вихідний сигнал), як і випадку варіанту, що на фіг. 2, відбувається у вихідній секції 9 системи 4 накачки за рахунок традиційного для ПЛВЕ параметричного механізму. Оскільки останній є багато менш чутливий до релятивізму електронного пучка, ніж механізм параметричного резонансу трьох поздовжніх хвиль у підсилювачі 5, то коефіцієнт підсилення даного СПЛВЕ у варіанті, що на фіг. 3, виявляється значно вищим навіть в 14 діапазоні частот сигналу.

Таким чином, використання в СЛВЕ-клістріні наведеному на фіг. 3 конструкційної схеми із проміжним прискоренням електронного пучка дозволяє суттєво змістити робочий діапазон довжин хвиль пристрою в область ІЧ-оптичних частот. Коротко резюмуючи сказане, констатуємо, що позитивний результат досягнуто, перш за все, тому, що як збудження, так і підсилення комбінаційної ХПЗ ІЧ-оптичного діапазону, тут проводять в слабо релятивістському електронному пучку, де обидва фізичні механізми виявляються найбільш ефективними. В той же час, процес випромінювання електромагнітного сигналу проводять у вихідній секції накачки у пучку, який має значно більшу енергію електронів, де негативний вплив релятивізму на ефективність взаємодії є значно слабшим. За рахунок цього, по-перше, досягається суттєве зростання потужності вихідного сигналу. По-друге, вирішуються головні технологічні проблеми, пов'язані із конструюванням вихідної секції накачки, оскільки у даному випадку вона вже не є дрібноперіодичною. Робочий діапазон частот може бути розширено ще більше, якщо перейти до використання мультитармонічних конструкцій секцій 8, 9 системи 4 накачки та підсилювача 5 комбінаційної ХПЗ. Головні особливості роботи приладу у такому випадку (за виключенням процедури проміжного прискорення) виявляються такими ж, як і у випадку конструкційного варіанту, що на фіг. 2.

Приклади версій, що наведено на фіг. 4 та фіг. 5 ілюструють дві конструкційні можливості виконання вхідної та вихідної частин 1, 6 електродинамічної системи електромагнітного сигналу. У тому числі, у версії, представлений на фіг. 4, вхідну частину 1 системи електромагнітного сигналу виконано у формі суцільного дзеркала 11, вихідну частину 6 - напівпрозорого (чи із спеціальним вікном для виводу енергії) дзеркала 12. Дзеркала 11, 12 розміщено таким чином, що вони утворюють оптичний (чи квазіоптичний) резонатор для хвилі сигналу. Резонаторні версії вхідної частини 1 системи сигналу є характерні для СПЛВЕ-генераторів. У даному випадку у якості вхідного сигналу використовують електромагнітні шуми системи «пучок-резонатор» на робочій частоті вихідного сигналу. Такий шумовий сигнал, поширюючись вздовж електронного пучка, який знаходиться у вакуумному каналі 3, підсилюється і далі відбивається послідовно від дзеркал 12 та 11 знову надходить на вхід системи і знову підсилюється. І так до того часу, поки втрати енергії в системі «резонатор-пучок» на паразитному та корисному навантаженнях не зрівняються з енергією, яку отримує сигнал від електронного пучка за один прохід.

Передбачено, однак, використання резонаторних схем і у СПЛВЕ-підсилювачах, особливо у випадках, коли застосовують конструкційні версії багатосекційних СПЛВЕ (СПЛВЕ-клістрінів) (див. фіг. 3, фіг. 4). При цьому резонаторну конструкцію можуть мати як вхідна частина 1 електродинамічної системи електромагнітного сигналу, так і вихідна частина 6.

