

ИНИЦИИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ПРОВОЯ  
В ВАКУУМНЫХ ДИОДАХ С ЭЛЕКТРОДАМИ  
ИЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

В.Г. М е с я ц, С.И. Ш к у р а т о в

В электрофизических устройствах, работающих при криогенных температурах, вакуум играет роль электрического и термического изолятора. Исследования инициирования вакуумного пробоя при криогенных температурах электродов [1] показали, что сверхпроводящее состояние  $Nb$  катода не влияет сколько-либо затменно на запаздывание пробоя, а охлаждение катода от 300 до 4,2 К ведет к монотонному росту предельных токов и времени запаздывания взрыва катодных микроострий вследствие уменьшения джоулевой диссипации и увеличения роли теплоотвода. Новые высокотемпературные оксидные сверхпроводники (ВТСП) значительно отличаются по своим теплофизическим и механическим свойствам от материалов, традиционно используемых в электрофизических установках. В настоящей работе предпринято изучение импульсной электрической прочности ВТСП катодов при различных температурах.

Эксперименты проводились в камере из нержавеющей стали, согласованной по волновому сопротивлению с передающей линией. Катод охлаждался погружением камеры в сосуд Дьюара с жидким азотом или гелием. Конструкция катодного узла позволяла изменять температуру катода от 4,2 до 300 К. Вакуум в камере был не хуже  $10^{-7}$  Па. В экспериментах использовался генератор прямоугольных импульсов высокого напряжения длительностью 10–1300 нс с фронтом 2 нс и амплитудой до 50 кВ. Катоды представляли собой конусы с радиусом при вершине 50–100 мкм, изготовленные механически из ВТСП керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  с температурой перехода  $T_C=92$  К ( $\Delta T_C=2-3$  К), а также монокристаллы  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$

в виде пластинок размером  $3 \times 0.2 \times 0.02$  мм. Анодом служил диск диаметром 5 мм из того же материала, что и катод. Поверхность катодов обследовалась в растровом электронном микроскопе.

После кондиционирования электродов импульсными дуговыми разрядами снимались зависимости времени запаздывания пробоя  $t_3$  от приложенного напряжения, значения которого затем пересчитывалось в значение напряженности макроскопического поля  $E$  между электродами. Необходимо отметить, что, во-первых, после кондиционирования импульсная электрическая прочность ВТСП катодов возрастала в 3-4 раза и становилась сравнимой с импульсной электрической прочностью  $W$  и  $Nb$  катодов. Во-вторых, после кондиционирования практически невозможно было снять статическую вольт-амперную характеристику. При очень медленном повышении напряжения на диоде сначала следовали броски тока на уровне  $10^{-9}$  -  $10^{-6}$  А, затем ток резко возрастал и возникал микроразряд (причем при напряжениях в 8-10 раз ниже импульсных пробивных напряжений). Это обусловлено либо механическими свойствами  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  катода, обработанного разрядами, либо влиянием продуктов эрозии. Время запаздывания пробоя определялось от момента прихода импульса на диод до начала роста тока, обусловленного образованием и расширением плазмы катодного факела. На рис. 1 приведены зависимости времени запаздывания пробоя  $t_3$  от напряженности макроскопического поля  $E$ . С повышением  $E$  от  $2 \cdot 10^6$  до  $10^7$  В/см  $t_3$  уменьшается до единиц наносекунд. Скорость движения плазмы катодного факела в межэлектродном пространстве, определенная из времени коммутации на осциллограммах тока пробоя, составляет  $(1.6-2) \cdot 10^8$  см/с, что сравнимо со скоростью движения плазмы хорошо исследованных металлов и не зависит от температуры катода. Дуга на ВТСП электродах горит устойчиво в течение сотен наносекунд как при токах 300-400, так и 2-3 А. Унос массы с керамического катода при импульсных дуговых разрядах существенно больше, чем с  $Nb$  катода. Это видимо, обусловлено различием теплофизических и механических характеристик этих материалов.

$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  катоды имеют более высокое удельное сопротивление ( $\rho = 10^{-3} - 10^{-2}$  Ом·см), меньшую теплопроводность по сравнению с  $W$  и  $Nb$  катодами, что, видимо, и обуславливает низкую исходную электрическую прочность вакуумного диода с ВТСП электродами. Увеличение электрической прочности диода после кондиционирования, очевидно, связано с тем, что при переплавке поверхности керамического катода импульсными дуговыми разрядами в вакууме образуется диэлектрическая „корка“, ослабляющая электрическое поле на имеющихся под ней выступах (рис. 2). Охлаждение катода от 300 до 78 К ведет к росту электрической прочности в 2-2.5 раза [2]. Более детальное исследование показало, что этот рост носит монотонный характер (рис. 2). Это невозможно объяснить уменьшением джоулевой диссипации и ростом теплоотвода, как в случае металлических эмиттеров, потому что  $\rho$  и удельная теплопроводность  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  с понижением температуры от 300 до 94 К изменяются незначительно. Столь заметное влияние охлажде-

