



УКРАЇНА

(19) UA (11) 14547 (13) A

(51) H 01 J 25/00

ДЕРЖАВНЕ  
ПАТЕНТНЕ  
ВІДОМСТВООПИС ДО ПАТЕНТУ  
НА ВІНАХІДбез проведення експертизи по суті  
на підставі Постанови Верховної Ради України  
№ 3769-XII від 23.XII. 1993 рПублікується  
в редакції заявника

(54) ЛАЗЕР НА ВІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОНАХ

1

(21) 95031123  
 (22) 10.03.95  
 (24) 09.01.97  
 (46) 25.04.97. Бюл. № 2  
 (47) 09.01.97  
 (72) Куліш Віктор Васильович, Кайлюк Олександр Георгійович, Квак Олександр Олександрович, Крутько Олег Борисович  
 (73) Сумський державний університет (UA)  
 (57) Лазер на свободных электронах, содержащий электродинамическую систему генерируемого сигнала, на оптической оси которой размещены источник релятивистского электронного пучка, коллектор элект-

2

ронов, система накачки и система изохронизации взаимодействия, о т л и ч а ю щ и й - с я тем, что система изохронизации выполнена в виде создающей поперечное периодически реверсивное вихревое электрическое поле последовательности расположенных вдоль оптической оси и ориентированных перпендикулярно ей пар электромагнитов с направлением вектора магнитной индукции перпендикулярным этой оси, подключенных к источнику низкочастотного переменного напряжения, полярность полюсов сердечников которых в каждой следующей паре изменена на противоположную.

Изобретение относится к электронной технике, в частности к генераторам и усилителям когерентных и флуктуационных колебаний, и может быть использовано как мощный технологический генератор электромагнитного излучения.

Известны электронные устройства - лазеры на свободных электронах (ЛСЭ), способные работать в режиме когерентных и флуктуационных колебаний [1-3]. Устройство содержит источник релятивистского электронного пучка (РЭП), систему накачки, электродинамическую систему генерируемого (усиливаемого) сигнала. В том числе, в ЛСЭ [1] система накачки выполнена в виде гладкого волновода, в [2] - замедляющей системы с подключенным микроволновым генератором накачки. В [3] система накачки выполнена в виде системы периодически ре-

версивных магнитов, создающих в области взаимодействия поперечное периодически реверсивное магнитное поле. В основе работы известных устройств лежит эффект трехволнового параметрического резонанса.

Особенности используемого базового физического механизма обуславливают основные недостатки известных ЛСЭ. Главный из них - низкий коэффициент полезного действия устройств. Поскольку здесь основным источником энергии служит РЭП, находящийся в параметрическом резонансе с полями накачки и сигнала, то усиление последнего сопровождается потерей энергии электронами, т.е. торможением РЭП как целого. Однако, изменение энергии электронов приводит к нарушению резонансного состояния системы, в результате чего про-

(19) UA (11) 14547 (13) A

цесс усиления волны сигналы прекращается - наступает насыщение усиления. Такие ЛСЭ называют неизохронными. Коэффициент полезного действия их, как правило, не превышает нескольких процентов [4].

Известно устройство, способное работать в изохронном режиме, т.е. без нарушения резонансного состояния системы - ЛСЭ с продольным электрическим подпором [5-7]. Оно содержит электродинамическую систему генерируемого (усиливаемого) сигнала, на оптической оси которой размещены источник РЭП, система накачки, система изохронизации взаимодействия и коллектор электронов. От неизохронных ЛСЭ [1-3] лазер [5-7] отличается тем, что здесь в область взаимодействия системы накачки введена продольная система изохронизации взаимодействия. Последняя обеспечивает создание в области взаимодействия системы накачки продольного ускоряющего электрического поля (подпора). Таким образом компенсируют потери энергии электронов РЭП на излучение, что эквивалентно изохронизации взаимодействия. В отличие от неизохронных ЛСЭ коэффициент полезного действия изохронных устройств достигает 40% и более [7].

