

С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университетінің 60 жылдығына арналған «Сейфуллин оқулары– 13: дәстүрлерді сақтай отырып, болашақты құру» атты Республикалық ғылыми-теориялық конференциясының материалдары = Материалы Республиканской научно-теоретической конференции «Сейфуллинские чтения – 13: сохраняя традиции, создавая будущее», посвященная 60-летию Казахского агротехнического университета имени С.Сейфуллина. - 2017. - Т.1, Ч.5. - С.73-76

## ЭФФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА И ПРИМЕНЕНИЕ ЕГО В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

*Соболева Л.А, Балтабай А.*

В 1932 г. Мейснер и Хольмв результате исследования проводимости тонкого изолирующего слоя между двумя сверхпроводниками установили наличие туннельного эффекта (исчезает сопротивление тонкого изолирующего слоя). В 1962 г. Брайан Джозефсон (по поручению Андерсена) теоретически исследовал явление туннелирования в сверхпроводниках, при этом получил основные формулы и предсказал ряд эффектов [1]. При описании данных явлений используется понятие «электронной жидкости». Это квантовое понятие, амплитуда волны возмущения в такой жидкости зависит от плотности электронов. Наличие разности фаз волн приводит к их интерференции. Если фазы волн равны, то их амплитуды суммируются, а если фазы смещены, то суммарная амплитуда уменьшается. При стационарном эффекте Джозефсона в цепи, состоящей из двух сверхпроводников, разделенных тонким окисным слоем ( $\hbar = 10^{-7} \text{ м}$ ), проходит малый постоянный ток без потери напряжения на туннельном переходе. Величина тока зависит от разности фаз волн, образованных синхронизированными электронными куперовскими парами, т.е. от соотношения плотностей носителей зарядов на границах перехода. Уравнение для тока в цепи перехода при стационарном эффекте имеет вид:

$$I = I_0 \cdot \sin (\varphi_1 - \varphi_2)$$

(1)

Наложение основной и просочившейся волн определяет значение суммарной амплитуды плотности носителей зарядов в контактирующих сверхпроводниках. При этом разность потенциалов на туннельном переходе равна нулю. При прямом нестационарном эффекте результате приложения к туннельному переходу постоянного напряжения (больше определенного уровня) в переходе происходит генерация высокочастотных колебаний. При обратном нестационарном эффекте под действием высокочастотного электромагнитного поля на переходе генерируется постоянная ЭДС, не зависящая от влияния внешних дестабилизирующих факторов.

Для тока в цепи перехода при нестационарном эффекте справедливо следующее уравнение:

$$I = I_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (2)$$

Выполнив не сложные преобразования можно получить следующие математические соотношения:

(3)

где

$$\omega = \frac{2eU}{\hbar} I = I_0 \cdot \sin\left(U \frac{2e}{\hbar} \cdot t\right)$$

(4)

(5)

$$D = \frac{2e}{\hbar} 2\pi = 483.59767 \frac{\text{МГц}}{\text{мВ}} \quad (6)$$

где:  $\hbar\omega$  - квант энергии;

n- целое число;

D – постоянная Джозефсона.

С увеличением частоты внешнего СВЧ излучения напряжение на туннельном переходе будет изменяться ступенчато.

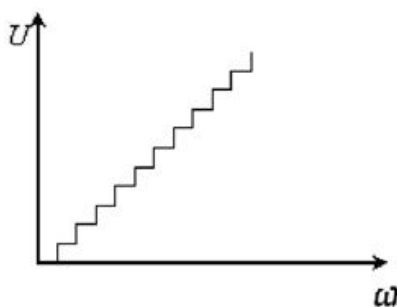


Рис. 1 Зависимость напряжения на джозефсоновском переходе от частоты внешнего поля.

Величина генерируемого при этом постоянного напряжения может составлять всего несколько милливольт, но при последовательном соединении большого числа переходов уровень генерируемого напряжения может измеряться уже в вольтах. Устройства данного типа используются, например, для создания эталона ЭДС. Выходное напряжение такого эталона не зависит от внешних дестабилизирующих факторов и определяется уравнением:

$$U = \frac{hc\omega}{2e}N, \quad (7)$$

где: N – число переходов, включенных последовательно.

Стационарный эффект Джозефсона положен в основу создания высокочувствительного сверхпроводящего квантового интерферометрического датчика, так называемого СКВИДа.

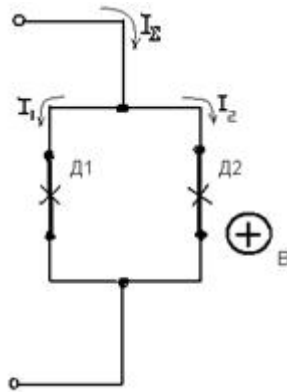


Рис.2 Структурная схема первичного преобразователя СКВИД.

