

Состояние и тенденции развития эталонов на эффекте Джозефсона

А. С. КАТКОВ, В. В. ГЕРАСИМЕНКО

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: a.s.katkov@vniim.ru

Описано текущее состояние и основные направления развития эталонов на эффекте Джозефсона. Рассмотрены схемы построения эталонных установок, способы их совершенствования и расширения области применения.

Ключевые слова: эффект Джозефсона, эталон вольты, джозефсоновские микросхемы, программируемый эталон, эталон с импульсной накачкой

The current status and the main trends in development of measurement standards based on the Josephson effect are described. Designs of measurement standards setups and the ways of their improving and expanding the field of their application are considered.

Key words: Josephson effect, voltage standard, Josephson arrays, programmable standard, pulse-driven standard.

Квантовый эффект Джозефсона был открыт в 1962 г. С момента открытия данного эффекта и по настоящее время ведутся активные исследования его практического применения в различных областях науки и разработка квантовых приборов — СКВИДов, одноэлектронных транзисторов, быстрой однокубитной логики, джозефсоновских микросхем [1—5]. Эффект Джозефсона наиболее распространён в области измерений постоянного электрического напряжения, развитие которой обусловлено возрастающими потребностями высокоточных измерений электрических параметров. Уникальные электрические свойства эффекта Джозефсона используют также в области измерений температур.

Современная эталонная база в области электрических измерений основана на применении квантовых эффектов и фундаментальных физических констант (ФФК) (постоянных Планка, Больцмана, Авогадро и заряда электрона). Развитие данной области метрологии привело к необходимости переопределения международной системы единиц СИ в результате постепенного внедрения методов воспроизведения электрических единиц, опирающихся на значения ФФК, входящих в противоречие с определениями единиц (метр, килограмм, секунда и ампер) в системе СИ [6]. Переопределение СИ позволит исключить зависимость электрических единиц от килограмма в результате фиксации значений основных ФФК. Таким образом, развитие электрических эталонов и, в частности, эталона вольты на основе квантового эффекта Джозефсона находится в русле современных тенденций.

Особенности реализации и применения эффекта Джозефсона. Изменение воспроизводимого напряжения зависит от характеристик электромагнитного поля, описываемого с помощью известного уравнения Максвелла:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t, \quad (1)$$

где $\mathbf{E}$ — напряжённость электрического поля; $\mathbf{B}$ — магнитная индукция.

Закон электромагнитной индукции Фарадея, вытекающий из (1), описывает воспроизводимое напряжение U как скорость изменения магнитного потока Φ :

$$U = d\Phi / dt. \quad (2)$$

Если скорость изменения магнитного потока выразить в виде произведения количества квантов n магнитного потока Φ_0 и частоты f , получим соотношение, известное как уравнение Джозефсона:

$$U = n\Phi_0 f = n(h/2e) f, \quad (3)$$

где $\Phi_0 = h/2e$, h — постоянная Планка, e — заряд электрона.

Из (3) следует, что воспроизводимое напряжение, являющееся одной из основных характеристик электромагнитного поля, определяется значениями ФФК, а также частотой. Воспроизводимое напряжение не зависит от параметров используемых материалов и внешних факторов (температуры, влажности, давления, магнитного и электрического полей), что позволяет создавать эталоны высокой точности на основе данного эффекта.

Первые простейшие устройства с так называемой слабой связью (при которой проявляется эффект Джозефсона) — точечные контакты (переходы) — позволяли воспроизводить напряжение до 3 мВ (частота около 10 ГГц). С развитием технологий число контактов постепенно увеличивалось. Разработанные модели, состоящие из последовательно соединённых джозефсоновских контактов, являются прообразом применяемых в настоящее время устройств — джозефсоновских микросхем.

Джозефсоновская микросхема, изготовленная с помощью современных нанотехнологий, представляет последовательность джозефсоновских переходов, разделённых на секции (включённых параллельно относительно СВЧ-источника) и объединённых в согласованную полосковую линию. В настоящее время джозефсоновские микросхемы наибо-

лее широко применяют в эталонах постоянного напряжения. Такие микросхемы позволяют получать напряжения порядка 10 В, также существует возможность воспроизведения напряжения порядка 20 В [7].

