Анализ джозефсоновских параметрический усилитель бегущей волны

**Николаева А.Н., *Корнев В.К., Колотинский Н.В.***

*Студент*

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,физический факультет, Москва, РоссияE–mail: nikolaeva.an19@physics.msu.ru

Параметрические усилители известны как усилители с предельно низким уровнем шума, однако такие усилители, в стандартной конструкции которых используются резонаторы, обременены существованием компромисса между шириной частотной полосы усилителя и величиной коэффициента усиления. Для преодоления этого недостатка были предложены параметрические усилители бегущей волны (ПУБВ).

В основе ПУБВ лежит использование волноводных линий с нелинейными реактивными параметрами (емкостного или индуктивного типов), таких как сверхпроводниковые микрополосковые линии с распределенной кинетической индуктивностью [1] или дискретные искусственные линии из сосредоточенных элементов с использованием нелинейных емкостных или индуктивных элементов. В силу сильно выраженной нелинейности кинетической индуктивности джозефсоновских переходов, искусственные дискретные линии из ячеек, содержащих джозефсоновские переходы, позволяют создавать наиболее перспективные конструкции усилителей – джозефсоновские параметрических усилителей бегущей волны (ДПУБВ)[2-5](рис. 1*a*). В качестве нелинейных индуктивных элементов могут быть использованы или непосредственно джозефсоновские переходы, или различные типы сквидов (рис. 1*b*,*c*) Такие усилители, способные работать при низких и сверхнизких температурах, могут обеспечить чрезвычайно высокую чувствительность, приближающуюся к стандартному квантовому пределу. Поэтому ДПУБВ в настоящее время рассматриваются как наиболее перспективные устройства для создания на их основе систем считывания сигналов в области прецизионных квантовых измерений, включая однофотонные детекторы, квантовых коммуникаций и квантовых вычислений [6,7].

Рис. 1 Электрическая схема дискретной нелинейной LC-линии параметрического усилителя бегущей волны и условная диаграмма волн (сигнала, холостой волны и накачки) вдоль этой линии, иллюстрирующая схематически процесс усиления сигнала за счет энергии волны накачки (a), а также примеры возможных нелинейных индуктивных элементов линии в виде сквидов с одним джозефсоновским переходом (b) или несколькими джозефсоновскими переходами (c)[4].

Целью данной работы является исследование характеристик ДПУБВ на основе как одной, так и двух дискретных волноводных линий.

Основными факторами, влияющими на достижимые характеристики ДПУБВ являются дискретность используемых волноводных линий, применяемая частотная схема, ограничение и истощение мощности волны накачки.

Для того, чтобы упростить математический анализ параметрического усилителя бегущей волны на основе искусственной дискретной линии, в большинстве работ принято считать размер ячеек линии предельно малым и рассматривать дискретную линию как непрерывную распределенную линию, используя дифференциальное волновое уравнение для описания распространения волн накачки, сигнала и холостой компоненты в такой среде. Однако в случае, когда сосредоточенные ячейки искусственной линии моделируют отрезки линии конечной длины, такую дискретную систему следует описывать с использованием дискретных телеграфных уравнений и волнового уравнения в дискретной форме записи, как это реализовано в [9] (в сравнении с континуальным приближением в [5]) и частично в [8]. Дискретность волновой среды приводит, с одной стороны, к существованию частоты среза, играющей положительную роль в рассматриваемой нелинейной системе, а с другой стороны, к дисперсии фазовой скорости волн и комплексной величине волнового импеданса. Это существенно влияет на характеристики ДПУБВ.

Использование джозефсоновских переходов в качестве сильно нелинейных реактивных элементов способствует увеличению достижимого параметрического эффекта, однако конечное значение критического тока такого сверхпроводящего элемента ограничивает допустимую амплитуду волны накачки и, следовательно, коэффициента усиления ДПУБВ. Для преодоления этого ограничения недавно было предложено использовать конструкцию из двух волноводных линий: линейной линии как резервуара для мощной волны накачки и нелинейной джозефсоновской линии для волны сигнала. Для анализа осуществимости ДПУБВ на основе такой конструкции будет выполнено изучение волновой динамики в связанных линиях и условий достижимости фазового синхронизма взаимодействующих волн в этих линиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. R. Vissers, R. P. Erickson, H. S. Ku, L. Vale, X. Wu, G. C. Hilton, and D. P. Pappas, “Low-noise kinetic inductance traveling-wave amplifier using three-wave mixing,”// Applied Physics Letters. 2016, 108, 012601
2. O. Yaakobi, L. Friedland, C. Macklin, and I. Siddiqi: Parametric amplification in Josephson junction embedded transmission lines// Phys. Rev. 2013, 87, 144301.
3. A. B. Zorin: Josephson Traveling-Wave Parametric Amplifier with ThreeWave Mixing,// Physical Review Applied. 2016, 6, 1–8.
4. A. B. Zorin, M. Khabipov, J. Dietel, and R. Dolata: “Traveling-Wave Parametric Amplifier Based on Three-Wave Mixing in a Josephson Metamaterial,” in 2017 16th International Superconductive Electronics Conference (ISEC), Vol. 2018-Janua (Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018) pp. 1–3.
5. E. Kogan: On parametric amplification in Josephson transmission line //Basic Sol. Stat. Phys*.* 2023,v.260, p. 2300005
6. C. Macklin, K. O’Brien, D. Hover, M. E. Schwartz, V. Bolkhovsky, X. Zhang, W. D. Oliver, I. Siddiqi: A nearquantum-limited Josephson traveling-wave parametric amplifier// Science. 2015 .v. 350, no. 6258,pp. 307–310.
7. M. Esposito, A. Ranadive, L. Planat, N. Roch: Perspective on traveling wave microwave parametric amplifiers // Applied Physics Letters. 2021, 119(12),p. 120501.
8. *A.B.Zorin.* Josephson traveling-wave parametric amplifier with magnetic flux drive// *Phys. Rev. Appl*. 2019, v.12, no. 4, art no.044051.
9. E. Kogan: *On parametric amplification in discrete Josephson transmission line* // On, Phys. C: Supercond. ItsAppl*.*, 2024, v. 616, p. 1354402.