



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 59495

(13) C2

(51) 7 G01N23/207, 1/06

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) РЕНТГЕНІВСЬКИЙ ВИМІРЮВАЛЬНО-ВИПРОБУВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС

1

(21) 2002032039

(22) 07 08 2000

(24) 15 09 2003

(86) PCT/RU00/00324, 07 08 2000

(46) 15 09 2003, Бюл. № 9, 2003 р.

(72) Кумахов Мурадін Абубекірович, RU

(73) Кумахов Мурадін Абубекірович, RU

(56) Синхронное излучение. Под ред. К. Кунца. Москва, издательство "Мир", 1981, с. 80-89

(57) 1 Вимірювально-випробувальний комплекс для досліджень в рентгенівському діапазоні випромінювання одночасно на кількох аналітичних установках, який містить джерело випромінювання, канали транспортування випромінювання до аналітичних установок і апаратуру аналітичних установок (5), який відрізняється тим, що як джерело випромінювання він містить джерело (1) розбіжного рентгенівського випромінювання, принаймні один канал транспортування випромінювання до аналітичних установок (5) містить рентгенівську лінзу (2) у вигляді сукупності зігнутих каналів (10) з використанням багаторазового повного зовнішнього відбивання рентгенівського випромінювання від їх стінок (11), встановлену і виконану з можливістю захоплення частини (3) розбіжного рентгенівського випромінювання джерела (1) і перетворення його у квазіпаралельний пучок (4).

2 Комплекс за п. 1, який відрізняється тим, що він додатково містить рентгенівську лінзу (6) у вигляді сукупності зігнутих каналів з використанням багаторазового повного зовнішнього відбивання рентгенівського випромінювання від їх стінок, встановлену і виконану з можливістю захоплення частини розбіжного рентгенівського випромінювання джерела (1) і його фокусування, а також аналітичну установку (8), розташовану з боку вихідної фокусної області (22) вказаної рентгенівської лінзи (6) і виконану з можливістю позиціонування об'єкта (18) дослідження для суміщення потрібної його частини з вихідною фокусною областю (22) вказаної рентгенівської лінзи (6).

3 Комплекс за п. 2, який відрізняється тим, що аналітична установка (8), розташована з боку вихідної фокусної області (22) вказаної

2

рентгенівської лінзи (6), призначена для проведення спектрометричних досліджень і містить детектор (19) випромінювання, збудженого у досліджуваному зразку (18), підключений до виходу детектора спектрометричний тракт (20) і підключений до виходу останнього засіб (21) обробки й відображення інформації.

4 Комплекс за будь-яким з пп. 1-3, який відрізняється тим, що він як джерело розбіжного рентгенівського випромінювання містить рентгенівську трубку (1).

5 Комплекс за п. 4, який відрізняється тим, що рентгенівська трубка (1) виконана з мікрофокусним анодом.

6 Комплекс за п. 4, який відрізняється тим, що рентгенівська трубка (1) виконана з простірним анодом.

7 Комплекс за п. 4, який відрізняється тим, що рентгенівська трубка (1) виконана з обертовим анодом.

8 Комплекс за п. 4, який відрізняється тим, що рентгенівська трубка (1) виконана зі складним анодом.

9 Комплекс за п. 4, який відрізняється тим, що рентгенівська трубка (1) виконана з вольфрамовим анодом.

10 Комплекс за будь-яким з пп. 7-9, який відрізняється тим, що він додатково містить принаймні один монохроматор (33), встановлений з можливістю виділення і відбивання в напрямку аналітичної установки частини (34, 35) квазіпаралельного пучка (4), формованого рентгенівською лінзою (2), встановленою з можливістю захоплення частини розбіжного рентгенівського випромінювання джерела і виконаною з можливістю перетворення його у квазіпаралельний пучок.

11 Комплекс за будь-яким з пп. 1-3, який відрізняється тим, що він як джерело розбіжного рентгенівського випромінювання містить плазмове або лазерне рентгенівське джерело.

12 Комплекс за будь-яким з пп. 1-3, 5-9, який відрізняється тим, що принаймні одна з аналітичних установок (5), до якої транспортується квазіпаралельний пучок (4) випромінювання, призначена для проведення дифрактометричних досліджень і містить засіб (17) для розміщення досліджуваного зразка (18) і орієнтації його

(13) C2

(11) 59495

(19) UA

відносно напрямку поширення квазіпаралельного пучка (4), детектор (19) випромінювання, дифрагованого на досліджуваному зразку, і засіб (25) для взаємного позиціонування детектора і досліджуваного зразка, а також підключений до виходу детектора (19) засіб (26) обробки й відображення інформації

13 Комплекс за будь-яким з пп 1-3, 5-9, який **відрізняється** тим, що принаймні одна з аналітичних установок (5), до якої транспортується квазіпаралельний пучок (4) випромінювання, призначена для одержання зображення внутрішньої структури об'єкта і містить засіб (17) для позиціонування об'єкта (18) і детектор (27) випромінювання, що пройшло крізь зразок, із засобами візуалізації і реєстрації зображення

14 Комплекс за будь-яким з пп 1-3, 5-9, який **відрізняється** тим, що принаймні одна з аналітичних установок (5), до якої транспортується квазіпаралельний пучок (4) випромінювання, призначена для здійснення рентгенівської літографії і містить засіб (28) для розміщення маски (29) і встановлений за ним засіб (30) для розміщення підкладки (31) з нанесеним на її поверхню шаром резисту (32)

15 Комплекс за будь-яким з пп 1-3, 5-9, який **відрізняється** тим, що принаймні одна з аналітичних установок (5), до якої транспортується квазіпаралельний пучок (4) випромінювання, призначена для проведення спектрометричних досліджень і містить рентгенівську лінзу (23) у вигляді сукупності зігнутих каналів з використанням багаторазового повного зовнішнього відбивання рентгенівського випромінювання від їх стінок, встановлену і виконану з можливістю фокусування квазіпаралельного пучка випромінювання, засіб (17) позиціонування досліджуваного зразка (18) для суміщення потрібної його частини з областю (24) фокусування рентгенівського випромінювання, детектор (19) збудженого у зразку (18) випромінювання, підключений до виходу детектора (19) спектрометричний тракт (20) і підключений до виходу останнього засіб (21) обробки й відображення інформації

