

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ ШНУРА ТОКА

M.Е.Алексеев, B.P.Сондаевский

24

Известные экспериментальные исследования (например, [1, 2]) содержат сведения о шнурах тока в полупроводниках только в стационарных условиях или делают выводы о кинетике на основании проявления эффектов во внешней цепи. В настоящей работе приведены результаты изучения процессов образования шнура и его перемещения в поперечном магнитном поле.

1. Для исследования распределения плотности тока j по сечению образца был разработан метод, основанный на измерении распределения напряжения U вдоль одного из контактов, имеющего малое продольное сопротивление. Из выражения для тока вдоль контакта и уравнения непрерывности в одномерном случае легко получить, что

$$j = \sigma_k \delta \frac{d^2 U}{dx^2},$$

где σ_k – проводимость контакта, δ – его толщина (ось координат x направлена вдоль контактов, см. рис. 1).

Считая, что проводимость образца σ_o постоянна, получаем

$$U = U_o \operatorname{sech} \frac{1}{2L} \operatorname{ch} \frac{2x - \ell}{2L},$$

где $L = \sqrt{\frac{\sigma_k}{\sigma_o}} h \delta$, ℓ – длина образца, а h – расстояние между контактами. Для получения этого выражения использовались граничные условия: $U(0) = U(\ell) = U_o$, т.е. ток подводится к краям контакта. При $L \gg \ell$ получаем квадратичное распределение напряжения вдоль контакта:

$$U = U_o \left(1 - \frac{x(\ell-x)}{2L^2}\right),$$

откуда $j(x) = \text{const}$. Таким образом в отсутствии шнура тока зависимость $U(x)$ имеет практически постоянную кривизну и экстремум при $x = \ell/2$.

При формировании шнура кривизна отдельных участков $U(x)$ резко изменяется, отражая процесс перераспределения плотности тока. Так как максимальная плотность тока будет в точке x_o с максимальной проводимостью, то в этой же точке будет и экстремум $U(x)$. Таким образом, точка x_o характеризует положение шнура тока.

2. В настоящей работе для образования отрицательного дифференциального сопротивления использовался механизм инжекционного пробоя электронного кремния с примесью золота с удельным сопротивлением $5 \cdot 10^4 \text{ ом} \cdot \text{см}$ при комнатной температуре. Образцы представляли собой полоски шириной 1 мм, толщиной (расстоянием между контактами) 0,2 мм

