

Технология контроля старения материалов в сверхпроводящем состоянии

Aging control technology for materials in a superconducting state

Спицын А.О.

студент 2 курса Белгородского государственного национального исследовательского
университета
e-mail: alekseypitsin@ mail.ru

Spitsyn A.O.

2nd year student, Belgorod State National Research University
e-mail: alekseypitsin@ mail.ru

Аннотация

Основная задача настоящей статьи – определить способы эффективного контроля над старением материалов в сверхпроводящем состоянии и подробно описать теоретические аспекты, вносящие значительный вклад в понимание основных механизмов технологии. С помощью методов: теоретического моделирования; анализа и обобщения соответствующих теоретических знаний; формализации и разработки ключевых идей для технологии контроля старения материалов – произведён синтез нового подхода к теории сверхпроводимости, а также связанных явлений, для использования в практических целях. В статье анализируется множество теоретических аспектов, связанных с основными механизмами технологии контроля старения материалов в сверхпроводящем состоянии, в частности: проводится качественное описание сверхпроводимости с помощью уровня нулевых колебаний; идёт подробный разбор свойств, присущих джозефсоновским переходам; приводятся условия коррелированного туннелирования электронов и преимуществ в создании резонансных туннельных переходов; даётся общее представление о старении материалов и способах его контроля. Вместе с этим, вносятся ключевые идеи реализации технологии, которые решают проблемы структурных изменений материалов на границе раздела с дислокациями и дефектами разного рода (включая внесистемные, приграничные, поверхностные, находящиеся на стыке). Выдвигаются и обосновываются идеи длительного контроля над эффектами Киркендалла, Френкеля-Конторовой, природными неоднородностями, необратимыми процессами диффузии, сдерживание которых является основной целью реализации технологии.

Ключевые слова: старение материалов, сверхпроводимость, дефекты материалов, диффузия, туннельный эффект.

Abstract

The main objective of this paper is to identify ways to effectively control the aging of materials in the superconducting state and to describe in detail the theoretical aspects that make a significant contribution to the understanding of the main mechanisms of the technology. Using the methods of: theoretical modeling; analysis and generalization of relevant theoretical knowledge; formalization and development of key ideas for the technology of controlling the aging of materials-a new approach to the theory of superconductivity, as well as related phenomena, is synthesized for practical use. The article analyzes many theoretical aspects related to the main mechanisms of the technology for controlling the aging of materials in the superconducting state, in particular: a qualitative description of superconductivity, using the level of zero vibrations; a detailed analysis of the properties inherent in Josephson transitions; the conditions for correlated electron tunneling and

the advantages in creating resonant tunnel transitions; a general idea of the aging of materials and methods of its control is given. At the same time, the key ideas for the implementation of the technology are introduced, which solve the problems of structural changes of materials at the interface with dislocations and defects of various kinds (including non-system, border, surface, located at the junction). The ideas of long-term control over the effects of Kirkendall, Frenkel – Kontorova, natural inhomogeneities, irreversible diffusion processes-the containment of which is the main goal of the technology implementation-are put forward and justified.

Keywords: aging of materials, superconductivity, material defects, diffusion, tunnel effect.

1. Введение

Анализ физических процессов, которые происходят в материалах различных элементов систем, показывает, что надежность и бесперебойное функционирование этих элементов – полностью характеризуются свойствами материалов, факторами нагрузки и комплексным характером внешних воздействий. Таким образом, для основных материалов существуют определённые зависимости протекания тех или иных физико-химических процессов, которые приводят к старению, локальному или глобальному изменению характеристик материалов, в частности: механических, электрических, магнитных свойств. Эти процессы определяются общим характером и количественными показателями воздействующих факторов.

«Старением материалов называют медленное самопроизвольное необратимое изменение свойств данных материалов. Этот процесс происходит под действием теплового движения атомов и молекул, гравитационных и магнитных полей, механических воздействий, светового и иного излучения, и т.д.» [1]. Процесс старения стремится перевести материал в более равновесное состояние. Это явление считается очень вредным процессом, так как с течением времени свойства материала отклоняются от спроектированных и, чаще всего, в худшую сторону. А его необратимость – запрещает эксплуатировать электронику или разнообразные механизмы по истечении определённого срока, так как пренебрежительное отношение к факту старения материалов приведёт к выводу из строя рассматриваемых элементов, что, в свою очередь, порождает определённо большие проблемы. Например, вывод из строя небольшого блока электроники у космического аппарата, который находится на очень большом расстоянии от Земли, приведёт к катастрофе – абсолютной неуправляемости, отсутствию контроля над системами и дальнейшей возможности возобновить эффективную работу.

Определим, в каком состоянии материалы наиболее уязвимы к старению. Так, в газах и низкомолекулярных чистых жидкостях, из-за очень быстрого наступления термодинамического равновесия, старения не происходит. Поэтому, как правило, старение происходит в твёрдых телах, жидких смесях и полимерах.