16 Комплекс за п 4, який **відрізняється** тим, що принаймні одна з аналітичних установок (5), до якої транспортується квазіпаралельний пучок (4) випромінювання, призначена для проведення дифрактометричних досліджень і містить засіб (17) для розміщення досліджуваного зразка (18) і орієнтації його відносно напрямку поширення квазіпаралельного пучка (4), детектор (19) випромінювання, дифрагованого на досліджуваному зразку, і засіб (25) для взаємного позиціонування детектора і досліджуваного зразка, а також підключений до виходу детектора (19) засіб (26) обробки й відображення інформації

17 Комплекс за п 4, який **відрізняється** тим, що принаймні одна з аналітичних установок (5), до якої транспортується квазіпаралельний пучок (4) випромінювання, призначена для одержання зображення внутрішньої структури об'єкта і містить засіб (17) для позиціонування об'єкта (18) і детектор (27) випромінювання, що пройшло крізь

зразок, із засобами візуалізації і реєстрації зображення

18 Комплекс за п 4, який **відрізняється** тим, що принаймні одна з аналітичних установок (5), до якої транспортується квазіпаралельний пучок (4) випромінювання, призначена для здійснення рентгенівської літографії і містить засіб (28) для розміщення маски (29) і встановлений за ним засіб (30) для розміщення підкладки (31) з нанесеним на її поверхню шаром резисту (32)

19 Комплекс за п 4, який **відрізняється** тим, що принаймні одна з аналітичних установок (5), до якої транспортується квазіпаралельний пучок (4) випромінювання, призначена для проведення спектрометричних досліджень і містить рентгенівську лінзу (23) у вигляді сукупності зігнутих каналів з використанням багаторазового повного зовнішнього відбивання рентгенівського випромінювання від їх стінок, встановлену і виконану з можливістю фокусування квазіпаралельного пучка випромінювання, засіб (17) позиціонування досліджуваного зразка (18) для суміщення потрібної його частини з областю (24) фокусування рентгенівського випромінювання, детектор (19) збудженого у зразку (18) випромінювання, підключений до виходу детектора (19) спектрометричний тракт (20) і підключений до виходу останнього засіб (21) обробки й відображення інформації

20 Комплекс за п 10, який **відрізняється** тим, що принаймні одна з аналітичних установок (5), до якої транспортується квазіпаралельний пучок (4) випромінювання, призначена для проведення дифрактометричних досліджень і містить засіб (17) для розміщення досліджуваного зразка (18) і орієнтації його відносно напрямку поширення квазіпаралельного пучка (4), детектор (19) випромінювання, дифрагованого на досліджуваному зразку, і засіб (25) для взаємного позиціонування детектора і досліджуваного зразка, а також підключений до виходу детектора (19) засіб (26) обробки й відображення інформації

21 Комплекс за п 10, який **відрізняється** тим, що принаймні одна з аналітичних установок (5), до якої транспортується квазіпаралельний пучок (4) випромінювання, призначена для одержання зображення внутрішньої структури об'єкта і містить засіб (17) для позиціонування об'єкта (18) і детектор (27) випромінювання, що пройшло крізь зразок, із засобами візуалізації і реєстрації зображення

22 Комплекс за п 10, який **відрізняється** тим, що принаймні одна з аналітичних установок (5), до якої транспортується квазіпаралельний пучок (4) випромінювання, призначена для здійснення рентгенівської літографії і містить засіб (28) для розміщення маски (29) і встановлений за ним засіб (30) для розміщення підкладки (31) з нанесеним на її поверхню шаром резисту (32)

23 Комплекс за п 10, який **відрізняється** тим, що принаймні одна з аналітичних установок (5), до якої транспортується квазіпаралельний пучок (4) випромінювання, призначена для проведення спектрометричних досліджень і містить рентгенівську лінзу (23) у вигляді сукупності зігнутих каналів з використанням багаторазового

повного зовнішнього відбивання рентгенівського випромінювання від їх стінок, встановлену і виконану з можливістю фокусування квазіпаралельного пучка випромінювання, засіб (17) позиціонування досліджуваного зразка (18) для суміщення потрібної його частини з областю (24) фокусування рентгенівського випромінювання, детектор (19) збудженого у зразку (18) випромінювання, підключений до виходу детектора (19) спектрометричний тракт (20) і підключений до виходу останнього засіб (21) обробки й відображення інформації

24 Комплекс за п 11, який відрізняється тим, що принаймні одна з аналітичних установок (5), до якої транспортується квазіпаралельний пучок (4) випромінювання, призначена для проведення дифрактометричних досліджень і містить засіб (17) для розміщення досліджуваного зразка (18) і орієнтації його відносно напрямку поширення квазіпаралельного пучка (4), детектор (19) випромінювання, дифрагованого на досліджуваному зразку, і засіб (25) для взаємного позиціонування детектора і досліджуваного зразка, а також підключений до виходу детектора (19) засіб (26) обробки й відображення інформації

25 Комплекс за п 11, який відрізняється тим, що принаймні одна з аналітичних установок (5), до якої транспортується квазіпаралельний пучок (4) випромінювання, призначена для одержання зображення внутрішньої структури об'єкта і містить засіб (17) для позиціонування об'єкта (18) і

детектор (27) випромінювання, що пройшло крізь зразок, із засобами візуалізації і реєстрації зображення

26 Комплекс за п 11, який відрізняється тим, що принаймні одна з аналітичних установок (5), до якої транспортується квазіпаралельний пучок (4) випромінювання, призначена для здійснення рентгенівської літографії і містить засіб (28) для розміщення маски (29) і встановлений за ним засіб (30) для розміщення підкладинки (31) з нанесеним на її поверхню шаром резисту (32)

27 Комплекс за п 11, який відрізняється тим, що принаймні одна з аналітичних установок (5), до якої транспортується квазіпаралельний пучок (4) випромінювання, призначена для проведення спектрометричних досліджень і містить рентгенівську лінзу (23) у вигляді сукупності зігнутих каналів з використанням багаторазового повного зовнішнього відбивання рентгенівського випромінювання від їх стінок, встановлену і виконану з можливістю фокусування квазіпаралельного пучка випромінювання, засіб (17) позиціонування досліджуваного зразка (18) для суміщення потрібної його частини з областю (24) фокусування рентгенівського випромінювання, детектор (19) збудженого у зразку (18) випромінювання, підключений до виходу детектора (19) спектрометричний тракт (20) і підключений до виходу останнього засіб (21) обробки й відображення інформації