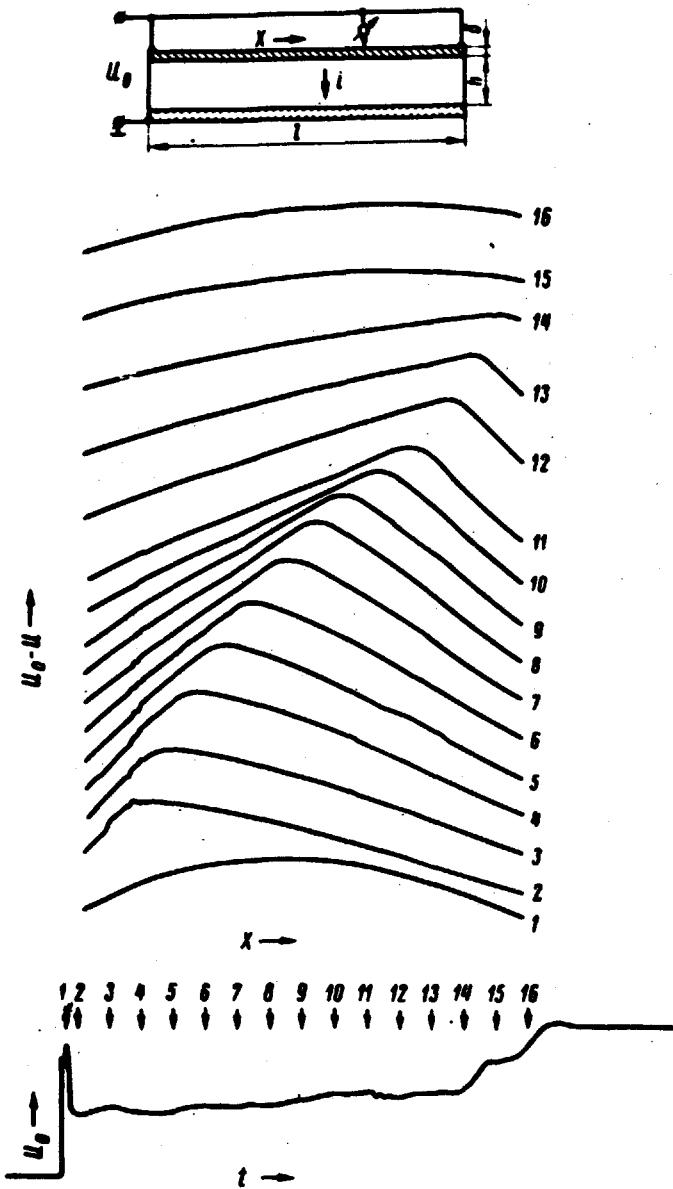


Рис. 1. Распределение напряжения $U_0 - U(x)$ вдоль контакта образца в поперечном магнитном поле $H = 2,3 \text{ кA}$ (крайние 1 – 16) в моменты времени, отмеченные стрелками на импульсе напряжения U_0 на образце (нижняя кривая). Запись кривых проведена на двухкоординатном потенциометре со стробоскопической приставкой. Масштаб $U_0 - 5 \text{ мВ/см}$, масштаб $x - 0,7 \text{ мм/см}$, масштаб $U_0 - 5 \text{ с/см}$ масштаб $t - 50 \text{ мксек/см}$, частота следования импульсов $U_0 - 70 \text{ Гц}$, сопротивление нагрузки – 4 к Ω . Использовалась система, линейно преобразующая x в электрический сигнал.

и различных длин до 25 м.м. Контакты изготавливались вжиганием алюминия и сплава золота с сурьмой на противоположные грани образца. Полное продольное сопротивление контактов составляло несколько ом.

Распределение напряжения по контакту $U(x)$ в заданный момент времени t измерялось с помощью электрического зонда диаметром 0,1 м.м и стrobоскопической системы, которая позволяла в процессе измерения $U(x)$ фиксировать момент t импульсной модуляции. Кроме того были измерены зависимости напряжения от времени при $x = \text{const}$.

При переключении в состояние с большей проводимостью импульс напряжения на образце в режиме, близком к режиму генератора тока, имеет ступенчатую форму, характеризующую время задержки при высоких напряжениях и время перехода в состояние при меньших напряжениях. Исследование распределения напряжения по контакту в моменты времени в течение задержки показало, что до переключения плотность тока равномерно распределена по сечению образца. При уменьшении напряжения происходит перераспределение плотности тока и образование шнура. После достижения напряжением на образце стационарного значения устанавливается распределение $U(x)$, экстремум которого характеризует положение образовавшегося шнура тока. При этом время образования шнура составляет несколько микросекунд.

3. Измерения, проведенные в поперечном магнитном поле, показали, что максимум наблюдаемого на зонде в точке x импульса напряжения $U_o - U(x)$ при изменении положения зонда смещается, указывая на перемещение области с максимальной плотностью тока. Данные, полученные из этих опытов, позволяют найти скорость перемещения шнура тока.

На рис. 1 (кривые 1 + 16) приведено семейство кривых $U_o - U(x)$, моменты измерения которых отмечены стрелками на импульсе напряжения U_o на образце (нижняя кривая на рис. 1). Кривые показывают, что до переключения плотность тока равномерно распределена по сечению образца (рис. 1, кривая 1). После образования шнура тока максимум $U_o - U(x)$, положение которого характеризует местонахождение области с максимальной плотностью тока, смещается с течением времени (рис. 1, кривая 2 + 14), свидетельствуя о перемещении шнура. При достижении конца образца (или другой встроенной неоднородности) напряжение на образце начинает расти, а шнур разрушается (рис. 1, кривые 15, 16), так как при этом увеличивается ток через остальную площадь образца. При прохождении шнура тока по образцу изменение напряжения U_o указывает на неоднородность свойств материала вдоль x .

Было обнаружено, что разрушение шнура на неоднородности материала приводит к возникновению его на прежнем месте, последующему перемещению и разрушению. Периодическое повторение этих процессов вызывает появление колебаний напряжения на образце в поперечном магнитном поле. При увеличении полного тока через структуру "толстый" шнур может проходить те неоднородности, на которых "тонкий" шнур разрушается.