У конструкційних версіях, представлених на фіг. 5 та фіг. 6, обидві частини 1,6 системи електромагнітного сигналу виконано у формі оптичних (квазіоптичних) лінз 13, 14, відповідно. Такі версії, головним чином, притаманні СПЛВЕ-підсилювачам. Тут вхідний сигнал в область підсилення надходить від зовнішнього джерела, яке входить до складу вхідної частини 1 системи електромагнітного сигналу. Підсилення сигналу відбувається в режимі «за один прохід». Специфікою багатосекційних (клістрінних) конструкційних версій такого типу (див., наприклад, фіг. 6) є те, що після модуляції електронного пучка в вхідній секції 8 системи 4 накачки відбувається повне поглинання вхідного електромагнітного сигналу у системі 17 поглинання. Далі в підсилювачі 5 комбінаційної електронної хвилі сигнал існує лише у формі ХПЗ. Зворотна трансформація підсиленої ХПЗ відбувається в об'ємі вихідної секції 9 системи 4 накачки.

Передбачено, однак, і комбіновані схеми, коли, наприклад одну із частин (вхідна чи вихідна) 1,6 електродинамічної системи сигналу виконано як резонатор, а іншу - як лінзову систему. Відповідно, одна частина такого комбінованого СПЛВЕ-клістріну працює як підсилювач, а інша - як генератор.

Згідно з винаходом виконання системи 4 накачки передбачено у формі магнітного ондулятора, електромагнітного ондулятора та електричного ондулятора (див. фіг. 6 - фіг. 8), принципи роботи яких є добре відомими [Т. Маршалл. Лазеры на свободных электронах. Москва, Мир, 1987]. Окремо лише стоїть конструкція СПЛВЕ-клістріну з нерезонансним модулятором, який складається з бочкоподібного оптичного (квазіоптичного) резонатора 18, до якого підключено джерело 19. Особливість її полягає у тому, що тут нерезонансний модулятор виконує одночасно як роль вхідної частини 1 системи сигналу, так і функції вхідної секції 8 системи 4 накачки. Як відзначалось, головною функцією вхідної секції 8 системи 4 накачки у СПЛВЕ є здійснення модуляції електронного пучка (тобто, збудження ХПЗ). У конструкційних версіях, представлених, наприклад, на фіг. 6, фіг. 8 для цього використовують механізм трихвильового параметричного резонансу, де одною із хвиль є поле системи накачки (магнітне чи електричне ондуляторне поле або поле інтенсивної електромагнітної хвилі (електромагнітний ондулятор)). Нерезонансний модулятор працює на іншому принципі. Тут бочкоподібний резонатор 18 розміщено таким чином, що електронний пучок може вільно рухатись вздовж його повздовжньої осі. Джерело вхідного сигналу 19 збуджує в його робочому об'ємі резонатора 18 резонаторне поле, характерною особливістю якого є наявність яскраво вираженої повздовжньої (тобто, вздовж осі резонатору) компоненти електричного поля. Під дією цього поля в електронному пучку збуджуються електронні хвилі. Одна з них - це

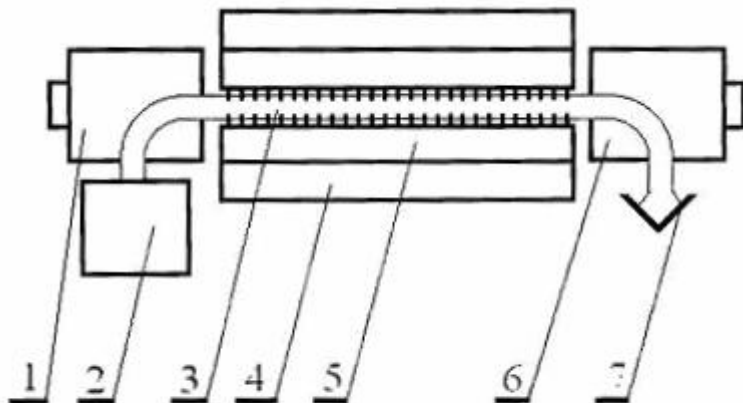
хвиля вимушених коливань, інші - власні хвилі електронного пучка, у тому числі, повільна та швидка. Хвиля вимушених коливань, згідно з її природою, існує тільки на відрізку електронного пучка, що проходить резонатор 18 і за його межами вона згасає. Таким чином, далі (в робочий об'єм підсилювача 5 комбінаційної електронної хвилі) надходить електронний пучок, у якому існують власні електронні хвилі. Одна з них (повільна електронна хвиля) вступає у параметрично-резонансну взаємодію з полем повздовжнього ондулятора підсилювача 5, в результаті чого вона підсилюється.