Винахід відноситься до техніки дослідження і випробування речовин, матеріалів або приладів з використанням рентгенівського випромінювання

Відомі комплекси для проведення вказаних досліджень і випробувань одночасно на кількох аналітичних установках (див Синхротронное излучение Под ред К Кунца Москва, издательство "Мир", 1981, с 80-89 [1]) В таких комплексах використовується спільне для усіх аналітичних установок джерело випромінювання Останнє являє собою синхротрон або, в більш сучасних комплексах, - накопичувальне кільце Синхротронне випромінювання, яке виводиться з синхротрона чи накопичувального кільця, транспортується до аналітичних установок (робочих станцій) із досить широку спектрометричного випромінювання виділяється необхідна для проведення конкретних досліджень чи випробувань спектральна смуга (у випадку, до якого відноситься пропонований винахід - смуга в рентгенівському діапазоні) Склад апаратури кожної аналітичної установки визначається спеціалізацією її на тому чи іншому виді досліджень чи випробувань

Відомо, проте, що джерела синхротронного випромінювання, в тому числі накопичувальні кільця, являють собою надзвичайно складні капітальні споруди, вартість яких сягає сотень мільйонів доларів Так, накопичувальні кільця, спектр випромінювання яких включає

рентгенівський діапазон, мають діаметр не менше 50м ([1], с 80)

При їх експлуатації, враховуючи гігантські розміри, найскладнішою проблемою є підтримання прийнятної ступеня вакууму, в тому числі у сполучених з накопичувачем каналах транспортування синхротронного випромінювання до аналітичних установок, віддалених від периферії кільця на десятки метрів, та експериментальному об'єму кожної аналітичної установки Порушення вакууму в будь-якій з аналітичних установок може вивести з ладу прилади не лише в самому накопичувачі, а й усіх пов'язаних з ним пристроях ([1], с 80)

Саме виділення рентгенівського випромінювання і формування кількох пучків за числом аналітичних установок з вузьконаправленого пучка, що виходить з синхротрона чи накопичувального кільця, яке має здійснюватися у вакуумі, являє собою серйозну задачу, яку розв'язують за допомогою системи дзеркал ковзного падіння і кристалів При каналах згаданої протяжності необхідно вжити спеціальних заходів для контролю й утримання положення кожного із сформованих пучків, ширина яких у вертикальній площині складає одиниці мілірадіанів Так, зміщення пучка на відстані 40м всього лише на 10мм означає втрату одного-двох порядків інтенсивності, в залежності від апертури аналітичної установки ([1], с 85)

Для синхротронів і накопичувальних кілець вказаних розмірів досить складно розв'язується також задача захисту від радіації як персоналу, що експлуатує власне синхротрон чи накопичувач, так і дослідницького персоналу аналітичних установок.

Нарешті, комплекси на основі синхротронів чи накопичувальних кілець є настільки дорогими, що фінансувати їх будівництво може далеко не кожна держава. Тому, їх кількість обчислюється одиницями, і останніми десятиліттями державам доводиться об'єднуватися, щоб побудувати такі комплекси. Як приклад можна назвати Європейський центр синхротронного випромінювання (Гренобль, Франція).

Незважаючи на відмічені недоліки, джерела синхротронного випромінювання на теперішній час є практично єдиним видом джерел, що дозволяють одержати достатню для цілей досліджень і випробовувань спектральну густину вузько направленого випромінювання у потрібному робочому діапазоні одночасно для кількох аналітичних установок.

Тому дуже важливим є створення комплексу, легкодоступного для вчених та інженерів, у якому могла б бути одержана висока яскравість випромінювання у вхідній апертурі аналітичних установок при використанні дешевих джерел.

Задача створення комплексу, позбавленого від названих недоліків (гігантські розміри і надзвичайно висока вартість, проблеми підтримання вакууму і забезпечення радіаційної безпеки, формування кількох пучків і управління ними при транспортуванні випромінювання до аналітичних установок) розв'язується пропонуваним винаходом.

Пропонований вимірювально-випробувальний комплекс для досліджень у рентгенівському діапазоні випромінювання одночасно на кількох аналітичних установках, як і відомий, містить джерело випромінювання, канали транспортування випромінювання до аналітичних установок і апаратуру аналітичних установок.

На відміну від відомого, пропонуваний комплекс в ролі джерела випромінювання містить джерело розбіжного рентгенівського випромінювання, кожен канал транспортування випромінювання до аналітичних установок містить рентгенівську лінзу у вигляді сукупності зігнутих каналів з використанням багаторазового повного зовнішнього відбивання рентгенівського випромінювання від їх стінок, встановлену з можливістю захоплення частини розбіжного рентгенівського випромінювання джерела і виконану з можливістю перетворення його у квазіпаралельне. В ролі джерела розбіжного рентгенівського випромінювання можуть бути використані рентгенівська трубка, лазерний або плазмовий джерела.

Таким чином, одержання названих видів технічного результату забезпечується пропонуваним винаходом завдяки відмові від використання синхротрона чи накопичувальних кілець як джерела випромінювання і застосування в ролі такого джерела, зокрема, стандартної рентгенівської трубки, і рентгенівських лінз для відбирання випромінювання і формування

вузьконаправлених квазіпаралельних пучків, що транспортують рентгенівське випромінювання до аналітичних установок.

Крім того, комплекс додатково може містити рентгенівську лінзу у вигляді сукупності зігнутих каналів з використанням багаторазового повного зовнішнього відбивання рентгенівського випромінювання від їх стінок, встановлену з можливістю захоплення частини розбіжного рентгенівського випромінювання джерела і виконану з можливістю його фокусування, а також аналітичну установку, виконану з можливістю розміщення об'єкта дослідження із суміщенням потрібної його частини з областю фокусування рентгенівського випромінювання.

При використанні у пропонуваному комплексі в ролі джерела розбіжного рентгенівського випромінювання рентгенівської трубки остання може бути виконана з різними видами анода, зокрема, мікрофокусним, простірним, обертовим, складним, вольфрамовим. Використання рентгенівської трубки, в якій анод виконано мікрофокусним або простірним, є доцільним для одержання випромінювання, розбіжного у великому тілесному куті, трубки зі складним анодом - для забезпечення можливості одержання різних спектральних ліній випромінювання відповідно до хімічних елементів, що входять до складу анода, трубки з обертовим анодом - для забезпечення можливості одержання великої потужності завдяки покращенню відводу тепла, трубки з вольфрамовим анодом - для одержання широкосмугового рентгенівського випромінювання.

