

а N_{\max} — максимальное количество ионов O (значения указаны на рисунке) на какой-то глубине. Из сравнения гистограмм распределения примеси по глубине подложки с гистограммами распределения дефектов (ПВА) следует, что примесь находится полностью в зоне радиационных нарушений. Величина среднего проецированного пробега R_p ионов O с $E = 50$ кэВ в $YBa_2Cu_3O_{7+\delta}$ составляет 0.1 мкм, в $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ — 0.066 мкм и в $Bi_2Pb_{0.6}Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$ — 0.072 мкм.

Имеющиеся представления о механизме переноса заряда указывают на то, что наибольшее число смещений в подрешетке кислорода при бомбардировке может быть одной из основных причин деградации критических параметров и потери сверхпроводимости в высокотемпературных пленках сверхпроводников.

Список литературы

[1] Lindhard J. // Matematisk fysiske. Medd Dan Vid. Selsk. 1965. Vol. 34. N 14. P. 1–135.

Нижегородский университет
им. Н.И.Лобачевского
НИФТИ

Поступило в Редакцию
12 января 1993 г.
В окончательной редакции
6 мая 1993 г.

12
© 1993 г.

Журнал технической физики, т. 63, в. 11, 1993

ОБ ЭФФЕКТЕ ГУБЕРА

Н.Н.Синельников

Уже более тридцати лет прошло после открытия Ж.Губером [1] эффекта, однако немногие знают о его существовании и до сих пор нет единого мнения о механизме эффекта Губера.

Эффект заключается в следующем: если через металлические колесо и опору пропустить электрический ток (переменный или постоянный) и придать колесу начальную скорость, то возникнет сила, действующая на колесо в направлении движения. Простейшей системой, в которой возникает эффект Губера, является колесная пара на рельсах (рис. 1) (ток при этом подводится к рельсам). О силе эффекта говорит тот факт, что сам Губер использовал его для передвижения железнодорожных вагонов при сортировке и сцепке.

Позднее был предложен двигатель, состоящий из одного шарикоподшипника, где ток подводится к внешней и внутренней обоймам [2] (рис. 2), а затем двигатель из двух подшипников качения на одной оси, где ток подводится к внешним обоймам (1967 г., Р. Мильрой) [3] (рис. 3).

Сам Губер считал, что эффект вызывается электромагнитными силами. Однако более подробное рассмотрение исключает такую возможность. Эффект не зависит от направления движения, от места подключения источника тока и направления тока. Ни одна из электромагнитных сил не может вызвать такой эффект. Авторы [2] объясняли работу своего двигателя деформациями, возникающими при нагреве элементов

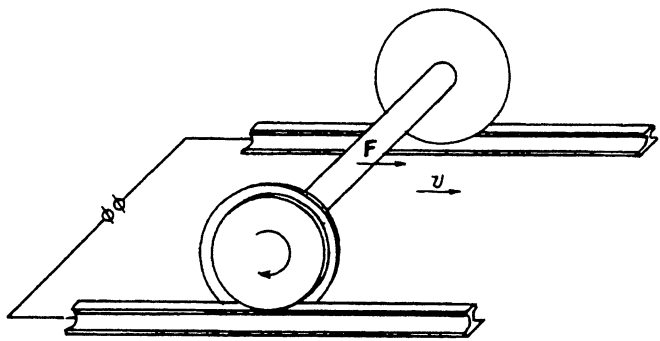


Рис. 1.

двигателя протекающим током (рис. 4). Ниже приводятся результаты, полученные при изучении установки типа двигателя Мильроя со следующими параметрами: диаметр подшипников около 25 мм, число шариков в подшипнике 12, масса ротора около 100 г.

Из теории упругих деформаций [4] известно, что радиус зоны контакта находится по формуле

$$a = 1.5 \cdot (1 - \eta) \cdot F \cdot R / E, \quad (1)$$

где η — коэффициент Пуассона; F — сила, прижимающая шарик к направляющей; R — радиус шарика; E — модуль Юнга.

Для стали $\eta \approx 0.25-0.3$, $E \approx 2200$ ГПа. При приведенных выше параметрах установки $a \approx 10$ мкм. При этом практически все тепло выделяется в зоне контакта. Возникает деформация шарика и направляющей, и шарик скатывается на новый участок. Решение задачи о линейном тепловом расширении полупространства при выделении тепла в плоском слое на поверхности приводит к формуле

$$h = P \cdot \alpha \cdot t / (c \cdot d \cdot S), \quad (2)$$

где h — высота деформации; α — коэффициент линейного теплового расширения материала; c — его удельная теплоемкость; d — плотность; P —

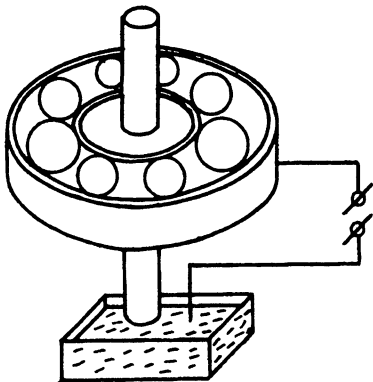


Рис. 2.