Теперь можно привести произвольную классификацию основных видов старения:

Механическое старение металлов – процессы, связанные с диффузией атомов металла.

Старение полимеров – выраженная деструкцией макромолекул, либо, наоборот, сшивание под действием излучений, воздуха, тепла, воды и других факторов.

Магнитное старение – постепенное изменение магнитных свойств в силу воздействия разнообразных факторов, таких как: переменные магнитные поля, вибрации, перепады температур и пр.

Старение коллоидных систем.

К процессу старения металлов, в том числе деформационного, добавляется деградация поверхностного слоя за счёт коррозии, износа и пр. Нередко, для того чтобы изготавливаемый материал имел стабильные свойства, применяют искусственное старение. «Само старение материалов в основном обусловлено: диффузией, хемосорбцией, увлажнением и рекристаллизацией материалов, различными химическими реакциями и коррозионными процессами, которые вызывают изменение начальных свойств материалов, из которых изготовлены элементы систем. Эти и другие изменения могут привести к повреждению данного элемента, а также к опасности возникновения критического отказа

всей системы. Следовательно, старение материалов вызывает снижение значений их характеристик с течением времени, а характер такого снижения определяется начальными свойствами, интенсивностью воздействия внешних факторов, общим напряженным состоянием материала. Во всех случаях старение материалов представляет собой необратимый процесс» [1].

Таким образом, старение материалов является до сих пор сложной, нерешённой до конца проблемой, решение которой, несомненно, будет способствовать качественному и стабильному прогрессу любых исследований, ограничивающихся возможностью длительной эксплуатации оборудования и его общим запасом прочности.

При формировании идей технологии контроля старения материалов, было поставлено несколько целей.

Цели:

- 1) Определить способы эффективного контроля над старением материалов в сверхпроводящем состоянии.
- 2) Подробно описать теоретические аспекты, вносящие значительный вклад в понимание основных механизмов технологии.
- 3) Обосновать выдвигаемые идеи и попытаться способствовать применению полученных знаний на практике (и в экспериментах).
- 4) Выполнить расчёты, способствующие более наглядному представлению идей.

Методы: теоретическое моделирование, анализ, сравнение и обобщение соответствующих теоретических аспектов, синтез нового подхода к теории для практических целей, формализация идей.

При непосредственном переходе к способам контроля рассмотрим самые важные теоретические основы для более чёткого представления ведущих механизмов и предполагаемой реализации технологии.

2. Характер сверхпроводимости

В первую очередь, необходимо понимать, что отличие так называемых идеальных проводников, т.е. таких, для которых удельное сопротивление равно нулю, от сверхпроводников, состоит в наличии характерного эффекта Мейснера-Оксенфельда у последних. Данный эффект заключается в выталкивании магнитного поля из объёма проводника, при его охлаждении в постоянном магнитном поле ниже критической температуры T_c . При этом, глубина проникновения магнитного поля характеризуется лондоновской глубиной проникновения, т.е. речь идёт о тонком поверхностном слое толщиной λ . Не стоит забывать и о том, что воздействие внешнего магнитного поля и тока, текущего через сверхпроводник, может разрушить состояние сверхпроводимости. Поверхностный ток распределяется тонким слоем у поверхности сверхпроводника и создает магнитное поле, которое уничтожает внешнее магнитное поле внутри сверхпроводника. По-разному происходит и само разрушение сверхпроводимости магнитным полем – в целом оно зависит от типа сверхпроводника. Так, разрушение сверхпроводимости во всем объеме у сверхпроводников I рода происходит, как только магнитное поле начинает превышать некоторое критическое значение H_c . В то время, как у сверхпроводников II рода (рис. 1) «магнитное поле при достижении первого критического поля H_{c1} начинает проникать в объем в виде вихрей, а при достижении второго критического поля H_{c2} - сверхпроводимость полностью разрушается» [2].

