DESCRIPTION

Titre de l'invention : Amplificateur de signaux hyperfréquence avec isolation

Domaine technique – arrière-plan technologique

[0001] L'invention s'inscrit dans le domaine des amplificateurs pour signaux électromagnétiques très faibles, notamment mais pas seulement pour l'informatique quantique.

[0002] En particulier l'invention s'inscrit dans le domaine des circuits transmettant des ondes hyperfréquences ou micro-ondes. Il s'agit de concevoir et manier ces circuits, en s'assurant que les signaux d'intérêt sont amplifiés, qu'aucun signal parasite n'est généré, et que le bruit ambiant et le bruit des composants utilisés est tenu à l'écart de la chaine d'amplification ou filtré dans celle-ci, dans la direction de l'amplification mais aussi dans la direction opposée, puisqu'il convient d'éviter d'exposer la source de signal à des ondes qui l'atteindraient à travers la chaîne de lecture – parcourue alors en sens inverse – et viendraient la perturber. S'agissant d'éviter le transfert d'ondes en sens inverse, on parle d'obtenir une isolation de la source, et cela constitue un travail en soi.

[0003] Les circuits considérés peuvent être des circuits fortement intégrés. Ils sont fondés sur des composants à propriétés supraconductrices, dit composants supraconducteurs, qui sont placés dans des enceintes cryogéniques pour bénéficier d'une température de tout au plus quelques K (quelques Kelvins).

[0004] Typiquement, le circuit supraconducteur considéré est un circuit d'amplification destiné à amplifier une onde hyperfréquence issue d'un qubit ou bit quantique, dont on souhaite connaître l'état. Il peut être alternativement destiné à la lecture d'une information de résonance magnétique de spin (autrement dit résonance paramagnétique électronique), ou encore à l'amplification d'une onde radio d'origine astronomique. Dans toutes ces situations, une microonde de puissance très faible est à amplifier.

[0005] Dans ce contexte, on connait des amplificateurs paramétriques, basés sur un milieu au comportement non-linéaire, ce qui permet des mélanges d'ondes, à savoir notamment le transfert d'énergie d'une fréquence à une autre. Le comportement non linéaire est modifié par une régulation du milieu, aux fins d'obtenir le phénomène d'accord de phase à la base du mélange d'ondes.

[0006] Dans un amplificateur paramétrique effectuant un mélange à quatre ondes (par effet Kerr), deux ondes sont incidentes : l'onde pompe de pulsation ωp et l'onde à amplifier ou onde signal de pulsation ωs. L'amplificateur transfère de l'énergie de l'onde pompe vers l'onde signal qui est donc amplifiée, et crée également une onde complémentaire à une pulsation ωc pour conserver l'énergie inchangée.

[0007] Des éléments supraconducteurs comme les jonctions Josephson constituent le support matériel dans lequel se produit la non-linéarité à la base de l'amplification paramétrique des ondes qu'on y fait circuler. On parle alors d'amplificateur paramétrique Josephson (JPA). Ces amplificateurs JPA sont efficaces dans le domaine des hyperfréquences.

[0008] Pour obtenir des gains significatifs, on a proposé des amplificateurs à onde stationnaire, construits autour d'une cavité résonante, comme dans Planat, 2018, Phys. Rev. Applied 11, 034014 –2019. La bande passante est de l'ordre de 45 MHz. Elle peut être multipliée par 10 en procédant à de l'adaptation d'impédance.

[0009] On a aussi proposé des amplificateurs à onde progressive ou TWPA (travelling wave parametric amplifier en anglais), par exemple de US8878626B2. Dans ces structures de nombreux éléments non-linéaires connectés en chaîne forment une ligne de transmission pour la propagation du signal. L'accord de phase peut être recherché par la présence de résonateurs sur la ligne, comme dans Macklin, Science, 2015, 350, 6258, 307 ou d'une modulation de la dimension de la ligne, comme dans US8878626B2.

[0010] Dans US2018/0034425A1, les éléments connectés en chaîne sont des assemblages de jonctions Josephson montées en boucles. Les boucles sont couplées de manière asymétrique, et chacune par quatre pôles. La régulation est effectuée en ajustant l'intensité d'un flux magnétique qui est disposé pour traverser les boucles.