Принципи дії конструкційних варіантів підсилювача 5 комбінаційної електронної хвилі, наведених на фіг. 9 - фіг. 11 не відрізняються за фізичною суттю. Відмінність полягає лише у методі формування у робочому об'ємі електронного пучка 22. Так у конструкціях, що на фіг. 9 та фіг. 11 повздовжнє ондуляторне електричне поле 27 створюється за рахунок різниці потенціалів між парами сусідніх електродів 25 чи частинами 31 сусідніх секцій екрану 30. Оскільки знаки потенціалів на кожній парі таких електродів є взаємно протилежними, а електроди «через один» мають однаковий потенціал, то і електричне поле сформоване в об'ємі електронного пучка 22 такою системою електродів також виявляється періодично знакозмінним, тобто, повздовжньо-ондуляторним. Принципова відмінність у принципі дії конструкційних версій, що на фіг. 9 та фіг. 11, стосується лише способу створення вище згаданої різниці потенціалів. А саме, в випадку наведеному на фіг. 9 ця різниця створюється за рахунок підключення пар електродів до якогось зовнішнього високовольтного джерела напруги (наприклад, до каскадного високовольтного джерела). У випадку ж, що наведено на фіг. 11 використано трансформаторний (індукційний) метод створення високовольтної різниці потенціалів. Тут імпульсне сильноточове джерело живлення підключено до первинних обмоток магнітних індукторів 29. Екран 30 у даному випадку служить як одновиткова вторинна обмотка трансформатора. Відповідно, різниця високочастотних потенціалів виникає між електрично розімкнутими кінцями такої вторинної обмотки, роль яких виконують частини 31 екранів 30, які охоплюють електронний пучок 22.

Головна відмінність у принципах дії конструкційних варіантів, наведених на фіг. 10 та фіг. 11, пов'язані лише з формою екранів 30. У випадку, який проілюстровано на фіг. 10 вся конструкція має усього один екран 30, причому такий, що не має внутрішніх частин у області взаємодії електронного пучка 22. Кожен із індукторів (або груп індукторів) 29 підключено до джерела електричного високочастотного струму таким чином, що напрямки циркуляції вихрового електричного поля 28 кожної пари індукторів (див. силові лінії вихрового електричного поля 28) виявляються взаємно протилежними. Як наслідок, загальне вихрове електричне поле 28, яке генерує така система індукторів 29 в робочому об'ємі електронного пучка 22 виявляється повздовжньо-ондуляторним.

Винахід дозволяє використовувати його як джерела потужного лазерного випромінювання, що характеризується помірними габаритами та відносними простотою конструкції і пониженою вартістю виготовлення та експлуатації, тобто, технологічною та комерційною адекватністю умовам, що є характерними для цивільних галузей індустрії, таких наприклад, як хімічна промисловість чи машинобудування.

Таким чином, заявлений електронний стерилізатор відповідає критерію патентоспроможності "Промислова придатність".