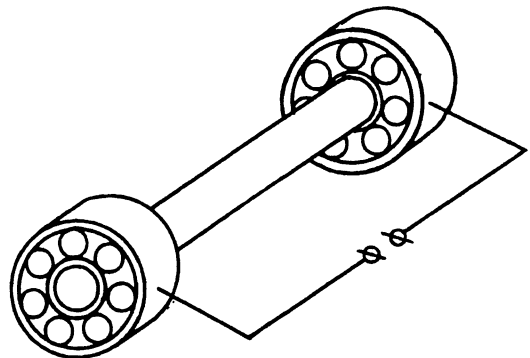


Рис. 3.

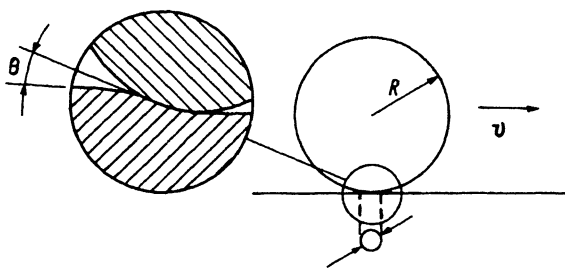


Рис. 4.

подводимая мощность; S — площадь контакта; t — время; $P \cdot t/S$ — тепло, выделившееся на единичной площади; $c \cdot d$ — теплоемкость единицы объема.

Тепло распространяется в одном направлении (в глубь материала). Формула (2) непосредственно следует из линейности теплового расширения. Разумеется, при изменении температуры в широких пределах ($\approx 1000^\circ \text{C}$) зависимость расширения от температуры не будет линейной, однако эта формула годится для оценки величины деформации.

Значения коэффициента $\alpha/(c \cdot d)$ для некоторых материалов следующие (α — при 25°C): железо — $3 \cdot 10^{-6}$, медь — $5 \cdot 10^{-6}$, алюминий — $10 \cdot 10^{-6}$ см \cdot К/кДж.

Можно легко показать, что при наблюдаемой скорости вращения (около 1000 об/мин при токе 10 А и напряжении приблизительно 2 В) материал шарика и направляющей успевает прогреться в зоне контакта только в слое толщиной несколько мк. Следовательно, в первом приближении модель плоского слоя применима при нагреве. После нагрева деформация относительно медленно рассасывается за счет теплоотвода в стороны. В стационарном режиме до следующего нагрева деформация успевает рассосаться до первоначального уровня (пока этого нет, деформация и поток уходящего тепла возрастают). Температура деталей, при которой процесс становится стационарным, определяется теплопроводностью материала и теплоотводом с поверхности.

На основе этой модели можно попытаться оценить скорость вращения ротора. Будем считать, что двигатель не совершает работы и потери вызываются трением качения. В этом случае можно приравнять силу трения $F_{\text{тр}} = k \cdot N/R$ (k приблизительно 0.002 см, R — радиус шарика) проекции силы реакции направляющей (которая вызвана весом ротора) на направление движения

$$F_{\text{тр}} = N \cdot \theta = mg \cdot h/l = mg \cdot h/(v \cdot t), \quad (3)$$

N — сила реакции направляющей; θ — угол наклона; h — высота деформации; v — скорость движения; l — путь, пройденный за время t (длина зоны контакта).

В эту формулу подставляем h из формулы (2), после чего находим скорость движения. Расчет дает значение скорости, по порядку величины совпадающее с наблюдаемым.

По данным Губера сила резко уменьшается с увеличением скорости. Это легко объясняет данная модель: при увеличении скорости уменьшается высота деформации и, следовательно, сила (формула (3)).

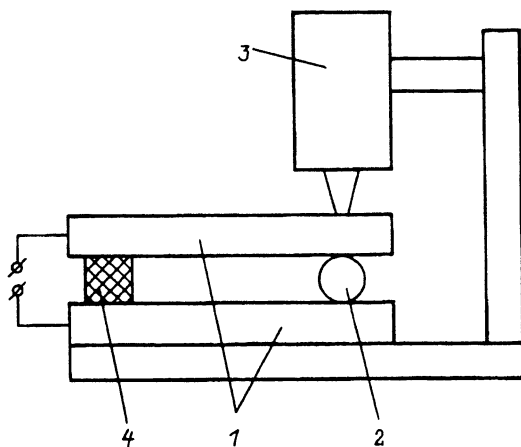


Рис. 5.

