

УДК 537.312.62 : 621.315.592

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦЫ СВЕРХПРОВОДНИК—КРЕМНИЙ

Н. И. Кривко

В структуре сверхпроводниковая пленка—кремний—алюминий при переходе сверхпроводника (свинец, ниобий) в нормальное состояние скачком изменяется сопротивление кремния. По сравнению с разностью потенциалов на границе сверхпроводник—нормальный металл (10^{-6} — 10^{-9} В) скачок потенциала на границе сверхпроводник—кремний значительно больше (0.2—2.5 В) зависит от знака напряжения смещения и концентрации носителей. Для кремния с концентрацией носителей 10^{19} см $^{-3}$ скачок потенциала отсутствует.

На границе раздела сверхпроводник—нормальный металл, как показано в работах [1, 2], возникает при протекании транспортного тока локализованный заряд. Соответствующая разность потенциалов (10^{-6} — 10^{-9} В) была измерена в экспериментах [3, 4].

В данной работе представлены результаты экспериментального изучения свойств границы раздела сверхпроводник—кремний. Кроме указанной аналогии, задача актуальна тем, что изучаемая структура сверхпроводниковая пленка—полупроводник—нормальный металл является одним из основных модулей криоэлектроники.

Общий результат исследования заключается в наблюдении ряда явлений, связанных со скачкообразным изменением электрических свойств границы раздела и самого кремния при переходе сверхпроводника в нормальное состояние.

Основное наблюдаемое явление — скачок сопротивления кремния при фазовом переходе металла. Опыты показали, что транспортный ток через границу раздела является, по-видимому, определяющим условием для возникновения такого скачка, хотя пороговая величина тока в различных структурах отличается в широких пределах.

Скачок сопротивления кремния возникает на начальном этапе перехода сверхпроводника. Если имеется гистерезис в обратном переходе металла, этот гистерезис проявляется и в скачке сопротивления полупроводника. Если при определенных условиях возникают осцилляции сопротивления сверхпроводниковой пленки, то наблюдаются и соответствующие осцилляции напряжения и тока на кремнии.

Было исследовано более 200 образцов на основе кремния *n*- и *p*-типа. Скачок сопротивления и сопровождающие его явления наблюдаются только для структур на основе кремния с концентрацией носителей 10^{14} — 10^{15} см $^{-3}$ и отсутствуют для кремния с концентрацией носителей при комнатной температуре 10^{19} см $^{-3}$.

Образцы были изготовлены напылением свинца или ниобия на кремниевые подложки толщиной 0.3—0.5 мм (отдельные образцы 1.4 мм). Толщина свинцовых пленок 100—500 нм, ниобиевых — 30—300 нм. Средние размеры образцов 20×4 мм. Омическим контактом ко второй поверхности кремния служила алюминиевая пленка толщиной 500 нм. Использовались различные типы контактов к сверхпроводниковым пленкам — алюминиевые, напыленные в вакууме, прижимные из бронзы,

индиевые и т. п. Изучались влияние распределения тока по сверхпроводниковой пленке и пленке нормального металла, режим стабилизации источников питания и т. п. и было показано, что результаты не зависят от изменения указанных условий.

При измерениях сверхпроводящего перехода использовался четырехзондовый метод. Опыты проводились как в криостате, так и в гелиевом транспортном дюаре. Температура ниже 2.19 К получалась откачкой гелия из криостата. Температура выше 4.2 К в том случае, когда образец находился в ампуле, герметически закрытой от жидкого гелия, могла изменяться с помощью печки. Измерения температуры проводились с помощью угольного термометра.

Для каждого образца при температуре ванны 4.2 К записывалась вольтамперная характеристика (ВАХ), т. е. зависимость напряжения на структуре от транспортного тока через структуру. Полная ВАХ представляет собой сложную кривую. На рис. 1 (сплошная кривая) выделен участок ВАХ, близкий к переходу пленки от тока через структуру. При

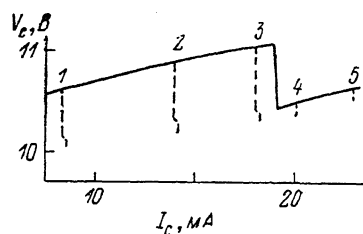


Рис. 1. ВАХ структуры ниобий—кремний—алюминий.