У випадках, коли в ролі джерела розбіжного рентгенівського випромінювання пропонуваний комплекс містить рентгенівську трубку з обертовим або складним або вольфрамовим анодом, він може додатково містити принаймні один монохроматор, встановлений на шляху квазіпаралельного пучка, що формується рентгенівською лінзою, з можливістю виділення і відбивання частини цього пучка в напрямку до аналітичної установки. У цих випадках квазіпаралельний пучок, що формується однією рентгенівською лінзою, використовується для забезпечення рентгенівським випромінюванням щонайменше двох аналітичних установок.

У випадку, коли аналітична установка, що входить до складу пропонуваного комплексу, призначена для проведення спектрометричних досліджень, вона містить засіб для розміщення досліджуваного зразка, детектор збудженого t у зразку випромінювання, підключений до виходу детектора спектрометричний тракт і підключений до виходу останнього засіб обробки й відображення інформації. Така аналітична установка розміщується з боку вихідної фокусної області рентгенівської лінзи, що входить до складу комплексу, встановленої з можливістю захоплення частини розбіжного рентгенівського випромінювання джерела і виконаної з можливістю його фокусування. Ця аналітична установка повинна бути виконана з можливістю суміщення потрібної частини досліджуваного зразка з фокусною областю вказаної лінзи.

В аналітичних установках, до яких транспортується квазіпаралельний пучок випромінювання, є, зокрема, наступні можливості

Якщо така аналітична установка призначена для проведення спектрометричних досліджень, можна містити рентгенівську лінзу у вигляді сукупності зігнутих каналів з використанням багаторазового повного зовнішнього відбивання рентгенівського випромінювання від їх стінок, встановлену з можливістю фокусування квазіпаралельного пучка випромінювання, і засіб для розміщення досліджуваного зразка із суміщенням потрібної його частини з областю фокусування рентгенівського випромінювання. Крім того, аналітична установка, що розглядається, містить детектор збудженого у досліджуваному зразку випромінювання, підключений до виходу детектора спектрометричний тракт і підключений до виходу останнього засіб обробки й відображення інформації

У випадку, якщо аналітична установка у складі пропонованого комплексу, до якої транспортується квазіпаралельний пучок випромінювання, призначена для проведення дифрактометричних досліджень, вона містить засіб для розміщення досліджуваного зразка й орієнтації його відносно напрямку поширення пучка, детектор випромінювання, дифрагований на досліджуваному зразку, і засіб для взаємного позиціонування детектора і досліджуваного зразка, а також підключений до виходу детектора засіб обробки й відображення інформації

У випадку, якщо аналітична установка у складі пропонованого комплексу, до якої транспортується квазіпаралельний пучок випромінювання, призначена для одержання зображення внутрішньої структури об'єктів, вона містить засіб для позиціонування об'єкта і детектор випромінювання, що пройшло крізь об'єкт, із засобами візуалізації і реєстрації зображення

У випадку, якщо аналітична установка у складі пропонованого комплексу, до якої транспортується квазіпаралельний пучок випромінювання, призначена для здійснення рентгенівської літографії, вона містить засіб для розміщення маски і встановлений за ним засіб для розміщення підкладки з нанесеним на її поверхню шаром резисту

Пропонований винахід ілюструється кресленнями, на яких показані

на Фіг 1 - склад і взаємне розташування основних частин пропонованого комплексу,

на Фіг 2 - поширення рентгенівського випромінювання з багаторазовим повним зовнішнім відбиванням вздовж окремого каналу рентгенівської лінзи,

на Фіг 3 - схематичне зображення рентгенівської лінзи для фокусування розбіжного випромінювання ("повної" лінзи),

на Фіг 4 - схематичне зображення рентгенівської лінзи для перетворення розбіжного випромінювання у квазіпаралельне ("півлінзи"),

на Фіг 5 - склад і взаємне розташування апаратури аналітичної установки, призначеної для проведення спектрометричних досліджень, у

випадку, коли випромінювання джерела транспортується до цієї установки "повною" рентгенівською лінзою, що фокусує розбіжне випромінювання джерела,

на Фіг 6 - те ж саме у випадку, коли до аналітичної установки транспортується квазіпаралельне випромінювання, сформоване "півлінзою",

на Фіг 7 - склад і взаємне розташування апаратури аналітичної установки, до якої транспортується квазіпаралельне випромінювання, призначеної для проведення дифрактометричних досліджень,

на Фіг 8 - склад і взаємне розташування апаратури аналітичної установки, до якої транспортується квазіпаралельне випромінювання, призначеної для одержання зображення внутрішньої структури об'єкта,

на Фіг 9 - склад і взаємне розташування апаратури аналітичної установки, до якої транспортується квазіпаралельне випромінювання, призначеної для здійснення рентгенівської літографії,

на Фіг 10 - варіант "геометрії" розташування складових частин пропонованого комплексу при використанні монохроматорів для "розщеплення" квазіпаралельного пучка на частини, що транспортуються до кількох аналітичних установок

Пропонований комплекс (Фіг 1) містить рентгенівську трубку 1, що є спільним джерелом рентгенівського випромінювання для аналітичних установок (робочих станцій) 5, кожна з яких має склад апаратури, що відповідає спеціалізації аналітичної установки на певному виді досліджень, вимірювань чи випробувань. У тілесному куті, що відповідає формованому рентгенівською трубкою 1 випромінюванню, розташовано кілька (по числу аналітичних установок 5) рентгенівських лінз 2, кожна з яких захоплює частину випромінювання рентгенівської трубки 1 в тілесному куті 3 і перетворює розбіжне випромінювання, що нею сприймається, в пучок 4 квазіпаралельного випромінювання. Фокусні області рентгенівських лінз 2 з боку їх вхідних торців, по можливості, суміщені одна з одною та з центром вихідної апертури рентгенівської трубки 1.

Вихідний пучок 4 кожної з лінз 2 направлений на вхідну апертуру відповідної аналітичної установки 5. Аналітичні установки 5 розташовані від рентгенівських лінз 2 на відстані, обраній з міркувань зручності розміщення (щоб відстань між пучками в зоні розміщення аналітичних установок була достатньою для розміщення апаратури і персоналу).

Рентгенівські лінзи 2, виконані з можливістю перетворення розбіжного рентгенівського випромінювання у квазіпаралельне, разом з квазіпаралельними пучками 4, що ними формуються, утворюють канали транспортування рентгенівського випромінювання від джерела (рентгенівської трубки 1) до аналітичних установок (робочих станцій) 5.