[0011] L'amplification dans les TWPA est obtenue grâce à un processus de mélange d'ondes résultant du couplage entre modes de propagation dans le milieu non linéaire : le milieu est excité avec une forte onde de pompe, à la fréquence ωp, provoquant l'amplification d'un signal plus faible, à la fréquence ωs, et la création d'une onde complémentaire, à la fréquence ωc. La bande passante d'un TWPA peut être de quelques GHz. En pratique, une distorsion dans la relation de dispersion est

générée en ouvrant un espace photonique dans la relation de dispersion en modulant périodiquement la ligne de transmission ou en créant une bande interdite en introduisant des éléments résonants dans la ligne de transmission. Néanmoins on observe des ondulations significatives dans le profil de gain. Et la bande d'amplification est fixée par conception.

[0012] Les amplificateurs hyperfréquences à onde progressive ou TWPA connus laissent passer le signal de l'entrée de l'amplificateur vers la sortie de l'amplificateur mais aussi le bruit existant de la sortie vers l'entrée. On dit par conséquent qu'ils sont réciproques.

[0013] De tels amplificateurs hyperfréquences à onde progressive réciproques nécessitent, du fait de leur caractère réciproque, d'être utilisés en conjonction avec un composant hyper-fréquence supplémentaire appelé isolateur, et qui permet de rechercher l'isolation qui a été évoquée en introduction. Ce composant placé entre la source microondes de faible puissance qu'on souhaite amplifier et l'amplificateur à onde progressive (et donc en général dans une enceinte de température très faible) permet de filtrer, dans la direction en provenance des appareils de lecture et vers la source, les signaux parasites générés par l'amplificateur à onde progressive lui-même ou par les composants ou l'environnement existant de l'autre côté de l'amplificateur, comme par exemple un amplificateur supplémentaire en technologie HEMT (high electron mobility transistor ou transistor à haute mobilité électronique). Mais ces isolateurs hyperfréquences ont une empreinte physique importante (et utilisent des champs magnétiques : ce sont des composants comportant des aimants permanents, dont les champs magnétiques peuvent affecter les qubits et les amplificateurs supraconducteurs) et ne peuvent pas être intégrés directement sur une puce. Il est donc malaisé ou peu rentable de placer un tel amplificateur dans une enceinte de température très faible, dans laquelle on souhaite de plus multiplexer de nombreux signaux. Alternativement ou en conjonction avec les isolateurs, on a pu utiliser des circulateurs, mais ces composants ont également une empreinte importante.

[0014] Lecoq et al., Phys. Rev. Applied 7, 024028 2017 et Lecoq et al., Phys. Rev Lett. 126, 020502, 2020 évoquent l'utilisation d'un amplificateur paramétrique à jonctions Josephson avec une boucle dans l'espace des fréquences. Ces auteurs avancent que cet amplificateur protège la cavité de lecture et le qubit sur lequel ils le

mettent en œuvre. Le système est un système à onde stationnaire nécessitant quatre sources microondes, et sa bande passante– de largeur environ 10 MHz - est étroite.

[0015] Ranzani et al., Physs Rev. Applied 8, 054035, 2017, a présenté une ligne de transmission fondée sur des jonctions Josephson, par groupe de cinq avec un total de 740 jonctions, insérées entre des segments de ligne de transmission 50 Ω. Une tonalité (ou onde) de pompe à ωp module l'inductance de ligne et permet la conversion de fréquence d'un signal se propageant conjointement avec la pompe.

[0016] Frattini et al., Appl. Phys. Lett. 110, 222603, 2017, a présenté un dipôle appelé le SNAIL, élément inductif asymétrique nonlinéaire supraconducteur, constitué de quatre jonctions Josephson réparties sur deux branches, dont trois grosses jonctions (énergie tunnel Ej) sur une branche et une petite jonction (énergie tunnel αEj) sur l'autre branche. Cet élément permet de faire du mélange à trois ondes. Puis Frattini et al Phys. Rev. Applied 10, 054020, 2018 a divulgué une chaîne de 20 éléments dipolaires SNAIL (constitués de 3 grosses jonction Lj et une petite jonction Lj/α) en série soumis à un flux magnétique identique pour tous les éléments, varié de 0 à 0,5 quantum de flux. Les auteurs évoquent l'optimisation d'une amplification par mélange à trois ondes, et la minimisation du mélange à quatre ondes.