Первые эталонные установки, основанные на СИС-переходах (сверхпроводник—изолятор—сверхпроводник) применяли в качестве эталонов постоянного напряжения. Для СИС-переходов характерна петля гистерезиса на вольт-амперной характеристике (ВАХ). Достоинством таких переходов является возможность размещения центра ступенек при нулевом токе смещения, что позволяет соединять последовательно множество переходов с относительно большим разбросом параметров и снижает требования к технологии изготовления, в результате чего достигается уровень напряжения 10 В и выше. Недостатки СИС-переходов — чувствительность к внешним помехам вследствие малой ширины ступенек по току, неустойчивость уровня напряжения из-за спонтанных перескоков между квантовыми ступенями напряжения (ступенями Шапиро), а также возможные переключения с квантовых ступенек на резистивную ветвь ВАХ, что связано с физическими характеристиками структуры переходов.

Развитие технологии производства микросхем привело к возможности уменьшения не только разброса параметров джозефсоновских переходов, но и неравномерности облучения, что позволило перейти к использованию СНС- (сверхпроводник—нормальный металл—сверхпроводник) и СИНИС- (сверхпроводник—изолятор—нормальный металл—изолятор—сверхпроводник) переходов, отличающихся структурой барьерного слоя между сверхпроводниками. Внедрение переходных слоёв позволило варьировать параметры джозефсоновских микросхем, приближая их к оптимальным с точки зрения частоты облучения, увеличивая при этом ширину квантовых ступеней напряжения.

В микросхемах на СНС- и СИНИС-переходах используется примерно в 5 раз большее число переходов, чем в микросхемах на СИС-переходах, вследствие учёта только первой квантовой ступени напряжения. Возможность увеличения критической силы тока перехода, мощности и соответственно ширины первой ступени позволяет воспроизводить напряжение, значительно более устойчивое к воздействию внешних помех. Однако ступени СНС-микросхем подвержены изменению формы (появление наклона) при воздействии определённого уровня шумов, что требует специальных методов их обнаружения. Напряжение на СНС-микросхемах является однозначной функцией тока, протекающего через неё, обеспечивающей надёжное управление воспроизводимым напряжением.

СНС- и СИНИС-микросхемы применяют в программируемых эталонах (PJVS) [8], а также в импульсно-управляемых эталонах (JAWS), позволяющих получать напряжение произвольной формы, включая как постоянное, так и переменное напряжение [9].

При разработке джозефсоновских микросхем необходимо проводить согласование элементов микросхемы с нагрузкой и генератором СВЧ-излучения. Для СИС-микросхем наиболее распространено их облучение сигналами синусоидальной формы в диапазоне частот 60—80 ГГц. СНС- и СИНИС-микросхемы, в свою очередь, работают в более широком спектре: в случае облучения синусоидальными сигналами диапазон частот составляет 15—75 ГГц, импульсными — 0—1 ГГц. Управление выходным напряжением СНС-мик-

росхем, облучаемых синусоидальным сигналом, достигается путём изменения числа переходов, участвующих в формировании напряжения. Поэтому при таком построении микросхем стоит задача формирования необходимого количества отводов и соответственно группировки переходов для уменьшения необходимого количества отводов и их влияния на согласование переходов с сигналом.

Отдельной группой выступает реализация эффекта Джозефсона на основе высокотемпературной керамики [10]. Технология изготовления высокотемпературных сверхпроводников значительно отличается ввиду специфики высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП). При формировании переходов используется способность ВТСП-плёнок изменять свойства на линии стыка кристаллов. По характеристикам ВТСП-плёнки можно отнести к СНС-переходам (частота облучения достигает 80 ГГц). ВТСП-плёнки можно использовать при температуре кипения жидкого азота (примерно 77 К). Достоинством эталонных установок на основе ВТСП является возможность работы без жидкого гелия. К недостаткам разработанных ВТСП-микросхем следует отнести относительно низкий (до 100 мВ) уровень воспроизводимого напряжения.

Воспроизведение напряжения эталонными установками на СИС- и СНС- (СИНИС-) микросхемах. Типовая эталонная установка состоит из источника СВЧ-излучения, джозефсоновской микросхемы, размещённой в специальном экранированном зонде (предназначенном для ослабления влияния магнитного поля Земли и электромагнитных наводок), устройств управления выходным напряжением и контроля параметров джозефсоновской микросхемы. Зонд размещён в системе охлаждения для обеспечения необходимого температурного режима работы джозефсоновской микросхемы. Воспроизводимое напряжение передается вторичному эталону напряжения методом компарирования с помощью нуль-индикатора.