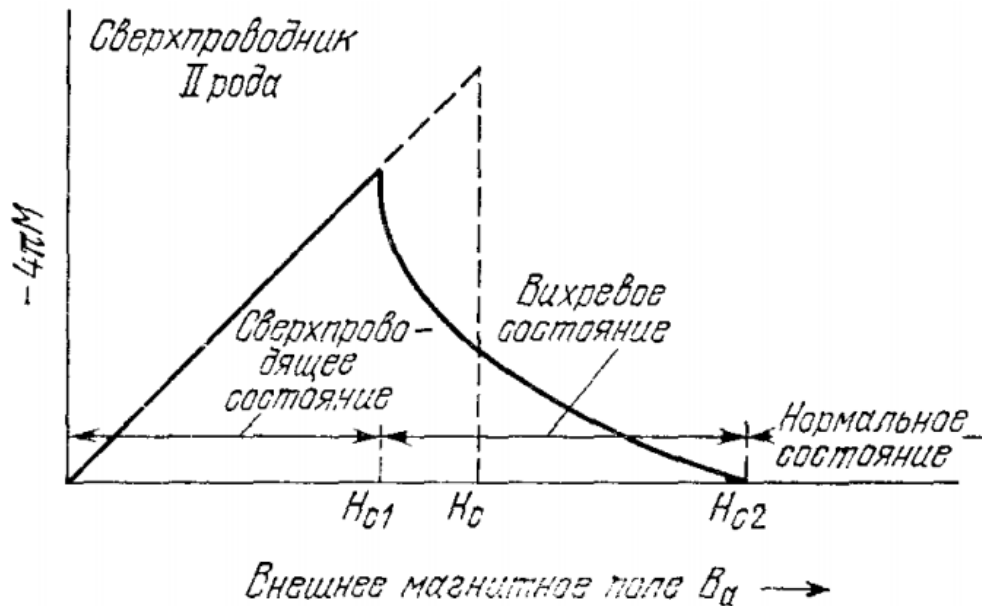


Рис. 1. Магнитный момент сверхпроводника II рода в магнитном поле

«Согласно теории БКШ (1957) носителями тока в сверхпроводнике являются куперовские пары. Образование электронных пар происходит благодаря обмену виртуальными фононами между электронами, составляющими пару» [3]. Это далеко не единственный подход к интерпретации сверхпроводимости, поэтому в своей работе я буду опираться не только на него. Отмечу важность хотя бы приблизительного понимания явления на качественном уровне, которое будет освещено благодаря механизму упорядочения нулевых колебаний.

Наличие энергии связи между бозонными парами, которая не позволяет отдельным частицам сверхпроводящего конденсата рассеиваться на дефектах, теряя малые порции энергии, является основной физической причиной существования сверхпроводимости. Т.е. без притяжения между спаренными электронами, процесс объединения электронов в пары не приводит к бозе-конденсации. Исходя из измерений лондоновской глубины проникновения, следует, что в конденсат объединяется лишь небольшое количество электронов: примерно 10^{-5} часть от общего числа спаренных электронов приходится на сверхпроводящие носители. Притяжение возникает между парами, находящимися почти на 100 междоузельных расстояний и никак не влияет на другие электроны, даже те, что находятся между электронами пары; и, в свою очередь, отдельные электроны также не мешают испытывать этих сил притяжения тем парам, которые объединяются в бозе-конденсат. Одним из таких механизмов спаривания электронов может являться их магнитное диполь-дипольное взаимодействие, и чтобы такое взаимодействие приводило к упорядочению спинов в синглетном состоянии (при температурах порядка $\sim 10\text{K}$), характерное расстояние между электронами должно быть достаточно малым:

$$r < \left(\frac{\mu_B^2}{k_B T_c} \right)^{\frac{1}{3}} \approx a_B,$$

где $a_B = \frac{\hbar^2}{m_e e^2}$ – радиус Бора (\hbar – постоянная Дирака, m_e – масса электрона, e – элементарный заряд), $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e c}$ – магнетон Бора, k_B – постоянная Больцмана. Такое условие указывает на то, что два спаренных электрона должны быть локализованы в объёме одного ионного узла – это хорошо согласуется с тем, что сверхпроводящее состояние не наблюдается в одновалентных щелочных (так как электроны проводимости в них локализуются в узлах решётки на слишком больших расстояниях друг от друга) и благородных металлах, но отлично реализуется в металлах с одной парой на атом. Однако, в окрестности ионного узла, имеющего свой магнитный момент, объединяющиеся электроны испытывают противодействие объединению, так как создаваемое узлом магнитное поле

препятствует такому взаимодействию, что также хорошо подтверждается на практике: сильные магнетики не бывают сверхпроводниками, а введение в сверхпроводящий сплав железа – всегда приводит к понижению его критической температуры. Такой механизм магнитного спаривания не должен разрушаться при критической температуре T_c , и это тоже находит подтверждение экспериментами: измерения периода квантования магнитного потока при переходе сверхпроводящего образца через T_c – не обнаруживают никаких изменений периода квантования [4]. А прямое влияние критического магнитного поля на магнитный момент электрона слишком слабо, чтобы нарушить диполь-дипольное взаимодействие двух спаренных электронов:

$$\mu_B H_c \ll k_B T_c.$$

Таким образом, все эти результаты говорят о том, что существование механизма спаривания электронов является необходимым, но недостаточным условием для существования сверхпроводимости, поскольку после объединения электронов в бозонные пары, они не становятся тождественными частицами, способными образовать сверхпроводящий конденсат, т.е. если температура недостаточно низка, электронные пары совершают некоррелированные нулевые колебания и только после их упорядочения может произойти образование конденсата Бозе-Эйнштейна [5].

Значимым моментом в технологии контроля старения материалов является тот факт, что электрон может поляризовать ближайший по отношению к нему атом решетки (рис. 2), т.е. за счет действия кулоновской силы электрон может немного притянуть его к себе, а значит – смещённый атом решетки будет смещать и следующий электрон; так образуется связь пары электронов, т.е. второй компонент пары при движении как бы воспринимает энергию, которую электрон передает атому решетки.