[0017] Perelshtein et al. 2022, Physical Review Applied 18, 024063 utilise des SNAILs, au nombre de 1632, comprenant seulement trois jonctions Josephson: une petite jonction, αEJ, sur une branche et deux grandes jonctions, EJ, sur l'autre branche avec la même orientation dipolaire sur la toute la chaine. Pour un quantum de flux nul, l'impédance de la ligne est inférieure à 50Ω et il n'y a pas de mélange à 3 ondes. A un quantum de flux de 0.4, ces auteurs observant du mélange à 3ondes, et un peu de mélange à 4 ondes.

[0018] Ranadive et al., Nature Communications, 2022, 13, 1737 a proposé de placer les SNAIL de manière inversée les uns par rapport aux autres vis-à-vis du champ, de manière alternée, pour supprimer des processus de mélange à trois ondes (les SNAIL sont placés avec une polarité de flux magnétique alternée, c'est-à-dire qu'ils sont physiquement orientés de manière à ce que la polarisation du flux magnétique entre deux cellules SNAIL adjacentes soit inversée, mettant à profit le fait que la

facteur g3 de nonlinéarité du 2nd ordre quantifiant le phénomène de mélange à trois ondes est fonction impaire du flux externe). Le système comprend, à 20 mK, 700 cellules s'étendant sur 6 mm chaque cellule contenant une boucle supraconductrice avec trois grandes jonctions Josephson (courant critique I0) et une petite (courant critique faible, rI0) dans deux bras. Le rapport entre le courant critique de la petite et de la grande jonction Josephson (r) est choisi de telle sorte que les amplitudes de la non-linéarité du deuxième ordre (g3) et de la non-linéarité du troisième ordre (g4) soient anti-corrélées. Ces auteurs ont constaté une importante amplification pour un quantum de flux de 0,5, par référence au quantum de flux magnétique unitaire Φ0. Ces auteurs présentent ainsi une ligne de transmission à large bande avec une forte non-linéarité du troisième ordre – qui permet donc le mélange à quatre ondes - le facteur g4 qui peut être ajustée à de valeurs positives ou à des valeurs négatives. Le phénomène rapporté est appelé adaptation de phase Kerr inversée. La bande passante combinée est annoncée à 3 GHz, sans lacunes dans la transmission.

Résumé de l'invention

[0019] En plus d'être réciproques, les TWPA soufrent de réflexions à la jonction avec les lignes de transmission, et de rétro-émission.

[0020] La présente invention résout le problème de l'isolation, car les principes proposés cassent la réciprocité des amplificateurs existants et ne permet donc pas la propagation des signaux ou du bruit de la sortie de l'amplificateur vers son entrée et donc vers le dispositif testé.

[0021] Pour cela il est proposé un amplificateur de signaux hyperfréquence comprenant une chaîne d'éléments dipolaires inductifs nonlinéaires formant chacun une boucle asymétrique supraconductrice à jonctions Josephson, ladite chaîne étant disposée entre une entrée de la chaîne pour appliquer un signal à amplifier de fréquence connue et une sortie de la chaîne à laquelle se développe un signal de sortie, l'amplificateur comprenant de plus un système contrôlable de génération de flux magnétique pour faire circuler un courant dans les dites boucles, l'amplificateur comprenant de plus une première pompe microonde et un moyen de couplage de ladite entrée de la chaîne à la première pompe, la première pompe générant à travers le premier moyen de couplage une onde dans la chaîne dans le sens de l'entrée vers la sortie de fréquence réglée pour transférer de la puissance aux

microondes se propageant dans une bande autour de la fréquence du signal à amplifier.

[0022] L'amplificateur comprend en outre une deuxième pompe microonde et un deuxième moyen de couplage de ladite sortie de la chaîne à ladite deuxième pompe, la deuxième pompe générant à travers le deuxième moyen de couplage une onde dans la chaîne dans le sens de la sortie vers l'entrée, à une fréquence différente de celle la première pompe et en sorte d'atténuer dans ledit sens de la sortie vers l'entrée les microondes se propageant dans une bande (en général différente de la précédente bande évoquée pour l'amplification) autour de la fréquence du signal à amplifier. Cette atténuation peut avoir lieu par un mécanisme de conversion de fréquence.

[0023] Les principes ainsi énoncés permettent d'obtenir un amplificateur paramétrique à onde progressive qui est également un puissant isolateur en direction inverse, sur une bande passante de plusieurs centaines de MHz (typiquement 800 MHz) et qui peut être ajustée sur plusieurs GHz, avec une fréquence centrale de 6 GHz typiquement. Avec un tel dispositif, on évite les isolateurs hyperfréquences additionnels volumineux et magnétiques, ou les circulateurs : il est possible d'avoir une liaison sans isolateur intermédiaire entre la source de microondes à amplifier et l'amplificateur paramétrique. L'empreinte des éléments à installer dans l'enceinte cryogénique est donc maîtrisée. L'amplification peut être obtenue avec un gain de 20 dB tout en obtenant une isolation de 30 dB dans l'autre sens.