При одном и том же значении силы тока напряжение на СИС-микросхеме зависит только от номера ступени. Поэтому отличительной особенностью СИС-микросхемы является возможность воспроизведения напряжения при нулевом токе. Плавное изменение выходного напряжения достигается вследствие изменения частоты сигнала, дискретное — путём изменения номера ступени. Для дискретного управления использовали устройство, содержащее источник постоянного напряжения с низким выходным сопротивлением, с помощью которого можно отключать цепь управляющего напряжения по завершении выбора необходимой ступени.

Изменение напряжения на выходе СНС- или СИНИС-микросхемы связано с силой тока. Поэтому для дискретного управления выходным напряжением необходимо изменять силу тока. Число ступеней на ВАХ ограничено, а ширина по току более высоких ступеней недостаточна для надёжного воспроизведения напряжения, поэтому для воспроизведения напряжений используется в основном первая ступень.

Для управления установками на СНС- (СИНИС-) микросхемах используют многоканальное устройство, состоящее из N независимых источников тока. Джозефсоновские переходы, объединённые в двоичные и квазидвоичные последовательности, управляются токами от источников, позволяя получить порядка 2^N уровней выходного напряжения (при положительной и отрицательной полярности напряжения). Однозначность ВАХ определяет высокое быстродействие и точность при изменении воспроизводимого напряжения.

Блок видеоконтроля в установках обоих типов (на СИС- и СНС- (СИНИС-) микросхемах) необходим для контроля параметров (ширины рабочей ступени, оптимальной мощности излучения, влияния помех) микросхемы.

Облучение джозефсоновских микросхем импульсными сигналами. Облучение джозефсоновских переходов импульсными сигналами впервые было предложено и разработано в NIST в 1996 г. Джозефсоновская микросхема воспроизводила выходное напряжение до 256 мкВ и состояла из 512 джозефсоновских переходов, управляемых однополярными импульсами с частотой повторения 250 МГц. При коротком времени нарастания и спада импульсов, по сравнению с характерной частотой джозефсоновской микросхемы, их последовательность определяет число квантов магнитного потока, поступающего в джозефсоновский переход, формируя выходное напряжение. Использование импульсных сигналов позволяет уменьшить недостатки, связанные с синтезом напряжения на основе ступенчатой аппроксимации. При импульсном облучении ширина квантовых ступеней напряжения слабо зависит от частоты, и она обычно больше, чем при облучении перехода синусоидальным высокочастотным сигналом. При постоянной частоте импульсов воспроизводится заданное выходное напряжение, а при изменении частоты существует возможность синтеза напряжения произвольной формы.

Ключевое отличие эталонной установки с импульсным облучением микросхемы заключается в источнике излучения, который с помощью программной блока формирует необходимую последовательность импульсов. Блок обеспечивает заданную частоту повторения, длительность и амплитуду импульсов, необходимых для формирования напряжения на выходе микросхемы. Рассматриваемая установка может иметь ряд дополнительных опций для формирования оптимального сигнала управления джозефсоновской микросхемой (СВЧ-сигнал, сигнал постоянного тока), в ней может быть использовано нескольких микросхем с целью увеличения выходного напряжения. Остальные элементы эталонной установки (блок видеоконтроля, зонд, криостат, экран, соединительные цепи и т. п.) не отличаются от типовой джозефсоновской установки.

Для прохождения однополярных импульсов через всю микросхему без отражений необходима согласованная широкополосная линия. В связи с ограниченной частотой повторения импульсов и для увеличения выходного напряжения необходимо иметь большое число переходов с малым разбросом параметров, что вызывает определённые сложности при изготовлении микросхем и эталонных установок.

Направления развития. Среди наметившихся в настоящее время перспективных направлений, связанных с созданием эталонов на эффекте Джозефсона, можно выделить следующие: снижение экономических затрат, расширение области применения и повышение эффективности установок за счёт новых технических решений.