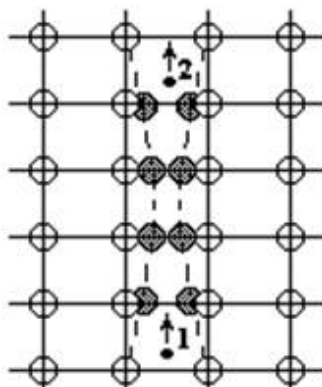


Рис. 2. Схема образования электронных пар в проводящем металле

Становится очевидно, что свободный электрон с энергией Ферми (если пренебречь взаимодействиями электронного газа): $E_F = (3\pi^2)^{\frac{2}{3}} \frac{\hbar^2}{2m_e} n_e^{\frac{2}{3}} \approx \frac{e^2 a_B}{\lambda_F}$ [6], совершающий нулевые колебания внутри определённой ячейки с линейными размерами λ_F , которая соответствует его дебройлевской длине волны: $\lambda_F = \frac{2\pi\hbar}{p_F}$; и связана с плотностью n_e электронного газа соотношением: $\lambda_F^3 = \frac{1}{n_e}$, взаимодействует с ионом. Конечно, электроны – это квантовые частицы и нельзя буквально понимать размещение спаренного электрона внутри определённой ячейки металла, но, как уже отмечалось, со стороны ионов на них действует кулоновская сила, поэтому такие электроны имеют большую вероятность находиться возле ионов, при этом экранируя их поля, однако, они остаются как бы размазанными по металлу. В среднем, например, в двухвалентном металле, возле определённого узла решётки в каждый момент времени находятся два электрона, которые можно приближённо рассматривать, как расположенные внутри ячейки. Итак, если подобным образом рассматривать равномерно размазанный фон ионов внутри ячейки, то внутри неё электрон будет обладать потенциальной энергией: $\varepsilon_p \approx -\frac{e^2}{\lambda_F}$; а если учесть, что нулевые колебания по определению

квантованы, и их амплитуда $a_0 \approx \sqrt{\lambda_F a_B}$ и частота Ω_0 связаны соотношением: $\hbar \approx 2m_e a_0^2 \Omega_0$, тогда выражение для кинетической энергии электрона, совершающего нулевые колебания в ограниченной области пространства, имеет вид: $\varepsilon_k \approx \frac{\hbar^2}{2m_e a_0^2}$ [5]. Производя несложные преобразования:

$$\varepsilon_k \approx \frac{\hbar^2}{2m_e \lambda_F a_B} \approx \frac{\hbar^2}{2m_e \lambda_F \frac{\hbar^2}{m_e e^2}} \approx \frac{e^2}{2\lambda_F} = -\frac{\varepsilon_p}{2}.$$

Видим, что полученные соотношения удовлетворяют теореме вириала [7], по которой, кулоновская частица, претерпевающая финитное движение, должна иметь связь между потенциальной ε_p и кинетической ε_k энергией в виде соотношения: $|\varepsilon_p| = 2\varepsilon_k$.

Выходит, если учесть энергию пары электронов, то при столкновении она не меняется, т.е. столкновения происходят без диссипации энергии электронов. Именно такие пары электронов и называются куперовскими. Но, как и любой квантовый объект, из принципа неопределённости Гейзенберга: электронная пара подвержена флуктуациям в основном состоянии – нулевым колебаниям. При нулевых осцилляциях электронной пары, относительно ближайшего иона, возникает, характерное для осциллирующего дипольного момента, электрическое поле. И важно отметить, что силы притяжения между парами отсутствуют, пока их колебания не упорядочены, но могут возникнуть только в системе упорядоченно осциллирующих дипольных моментов. А понижение энергии диполей возникнет, если эти колебания будут находиться в противофазе, т.е. когда пары будут располагаться на расстояниях, равных половине длины волны, создаваемой колебаниями их электромагнитного поля. В результате – возникновение сил притяжения между электронными парами за счёт упорядочения их нулевых колебаний приводит к формированию конденсата частиц на уровне с минимальной энергией.

Теперь ясно, что спаривание электронов является коллективным эффектом, следовательно, с увеличением числа пар растёт энергия связи и при определенных условиях такие пары могут образовывать конденсат Бозе-Эйнштейна. Нулевые колебания остаются неупорядоченными до тех пор, пока не установится достаточно низкая температура, а при достижении T_c – сверхпроводимость станет следствием упорядочения нулевых колебаний, т.е. произойдёт возникновение энергии притяжения, которая объединяет частицы за счёт электромагнитного взаимодействия упорядоченных нулевых колебаний спаренных электронов, так как куперовские пары обладают большой энергией связи – обмена энергетическими импульсами между ними и решеткой не наблюдается, следовательно, «чистое» сверхпроводящее состояние имеет второстепенную роль в технологии контроля старения материалов.