[0024] De manière remarquable, ces principes ne nécessitent que deux pompes hyperfréquences, en non pas trois ou quatre comme certains dispositifs de l'art antérieur. Cela est remarquable dans la perspective de passage à l'échelle.

[0025] Avec ces principes, de plus, le profil de gain est régulier, sans brutales ondulations comme dans les dispositifs dans lesquels l'accord de phase est obtenu par modulation de la largeur de la ligne basée sur des jonctions Josephson simples, qui présentent des désadaptations d'impédance.

[0026] Selon des caractéristiques avantageuses et optionnelles :

- les éléments dipolaires de la chaine peuvent être identiques, et que le flux magnétique est, rapporté au quantum de flux des boucles, réglé pour être non nul

modulo 0,5, et de préférence compris entre 0,05 et 0,35, et de préférence entre 0,1 et 0,3.

- des éléments inductifs asymétriques nonlinéaires de la chaîne peuvent comprendre entre leurs deux pôles une première et une deuxième branches connectées en parallèle l'une de l'autre, la première branche étant constituée d'un réseau d'au moins deux jonctions Josephson en série, la deuxième branche étant constituée d'une jonction Josephson unique ou d'un deuxième réseau de jonctions Josephson en série, un nombre de jonctions Josephson dans le deuxième réseau étant inférieur à un nombre de jonctions Josephson dans le premier réseau ;

- les éléments dipolaires et le système de génération de flux magnétique peuvent être configurés de telle sorte que les boucles asymétriques des éléments dipolaires successifs le long de la chaine sont soumises à un flux magnétique d'intensité similaire mais dont le sens est opposé d'une boucle asymétrique à une boucle suivante dans la chaine, et de préférence, d'une boucle asymétrique à la boucle immédiatement suivante dans la chaine ;

- les éléments inductifs asymétriques nonlinéaires peuvent comprendre entre leurs deux pôles une branche comportant une ou plusieurs petites jonctions Josephson identiques et une branche comportant une ou plusieurs grosses jonctions Josephson identiques, un rapport r de courant critique entre petite jonction et grosse jonction étant compris entre 0,01 et 0,25, et préférentiellement entre 0,05 et 0,20.

- les éléments inductifs asymétriques nonlinéaires supraconducteurs peuvent comprendre entre leurs deux pôles une branche comportant une unique jonction Josephson dite petite jonction et une branche comportant trois jonctions Josephson identiques dites grosses jonctions, en série.

- les éléments inductifs asymétriques nonlinéaires peuvent comprendre des petites et des grosses jonctions Josephson, les petites jonctions Josephson étant d'inductance comprise entre 1300 et 2500 pH, préférentiellement entre 1600 et 2200 pH ou les grosses jonctions Josephson étant d'inductance comprise entre 100 et 300 pH, préférentiellement entre 140 et 260 pH.

- le système de génération de flux magnétique peut être constitué d'un électroaimant unique développant un champ magnétique uniforme sur toute la chaîne.

- la chaîne peut comprendre entre 500 et 1300 éléments dipolaires inductifs nonlinéaires, et préférentiellement entre 600 et 850.

- la première pompe peut émettre une microonde à une fréquence comprise entre 5,2 et 10,5 GHz, préférentiellement entre 6,0 et 10 GHz.

- la deuxième pompe peut émettre une microonde à une fréquence comprise entre 8,4 et 13,5 GHz, préférentiellement entre 9,7 et 13,5 GHz.

- une différence de fréquences entre les microondes émises par la première pompe et la deuxième pompe peut être comprise entre 2 et 6 GHz, la deuxième pompe émettant à une fréquence plus élevée ou plus basse que la première.

- le signal à amplifier peut être présent à une fréquence de l'ordre comprise entre 5,0 et 7,8 GHz, préférentiellement entre 6,0 et 6,4 GHz. Typiquement, il s'agit d'un signal issu d'un qubit.

- le premier moyen de couplage peut être un diplexeur appliquant un filtre passe-haut aux microondes de la première pompe et les dirigeant vers la chaîne, et appliquant un filtre passe-bas aux microondes du signal à amplifier et les dirigeant également vers la chaîne.