V_c — напряжение на структуре, I_c — транспортный ток через структуру. Штриховые линии — изменение ВАХ при подъеме из ванны.

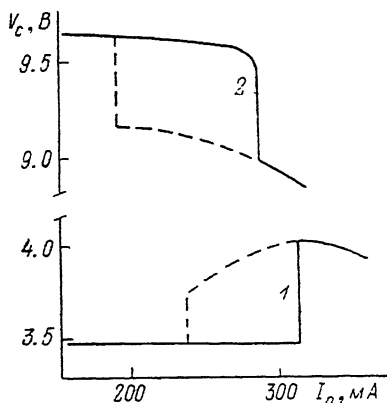


Рис. 2. Зависимость напряжения V_c на структуре ниобий—кремний—алюминий от тока I_n , протекающего по пленке ниобия.

Штриховые линии — обратный ход в нормальное состояние.

некотором значении мощности, выделяемой током, происходят переход пленки в нормальное состояние и одновременный скачок тока и напряжения на структуре. После скачка ВАХ изменяется монотонно, с другим наклоном, чем до перехода. Это свидетельствует, во-первых, об изменении сопротивления кремния и, во-вторых, о том, что при скачке ВАХ пробы структуры не происходит.

В большинстве случаев сопротивление кремния для нормального состояния металла меньше, чем для сверхпроводящего (наблюдаются скачок напряжения в сторону уменьшения на 0.2—2.5 В и скачок тока в сторону увеличения на 0.1—0.5 мА и соответствующее изменение наклона), однако примерно для 10 % структур сопротивление кремния уменьшается при одном знаке напряжения смещения (т. е. полярности пленки относительно кремния) и увеличивается при другом, или наблюдается только при одном знаке. Корреляции с типом проводимости кремния не установлено. Напряженности полей, при которых происходит переход, $(2\div 6) \cdot 10^2$ В/см, плотности тока $2 \cdot 10^{-3}$ — $3 \cdot 10^{-2}$ А/см². Величина скачка напряжения для структур со свинцовыми пленками больше на 20—40 %, чем для структур с ниобиевыми пленками той же площади при прочих равных условиях.

ВАХ структуры при многократных повторениях хорошо воспроизводятся, весьма стабильна. Перехода пленки и соответствующего скачка ВАХ не происходит, если напряжение на образце, находящемся в ванне жидкого гелия, отличается всего на 0.1—0.2 В от критического. Мощность, рассеиваемая в структуре в момент перехода, 100—300 мВт для образцов со свинцовыми пленками, 200—500 мВт для образцов с ниобиевыми. Из сравнения величины скачка напряжения (0.2—2.5 В для раз-

личных структур) с разностью потенциалов на пленке в нормальном состоянии (0.1—0.3 мВ для свинцовых пленок, 2—5 мВ для ниобиевых) можно заключить, что возникновение потенциала на пленке не является причиной скачка ВАХ.

Следует отметить, что в ряде случаев одновременно с переходом сверхпроводниковой пленки наблюдается скачок потенциала на пленке алюминия, образующей электрод на второй поверхности кремния. Этот скачок не зависит от распределения тока по пленке, происходит чаще всего в сторону уменьшения сопротивления алюминия на 5—8 %, т. е. как если бы происходило уменьшение температуры пленки.

Если поднимать из ванны с жидким гелием ячейку с образцом при заданных напряжениях смещения (точки 1—3 на рис. 1) в область температур 40—50 К, то за скачком напряжения на структуре следует слабое изменение ВАХ, связанное с отогревом кремния (штриховые кривые на рис. 1). Подъем структуры с пленкой, находящейся в нормальном состоянии (точки 4, 5 на рис. 1), приводит только к слабому изменению напряжения без скачка. Этим методом можно определить величину скачка напряжения при различных транспортных токах.

В магнитном поле, параллельном плоскости пленки, скачок сопротивления кремния при переходе с увеличением начального значения транспортного тока происходит все в меньших магнитных полях.

Однако существует некоторое пороговое значение тока, меньше которого переход в магнитном поле не сопровождается таким скачком. При полях выше критического (для свинцовых пленок) скачка ВАХ не наблюдается.