С точки зрения классического подхода: по мере увеличения плотности сверхпроводящего тока увеличивается скорость электронов, но это сопровождается уменьшением их плотности – «так происходит разрыв электронных пар, возникает распаривание электронов. Наконец, наступает такое состояние, когда дальнейшего увеличения сверхпроводящего тока произойти не может просто потому, что сильно снизилась плотность сверхпроводящих носителей, чтобы перенести заданный ток, который называют критическим током распаривания» [2].

Таким образом, необходимо осуществлять плавный контроль над концентрацией куперовских пар, придавая тем самым необходимый баланс системе. С повышением температуры, определённая доля электронов возбуждается, переходя в одиночное состояние и приобретая свойства электронов обычного металла, а, значит, температурный контроль будет являться одним из механизмов регулировки концентрации куперовских пар. Для осуществления такого типа контроля не обязательно создавать сложные комбинации из криогенных установок и пытаться заниматься тонкой терморегуляцией – достаточно создать особый сплав с подходящими характеристиками, которые можно получить из расчётов.

Важно отметить, что сверхпроводимость является квантовым явлением, проявляющимся в макроскопических масштабах. Таким образом, для сверхпроводников: как плотность

электрического тока, так и плотность электрического заряда – обладают реальным физическим смыслом. Кроме того, существует разница между видами токов, так: постоянный электрический ток протекает через сверхпроводник без диссипации, а протекание переменного тока принципиально сопровождается потерями.

Для правильного функционирования систем необходима тонкая регулировка процессов деструктуризации только на границе раздела, а не во всём объёме материала, соответственно, необходимо подобрать такие механизмы физических явлений, которые будут способны к реализации поставленной задачи без серьёзного ущерба функционированию системы в целом.

3. Механизм туннелирования

Одним из основных механизмов технологии контроля старения материалов является туннельный эффект. В этой работе я попытаюсь обобщить необходимые знания о сверхпроводимости и туннелировании для успешной реализации технологии контроля старения материалов в сверхпроводящем состоянии.

Как известно, туннельный эффект в структуре, состоящей из двух сверхпроводников, разделенных тонким изолирующим слоем, называется переходом Джозефсона и состоит он в том, что сквозь такой переход, помимо отдельных электронов, могут туннелировать и куперовские пары. Это приводит к эффектам Джозефсона, и поскольку пары движутся через туннельный переход без потерь энергии – эффекты Джозефсона иногда называют «слабой сверхпроводимостью». Также необходимо принимать во внимание тот факт, что «все электроны в определённом сверхпроводнике имеют одинаковую фазу» [8], и при образовании туннельного контакта из двух различных сверхпроводников (или другой вариант, связанный с тем, что при нанесении на сверхпроводник тонкой пленки нормального металла – эта пленка тоже приобретает сверхпроводящие свойства) – через такой контакт потечёт ток (не меняющийся во времени) без всякого приложенного напряжения, и поэтому он является бездиссипативным (т.е. не сопровождается выделением джоулева тепла) – это ток Джозефсона, зависящий от разности фаз параметров порядка с двух сторон. Параметр порядка Δ_n можно рассматривать, как волновую функцию сверхпроводящего конденсата. Данное явление называется стационарным эффектом Джозефсона.

Стоит отметить, что эффект Джозефсона в слабых связях может описываться теорией Асламазова–Ларкина, в которой вычисление полного тока, как и в обычном туннельном контакте, производится по формуле:

$$I_s = I_c \sin(\varphi_2 - \varphi_1),$$

где $I_c = \frac{\pi \Delta_0^2}{4eT_c R_n}$ – максимальный бездиссипативный ток [10].

Для нас важны следствия из уравнений, описывающих эффект Джозефсона, которые проявляются рядом свойств, присущих джозефсоновским переходам:

1) Если к переходу прилагается постоянное напряжение V_0 , то через него потечёт переменный ток с частотой $\omega_J = \frac{q_p V_0}{\hbar}$.

2) Если напряжение на переходе равно нулю: $V_0 = 0$, то текущий через него ток может принимать любые значения в пределах $J \in [-J_c; +J_c]$. Подчеркнём, что в обоих случаях мощность, рассеиваемая на переходе, равна нулю: $P_{(V_0)} = 0$.

3) Если к переходу приложена сумма постоянного и переменного напряжений: $V = V_0 + v \cos \omega t$, то при $\omega = \omega_J = \frac{q_p V_0}{\hbar}$ через переход будет течь постоянный ток. Законы электростатики не позволяют иметь устойчивое положение заряженной частицы в электростатическом поле, создаваемом внешними источниками с постоянной ЭДС. Как видим, это можно сделать, если добавить осциллирующее поле, при этом возникает эффект динамической стабилизации.

Однако, даже при более низких токах чем I_c , возможен распад метастабильных состояний джозефсоновского перехода путём преодоления потенциальных барьеров за счёт шума в

измерительных цепях, за счёт тепловых и квантовых флуктуаций фазы.