- le deuxième moyen de couplage peut être un diplexeur appliquant un filtre passe-haut aux microondes de la deuxième pompe et les dirigeant vers la chaîne, et appliquant un filtre passe-bas aux microondes issues de la chaîne et les dirigeant vers une chaîne de lecture.

Liste des figures

[0027] Les figures 1 et 2 montrent un circuit selon un mode de réalisation de l'invention.

[0028] La figure 3 est un graphe des valeurs numériques de l'atténuation obtenue.

[0029] La figure 4 est une vue de l'évolution des valeurs de gain, en fonction du flux et de la fréquence.

[0030] La figure 5 est une vue des valeurs numériques de gain dans un sens et dans le sens inverse.

Description détaillée

[0031] [Fig. 1] Comme cela est représenté en figure 1, une chaine d'éléments supraconducteurs inductifs asymétriques non linéaires (SNAIL) est insérée au centre d'une section de ligne de transmission, indiquée sur la figure comme ligne de transmission 50 Ω - une valeur d'impédance utilisée de manière standard, par exemple coaxiale, et avantageusement différentielle entre deux lignes conductrices.

[0032] Le dispositif est constitué de plusieurs centaines de cellules dipolaires branchées en série s'étendant au total sur quelques millimètres de long, chaque cellule contenant une boucle supraconductrice avec trois grandes jonctions Josephson (courant critique élevé I0 ou inductance L) et une petite (courant critique faible rI0 avec $r<1$ ou inductance L/α avec $\alpha<1$) dans respectivement un bras et l'autre bras de la boucle.

[0033] La chaîne de SNAIL – 700 SNAILs typiquement, mais d'autres valeurs sont possibles - est fabriquée sur un substrat de silicium en utilisant des techniques d'évaporation et de dépôt. Elle relie une ligne conductrice en amont de la chaîne à une ligne conductrice en aval. Les deuxièmes lignes conductrices en amont et en aval sont reliées directement par un conducteur. Une couche diélectrique, par exemple de l'alumine, placée entre la chaîne de SNAIL et la ligne de cuivre de fournit la capacité de masse requise pour adapter l'impédance de la ligne de transmission à un environnement standard de 50 Ω.

[0034] Au sein de chaque SNAIL les jonctions sont toutes coplanaires et les SNAIL de la chaîne sont tous coplanaires. On utilise une bobine porteuse de courant de quelques centimètres de diamètre pour polariser le dispositif, avec une faible asymétrie de champ à travers la chaîne de boucles SNAIL.

[0035] Dans un mode de réalisation, les SNAIL sont construits avec une alternance selon laquelle, en se déplaçant d'une extrémité de la chaîne à l'autre extrémité de la chaine, pour un SNAIL sur deux, la branche à grosses jonctions Josephson est à gauche et celle à petite jonction Josephson est à droite, puis pour le SNAIL suivant, la branche à grosses jonctions Josephson est à droite et celle à petite jonction Josephson est à gauche. Cela a déjà été présenté dans Ranadive *et al.*, Nature

Communications, 2022, 13, 1737. Les SNAIL sont ainsi placés avec une polarité de flux magnétique alternée, en étant physiquement orientés de manière à inverser la polarisation du flux magnétique pour deux cellules SNAIL adjacentes. Dans un autre mode de réalisation, l'alternance ne se fait pas à chaque SNAIL, mais tous les deux SNAIL, ou tous les N SNAIL, N étant un entier.

[0036] Depuis la gauche de la figure vers la droite, sont introduits dans la ligne de transmission, qui constitue une chaîne d'amplification par mélange d'ondes, le signal à amplifier de pulsation ωs (aux alentours de 6 GHz, mais sans que cela ne soit indispensable, d'autres valeurs sont utilisables) qui est d'intensité faible, ainsi qu'une pulsation de pompe d'intensité contrôlée, importante par son intensité, de pulsation ωp peu éloignée de ωs mais par exemple supérieure à celle-ci.

[0037] Par un phénomène de mélange d'ondes, dont on estime, sans vouloir néanmoins être tenu par cette explication, qu'il repose surtout sur un mélange à quatre ondes – noté sur la figure 4WM pour four wave mixing- le signal à la pulsation ωs se développe amplifié par mélange d'ondes à l'extrémité de la chaîne d'amplification, à droite de la figure. A cette extrémité est bien sûr présent le signal de pompe ωp qui a parcouru la chaîne. Il existe aussi à cette extrémité une ou des ondes complémentaires ou idler, non représentées car non amplifiées.