4. Измерение кривых $U(x)$ в заданный момент времени позволяет однозначно определять положение шнура тока. На основании таких экспериментов на рис. 2 построена зависимость положения шнура тока x_0 от времени t для различных напряженностей магнитного поля. Кривые показывают, что время установления постоянной скорости и ее величина зависят от напряженности магнитного поля, однако во всех случаях (рис. 2) шнур начинает равномерное движение, пройдя не более 1 мм от точки зарождения.

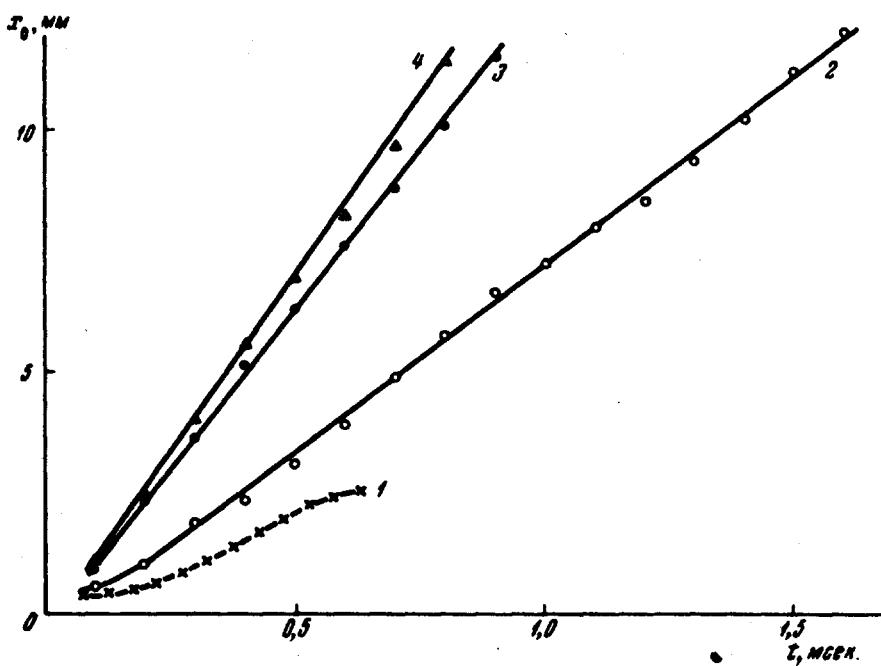


Рис. 2. Зависимость положения x_0 шнура тока от времени t при различных напряженностях H поперечного магнитного поля:
1 – $H = 1,2 \text{ кэ}$; 2 – $H = 1,4 \text{ кэ}$; 3 – $H = 2,2 \text{ кэ}$; 4 – $H = 2,4 \text{ кэ}$.
Ток через образец фиксирован и равен 30 ма

Измерения показали, что зависимость установившегося значения скорости шнура от напряженности поперечного магнитного поля является линейной для магнитных полей до 2,5 кэ. Скорость движения шнура в данном случае можно характеризовать его подвижностью, т.е. скоростью в единичном магнитном поле, которая составляет 0,6 см/сек². Эта величина значительно меньше соответствующего значения для германия с примесью золота при 77°К, которое по нашим данным составляет около 40 см/сек².

Таким образом, разработанная в настоящей работе методика исследований позволила показать, что а) образование шнура тока происходит путем стягивания токовых линий в процессе переключения образца в состояние с малым сопротивлением; б) в поперечном магнитном поле шнур

перемещается со скоростью, которая достигает установившегося значения после прохождения шнуром около 1 мм от точки возникновения;
в) зависимость установившегося значения скорости от напряженности поперечного магнитного поля является линейной и характеризуется подвижностью шнура, равной 0,6 см/сек²

Научно-исследовательский институт
физических проблем

Поступила в редакцию
27 мая 1969 г.

Литература

- [1] *I. Melngailis, A. G. Milnes. J. Appl. Phys., 33, 995, 1962.*
 - [2] М.Е. Алексеев, И.В. Варламов, В.П. Сондаевский. Электронная техника, сер. 6, в. 1, 8, 1968.
-