Основная проблема, которую должна нивелировать технология контроля старения материалов – это необратимость процессов диффузии в любом температурном диапазоне. Может показаться, что простое охлаждение до низких температур может быстро решить все проблемы, но это далеко не так. Действительно, можно сильно замедлить скорость диффузии, например, если оборудование будет находиться в хладагенте под постоянным температурным контролем. Но, рассматривая достаточно длительный промежуток времени, мы понимаем, что почти всегда будут происходить внутренние деформации, связанные с напряжённостями в структуре материала, образующимися ещё в процессе изготовления (в частности, при охлаждении), ведь какой бы мы материал не создавали – он не может быть полностью однородным (однородность – это идеализация). К такой классификации могут быть отнесены: грубые включения, трещины, дислокации, другие дефекты. Их роль в нарушении структуры материалов является основной.

Во всём объёме материала флуктуации плотности существуют всегда. Различные дефекты образуются в основном при отверждении и в районе этих неоднородностей концентрируются электрические и механические напряжения. Механизм деструктуризации объясняется «термофлуктуационной теорией, согласно которой: разрушение структур рассматривается не как критическое явление, наступающее при достижении предельного напряжения или деформации, а как кинетический процесс накопления повреждений, развивающийся в теле с момента приложения нагрузки» [11]. Продолжая рассматривать процессы и явления, определяющие старение материалов в долгосрочной перспективе, следует добавить к ним эффекты Френкеля и Киркендалла. Эти процессы также считаются необратимыми и сопровождаются появлением дислокаций и новообразований (пустот), которые для нас категорически неприемлемы, так как любое нарушение структуры будет разрушать места крепления блоков и модулей, спаи контактов и, следовательно, выводить из строя микросхемы, платы, приборы, важные элементы оборудования систем и т.д.

Одним из важнейших следствий работы Киркендалла является установка факта существования пор, образующихся во время диффузии. Пустоты (поры) являются поглотителями вакансий, а когда их соберётся достаточное количество, они могут становиться существенными, и в попытках восстановить равновесие будут расширяться, а значит негативно влиять на структурную целостность материала. Эта доля пустот (пористость) появляется и развивается из-за разницы в скорости диффузии материалов двух различных видов. При этом существуют разные пути проявления воздействия пустот, например, поры в металлах имеют ответвления по электрическим, механическим и термическим свойствам, поэтому желательно успешно контролировать их образование. Одним из методов устранения (уменьшения) пористости является простой контроль температуры отжига, так как пористость Киркендалла, как правило, образуется при заданной температуре в системе, а значит этап отжига необходимо проводить в течение более длительного времени и при более низких температурах, для того чтобы избежать образования пор ещё в процессе изготовления. Но в целом, подводя итог, можно с уверенностью сказать, что нельзя добиться эффекта полного «консервирования» и остановки деструктуризации материалов, путём простого длительного охлаждения.

Решение поставленных задач требует рассмотрения возможных механизмов, способных составить основу технологии контроля старения материалов. Так, например, с помощью туннельного эффекта, перераспределяя и добавляя электроны, можно вполне успешно контролировать эти процессы, поддерживать равномерную нагрузку, сводящую до минимума пагубное влияние описанных выше эффектов. Компенсирование избыточных напряжённостей в структуре происходит благодаря тщательному сканированию материала и перераспределению электрических сил в необходимых местах для потенциального сглаживания неоднородностей. Само перераспределение может происходить автономно, при этом оно будет зависеть от геометрии контакта и других параметров перехода. Соответственно, уже после создания, можно искусственно фактически преобразовывать

материал, делая его потенциально однородным, при этом, исключая различные факторы старения. Конечно, создание структур подобного рода очень трудоёмкий процесс, требующий отдельного рассмотрения.

Туннельный эффект для резонансных переходов с равными уровнями энергии будет взаимно обратным, а более вероятным для него, в разноуровневых переходах, будет переход от более высоких уровней энергии к менее высоким, соответствующим не скомпенсированным областям на поверхности вблизи границы контакта. И всё из-за стремления системы к равновесному состоянию; а что касается переходов с равными уровнями энергии: при наличии системы из двух совершенно одинаковых ям электрон оказывается делокализованным – он непрерывно туннелирует из одной ямы в другую. Характерное время такого подбарьерного перехода τ_0 тем меньше, чем уже и ниже разделяющий ямы барьер. Ни пребывание электрона в левой яме, ни его наличие в правой яме уже не являются стационарными состояниями системы, а уровни электрона в каждой из ям теперь обладают конечной шириной $\Gamma = \frac{\hbar}{\tau_0}$. Другими словами, ни волновая функция Ψ_r (электрон в правой яме), ни волновая функция Ψ_l (электрон в левой яме) теперь не являются стационарными собственными функциями системы. В данном случае такими функциями оказываются их комбинации – симметричная: $\Psi_s = \frac{1}{\sqrt{2}}[\Psi_l + \Psi_r]$ и антисимметричная: $\Psi_a = \frac{1}{\sqrt{2}}[\Psi_l - \Psi_r]$. Это означает, что система может пребывать в двух энергетических состояниях (рис. 3), различающихся по энергии на $\Delta E_{as} = \frac{\hbar}{\tau}$; и лишь при $\tau \rightarrow \infty$ (раздвижение двух ям на бесконечное расстояние) пара состояний Ψ_s и Ψ_a совпадают друг с другом, с Ψ_l и Ψ_r [12].