Фіг. 1

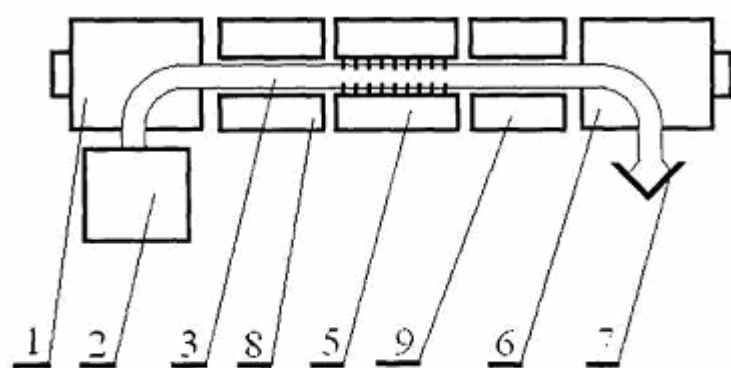


Fig. 2

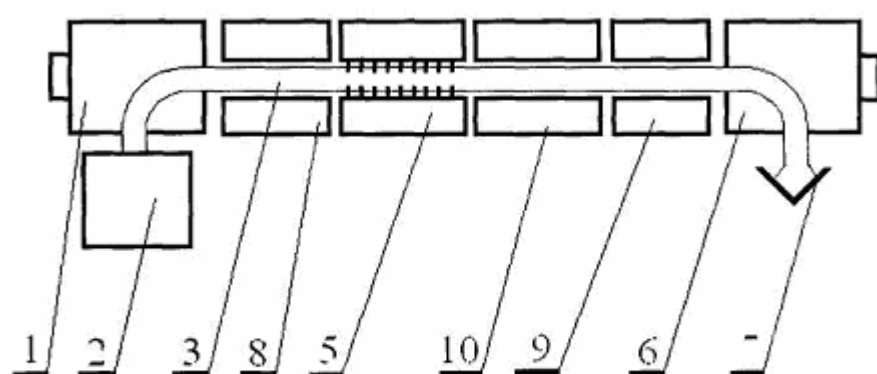


Fig. 3

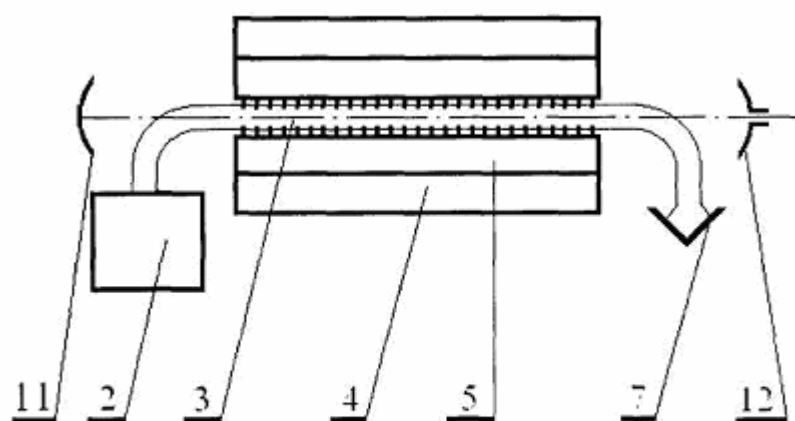


Fig. 4

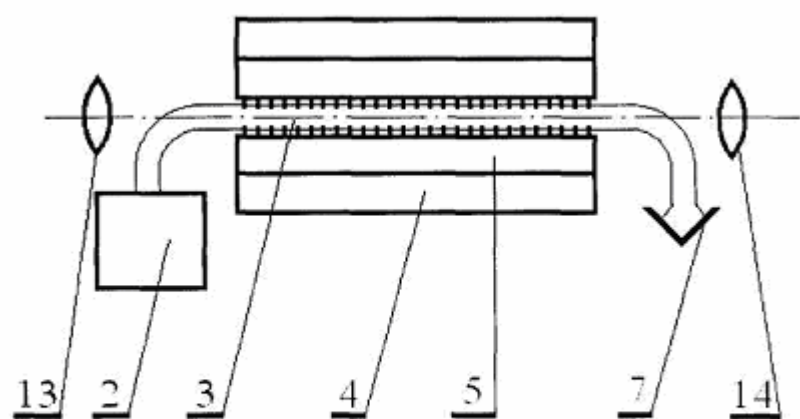