Недостатки известного устройства связаны с фактами использования в системе изохронизации продольного электрического поля большой интенсивности. Важно отметить, что высокие значения КПД здесь достигаются лишь в случае, когда начальная энергия электронов соизмерима с энергией, полученной ими за счет ускоряющего действия поля подпора. Соответственно, уровня ускоряющего напряжения в источнике РЭП (а это величины порядка единиц - десятков МВ) оказываются соизмеримыми с уровнями разности потенциалов, приложенной к продольной системе изохронизации взаимодействия. Это имеет ряд негативных последствий для нормальной работы ЛСЭ. В частности, резко повышается вероятность электрического пробоя в области взаимодействия (между электродами системы изохронизации и элементами системы накачки). Для исключения последнего явления в конструкцию вводят дополнительные изолирующие элементы, подбирают особую схему системы накачки, позволяющую свести к минимуму возможность пробоя и т.д. Все это однако приводит к существенному усложнению устройства в целом, уменьшению надежности его работы. Имеются и другие негативные моменты. В частности, например, ускоряющее действие продольного электрического поля на ионы ионного фона приводит к появлению ионного тока, движу-

щегося в области взаимодействия в направлении противоположном направлению движения РЭП; если не приняты специальные меры (например, не введены ионные ловушки и др.), то высокоэнергетичный поток ионов бомбардирует элементы системы сопровождения РЭП (электронные линзы, поворотные системы, элементы систем диагностики и т.д.). Это приводит либо к нарушению их работы, либо вообще к разрушению последних. Необходимость борьбы с данным явлением также требует усложнения конструкции устройства в целом, ведет к снижению надежности его работы. Все перечисленное - есть та цена, которую, в данном случае, необходимо платить за возможность получения высоких значений КПД изохронных ЛСЭ известных конструкций [5-7].

Данное устройство [5-7] является наиболее близким к предлагаемому изобретению и принято за прототип.

Задачей изобретения является создание изохронного лазера на свободных электронах с высоким значением КПД, но более простой конструкции и с более высокой надежностью его работы. Это достигается за счет изменения конструкции системы изохронизации, позволяющей использовать для подпора поперечное периодически реверсивное вихревое электрическое поле, характеризующееся периодом ондуляции, равным периоду поля накачки.

Поставленная задача решается тем, что в лазере на свободных электронах, содержащем электродинамическую систему генерируемого (усиливаемого) сигнала (на оптической оси которой размещены источник РЭП, система накачки, система изохронизации взаимодействия и коллектор электронов), согласно изобретению, система изохронизации выполнена в виде создающей поперечное периодически реверсивное вихревое электрическое поле последовательности, расположенных вдоль оптической оси и перпендикулярно ей пар электромагнитов с направлением вектора магнитной индукции перпендикулярным этой оси, подключенных к источнику низкочастотного переменного напряжения, полярность полюсов сердечников которых в каждой следующей паре изменено на противоположную.

Выполнение лазера с системой изохронизации по казанной конструкции позволяет отказаться от использования в качестве подпора интенсивных продольных электрических полей. В предлагаемом изобретении для подпора использовано поперечное периодически реверсивное вихревое электри-

ческое поле, характеризующееся периодом ондуляции, равным периоду поля накачки. За счет периодического реверсирования поперечного вектора напряженности электрического поля, вся область подпора оказывается разбитой на  $N$  независимых ускоряющих участков ( $N$  - число периодов поля накачки на длине области взаимодействия). В силу оговоренной независимости ускоряющих участков результирующая энергия РЭП, приобретаемая при прохождении всей системы, оказывается равной сумме энергий, полученной ею электронами на  $N$  отдельных участках. В то же время в силу реверсивного характера поля результирующая напряженность электрического поля оказывается равной нулю (при четном числе полупериодов). Максимальное эффективное напряжение, действующее между элементами системы изохронизации, таким образом, также равно максимальному напряжению на одном из ускоряющих участков, т.е. при прочих равных в  $N$  раз меньше чем в прототипе [5-7]. Это, а также и то, что силовые линии вихревого электрического поля в области взаимодействия являются замкнутыми, позволяет резко снизить вероятность электрических пробоев - увеличить надежность работы устройства. Как следствие отпадает необходимость принятия специальных мер (по повышению электрической прочности системы изохронизации, накачки и др.). В итоге, конструкция предлагаемого устройства оказывается более простой при более высокой надежности его работы, чем достигается требуемым положительный эффект.