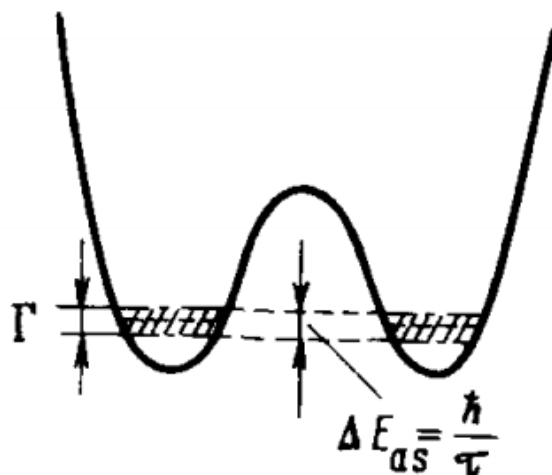


Рис. 3. Туннелирование в системе двух одинаковых потенциальных ям

Один из теоретических фактов, для применения эффекта туннелирования в моей технологии, заключается в том, что туннелирующие электроны уносят импульс из одного материала и передают его другому, т.е. создают силовое воздействие. Полезно узнать величину этого воздействия. Так, например, регистрируя изменение амплитуды колебаний измерительного осциллятора, допустим, с помощью туннельного преобразователя – можно составить выражение для минимальной силы $(F_0)_{\min}$, а, следовательно, получить необходимое знание, способствующее пониманию уровня контроля. Это выражение имеет вид:

$$(F_0)_{\min} \approx 2\tau^{-1} \left[M\hbar\omega_0 \sqrt{\frac{E_F}{\pi\varphi_0}} \right]^{\frac{1}{2}},$$

где τ – время действия силы; E_F – энергия Ферми металла электродов туннельного преобразователя; φ_0 – работа выхода материала его электродов; M – величина массы измерительного осциллятора; ω_0 – его собственная частота. Величина отношения $\frac{E_F}{\varphi_0}$ для

металлов близка к единице. Так определяется «стандартный квантовый предел чувствительности по измеряемой силе. Он достигается при определенном значении туннельного тока преобразователя» [13].

Достаточно важным является механизм коррелированного туннелирования, которое заключается в туннелировании тока сквозь туннельные переходы со сверхмалой емкостью. Прохождение электронов через туннельный переход носит только дискретный характер. Так, «уменьшение размеров (поперечного сечения) туннельного перехода уменьшает его емкость C . Если $C = 1 \cdot 10^{-16}$ Ф, то даже изменение заряда на 1 электрон создает относительно большое изменение напряжения $\Delta V = \frac{e}{C} \approx 1,6 \cdot 10^{-3}$ В» [9].

Условия наблюдения коррелированного туннелирования электронов:

«(1) $\frac{e^2}{2C_T} \gg k_B T$ – обеспечивает слабое влияние хаотических перескоков через туннельный барьер за счет тепловых флуктуаций;

(2) $\frac{e^2}{2C_T} \gg \frac{\hbar\omega}{2}$ – обеспечивает слабое влияние квантового шума» [9].

Подставляя в (2) значение характерной частоты туннельного перехода $\sim (R_T C_T)^{-1}$, где R_T – сопротивление туннельного перехода, получаем:

$$R_T > R_Q = \frac{2\pi\hbar}{e^2} = 25812,807 \dots \text{ Ом},$$

значение так называемого кванта сопротивления. Изменение электрической энергии ΔE емкости перехода при изъятии или добавлении одного электрона описывается выражением: $\Delta E = \frac{(Q \pm e)^2}{2C} - \frac{Q^2}{2C}$, откуда следует: «если заряд на емкости перехода заключен в интервале $-\frac{e}{2} < Q < +\frac{e}{2}$, то туннелирование одного электрона может только увеличить энергию перехода. Поэтому туннелирование через переход сильно подавлено при напряжении на нем $V < \frac{e}{2C}$. Этот эффект называется кулоновской блокадой туннелирования» [14] и его также необходимо принимать во внимание.

Таким образом, при необходимом распределении по поверхности граничного слоя токов туннелирования – решается проблема процессов диффузии на границе раздела двух материалов, остаётся лишь поддерживать это состояние. При этом, также будет решаться проблема дислокации Френкеля-Конторовой, «предельным случаем, которой является "дырка" в кристаллической решётке. Одна из моделей движения дислокации в кристаллической структуре твёрдого тела заключается в том, что для переброса соседнего атома на пустое место нужно его "раскачать", чтобы он мог оторваться от окружающих его атомов. Легче перемещается дефект, в котором атомы вокруг "дырки" смещены» [15].