Fig. 5

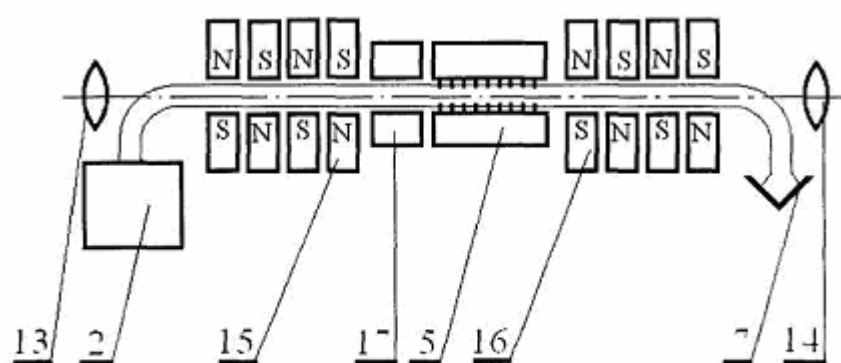


Fig. 6

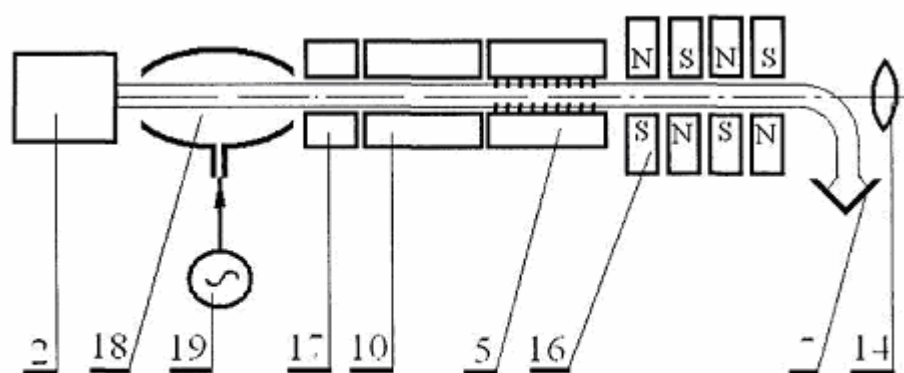


Fig. 7

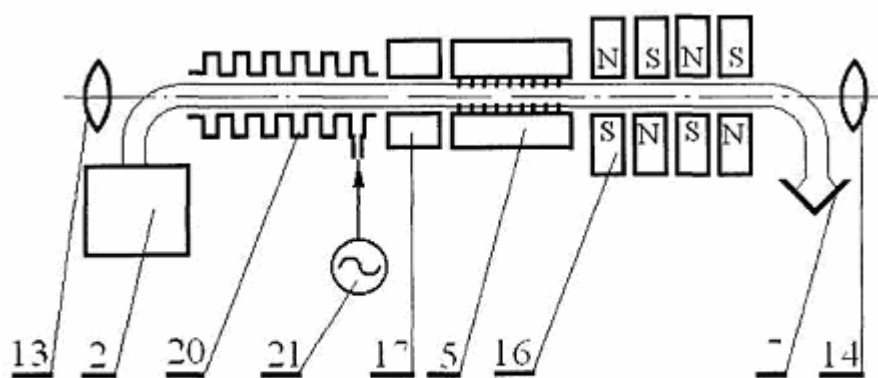


Fig. 8