Изучение ВАХ при температурах ниже 2.19 К, когда существенно изменяется теплоотдача от системы, показало, что скачок напряжения при температуре ванны 1.8—1.9 К в 2—3 раза больше, чем при 4.2 К, а критическая мощность увеличивается только на 15—20 %.

Переход пленки в нормальное состояние под влиянием критического тока также сопровождается скачком сопротивления кремния. На рис. 2 показано изменение напряжения на структуре ниобий—кремний—алюминий в зависимости от тока, протекающего по пленке ниобия. Кривая 1 относится к случаю малого транспортного тока (10^{-4} А/см²), кривая 2 — большого тока ($8 \cdot 10^{-3}$ А/см²). Увеличение тока через структуру, таким образом, не только сдвигает начало перехода, но и изменяет направление скачка. Для сверхпроводящего состояния пленки напряжение на кремнии практически не зависит от тока по пленке ниобия. После перехода такая зависимость становится существенной.

Таким образом, наблюдаемый скачок ВАХ во всех случаях может быть связан с переходом сверхпроводниковой пленки.

Последующие эксперименты были направлены для выяснения причины скачка ВАХ: определяется ли такой скачок фазовым переходом металла или является следствием изменения температурного режима структуры в связи с изменением теплоемкости и теплопроводности металла при переходе?

Уже сравнение (рис. 1, 2) тепловых мощностей, выделяемых при различных условиях перехода (300 мВт под действием собственного тока, 70 мВт при переходе под действием критического тока совместно с транспортным током и 10 мВт при малом транспортном токе), показывает, что тепловые эффекты не являются определяющими для скачка сопротивления кремния. Другие участки ВАХ могли быть исследованы с помощью метода локального нагрева пленки. Такой нагрев осуществлялся транспортным током через вторую структуру с нормальными электродами, расположенную накрест по отношению к основной и контактирующей с последней. Контакт сверхпроводниковой пленки основной структуры с алюминиевой пленкой дополнительной структуры осуществлялся либо непосредственно, либо через тонкую индиевую прокладку. Проверка качества контакта заключалась в полном воспроизведении ВАХ при подключении к любому из четырех выходных контактов. Опыты показали, что изменения ВАХ

в области перехода одинаковы при любой процедуре — как при увеличении тока в дополнительной структуре при заданном токе в основной, так и наоборот. Влияние локального нагрева состоит в том, что переход сверхпроводника и соответствующий скачок напряжения и тока происходят при меньших значениях тока в основной структуре. Вне области перехода ВАХ остается неизменной, т. е. влияние нагрева самого кремния является несущественным. С помощью локального нагрева можно определить величину скачка напряжения при различных токах в основной структуре (рис. 3). Эта зависимость полностью аналогична той, которая получается при подъеме образца над ванной жидкого гелия или под влиянием перехода при критическом токе по пленке.

Аналогично изучались системы, когда две структуры находились в контакте через сверхпроводниковые пленки (ниобий—ниобий, ниобий—свинец, свинец—свинец) либо когда две структуры были образованы пленками ниобия, сформированными на одной поверхности кремния, так, что между ними имелся зазор 3—4 мм — полоска чистого кремния. Аллюминие-

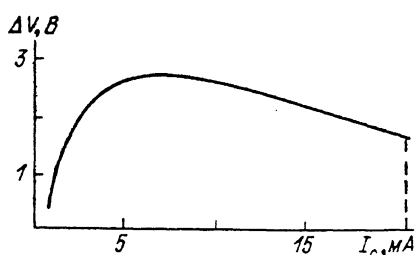


Рис. 3. Величина скачка напряжения ΔV для структуры свинец—кремний—алюминий при различных транспортных токах I_c .

Штриховая линия — величина скачка при переходе от собственного тока.