При рассмотрении длинного джозефсоновского перехода, стоит воспользоваться тем, что вдоль него может двигаться джозефсоновский вихрь (солитон), при этом перенося квант магнитного потока. Многосолитонные состояния, в которых переносятся целое число квантов магнитного потока, описываются нелинейным уравнением синус-Гордона [16]. А так как число квантов потока сохраняется, Джозефсоновский вихрь сравним с солитоном Френкеля. Я акцентирую внимание на них, потому что такие вихри обладают важным свойством: солитоны «цепляются» за неоднородности в изолирующем слое из диэлектрика и, для того чтобы сдвинуть их, придётся прикладывать довольно большое внешнее напряжение. Получается, что такие солитоны можно успешно накапливать и даже пересылать вдоль перехода – эта интересная особенность может найти применение и в технологии контроля старения материалов. Например, опираясь на подробную карту поверхности материала, можно специально создавать, при изготовлении изолирующего слоя, такие неоднородности в определённых местах, чтобы при совмещении всех элементов, происходила взаимная компенсация неоднородностей самих материалов, при этом закреплённый квант магнитного потока воздействует на обе поверхности.

4. Заключение

Таким образом, в работе были достигнуты все поставленные цели, при этом были получены важные результаты:

1. Дано общее представление о процессах старения и предложено решение связанных с ними проблем различного рода.
2. Установлен характер сверхпроводимости на качественном уровне.
3. Описан один из ключевых механизмов технологии: туннелирование.
4. Подробно разобраны эффекты Джозефсона и следствия из них.
5. Составлены и обоснованы рекомендации применения предложенного механизма на практике.
6. Приведены важные в учёте при реализации технологии, формулы и выполнены соответствующие расчёты.

Подводя итог, я уверен, что технология контроля старения материалов найдёт широкое применение при внедрении совокупности разработанных механизмов в космическую отрасль, в частности – это может быть конструирование основных узлов электроники на базе собранных в этой и других работах данных, и новой идеи применения закономерностей туннелирования. Только важно принимать во внимание тот факт, что при описанном механизме туннелирования, влиянием собственного магнитного поля токов внутри контакта на сверхток мы пренебрегаем; в противном случае, вместо разности сверхпроводящих фаз должно фигурировать калибровочно-инвариантное выражение, включающее в себя векторный потенциал. Разработанная теоретическая база закладывает фундамент технологических инноваций в данной отрасли. Развитие технологий подобного класса способно расширить границы наших возможностей, тем самым, оно позволяет выглянуть за горизонт науки, преодолеть технологический барьер и дотянуться до запретных вершин.

Литература

1. *Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П.* Материаловедение. – Москва: Машиностроение, 1990.
2. *Шмидт В.В.* Введение в физику сверхпроводников. – Москва: МЦНМО, 2000.
3. *Киттель Ч.* Введение в физику твёрдого тела / Пер. с амер. – Москва: Наука, 1978. – 791 с.
4. *Шарвин Д.Ю., Шарвин Ю.В.* Квантование магнитного потока в цилиндрической плёнке из нормального металла // Письма в ЖЭТФ, Т. 34(5). – 1981. – С. 285-288.
5. *Васильев Б.В.* Сверхпроводимость, сверхтекучесть и нулевые колебания. – Москва: LennexCorp, 2013.
6. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика, Статистическая физика. Часть 1, Т. 5. – Москва: Наука, 1976.
7. *Vasiliev V.V., Luboshits V.L.* Virial theorem and some properties of the electron gas in metals // Physics-Uspekhi, Т. 37, 1994.p. 345.
8. *Кресин В.З.* Сверхпроводимость и сверхтекучесть. – Москва: Наука, 1978.
9. *Митрофанов В.П.* Методы прецизионных физических измерений, основанные на квантовых эффектах. – Москва: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010.
10. *Асламазов Л.Г., Ларкин А.И.* Эффект Джозефсона в точечных сверхпроводящих контактах // Письма в ЖЭТФ Т. 9(2), 1969. – С. 150–154.
11. *Тростянская Е.Б., Бабаевский П.Г., Виноградов В.М., Головкин Г.С.* Термопласты конструкционного назначения. – Москва: Химия, 1975.
12. *Гольданский В.И.* Явление квантового низкотемпературного предела скорости химических реакций // Успехи химии. – Т. 44,12. – 1975. – С. 2121-2149.
13. *Braginsky V.B., Vorontsov Y.I., Thorne K.S.* Quantum Nondemolition Measurements // Science, 1980. V. 209. P. 547.
14. *Likharev K.K.* Single-Electron Devices and Their Application // Proc. IEEE. 1999; V. 87. P. 606-632.

15. *Браун О.М.* Модель Френкеля — Конторовой. Концепции, методы, приложения. — Москва: Физматлит, 2008.
16. Zamolodchikov A.B. Factorized S-matrices in two dimensions as the exact solutions of certain relativistic quantum field theory models // *Annals of Physics*, 1979. V. 120. No. 2. P. 253-291.