Признаки, отличающие заявляемое техническое решение от прототипа, не выявлены в других технических решениях и, следовательно, обеспечивает заявляемому решению соответствие критерию "изобретательский уровень".

Сущность изобретения поясняется чертежами, где на фиг. 1 приведена структурная электрическая схема лазера на свободных электронах; на фиг. 2 - структурная электрическая схема блока из системы накачки и поперечной вихревой системы изохронизации взаимодействия; на фиг. 3 - структурная электрическая схема блока из системы накачки и поперечной вихревой системы изохронизации, с последовательным соединением обмоток электромагнитов, а на фиг. 4 - траектория электрона при движении его в суперпозиции полей накачки (в данном случае Н-убитронном) и системы изохронизации (в данном случае поперечном скрещенном вихревом ЕН-убитроне).

На схеме, представленной на фиг. 1, позицией 1 обозначена электродинамическая система генерируемого сигнала (в данном случае - открытый оптический резонатор). На ее оптической оси размещены источник релятивистского электронного пучка 2, блок из системы накачки 3 и поперечной вихревой электрической системы изохронизации взаимодействия 4, а также коллектор 5. При этом все перечисленные элементы расположены таким образом, что не затеняют рабочего объема электродинамической системы сигнала 1 (резонатора). Взаимное расположение элементов 1-4 таково, что их рабочие объемы пересекаются и образуют область взаимодействия, через которую направляются релятивистский электронный поток 6. Генерируемый электромагнитный сигнал частоты  $\omega$  выводят из устройства через выходное окно одного из зеркал системы 1.

На схеме, представленной на фиг. 2, приведена структурная электрическая схема блока из системы накачки и поперечной вихревой системы изохронизации взаимодействия. Здесь позицией 7 обозначен источник низкочастотного переменного напряжения, который подключен к периодически реверсивной системе пар электромагнитов 8, расположенных вдоль оптической оси перпендикулярно ей и совмещенной с Н-убитронной системой накачки 3, выполненной в виде поперечной периодически реверсивной магнитостатической системы, электромагниты в свою очередь, содержат катушки 9 и сердечники 10, полярность полюсов которых в каждой следующей паре изменена на противоположную таким образом, что создаваемое ими магнитное переменное поле, на время периода действия устройства, по направлению и конфигурации совпадает с магнитным полем Н-убитронной накачки, а вихревое электрическое поле локализовано в области взаимодействия в промежутках между электромагнитами 8 и является ускоряющим для электронов. Вариант соединения обмоток пар электромагнитов 8, в системе изохронизации 4, приведенный на фиг. 2, является частным случаем и не является единственно возможным, который бы обеспечил создание системой изохронизации нужного электрического поля. Такой же эффект будет получен и при последовательном соединении обмоток "змеикой" (см. фиг. 3) и при комбинированном соединении - на одних участках - параллельно-последовательном, на других - чисто последовательном.

На фиг. 4 синусоидальной кривой изображена "слаломная" траектория движения

электрона, обладающего зарядом  $-e$  и характеризуемого вектором скорости  $V_e$ , в суперпозиции полей накачки и подпора. В том числе, стрелками (в плоскости чертежа) представлены направления векторов напряженности вихревого электрического поля подпора  $E_1$  в точках пространства (по оси системы), в которых величина  $|E_1|$  достигает максимума. Кружочками обозначены направления векторов индукции магнитного поля накачки  $B_n$  и переменного магнитного поля  $B_1$ , создаваемого периодически реверсивной системой электромагнитов. Векторы  $B_n$  и  $B_1$  ориентированы перпендикулярно плоскости чертежа.

Работа лазера состоит в следующем.