[0038] Depuis la droite de la figure vers la gauche, le signal de pulsation ωs parvenu à l'extrémité de la chaîne ou au-delà, et qui a été amplifié, se réfléchit très partiellement dans la ligne de transmission du fait de toute modification d'impédance même modeste. Un bruit dans la gamme de fréquences du signal ωs peut aussi être présent et parcourir la ligne d'amplification, depuis la sortie et dans la direction de la source du signal à amplifier.

[0039] Une tonalité de pompe, d'intensité contrôlée, importante en puissance, de pulsation ωp', par exemple un peu plus éloignée de ωs que ωp (donc ωp' > ωp) est introduite dans la chaîne par la sortie. ωp' dépend de la méthode de fabrication des jonctions Josephson.

[0040] Par un phénomène de mélange d'ondes, dont on estime, sans vouloir néanmoins être tenu par cette explication, qu'il repose surtout sur un mélange à trois ondes– noté sur la figure 3WM pour three wave mixing- le signal à la pulsation ωs et le bruit à cette fréquence et aux fréquences voisines sont atténués lors qu'ils

parcourent, en sens contraire au sens prévu pour l'amplification, la chaine d'amplification, de la sortie vers l'entrée.

[0041] A cette extrémité d'entrée se développe alors bien sûr présent le signal de pompe ωp' qui a parcouru la chaîne depuis la sortie, ainsi qu'une onde de fréquence décalée ωs+p', de fréquence beaucoup plus élevée. Ils sont tous les deux en dehors de fréquences susceptibles de perturber la source du signal à amplifier (typiquement un qubit), car bien éloigné de ωs.

[0042] [Fig. 2] Comme représenté en figure 2, les émissions de l'objet à tester DUT (device under test) 10 et une source microondes de pompe 20 sont, dans une chambre de cryostat à 20 mK orientées vers respectivement les deux voies d'un diplexeur 30, la pompe étant traitée par un filtre passe-haut dans une des voies, et le signal de l'objet à tester par un filtre passe-bas dans l'autre voie. Les deux ondes sont orientées par le diplexeur 30 via son port commun servant alors de sortie vers l'amplificateur paramétrique 40 selon l'invention lui aussi dans la chambre de cryostat à 20 mK, et le signal à amplifier en ressort comme expliqué en lien avec la figure 1. Il est dirigé vers la porte commune d'un diplexeur 50, qui est relié par ses portes de voies à respectivement une source microondes 60, et un isolateur 70 suivi d'un amplificateur à bas bruit LNA 80 se trouvant dans un étage de température plus élevé, par exemple 4 K, qui donne le signal amplifié à une chaîne de lecture 90. Les ondes de la source microondes 60 sont filtrées par un filtre passe haut avant d'être transmises vers la sortie de l'amplificateur paramétrique 40. Les ondes sortant de l'amplificateur paramétrique 40 sont traitées par un filtre passe bas avant d'être transférée dans l'isolateur 70. L'amplificateur LNA 80 produit un bruit qui se propage dans la ligne de transmission dans la direction du diplexeur 50 mais est bloqué par l'isolateur 70. A l'inverse, aucun isolateur n'est présent sur la ligne de transmission entre l'objet à tester DUT 10 et l'amplificateur paramétrique 40, ni non plus entre l'amplificateur paramétrique 40 et le diplexeur 50. C'est un avantage considérable, quand on sait l'encombrement et les inconvénients de la présence d'un tel isolateur dans une chambre cryostat, à proximité typiquement d'un qubit ou d'un autre dispositif à tester. Le diplexeur 30 filtre optionnellement par le filtre passe-bas qu'il interface entre l'amplificateur paramétrique 40 et l'objet à tester DUT 10 la tonalité de pompe ωp' qui a parcouru la chaîne depuis la sortie, ainsi que l'onde de fréquence décalée ωs+p'.

[0043] [Fig. 3] La figure 3 montre l'isolation obtenue dans le sens contraire à l'amplification, avec le système selon l'invention. La source microondes 60 fournit une tonalité de pompe à 10,2 GHz, et cela crée une bande d'isolation de 1GHz de large et de 20dB de gain d'atténuation, ce qui est remarquable.