Снижение экономических затрат связано с переходом на системы охлаждения, работающие без использования жидкого гелия. Применение таких систем приводит к непрерывной работе и отсутствию зависимости от поставок сжиженных газов. Однако необходимо учитывать возможные температурные пульсации, повышенную термоЭДС, вибрации и другие характеристики, вносимые охлаждающими установками.

Проводится освоение новых технологий производства микросхем с другими барьерными переходами, их количеством и материалом. Например, в INRIM совместно с РТВ была разработана микросхема 1 В на СНИС-переходах [11], имеющая характеристики, аналогичные СИНИС-микросхеме 1 В за счёт работы на более высоких квантовых ступенях, но при этом содержащая меньшее число джозефсоновских переходов.

В области повышения эффективности существующих эталонных установок можно отметить переход от СИС-микросхем к СНС- и СИНИС-микросхемам, функциональные возможности которых значительно шире. Активно совершенствуются микросхемы на эффекте Джозефсона с импульсной модуляцией, способные воспроизводить как постоянное напряжение, так и напряжение произвольной формы с достаточно высоким диапазоном частот сигналов. Воспроизведено синусоидальное напряжение на уровне 1 В [12]. Исследованы возможности одновременного применения программируемой (PJVS) и импульсной (JAWS) джозефсоновских микросхем для воспроизведения синусоидальных сигналов с большим уровнем напряжения и малым уровнем гармоник [13].

Изучены методы управления джозефсоновской микросхемой с применением оптоволоконных линий связи взамен СВЧ-волноводов и коаксиальных кабелей. Таким способом можно управлять секциями джозефсоновских переходов без непосредственной электрической связи с управляющими источниками. Это позволяет снизить потери мощности излучения и влияние помех на работу джозефсоновской микросхемы. Рассматривают возможность облучения двух джозефсоновских микросхем двумя СВЧ-источниками, для получения постоянного напряжения в интервале 0—20 В с плавностью регулировки выходного напряжения порядка нановольт. Возможно применение данной установки в системе калибровки цифровых вольтметров в диапазоне до 1 кВ [14]. Исследуются методы измерения импеданса, мощности, температуры с помощью эффекта Джозефсона.

Транспортируемые эталоны Джозефсона [15] позволяют проводить ключевые сличения более эффективно и качественно, повысить точность сличений эталонов вольты, которую невозможно достичь, используя меры напряжения на стабилитронах.

Заключение. Явление эффекта Джозефсона, открытое более 50 лет назад, является перспективным и востребованным, находит всё большее применение в области прикладных наук и практических задач. В последнее время наблюдается тенденция применения СНС- и СИНИС-микросхем в эталонных и исследовательских установках постоянного напряжения. Применение импульсной модуляции для таких микросхем даёт возможность синтезировать сигналы произвольной формы, что в будущем позволит применять установки такого типа как в качестве высокоточных эталонов постоянного и переменного напряжения, так и в качестве квантовых синтезаторов, воспроизводящих сигналы произвольной формы.

Применение джозефсоновских микросхем не ограничивается областью метрологии, что подтверждается усиливающимся интересом учёных, исследующих практические аспекты применения переходов Джозефсона: в области построения квантовых суперкомпьютеров, медицины и в других областях, где требуются высокие быстродействие, точность и стабильность измерений электрического напряжения.