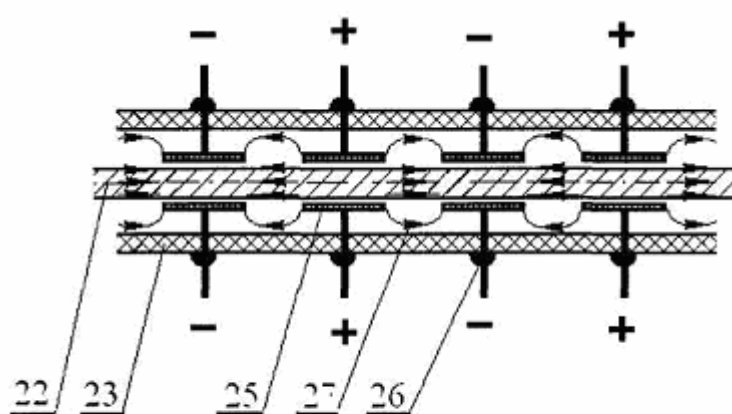


Fig. 9

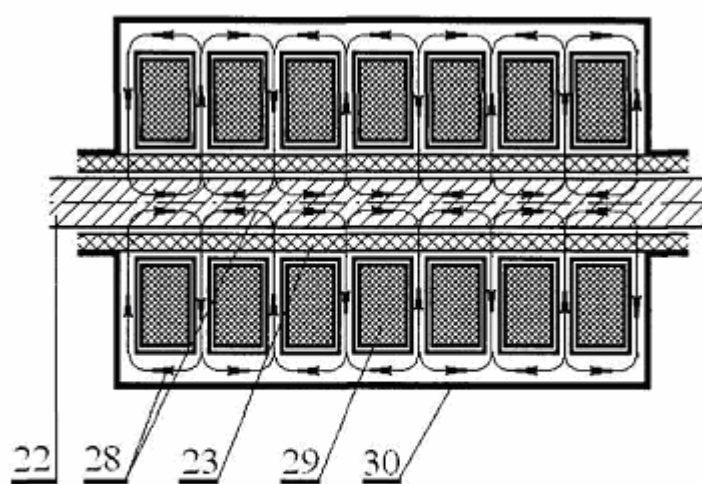


Fig. 10

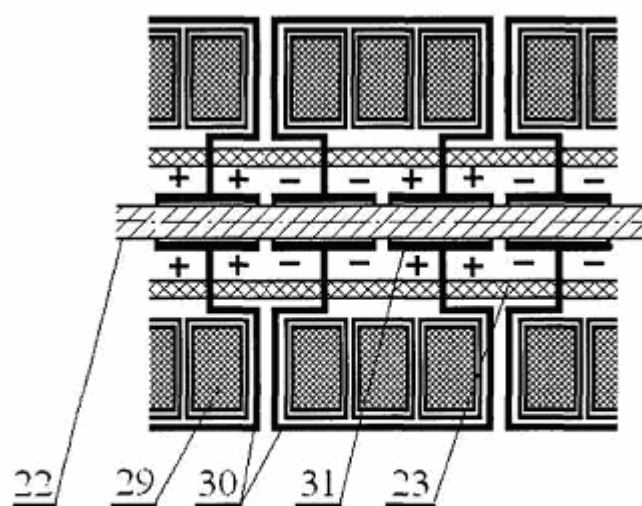


Fig. 11

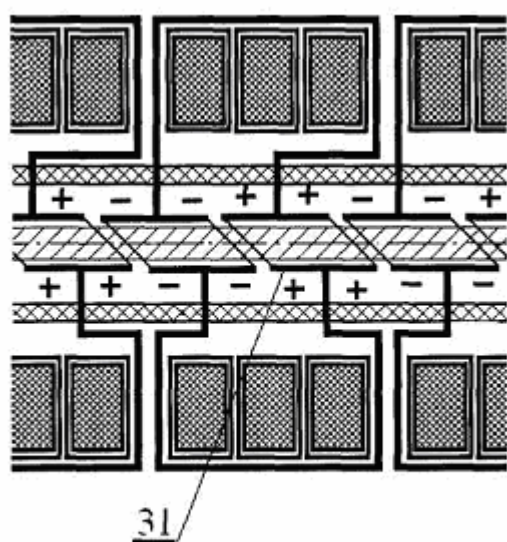


Fig. 12