Релятивистский электронный пучок 6 из его источника 2 направляют в область взаимодействия вдоль оптической оси электродинамической системы сигнала 1. Здесь электроны пучка движутся в суперпозиции полей накачки, электромагнитной волны сигнала (существующей в виде шумов в системе 1) и вихревого поперечного электрического подпора. Взаимодействие плазмы пучка 6 с полями накачки и сигнала приводит к развитию волновой параметрической неустойчивости, вследствие чего волна сигнала нарастает по амплитуде, а электронный пучок 6 тормозится. В результате действия последнего эффекта резонансный характер взаимодействия может нарушаться, если не принять специальные меры. В качестве одной из тактовых здесь использована вихревая электрическая система изохронизации 4, объединенная в единый блок с системой накачки 3. Принцип действия такого блока проиллюстрирован на фиг. 2 и фиг. 4. Источник низкочастотного переменного напряжения 7 (характеризующийся рабочей частотой  $\Omega \ll \omega_e$ ) создает в катушках 9 электромагнитов 8 (содержащих сердечники 10) переменный во времени ток. Создаваемое

катушками 9 магнитное поле  $B_1$  в этой связи также оказывается переменным во времени, что приводит в свою очередь к генерации

вихревого электрического поля подпора  $E_1$ . Большинство лазеров на свободных электронах работают в импульсном режиме [3]. Длительность импульса  $\tau$  электронного пучка 6 в данном устройстве подбирают такой,

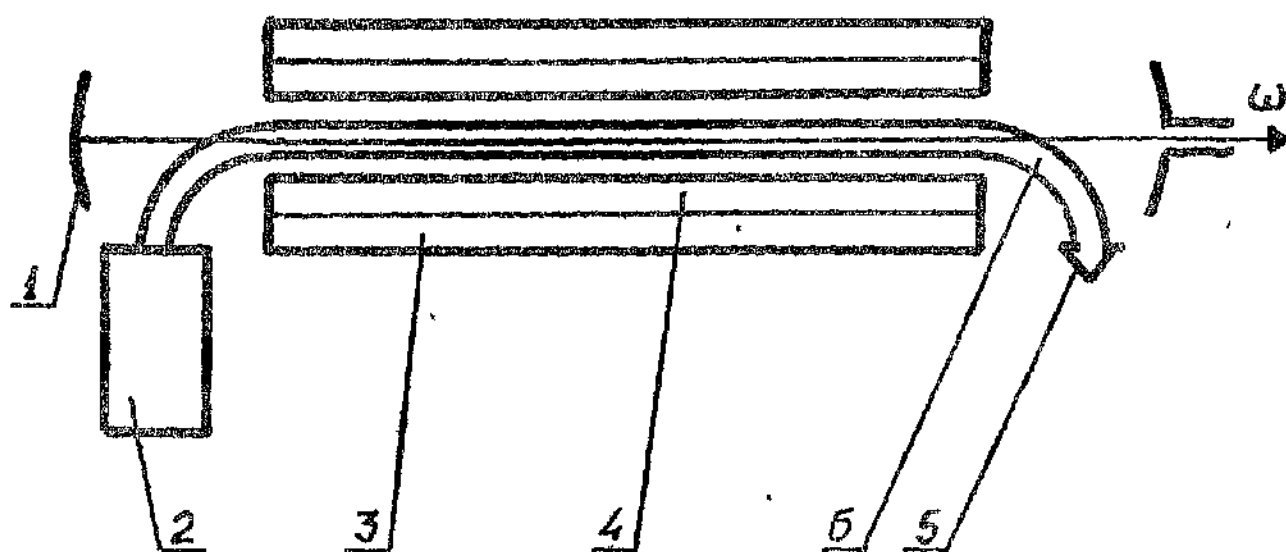
чтобы  $\tau \ll 2\pi/\Omega$  и, кроме того,  $\tau \ll L/|V_e|$  (где  $L$  - длина области взаимодействия). Тогда электроны пучка "воспринимают" переменное электромагнитное поле системы изохронизации взаимодействия как статическое скрещенное ЕН-убитронное поле. Фазу влета электронного импульса в область взаимодействия синхронизируют с начальной фазой колебаний напряжения на выходе источника 7 низкочастотного переменного напряжения, причем таким образом, чтобы напряженность вихревого