[0044] [Fig. 4] La figure 4 montre le gain du système dans un sens ou dans l'autre, pour une fréquence de tonalité de pompe de 10,17 GHz, en fonction du flux appliqué à l'amplificateur paramétrique, en abscisses et en fonction de la fréquence à amplifier ou atténuer, en ordonnées. Plus la teinte est foncée, plus le signal est atténué, plus la teinte est claire, plus il est amplifié. On observe une périodicité selon l'axe des abscisses, de période un quantum de flux des boucles de l'amplificateur paramétrique. On constate aussi des symétries vis-à-vis des abscisses 0 quantum de flux, 0,5 quantum de flux et 1 quantum de flux. Des zones d'atténuation sont très visibles de 0 à 0,5 quantum de flux et de 0,5 quantum de flux à 1 quantum de flux, se déplaçant en fréquence en fonction de la valeur de flux, de largeur en fréquence et en flux diminuant jusqu'à devenir nul à l'approche de 0 et 0,5 quantum de flux, valeurs où on n'observe plus cette atténuation. Ainsi, dès que la valeur de quantum de flux s'écarte de 0 et de 0,5 quantum de flux, il est possible de mettre en place l'atténuation.

[0045] [Fig. 5] La figure 5 montre la mise en œuvre d'un mode de réalisation de l'invention, avec une tonalité de pompe pour l'amplification de 9 GHz et une tonalité de pompe pour l'isolation de 12 GHz. On obtient pour une bande passante de 250 MHz, une isolation de 20 dB dans le sens à isoler et un gain de 20 dB dans le sens à amplifier.

[0046] S'agissant de la construction des SNAIL, si on note n1 le nombre de jonctions Josephson sur un bras (les petites jonctions), et n2 le nombre de jonctions Josephson sur l'autre bras (les grandes jonctions), alors on préfère que n1 soit différent de n2 ($n1 \neq n2$). En particulier s'il y a une unique petite jonction, il faut au moins deux grandes jonctions Josephson. On peut choisir des grosses jonctions à 200 pH et des petites jonctions à 1500 pH.

[0047] Le ratio des courants critiques entre les jonctions dans chaque bras (les petites et les grandes jonctions), ainsi que le nombre de jonctions dans chaque bras sont des paramètres pour ajuster la présence d'atténuation déclenchée par

une pompe de fréquence donnée, et d'amplification déclenchée par une pompe d'une autre fréquence.

REVENDICATIONS

1. Amplificateur de signaux hyperfréquence comprenant une chaîne (40) d'éléments dipolaires inductifs nonlinéaires formant chacun une boucle asymétrique supraconductrice à jonctions Josephson, ladite chaîne étant disposée entre une entrée de la chaîne pour appliquer un signal à amplifier de fréquence connue (10) et une sortie de la chaîne à laquelle se développe un signal de sortie, l'amplificateur comprenant de plus un système contrôlable de génération de flux magnétique pour faire circuler un courant dans les dites boucles, l'amplificateur comprenant de plus une première pompe microonde (20) et un premier moyen de couplage (30), le premier moyen de couplage couplant ladite entrée de la chaîne à la première pompe (20), la première pompe (20) générant à travers le premier moyen de couplage (30) une onde dans la chaîne (40) dans le sens de l'entrée vers la sortie et de fréquence réglée pour transférer de la puissance à des microondes se propageant dans une bande autour la fréquence du signal à amplifier, l'amplificateur étant de plus **caractérisé en ce qu'**il comprend en outre une deuxième pompe microonde (60) et un deuxième moyen de couplage (50), le deuxième moyen de couplage (50) couplant ladite sortie de la chaîne à ladite deuxième pompe (60), la deuxième pompe (60) générant à travers le deuxième moyen de couplage (50) une onde dans la chaîne (40) dans le sens de la sortie vers l'entrée, à une fréquence différente de celle la première pompe (20) et en sorte d'atténuer dans ledit sens de la sortie vers l'entrée de microondes se propageant également dans une bande autour de la fréquence du signal à amplifier.

2. Amplificateur de signaux hyperfréquence selon la revendication 1, caractérisé en ce que les éléments dipolaires de la chaine sont identiques, et que le flux magnétique est, rapporté au quantum de flux des boucles, réglé pour être non nul modulo 0,5, et de préférence compris entre 0,05 et 0,35, et de préférence entre 0,1 et 0,3.