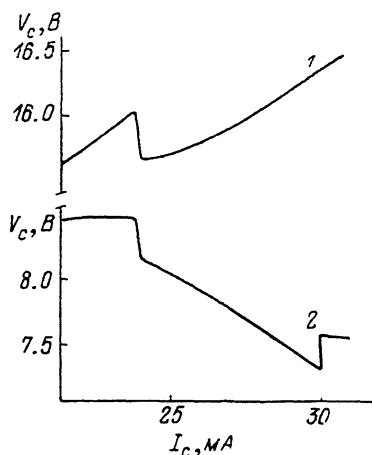


Рис. 4. Структуры на одной кремниевой подложке: ВАХ структуры, ток через которую изменяется (1); изменение напряжения V_0 на структуре с заданным током (2).

вый электрод на второй поверхности был общим. Оба варианта показали сходные результаты.

Взаимное влияние ВАХ вне области перехода отсутствует для большинства контактирующих структур. На рис. 4 показана зависимость напряжений на структурах от транспортного тока через одну из них. В другой структуре от независимого источника питания задан малый транспортный ток. Вначале наступает переход пленки в той структуре, ток в которой увеличивается. Он сопровождается скачком напряжения в этой структуре (кривая 1) и скачком напряжения в структуре с малым током (кривая 2). Однако пленка во второй структуре остается полностью в сверхпроводящем состоянии. Так, при контакте ниобия со свинцом первым происходит переход ниобия, а свинцовая пленка остается сверхпроводящей. При дальнейшем увеличении тока наступает переход второй пленки и соответствующий скачок напряжения (скачок вверх на кривой 2, рис. 4). Направления скачков в каждой из структур определяются знаками только собственного напряжения смещения. Если структуры разделить тонкой диэлектрической прокладкой, то скачки разделяются — наблюдается по одному скачку (соответственно переходу собственной пленки). Если в обеих структурах транспортный ток достаточно велик, то имеет место одновременный переход пленок и одновременный скачок ВАХ.

Были сделаны опыты, когда теплоотвод от системы существенно отличался от теплоотвода в ванне с жидким гелием. Если структуру поместить в экран, изолирующий ее от жидкого гелия, и нагревать с помощью печки

или некоторым транспортным током, то наблюдается следующее. После установления некоторого значения тока начинается медленное повышение температуры и слабое изменение напряжения на структуре. Этот процесс занимает 5—15 с в зависимости от установленного значения транспортного тока.

Затем происходит переход пленки, скачок напряжения на структуре и скачок температуры (по показаниям термометра, прижатого к пленке). Вслед за таким скачком начинается обратное медленное изменение температуры и обратное изменение напряжения на структуре. Для ряда структур такая релаксация приводит (как для ниобия, так и для свинца) к обратному переходу пленки в сверхпроводящее состояние, скачку напряжения на структуре и скачку (понижению) температуры. Возникают спонтанные осцилляции напряжения на образце и температуры (0.5—0.8 К по показаниям термометра) со строгой периодичностью (10—30 с), полностью синхронные с осцилляциями сопротивления пленки. На рис. 5 показаны установив-

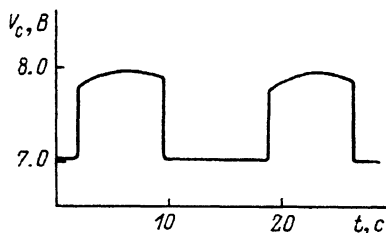


Рис. 5. Запись осцилляций напряжения в установившемся режиме для структуры ниобий—кремний—алюминий.

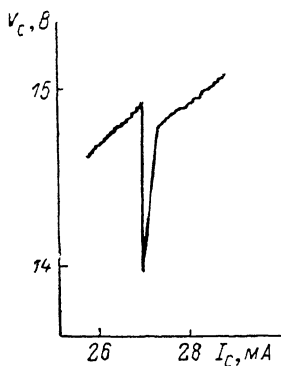


Рис. 6. Запись высокочастотного сигнала после детектора.

По осям — параметры постоянной ВАХ структуры свинец—кремний—алюминий.

шиеся осцилляции для структуры с ниобиевой пленкой. Отношение времени пребывания пленки в нормальном состоянии ко времени пребывания в сверхпроводящем зависит от устанавливаемой величины транспортного тока. С увеличением начального тока это отношение увеличивается, а при еще больших значениях после медленного нагрева происходят необратимый переход пленки в нормальное состояние, скачок напряжения и температуры. Область рассеиваемой мощности, в которой эти осцилляции существуют, в зависимости от тока составляет 40—80 мВт.