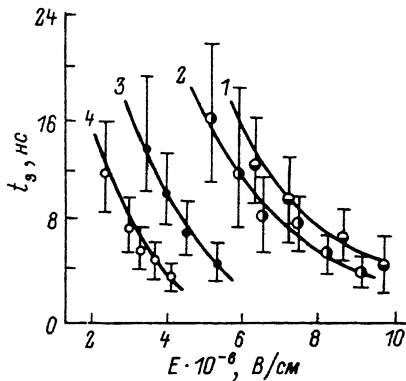


Рис. 1. Керамический катод  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ .  
 $T_K = 4.2$  К(1), 78 К(2), 150 К(3) и 300 К(4).

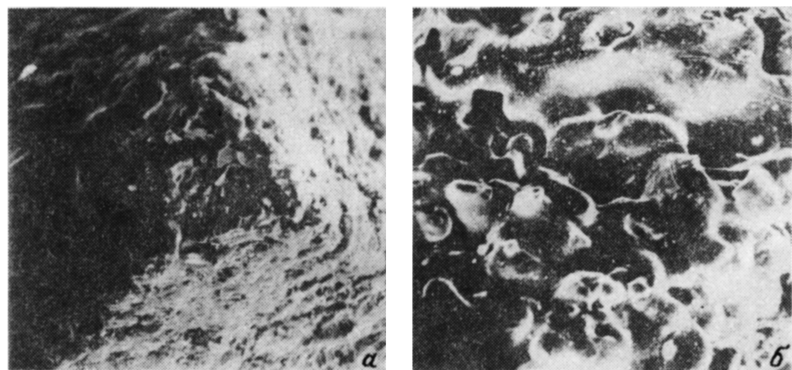


Рис. 2. Изображение поверхности  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  катода до (а) и после (б) обработки дуговыми разрядами.

ния на импульсную электрическую прочность связано с ростом предельных плотностей тока  $j_{пр}$  диэлектрической „корки”. Оценки показывают, что диэлектриков и полупроводников в 10–20 раз ниже  $j_{пр}$  металлов. Это согласуется с экспериментальными данными: уровень предпробного тока при  $t_s = 300\text{--}500$  нс в 8–10 раз меньше, чем в случае  $Nb$  катода, и составляет 2–3 мА.

Увеличение электрической прочности керамического катода происходит и в результате термообработки поверхности катода в вакууме. Статическая и импульсная электрическая прочность монокристаллического катода возрастают более, чем в 4–5 раз после бом-

бардировки катода инертных газов. Это связано либо со сглаживанием катодных микровыступов, либо с увеличением работы выхода поверхности катода.

Результаты экспериментов показывают, что инициирование импульсного вакуумного пробоя на ВТСП электродах имеет особенности по сравнению с обычными металлами. Формирование на поверхности катода диэлектрического покрытия делает возможным использование ВТСП катодов в высоковольтных электрофизических устройствах.

Благодарим Г.А. Месяца, В.Ф. Пучкарева за поддержку, полезные советы и обсуждение результатов.

### Л и т е р а т у р а

- [1] Пучкарев В.Ф., Шкуратов С.И. — Тез. докл. XX Всесоюзной конференции по миссионной электронике. Киев, 1987, т. II, с. 248.
- [2] Месяц В.Г., Шкуратов С.И. — Труды 1 Всесоюзного рабочего совещания по проблеме высокотемпературной сверхпроводимости. Свердловск, июль 1987, т. II, с. 248–250.

Институт электрофизики  
АН СССР, Свердловск

Поступило в Редакцию  
31 мая 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 16

26 августа 1988 г.

### ПРОХОЖДЕНИЕ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ *NaCl* — ЛАЗЕРА ЧЕРЕЗ КВАРЦЕВЫЙ СВЕТОВОД

Е.М. Д и а н о в , В.И. К о н о в ,  
В.П. П а ш и н и н , А.С. С и л е н о к

Широкие перспективы применения УФ излучения эксимерных лазеров в технологии и медицине требуют создания волоконно-оптических линий, способных передавать с малыми потерями импульсно-периодическое излучение большой средней мощности. Поскольку возможность увеличения энергии  $W$  каждого отдельного импульса серии ограничена разрушением волокна или нелинейным поглощением в нем излучения [1, 2], естественным путем существенного увеличения средней мощности излучения, передаваемого по волокну заданного сечения, представляется повышение частоты  $f$  следования лазерных импульсов.

В настоящей работе обнаружен и исследуется эффект самоограничения с ростом  $f$  мощности излучения с длиной волны  $\lambda = 308$  нм, транспортируемого через световод из кварцевого стекла.