3. Amplificateur de signaux hyperfréquence selon la revendication 1 ou la revendication 2, caractérisé en ce que des éléments inductifs asymétriques nonlinéaires de la chaîne comprennent entre leurs deux pôles une première et une deuxième branches connectées en parallèle l'une de l'autre, la première branche étant constituée d'un réseau d'au moins deux jonctions Josephson en série, la

deuxième branche étant constituée d'une jonction Josephson unique ou d'un deuxième réseau de jonctions Josephson en série, un nombre de jonctions Josephson dans le deuxième réseau étant inférieur à un nombre de jonctions Josephson dans le premier réseau.

4. Amplificateur de signaux hyperfréquence selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que les éléments dipolaires et le système de génération de flux magnétique sont configurés de telle sorte que les boucles asymétrique des éléments dipolaires successifs le long de la chaine sont soumises à un flux magnétique d'intensité similaire mais dont le sens est opposé d'une boucle asymétrique à une boucle suivante dans la chaine, et de préférence, d'une boucle asymétrique à la boucle immédiatement suivante dans la chaine.

5. Amplificateur de signaux hyperfréquence selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que les éléments inductifs asymétriques nonlinéaires comprennent entre leurs deux pôles une branche comportant une ou plusieurs petites jonctions Josephson identiques et une branche comportant une ou plusieurs grosses jonctions Josephson identiques, un rapport r de courant critique entre petite jonction et grosse jonction étant compris entre 0,01 et 0,25, et préférentiellement entre 0,05 et 0,20.

6. Amplificateur de signaux hyperfréquence selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que les éléments inductifs asymétriques nonlinéaires supraconducteurs comprennent entre leurs deux pôles une branche comportant une unique jonction Josephson dite petite jonction et une branche comportant trois jonctions Josephson identiques dites grosses jonctions, en série.

7. Amplificateur de signaux hyperfréquence selon l'une des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que les éléments inductifs asymétriques nonlinéaires comprennent des petites et des grosses jonctions Josephson, les petites jonctions Josephson étant d'inductance comprise entre 1300 et 2500 pH, préférentiellement entre 1600 et 2200 pH ou les grosses jonctions Josephson étant d'inductance comprise entre 100 et 300 pH, préférentiellement entre 140 et 260 pH.

8. Amplificateur de signaux hyperfréquence selon l'une des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que le système de génération de flux magnétique est constitué d'un électroaimant unique développant un champ magnétique uniforme sur toute la chaîne.

9. Amplificateur de signaux hyperfréquence selon l'une des revendications 1 à 8, caractérisé en ce que la chaîne comprend entre 500 et 1300 éléments dipolaires inductifs nonlinéaires, et préférentiellement entre 600 et 850.

10. Amplificateur de signaux hyperfréquence selon l'une des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que la première pompe émet une microonde à une fréquence comprise entre 5,2 et 10,5 GHz, préférentiellement entre 6,0 et 10 GHz.

11. Amplificateur de signaux hyperfréquence selon l'une des revendications 1 à 10, caractérisé en ce que la deuxième pompe émet une microonde à une fréquence comprise entre 8,4 et 13,5 GHz, préférentiellement entre 9,7 et 13,5 GHz.

12. Amplificateur de signaux hyperfréquence selon l'une des revendications 1 à 11, caractérisé en ce qu'une différence de fréquences entre les microondes émises par la première pompe et la deuxième pompe est comprise entre 2 et 6 GHz, la deuxième pompe émettant à une fréquence plus élevée que la première.

13. Amplificateur de signaux hyperfréquence selon l'une des revendications 1 à 12, caractérisé en ce que le signal à amplifier est présent à une fréquence de l'ordre comprise entre 5,0 et 7,8 GHz, préférentiellement entre 6,0 et 6,4 GHz.

14. Amplificateur de signaux hyperfréquence selon l'une des revendications 1 à 13, caractérisé en ce que le premier moyen de couplage est un diplexeur appliquant un filtre passe-haut aux microondes de la première pompe et les dirigeant vers la chaîne, et appliquant un filtre passe-bas aux microondes du signal à amplifier et les dirigeant également vers la chaîne.

15. Amplificateur de signaux hyperfréquence selon l'une des revendications 1 à 14, caractérisé en ce que le deuxième moyen de couplage est un diplexeur appliquant un filtre passe-haut aux microondes de la deuxième pompe et les dirigeant vers la chaîne, et appliquant un filtre passe-bas aux microondes issues de la chaîne et les dirigeant vers une chaîne de lecture.