электрического поля  $E_1$  на протяжении всего времени взаимодействия была близка к максимальной, а действие поля ускоряющим для электронов. В этом случае электроны пучка 6, двигаясь по "слаломным" траекто-

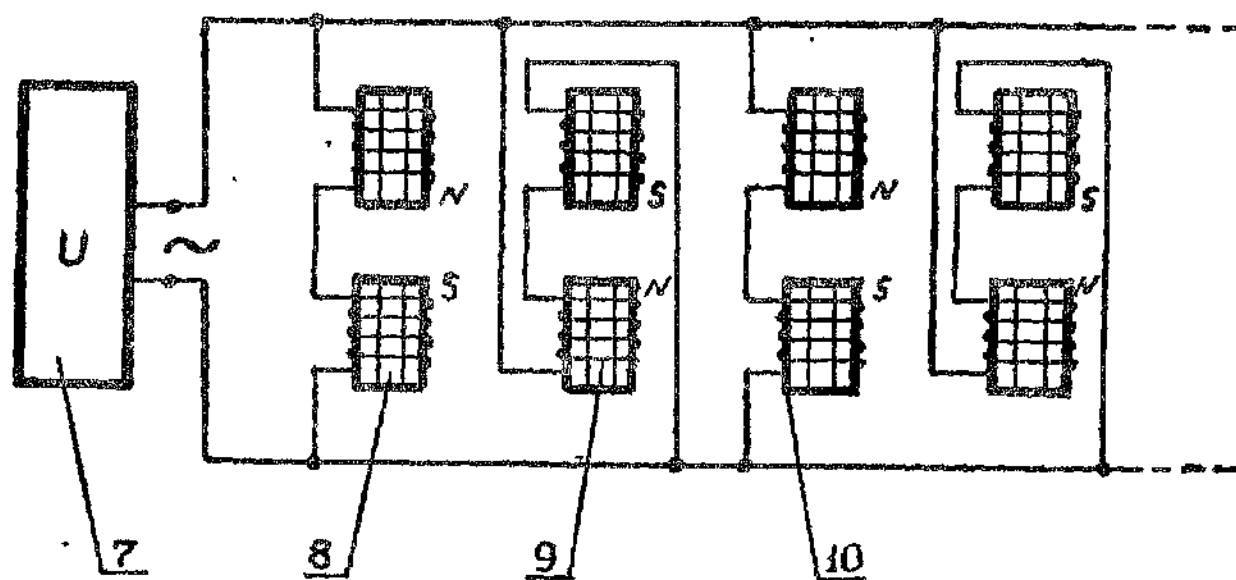
риям в суперпозиции полей  $B_n$  и  $B_1$ , все время ускоряются электрической компонентой поля системы изохронизации  $E_1$ . Величину последней подбирают такой, чтобы

потери энергии электронов на излучение на каждом периоде системы накачки 3 компенсировались за счет ускоряющего действия