Возникновение осцилляций можно объяснить исходя из того, что теплопроводность металла в нормальном состоянии существенно больше, чем в сверхпроводящем. Теплоотвод от системы в условиях, близких к адиабатическим, резко увеличивается при переходе, что приводит к охлаждению кремния и всей системы и к обратному переходу пленки в сверхпроводящее состояние. Температурная область таких осцилляций невелика, по-видимому, всего в несколько раз превышает температурную ширину перехода. Тем не менее изменение ВАХ проявляется резко, что еще раз подтверждает тот факт, что скачок сопротивления кремния является следствием фазового перехода металла.

Наконец, для ряда структур было проведено непосредственное исследование наличия локализованного заряда на границе раздела методом измерения высокочастотной емкости. В этом случае измеряются высокочастотный сигнал, прошедший структуру, и его изменение под действием напряжения смещения как следствие изменения емкости граничного слоя. В наших опытах высокочастотный сигнал (190 кГц, 100 мВ) через развязывающую емкость подавался на структуру и с выходного сопротивления регистрировался с помощью усилителя, детектора и самописца. На рис. 6

показана запись такого выходного сигнала. Скачок сигнала имеет место в момент перехода пленки. Основные зависимости такого скачка аналогичны приведенным: имеют место гистерезис, зависимость от знака смещения, скачок при критическом токе и отогреве пленки. Основной вклад в изменение сигнала происходит, по-видимому, от участия поверхностных состояний на кремнии.

В обсуждении экспериментальных результатов естественно следовать модели границы раздела сверхпроводник—нормальный металл, рассмотренной в работах [1, 2]. Граница раздела представляет собой некоторую протяженную область, в которой чисто нормальный ток (из глубины нормального материала) переходит в чисто сверхпроводящий (в глубине сверхпроводника). Ход потенциала в этой области будет зависеть как от параметров сверхпроводника и нормального материала, так и от величины тока через границу. Глубина области, в которой происходит падение потенциала, определяется проводимостью нормального материала. Для полупроводника эта область в случае малой концентрации носителей (10^{14} — 10^{15} см⁻³) захватывает значительно большую глубину, чем для контакта сверхпроводника с нормальным металлом. В большинстве случаев на поверхности кремния имеется также система поверхностных состояний, которая может как уменьшить, так и увеличить эту область.

При разрушении сверхпроводимости, очевидно, должны исчезнуть потенциал на границе и локализованный заряд, связанный с этим потенциалом. Изменение энергетического спектра в некоторых случаях может захватить всю глубину кремния и вызвать инжекцию носителей из второго электрода. Поскольку в компенсации локализованного заряда участвует большая часть полупроводника, то и скачок потенциала существенно (на несколько порядков) больше, чем для контакта сверхпроводника с металлом.

В заключение следует отметить, что для контактов сверхпроводника с полупроводником отмечается ряд аномалий: резкое увеличение сопротивления вблизи нулевого смещения [5], асимметрия в туннельных переходах [6], влияние разрушения сверхпроводимости на фотоэффект в кремнии [7].

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Rieger T. J., Scalapino D. J., Mercereau J. E. // Phys. Rev. Lett. 1971. V. 27. N 26. P. 1787—1790.
- [2] Артеменко С. Н., Волков А. Ф. // УФН. 1979. Т. 128. № 1. С. 3—30.
- [3] Yu M. L., Mercereau J. E. // Phys. Rev. Lett. 1972. V. 28. N 17. P. 1117—1120.
- [4] Clarke J. // Phys. Rev. Lett. 1972. V. 28. N 21. P. 1363—1366.
- [5] Вул Б. М., Заварицкая Э. И., Заварицкий Н. В. // ФТТ. 1966. Т. 8. № 3. С. 888—893.
- [6] Tsui D. C. // Phys. Rev. Lett. 1971. V. 27. N 9. P. 574—576.
- [7] Кривко Н. И. // ФТП. 1977. Т. 11. С. 2235—2237.

Московский институт
электронной техники
Москва

Поступило в Редакцию
6 декабря 1988 г.
В окончательной редакции
3 февраля 1989 г.