У наступному випадку комплекс може містити також одну чи кілька рентгенівських лінз 6, що

фокусують захоплене ними розбіжне випромінювання рентгенівської трубки в малій області, яка знаходиться в заданому місці на вході спеціалізованої аналітичної установки 8, яка потребує саме такого характеру рентгенівського випромінювання, що діє на досліджуваний об'єкт. Сфокусованому вихідному пучку рентгенівського випромінювання лінзи 6 на Фіг 1 відповідає тілесний кут 7. При необхідності в комплексі, що не має фокусувальних лінз 6 безпосередньо в зоні випромінювання рентгенівської трубки, еквівалентна названій вище для може бути одержана шляхом включення до складу аналітичної установки 5 лінзи, аналогічної одній із лінз 2, але орієнтованої протилежно їй. Така лінза перетворює квазіпаралельний пучок 4 рентгенівського випромінювання у сфокусований пучок.

Захист персоналу аналітичних установок від прямого рентгенівського випромінювання трубки 1 забезпечується екраном 9, що має отвори за розмірами перерізів пучків 4, 7. Захисний екран 9 може знаходитися як поблизу аналітичних установок 5, 8 (цей випадок показано на Фіг 1), так і поблизу вихідних торців рентгенівських лінз 2, 6. Оскільки довжина пучків 4 може становити кілька метрів і більше, у першому випадку розміри екрану 9 є значно більшими, ніж у другому. Однак у другому випадку слід очікувати більшого впливу неточностей виготовлення захисного екрану на імовірність дії на персонал прямого випромінювання рентгенівської трубки 1.

Найважливішими елементами пропонованого комплексу, завдяки використанню яких вдається забезпечити досягнення технічного результату, складові якого були перелічені вище при розкритті винаходу, є рентгенівські лінзи.

Перші лінзи для керування рентгенівським випромінюванням (фокусування розбіжного випромінювання, формування паралельного потоку з розбіжного випромінювання, фокусування паралельного випромінювання та ін.), являли собою сукупність зігнутих потрібним чином каналів 10 (Фіг 2) транспортування випромінювання, у яких випромінювання зазнає багаторазового повного зовнішнього відбивання від стінок 11. Процес багаторазового повного зовнішнього відбивання окремого кванта рентгенівського випромінювання при поширенні вздовж одного з каналів 10 рентгенівської лінзи показано на Фіг 2 ламаною лінією 12. Такі лінзи виготовляються у вигляді великої кількості каплярів або полікаплярів, що проходять крізь отвори чи комірки підтримувальних структур, встановлених на певній відстані вздовж довжини лінзи (див. В. А. Аркадьєв, А. И. Коломийцев, М. А. Кумахов и др. Широкополосная рентгеновская оптика с большой угловой апертурой. Успехи физических наук, 1989, том 157, выпуск 3, с. 529-537 [2], патент США №5,192,869 (опубл. 09.03.93) [3]). Лінза в цілому має форму бочки (тобто звужується до обох торців), якщо вона призначена для фокусування розбіжного випромінювання, або півбочки (тобто звужується лише до одного з торців), якщо вона призначена для перетворення розбіжного випромінювання у квазіпаралельне або для

фокусування такого випромінювання.

В подальшому для позначення лінз двох названих типів, в тому числі й таких, що мають відмінне від описаного конструктивне виконання, закріпилися відповідно терміни "повна лінза" й "півлінза". Відповідна термінологія використовується і нижче при описанні пропонованого винаходу.

Відома також лінза, в якій стінки сусідніх каналів транспортування випромінювання контактують одна з одною по всій довжині, а самі канали мають змінний по довжині поперечний переріз, що змінюється за тим же законом, що й повний поперечний переріз лінзи (V. M. Andreevsky, M. V. Gubarev, P. I. Zhidkin, M. A. Kumakhov, A. V. Noskin, I. Yu. Ponomarev, Kh. Z. Ustok. X-ray waveguide system with a variable cross-section of the sections. The IV-th All-Union Conference on Interaction of Radiation with Solids. Book of Abstracts (May 15-19, 1990, Elbrus settlement, Kabardino-Balkarian ASSR, USSR, pp. 177-178) [4], патент США №5,570,408 (опубл. 29.10.96) [5]). "Повна лінза" і "півлінза" з такими каналами схематично показані на Фіг 3 і Фіг 4 відповідно.

"Повна" лінза (Фіг 3) має канали, зігнуті таким чином, що продовження їх ліворуч та праворуч від відповідних торців сходяться у лівій 13 і правій 14 фокусних областях, розмір яких має порядок діаметра окремого каналу. Кривина каналів, розташованих ближче до периферії "повної" лінзи, більше, ніж каналів, що знаходяться ближче до її оптичної осі 15, яка збігається з продовженням віссю симетрії. Для забезпечення фокусування розбіжного рентгенівського випромінювання квазіточкове джерело має знаходитися в одній з фокусних областей, тоді фокусування відбувається в іншій фокусній області.

"Півлінза", показана на Фіг 4, при подачі розбіжного випромінювання зліва забезпечує перетворення його у квазіпаралельне випромінювання, що виходить з правого торця. Вигин каналів, різний на різній віддалі від оптичної осі 15 "півлінзи", забезпечує перетин продовжень їх лівих кінців у фокусній області 16 "півлінзи", яка повинна збігатися з розміщенням квазіточкового джерела розбіжного рентгенівського випромінювання, у вихідного торця (правого за Фіг 4) канали "півлінзи" паралельні. При подачі квазіпаралельного рентгенівського випромінювання на правий за Фіг 4 торець "півлінзи" воно фокусується у фокусній області 16, розташований біля лівого торця.

Оскільки використовується джерело (рентгенівська трубка), що дає безпосередньо рентгенівське випромінювання, ніяких засобів для віділення випромінювання рентгенівського діапазону з випромінювання джерела в описуваному комплексі не вимагається. Відбір випромінювання і розподіл його по каналах транспортування до аналітичних установок також не потребує застосування яких-небудь спеціальних засобів чи технічних прийомів. Достатньо розташувати лінзи 2, 6 в зоні виходу випромінювання з трубки 1 на відстані, що забезпечує близькість фокусних областей лінз до ефективного геометричного центру

випромінювання трубки 1

Не вимагається також ніяких особливих засобів для підтримання потрібної траєкторії сформованих променів (рентгенівських пучків 4, 7) на шляху до аналітичних установок 5, 8 достатньо забезпечити взаємну механічну нерухомість рентгенівської трубки 1 і лінз 2, 6. Властивості рентгенівської трубки 1 і рентгенівських лінз 2, 6 стабільні і дозволяють обходитися без яких-небудь підстроювань після правильного початкового встановлення.