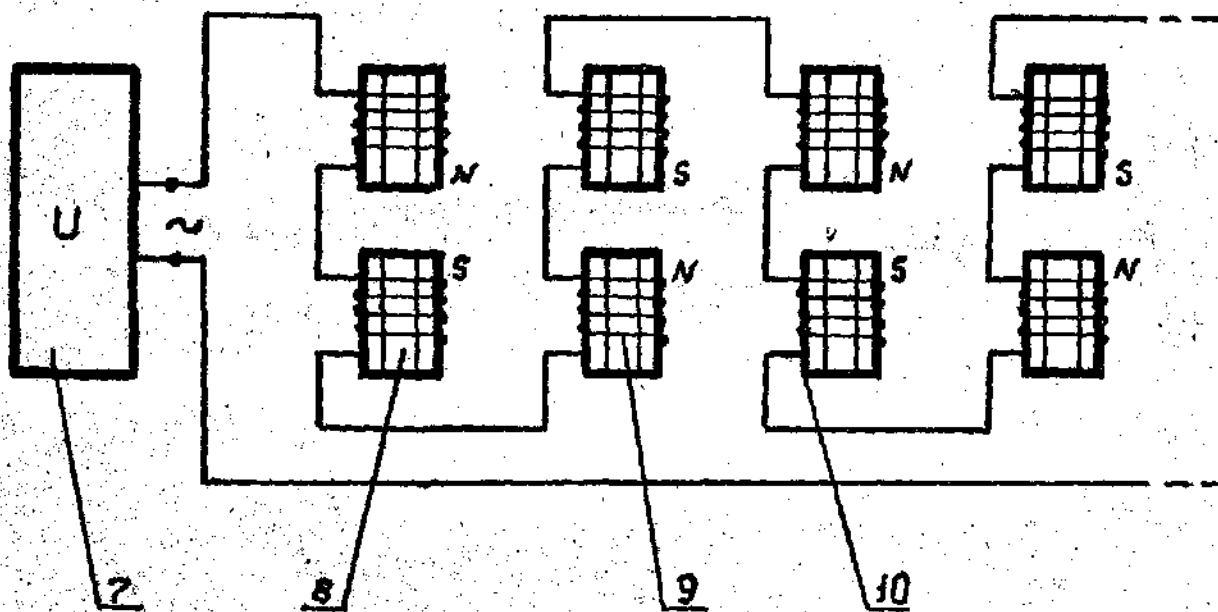
электрического поля  $E_1$ . Этим объясняются высокие значения коэффициента полезного действия ( $\sim 50\%$  и выше). Отработанный релятивистский электронный пучок 6 осаждают на коллекторе 5. В состав коллектора 5, при этом, может входить, в том числе, система рекуперации, позволяющая дополнительно повысить коэффициент полезного действия устройства в целом (до  $60\%$  и выше).



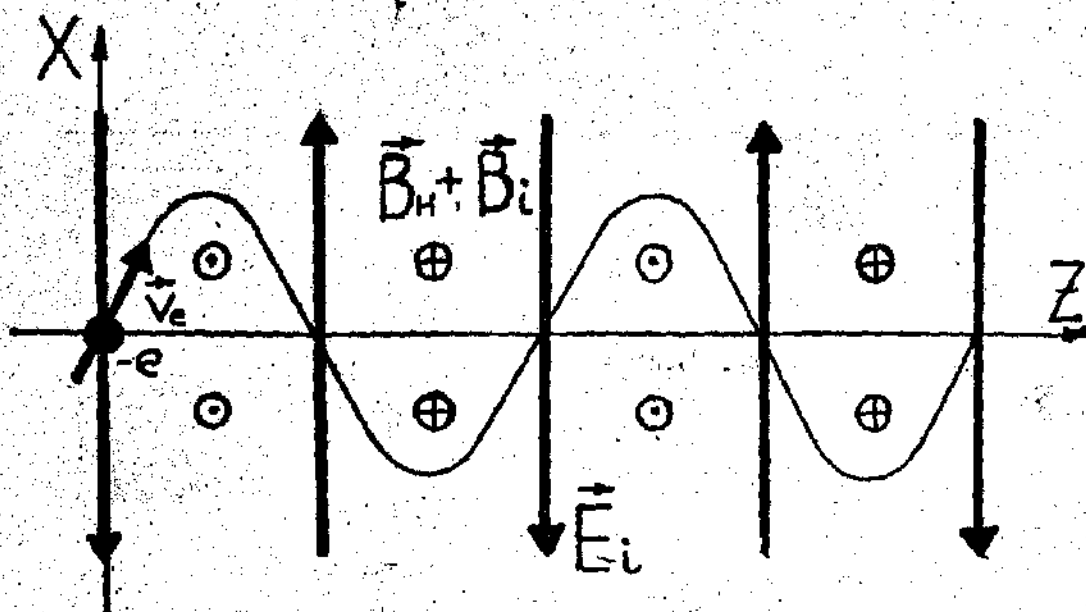
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

Упорядник

Техред М.Моргентал

Коректор М.Керецман

Замовлення 4136

Тираж

Підписне

Державне патентне відомство України,  
254655, ГСП, Київ-53, Львівська пл., 8

Відкрите акціонерне товариство "Патент", м. Ужгород, вул.Гагаріна, 101