В 1973 г. группой авторов [5] была предложена другая модель эффекта Губера: при качении шарика возникает несимметричный искровой разряд (в основном позади шарика), воздух резко нагревается разрядом, давление позади шарика повышается и шарик катится вперед. При этом считается, что нагрев металла в зоне контакта ничтожно мал, а температура практически одинакова по всему кольцу при быстром вращении, так как скорость рассасывания перегревов в стали слишком мала. В случае медных подшипников, напротив, температура быстро выравнивается за счет высокой теплопроводности.

Не ясно, как в этой модели оценить величину эффекта и как такая модель объясняет резкое уменьшение силы с увеличением скорости. Приведенные аргументы против объяснения эффекта на основе теплового расширения не слишком убедительны по следующим причинам.

1) Нагрев в точке контакта достаточно сильный (по расчету до точки плавления на поверхности).

2) Скорость рассасывания перегревов влияет при достаточно большой скорости движения и, следовательно, малой глубине прогрева, только на значение температуры в зоне контакта, но не на высоту деформации (в стационарном режиме работы).

3) Высота деформации зависит от коэффициента $\alpha/(c \cdot d)$ в формуле (2), который слабо зависит от материала.

Дополнительным свидетельством справедливости данной модели может, по-видимому, служить простой эксперимент, подтверждающий величину тепловой деформации зоны контакта между шариком и обоймами (рис. 5). При подаче переменного напряжения к закаленным пластинам 1 цепь замыкается через шарик 2 (диаметр ≈ 7 мм). Тепловая деформация зоны контакта между шариком и пластинами легко измеряется индикатором микронных перемещений 3. Величина деформации $\approx 1-3$ мкм при токе 5–10 А. Пластины крепятся к изолятору 4.

Таким образом, модель эффекта Губера на основе теплового расширения зоны контакта при нагреве деталей протекающим током (“бегущая волна теплового расширения, преследующая шарик” [5]) не имеет существенных недостатков и хорошо согласуется с экспериментальными данными, что позволяет считать, что эффект Губера действительно обусловлен тепловым расширением.

- [1] Huber J. // *EuM*. 1959. Н. 8. S. 169–174.
 [2] Косырцев В.В., Рябко В.Д., Вельман Н.Н. А.С. № 155216. БИ. 1963. № 12-2.
 [3] Milroy R.A. // *Discussion "J. of Appl. Mech."* 1967. P. 525.
 [4] Hutte. *Справочник для инженеров, техников и студентов*. 1933. Т. 2.
 [5] Полюванов К.М., Нестушиц А.В., Татарина Н.В. // *Электричество*. 1973. № 8.

Московский
 физико-технический институт

Поступило в Редакцию
 25 марта 1993 г.

03;04;07;12
 © 1993 г.

Журнал технической физики, т. 63, в. 11, 1993

ОЧИСТКА И ЛЕГИРОВАНИЕ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АЭРОЗОЛЬНОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ

*Е.М.Дианов, А.С.Коряковский, В.М.Марченко, В.Ф.Лебедев,
 В.Г.Пименов, А.М.Прохоров*

Введение

При взаимодействии непрерывного лазерного излучения на длине волны 10.6 мкм интенсивностью 1–10 кВт/см² с кварцевым стеклом на его поверхности возникает эрозионный факел [1]. Вследствие большого коэффициента поглощения ($\sim 10^{-3}$ см⁻¹ [2]) и малой теплопроводности поверхность кварцевого стекла нагревается до температуры кипения (3070 ± 75 К) и происходит интенсивное диссоциативное испарение SiO₂ [3–5]. В результате возникает реактивная газовая струя, в которой по мере охлаждения наступает объемная конденсация и агломерация частиц до субмикронных размеров, газовый поток становится аэрозольным.

Условия формирования стационарного управляемого лазерного факела описаны в [6]. Анализ энергобаланса на границе мишени на основе уравнений сохранения, подтвержденный экспериментами, позволил установить высокую эффективность энергопереноса в эрозионном лазерном факеле: удельные затраты энергии лазерного излучения на испарение порядка 0.5 кВт/г/мин при КПД использования около 50% в неоптимальных условиях. При использовании промышленного электро-разрядного лазера ИЛГН-709 с мощностью многомодового излучения до 100 Вт производительность процесса испарения достигала 0.2 г/мин [6–8].

Компактность, экологическая чистота и высокая энергетическая эффективность лазерной аэрозольной дистилляции (ЛАД) по сравнению, например, с эффективностью выращивания тонких пленок путем испарения материала импульсными лазерами [9,10] определяют перспективность метода ЛАД для синтеза в лазерном факеле высокочистых тугоплавких оксидных материалов в виде субмикронных порошков, пористых (в том числе керамических) и стеклообразных покрытий и объемных изделий. Методом ЛАД были синтезированы пористые и стеклообразные покрытия из кварцевого стекла площадью в десятки см² и изделия объемом в несколько см³ с КПД осаждения 30–60% [7,8].