Оскільки довжина пучка транспортованого квазіпаралельного випромінювання, тобто відстань між вихідними торцями рентгенівських лінз і аналітичними установками, не перевищує кількох метрів (такої відстані достатньо для зручного розміщення апаратури аналітичних установок і персоналу), загасання і розсіяння рентгенівського випромінювання є незначним. Тому транспортування випромінювання можливе безпосередньо у повітряному середовищі, без вживання яких-небудь заходів з вакуумування, завдяки чому ніяких проблем, пов'язаних з підтриманням вакууму, в пропонованому комплексі не існує.

Радіаційний захист, що реалізується за допомогою екрану 9, конструктивно є досить простим і при невеликій потужності рентгенівської трубки 1 (яка, як буде показано нижче, може виявитися цілком прийнятною) може бути забезпечений навіть звичайними будівельними конструкціями.

На відміну від синхротрона, якому властивий імпульсний характер випромінювання, параметри якого не можуть бути змінені персоналом аналітичних установок, випромінювання рентгенівської трубки може бути як неперервним, так і імпульсним з бажаними параметрами останнього. Завдяки можливості роботи при неперервному випромінюванні в пропонованому комплексі можуть проводитися дослідження, для яких імпульсне випромінювання неприйнятне (наприклад, через те, що при однаковій з неперервним випромінюванням середній інтенсивності імпульсного випромінювання можливі прояви неплінних ефектів у досліджуваному середовищі, викликаних досить великою інтенсивністю в імпульсі).

Аналітичні установки в складі пропонованого комплексу можуть бути призначені для розв'язання великої кількості досить різноманітних фундаментальних і прикладних задач. Це - дифрактометрія і топографія простих, складних, а також білкових кристалів, це - рентгенофлуоресцентний аналіз за допомогою сфокусованих рентгенівських пучків, це - одержання внутрішньої структури різних об'єктів, включаючи біологічні, в тому числі в медичних цілях, це - аналіз нових матеріалів і лікарських засобів, аналіз "чипів", властивостей і якості поверхонь і т.д.

У випадку, якщо аналітична установка, що входить до складу пропонованого комплексу, призначена для проведення спектрометричних досліджень, вона містить (Фіг 5) засіб 17 для розміщення досліджуваного зразка 18, детектор 19

збудженого у зразку випромінювання, підключений до виходу детектора 19 спектрометричний тракт 20 і підключений до виходу останнього засіб 21 обробки й відображення інформації. Така аналітична установка 8 розміщується з боку вихідної фокусної області 22 "повної" рентгенівської лінзи 6, що входить до складу комплексу (див також Фіг 1), встановленої з можливістю захоплення частини розбіжного рентгенівського випромінювання джерела 1 і виконаної з можливістю його фокусування. Засіб 17 для розміщення досліджуваного зразка повинен забезпечувати можливість суміщення потрібної частини досліджуваного зразка 18 з вихідною фокусною областю 22 (правою за Фіг 1, Фіг 5) "повної" лінзи 6. Відомості про елементи спектрометричного тракту 20 (підсилювачі, режектор накладень, багатоканальний амплітудний аналізатор та ін.), а також про засіб 21 обробки й відображення інформації наведені, зокрема в книжці Р. Вольдсет. Прикладная спектрометрия рентгеновского излучения М, Атомиздат, 1977 [6], розділ 2. Основною областю застосування спектрометричних досліджень є визначення елементного складу зразка з оцінкою, кількісного вмісту в ньому різних хімічних елементів.

Аналогічна розглянутій аналітична установка може використовувати і квазіпаралельне рентгенівське випромінювання, пучок якого сформовано однією з "півлінз" 2 (Фіг 1). Для цього достатньо доповнити установку 8/ показану на Фіг 5, "півлінзою" 23 (див Фіг 6, де показано установку 5, що одержується в результаті такого доповнення). Роль вихідної фокусної області "повної" лінзи виконує фокусна область 24 "півлінзи" 23.

У випадку, якщо аналітична установка 5 у складі пропонованого комплексу, до якої транспортується квазіпаралельний пучок випромінювання, призначена для проведення дифрактометричних досліджень, вона містить (Фіг 7) засіб 17 для розміщення досліджуваного зразка 18 і орієнтації його відносно напрямку поширення пучка 4, детектор 19 випромінювання, дифрагованого на досліджуваному зразку, і засіб 25 для взаємного позиціонування детектора 19 і досліджуваного зразка 18, а також підключений до виходу детектора 19 засіб 26 обробки й відображення інформації. До засобу 25 для взаємного позиціонування детектора і досліджуваного зразка і засобу 17 для розміщення досліджуваного зразка і орієнтації його відносно напрямку поширення пучка ставиться вимога забезпечення високої кутової точності, і вони виконуються у вигляді гоніометричних механізмів. Основною областю застосування такої аналітичної установки є дослідження кристалічних зразків.

У випадку, якщо аналітична установка 5 у складі пропонованого комплексу, до якої транспортується квазіпаралельний пучок випромінювання, призначена для одержання зображення внутрішньої структури об'єктів, вона містить (Фіг 8) засіб 17 для розміщення об'єкта 18 і детектор 27 випромінювання, що крізь нього пройшло. У найпростішому випадку в ролі такого

детектора використовується звичайна рентгенівська плівка в упаковці, яка захищає її від дії світла. Така плівка одночасно виконує функцію засобу реєстрації зображення, а після проявлення - також функцію засобу його візуалізації. Інші схеми одержання зображень, застосовувані в аналітичних установках пропонованого комплексу, описані, наприклад, у європейській заявці №EP0742150 (опубл. 31.07.98) [7].

У випадку, якщо аналітична установка 5 у складі пропонованого комплексу, до якої транспортується квазіпаралельний пучок випромінювання, призначена для здійснення рентгенівської літографії, вона містить (Фіг. 9) засіб 28 для розміщення маски 29 і встановлений за ним засіб 30 для розміщення підкладки 31 з нанесеним на її поверхню шаром резисту 32. Більш складні схеми див. наприклад, в патенті США №5,175,755 (опубл. 29.12.92) [8].