Литература

1. **Jaklevic R. C., Lambe J., Silver A. H., Mercereau J. E.** Quantum Interference Effects in Josephson Tunneling // *Phys. Rev. Let.* 1964. N. 12 (7). P. 159—160.
2. **Fulton T. A., Gammel P. L., Bishop D. J., Dunkleberger L. N., Dolan G. J.** Observation of Combined Josephson and Charging Effects in Small Tunnel Junction Circuits // *Phys. Rev. Let.* 1989. N. 63(12). P. 1307—1310.
3. **Likharev K. K., Semenov V. K.** RSFQ logic/memory family: a new Josephson-junction technology for sub-terahertz-clock-frequency digital systems // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1991. N. 1. P. 3—28.
4. **Hamilton C. A., Kautz R. L., Steiner R. L., Lloyd F. L.** A practical Josephson voltage standard at 1 V // *IEEE Electron Device Let.* 1985. N. 6 (12). P. 623—625.
5. **Niemeyer J., Hinken J. H., Kautz R. L.** Microwave-induced constant voltage steps at one volt from a series array of Josephson junctions // *Appl. Phys. Let.* 1984. N. 45 (4). P. 478—480.
6. **Comptes Rendus de la 24e CGPM.** 2011. P. 532—536.
7. **Muller F., Scheller T., Wendisch R., Behr R., Kieler O., Palafox L., Kohlmann J.** NbSi Barrier Junctions Tuned for Metrological Applications up to 70 GHz: 20 V Arrays for Programmable Josephson Voltage Standards // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2013. N. 23(3). 1101005 (5 pp).
8. **Lee J., Behr R., Palafox L., Katkov A., Schubert M., Starkloff M., Bock A. C.** An ac quantum voltmeter based on a 10 V programmable Josephson array // *Metrologia.* 2013. N. 50 (6). P. 612—622.
9. **Benz S. P., Hamilton C. A., Burroughs C. J., Harvey T. E.** AC and DC bipolar voltage source using quantized pulses // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1999. N. 48(2). P. 266—269.
10. **Klushin A. M., He M., Katkov A. S.** Constant-voltage steps at 0.1 volt from a series array of high-*T_c* Josephson junctions // *Conf. Digest CPEM 2008. Boulder.* 2008. P. 104—105.
11. **Lacquaniti V., De Leo N., Fretto M., Sosso A., Müller F., Kohlmann J.** 1 V programmable voltage standards based on SNIS Josephson junction series arrays // *Supercond. Sci. and Technol.* 2011. N. 24 (4). 045004.
12. **Behr R., Kieler O., Lee J., Bauer S., Palafox L., Kohlmann J.** Direct comparison of a 1 V Josephson arbitrary waveform synthesizer and an ac quantum voltmeter // *Metrologia.* 2015. N. 52 (4). P. 528—551.
13. **Behr R., Kieler O., Schleußner D., Palafox L., Ahlers F.-J.** Combining Josephson systems for spectrally pure AC waveforms with large amplitudes // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2013. N. 62. P. 1634—1639.
14. **Georgakopoulos D., Budovsky I., Grady S., Hagen T.** Quantum calibration system for digital voltmeters at voltages from 10 nV to 1 kV // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2013. V. 62 (6). P. 1581—1586.
15. **Катков А. С., Ловцюс В. Э.** Компактный эталон сравнения на эффекте Джозефсона с выходным напряжением 10 В // *Измерительная техника.* 2011. № 7. С. 41—45.

Дата принятия: 05.10.2015.

620.179.143

Создание трёхмерной модели намагниченного участка трубопровода для внутритрубной магнитной дефектоскопии

С. А. МАННИНЕН, П. А. КУЗНЕЦОВ

Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», С.-Петербург, Россия, e-mail: victorm@crism.ru

Рассмотрен метод обнаружения и идентификации дефектов внутри трубы, намагниченной переменным током. Разработана трёхмерная компьютерная модель намагниченного участка трубопровода с использованием метода конечных элементов. Модель позволяет рассчитывать распределение магнитного поля внутри трубы при протекании через неё переменного электрического тока. Расчётную модель можно использовать для создания эффективной измерительной системы внутритрубного магнитного дефектоскопа.

Ключевые слова: внутритрубная магнитная дефектоскопия, коррозионные повреждения трубопровода, метод конечных элементов.

The method of detection and identification of defects inside the tube, magnetized by alternating current is considered. The 3D computer model of the magnetized part of the pipeline was developed using the finite element method. The model allows to calculate the magnetic field distribution inside the tube while flowing through it an alternating electrical current. The developed calculation model may be used to create an effective measurement system for intratubal magnetic defectoscope.

Key words: intratubal magnetic defectoscopy, pipeline corrosion damage, finite element method.

В настоящее время методы магнитной дефектоскопии получили широкое распространение в связи со значительным развитием измерительной и компьютерной техники [1]. Первичные индукционные, феррозондовые и другие преобразователи магнитного поля встраиваются в измеритель-

ные системы, позволяющие регистрировать и обрабатывать сигналы в режиме реального времени [2].

В основе методов магнитной дефектоскопии лежит намагничивание ферромагнитных объектов и измерение на их поверхности поля рассеяния от дефекта. Если в результате