Под действием измеряемого магнитного поля происходит изменение суммарного тока через два параллельно включенных джозефсоновских перехода, реализующих стационарный эффект [2]. Величина дополнительного сдвига фаз между токами в ветвях контура функционально зависит от измеряемого магнитного поля.

$$B = 0; I_{\Sigma} = I_{10} \cdot \sin\theta_1 + I_{20} \cdot \sin\theta_2 \approx 2I_0 \cdot \sin\theta \quad (8)$$

$$B \neq 0; I_{10} \cdot \sin\theta_1 + I_{20} \cdot \sin(\theta_2 + 2\pi \frac{\delta}{\delta_0}), \quad (9)$$

$$\delta_0 = \frac{hc}{2e2\pi} \quad (10)$$

где:  $\delta_0 = 2.07 \cdot 10^{-15} \text{ Вб}$  - квант магнитного поля.

Устройства данного типа используются для регистрации сверхслабых магнитных полей (в десятки раз слабее магнитного поля Земли). Ток в измерительной цепи находится в пределах 10 мкА, а напряжение - в пределах 100 мкВ (R – сопротивление контакта). Применение высокотемпературных сверхпроводников в измерительных устройствах позволит кардинально повысить метрологические характеристики измерительных устройств и

отказаться от необходимости производить периодическую поверку средств измерений.

Эффект Джозефсона нашел применение для создания переключающих и запоминающих устройств [3].

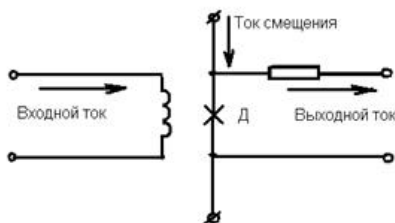


Рисунок 3 – Структурная схема переключающего устройства основанного на реализации эффекта Джозефсона

При протекании в цепи тока создается магнитное поле, которое управляет процессом туннелирования зарядов через джозефсоновский переход. К достоинствам устройств, основанных на использовании эффекта Джозефсона можно отнести сверхвысокое быстродействие, низкий уровень рассеиваемой энергии, энергонезависимость хранения информации:  $P = 10^{-12} \text{ Вт}$ ,  $\tau = 10^{-12} \text{ с}$ .

Аналогичным образом в измерениях магнитных полей проявляется сверхтонкое расщепление уровней энергии. Принципиальное его отличие отзеемановского расщепления в том, что вокруг направления магнитного поля прецессируют не моменты электрона, а моменты ядра. Энергетические добавки оказываются значительно меньшими, чем при прецессии моментов электрона, следовательно, в спектре это проявляется не как появление новых линий, а как искажение контуров линий. Точное измерение сверхтонкого расщепления, а следовательно, и измерение магнитных полей более точно возможно в радиочастотной области по поглощению энергии внешнего поля, подводимого к веществу. Схема таких измерительных устройств аналогична схемам установок для регистрации электронного парамагнитного резонанса или ядерного магнитного резонанса. Существует целый ряд квантовых эффектов, на основе которых созданы магнитные преобразователи, позволяющие измерять характеристики магнитных полей. Поскольку данное изложение не предполагает наличия у читателя достаточно полного представления, например, о характеристиках сверхпроводимости или о магнитооптических эффектах, ограничимся кратким описанием сути этих явлений и упоминанием о том, что подобного рода эффекты нашли практическое применение в технике измерений параметров магнитного поля.

Применение описанных квантовых методов в приборостроении позволяет создавать высокоточные средства измерений, обладающие высокой чувствительностью. В свою очередь, успех современного боя зависит во многом от того, насколько полно реализуются тактико-

технические характеристики образцов ВВТ, значения которых контролируются с помощью современных средств измерений.

### Список литературы

1. Ю.В. Афанасьев, Средства измерений параметров магнитного поля. М. 2001
2. Dynamics of first and second switches in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ; intrinsic josephson junction stacks measured by specifically designed electronics-[Nomura, Y.](#),[Okamoto, R.](#),[Kakeya, I.](#) 2017IEEE Transactions on Applied Superconductivity27(4),7792130
3. Interaction of X-Ray Photons with Abrikosov Vortices in Josephson Tunnel Junctions with a Bulk Niobium Base Electrode-Lisitskiy, M.P.,[Camerlingo, C](#) 2017IEEE Transactions on Applied Superconductivity27(4),7776772