Низка інших прикладів структури аналітичних установок, в тому числі з використанням у їх складі рентгенівських "повних" лінз і "півліній", описані, наприклад, в патенті США №5,497,008 (опубл. 05.03.96) [9] і європейському патенті №EP0555376 (опубл. 18.03.98) [10].

Якщо в ролі матеріалу анода трубки використовується вольфрам, то за допомогою монохроматорів можна відбирати найрізноманітніші довжини хвиль, оскільки випромінювання вольфраму є досить широкодіапазонним та інтенсивним.

Якщо в ролі анода використовується складна мішень, виконана з кількох хімічних елементів, то монохроматори будуть селективно відбирати ті чи інші довжини хвиль характеристичних випромінювань складного анода.

Вибір типу використовуваного джерела розбіжного рентгенівського випромінювання визначається, зокрема, розв'язуваною задачею. Так, випромінювання лазерних і плазмових джерел, що лежить у м'якому рентгенівському діапазоні, можна використовувати при проведенні досліджень у біології, медицині, для мікроскопії та ін. Крім того, такі джерела, а також рентгенівські трубки достатньої потужності можуть бути використані в комплексах, що містять аналітичні установки (робочі станції), за допомогою яких розв'язуються задачі рентгенівської літографії (як контактної, так і проекційної) та LIGA-технології.

В залежності від типу рентгенівської трубки можна використовувати різну "геометрію" розташування анода трубки, рентгенівської лінзи й аналітичної установки.

Розглянута вище "геометрія", показана на Фіг. 1, коли кожній аналітичній установці відповідає своя рентгенівська лінза, що формує пучок випромінювання тільки для цієї аналітичної установки, є однією з можливих. У цій "геометрії" доцільно використовувати, наприклад, трубки з прострільним або мікрофокусним анодом. Такі трубки випромінюють практично у півпростір, тому в тілесному куті їх випромінювання можна розмістити велику кількість "півліній" і "повних" лінз.

На Фіг. 10 показано іншу "геометрію", в більшій мірі характерну для рентгенівського джерела у вигляді трубки (умовно показану позицією 1) з

обертвовим анодом. При використанні такої трубки джерело випромінювання є лінійним. Трубка має два вихідні вікна. Рентгенівські оптичні пристрої можуть "забирати" лише випромінювання, що виходить з цих двох вікон. Для забезпечення можливості роботи великої кількості аналітичних установок на шляху сформованого рентгенівського "півлінійного" 2 квазіпаралельного пучка 4 розташовано під різними кутами кілька (5-10) монохроматорів 33, які "перехоплюють" різні частини 34 поперечного перерізу початкового пучка 4, що виходить з "півлінійного" 2, і направляють відбиті частини 35 початкового пучка 4 до аналітичних установок 5. В ролі монохроматорів 33 можуть бути використані, наприклад, кристали з площинами зрізу, не паралельними кристалічними площинам, та шаруваті структури. Тип монохроматора і кут його орієнтації відносно напрямку пучка рентгенівського випромінювання, що виходить з "півлінійного", визначають потрібний ступінь колімації дифрагованої на ньому частини пучка.

Таким чином, при використанні в ролі джерела розбіжного випромінювання рентгенівської трубки канали транспортування випромінювання до аналітичних установок можуть бути поділені на наступні частини:

в геометрії, показаній на Фіг. 1

проміжок рентгенівської трубки 1 (точніше, її анод) - вхідний торець рентгенівської лінзи 2 або 7 (в межах тілесного кута 3),

канали рентгенівської лінзи 2 або 7,

проміжок вихідний торець рентгенівської лінзи 2 або 7 - аналітична установка 5 або 8 (в межах поперечного перерізу вихідного пучка 4 лінзи 2 або тілесного кута 7, який відповідає вихідному пучку лінзи 6),

в геометрії, показаній на Фіг. 10

проміжок рентгенівської трубки 1 (точніше, її анод) - вхідний торець рентгенівської лінзи 2 (в межах тілесного кута 3),

канали рентгенівської лінзи 2,

проміжок вихідний торець рентгенівської лінзи 2 - монохроматор 33 (в межах поперечного перерізу частини 34 вихідного пучка 4 лінзи 2),

проміжок монохроматор 33 - аналітична установка 5 (в межах поперечного перерізу відбитого монохроматором пучка 35).

Наведемо порівняння параметрів випромінювання сучасних синхротронів і рентгенівської трубки в комплексі пропонованої конструкції.

В книжці [1] на рис. 15 (с. 20) наведено криву яскравості випромінювання англійського синхротрона "Doris" ($E=2\text{Гев}$, струм 300мА). Як видно з цього рисунка, в околі 10кеВ цей синхротрон випромінює 10^{10} фотонів/с еВ (мрад)², тобто у вузькому тілесному куті, рівному 1 мрад, і вузькому спектральному діапазоні, рівному 1еВ, "Doris" випромінює протягом секунди близько 10^{10} фотонів. Рентгенівська трубка потужністю 1Вт за такий же час випромінює ізотропно приблизно $3 \cdot 10^{11}$ фотонів. Це - квазімонохроматичні фотони в спектральному діапазоні шириною близько 10еВ. Відповідно, трубка потужністю 10кВт випромінює $3 \cdot 10^{15}$ фотонів за 1 секунду.

За допомогою рентгенівської "півлінзи", що перетворює розбіжне випромінювання у квазіпаралельне і використовується в пропонованому комплексі, можна одержати наступне число фотонів, транспортуваних квазіпаралельно з кутовою розбіжністю близько 3мрад

$$N=310^{15} \Delta \Sigma (\varepsilon T_3)^2 / 4 \Sigma \text{фот/с} (3\text{мрад})^2 10\text{еВ},$$

где εT_3 - апертура захоплення випромінювання рентгенівської трубки "півлінзою",

Δ - коефіцієнт передачі "півлінзи"

Вважаючи, що $\varepsilon T_3=0,1$ рад, $\Delta=0,3$, одержуємо $N=2,510^{11}$ фот/сеВ (мрад)²,

тобто в пропонованому комплексі рентгенівська трубка з середньою потужністю 10кВт, сполучена з оптикою, дає в тому ж спектральному і кутовому інтервалі в 25 разів більшу інтенсивність, ніж синхротрон "Doris". Звідси видно, що однакову з синхротроном "Doris" густину випромінювання в околі 10кеВ можна одержати в пропонованому комплексі при потужності трубки лише 400Вт. Такі і навіть більш потужні трубки широко використовуються в наукових дослідженнях, наприклад, в дифрактометрії. Так, компанія Philips використовує для дифрактометрії трубку потужністю 2,5кВт.

Зараз виготовляються і вільно продаються трубки з обертовим анодом потужністю від 30 до 100кВт. Вартість цих трубок разом з генератором складає близько 100 тисяч доларів, що приблизно на 3 порядки менше вартості синхротрона.

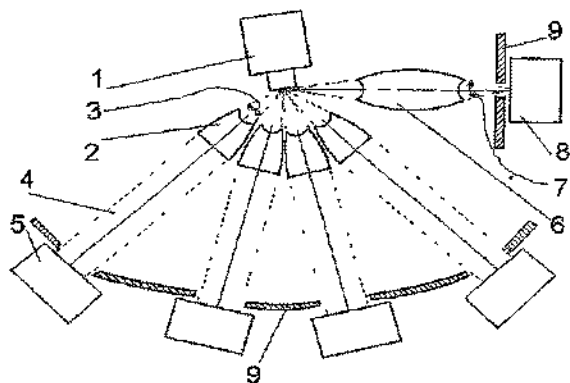
З наведених розрахунків і прикладів видно, наскільки ефективним і доцільним є використання пропонованого рішення.

Пропонований комплекс внаслідок своєї відносної простоти і дешевизни в порівнянні з

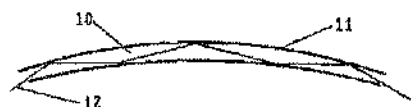
традиційними засобами є доступним для широкого кола спеціалістів і дозволяє суттєво розширити масштаби використання рентгенівських досліджень, випробовувань та вимірювань, забезпечуючи прийнятну яскравість випромінювання у вхідній апертурі аналітичних установок. Можна припустити, що в перспективі він зможе знайти широке застосування у великих і середніх фізичних лабораторіях.

Джерела інформації

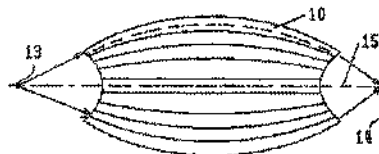
- 1 Синхротронное излучение. Под ред. К. Кунца. Москва, издательство "Мир", 1981.
- 2 В. А. Аркадьев, А. И. Коломийцев, М. А. Кумахов и др. Широкополосная рентгеновская оптика с большой угловой апертурой. Успехи физических наук, 1989, том 157, выпуск 3, с. 529-537.
- 3 Патент США №5,192,869 (опубл. 09.03.93).
- 4 V. M. Andreevsky, M. V. Gubarev, P. I. Zhidkin, M. A. Kumakhov, A. V. Noskin, I. Yu. Ponomarev, Kh. Z. Ustok. X-ray waveguide system with a variable cross-section of the sections. The IV-th All-Union Conference on Interaction of Radiation with Solids. Book of Abstracts (May 15-19, 1990, Elbrus settlement, Kabardino-Balkarian ASSR, USSR, pp. 177-178).
- 5 Патент США №5,570,408 (опубл. 29.10.96).
- 6 Р. Вольдсет. Прикладная спектрометрия рентгеновского излучения. Москва, Атомиздат, 1977.
- 7 Европейская заявка №EP0742150 (опубл. 31.07.96).
- 8 Патент США №5,175,755 (опубл. 29.12.92).
- 9 Патент США №5,497,008 (опубл. 05.03.96).
- 10 Европейский патент №EP0555376 (опубл. 18.03.98).



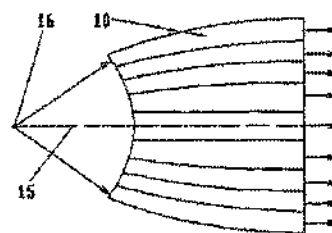
Фиг. 1



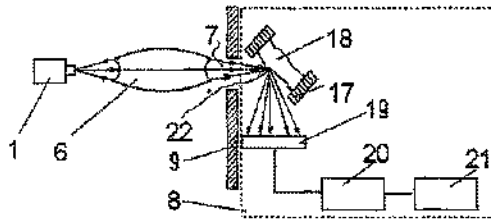
Фиг. 2



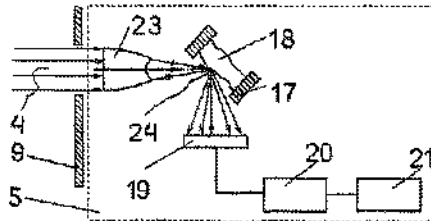
Фиг. 3



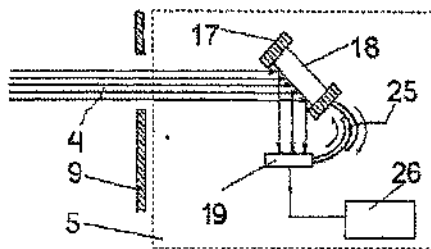
Фиг. 4



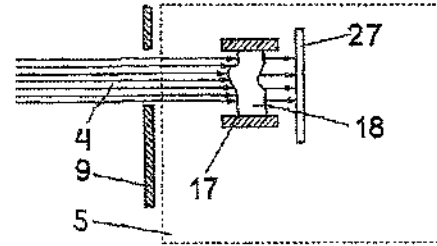
Фиг. 5



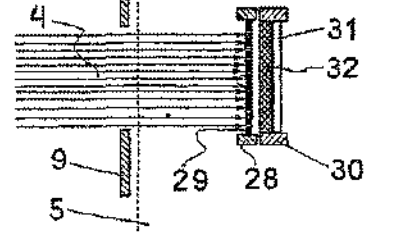
Фиг. 6



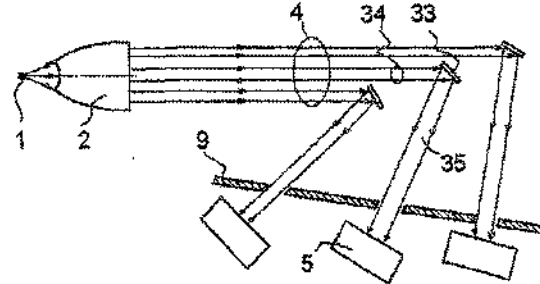
Фиг. 7



Фиг. 8



Фиг. 9



Фиг. 10