

ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ПРИ ЛОКАЛИЗОВАННОМ ВОЗНИКНОВЕНИИ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ S-ТИПА

Костылев С. А., Коджеспирова И. Ф., Шкут В. А.

В применении халькогенидных полупроводников приведена феноменологическая модель воздействия проводящей неоднородности (канала) на пороговые параметры переключения сред с ОДС *S*-типа. Сформулированы критерии перерастания канала в шнур. Получено соответствие модели и экспериментальных результатов.

Необходимость создания адаптивных элементов памяти для нейросетевых компьютеров вызвала интерес к явлению переключения в тонких пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП). Многочисленные исследования переключения в ХСП не дали однозначной информации о его механизме. Тем не менее существуют общие для всех механизмов объемного отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) закономерности возникновения пространственно-неоднородных распределений поля и плотности тока. Цель данного исследования состоит в применении этих закономерностей к эффектам переключения в пленках ХСП. Много усилий было затрачено на выяснение того, какие эффекты (термические или электронные) ответственны за переключение в ХСП. Из анализа посвященных этой проблеме работ возникает вопрос более общего плана: полевые или токовые эффекты формируют участок с ОДС *S*-типа (далее *S*-ОДС). На этот вопрос можно дать однозначный ответ, исходя из самых элементарных соображений: полевые или термические эффекты являются поставщиками носителей, но формирование участка с отрицательным наклоном кривой *S*-ОДС происходит за счет токовых эффектов. Действительно, возникновение ОДС возможно только в случае наличия положительной обратной связи по одному параметру, например росту напряженности поля, увеличивающему напряженность поля, или росту плотности тока, увеличивающему плотность тока. Иными словами, изменения, происходящие в материале под действием какого-либо возбуждения, должны это возбуждение усиливать. Для наглядности рассмотрим возможность возникновения *S*-ОДС за счет полевых эффектов. Пусть F_i — пороговая напряженность электрического поля для этого эффекта. Поскольку для наблюдения *S*-ОДС образец должен быть включен в режим заданного тока, рост проводимости материала будет приводить к снижению поля и, следовательно, к уменьшению проводимости и исчезновению эффекта. Чтобы избежать этого противоречия, авторы полевых моделей привлекают дополнительные механизмы, например сужение области сильного поля, что позволяет сохранить пороговую напряженность поля и ток при снижении падения напряжения на образце. При этом на клеммах образца действительно появляется *S*-ОДС, но такое ОДС не обладает объемным характером, следовательно, не может привести к шнурованию тока, так как для возникновения шнура высокой плотности тока необходимо (но недостаточно), чтобы механизм *S*-ОДС мог реализоваться в каждом отдельно взятом микрообъеме материала. Поскольку установлено, что переключение в ХСП есть следствие формирования шнура, следует считать, что в данных материалах возникновение *S*-ОДС связано с токовыми эффектами (повышением концентрации или средней подвижности носителей). Поэтому характерным параметром эффекта переключения в ХСП должна считаться пороговая плотность тока [1].

К сожалению, случай идеального (однородного) образца в практике экспериментальных исследований неупорядоченных полупроводников является уникальным. Как правило, имеет место ситуация с наличием в материале встроенных областей с различным набором физических параметров. В таком материале S -ОДС возникает в части объема материала, усиливая первоначальную неоднородность. Однако, как показывает эксперимент [2], конечная устойчивая фаза со шнуром высокой плотности тока практически не зависит от степени первоначальной однородности материала. Как происходит переход из состояния S -ОДС, локализованным в части объема, в состояние со шнуром во всем образце, все еще не установлено. Отметим, что в [3, 4] в качестве механизма возникновения неоднородности предлагается неоднородный термический разогрев. При этом предполагается, что переключение произойдет легко в области с повышенной температурой. Такое предположение не бесспорно, поскольку хорошо известно, что с повышением температуры до > 150 К пороговая плотность тока резко возрастает, а в диапазоне температур $2-150$ К остается неизменной, но ни при каких температурах не уменьшается [5, 6]. Кроме того, в этих и других моделях развития переключения в неоднородных образцах учет неоднородности материала сводится по существу к замене переключения во всем образце на переключение в макронеоднородности, которая возникает при формовке и просто изменяет эффективные геометрические размеры образца. Современная технология осаждения пленок ХСП позволяет получать неформующиеся образцы, в которых возможны только микронеоднородности размером в несколько длин Дебая. Влияние такой неоднородности на пороговые параметры переключения рассматривается далее.

В соответствии с приведенными выше соображениями основным пороговым параметром переключения в ХСП является плотность тока, поэтому неоднородность, в которой возможно локализованное развитие S -ОДС, — это область повышенной проводимости. Такая область может быть встроенной, либо может развиваться в электрическом поле. Например, в случае проводящего включения напряженность электрического поля в остальной части межэлектродного зазора будет повышенной и полевые эффекты приведут к выравниванию проводимости вдоль линий тока. Такое образование назовем каналом. Образец с каналом отличается от образца со шнуром прежде всего отсутствием действующей по всему объему микроскопической связи, свойственной только системам с объемным S -ОДС и приводящей к тому, что приращения токов шнура и остальной части образца имеют противоположные знаки. Кроме того, первоначальное сечение канала определяется только сечением зародышевой неоднородности, а сечение шнура — формой кривой S -ОДС, сечением всего образца и величиной полного тока. Естественно, что, для того чтобы ситуация была нетривиальной, сечение канала должно составлять ничтожную часть сечения образца и шнурования тока в нем происходить не должно.

Обозначим начальное сечение канала a_{c0} , сечение образца — A и запишем первое условие нетривиальности $a_{c0} \ll A$. Второе условие выполняется в следующих случаях: а) если сечение канала меньше характерного сечения шнура: $a_{c0} < \pi D \tau_f$ (где D — коэффициент диффузии, τ_f — характерное время формирования шнура); б) если область вне канала, включенная параллельно ему, имеет столь низкое сопротивление, что канал может находиться в режиме заданного напряжения даже после возникновения в нем S -ОДС. Тогда из самых общих положений физики электрических неустойчивостей следует, что среда с объемной S -ОДС в режиме заданного напряжения устойчива по отношению к неоднородным флуктуациям [7], следовательно, шнурования в канале не произойдет, даже если его сечение превышает критическое.

Обозначим ρ_c — удельное сопротивление канала, ρ_0 — удельное сопротивление материала вне канала, I_c — избыточный ток канала, j_k — плотность тока вне канала. Тогда полный ток в предпороговой области смещения будет равен

$$I = I_c + j_k A.$$

При переключении с помощью параметров материала (форма кривой S -ОДС) через правило равных площадей [2, 8] устанавливается взаимосвязь между

плотностями токов в шнуре j_f и в остальной части образца j_R , а геометрические размеры образца и полный ток задают начальные величины избыточного тока шнура $I_{f, \text{нач}}$ и фоновой плотности тока $J_{R, \text{нач}}$. Очевидно, что для трансформации канала в шнур необходимо, чтобы плотность тока вне канала превышала в данном образце $J_{R, \text{нач}}$ на величину, обеспечивающую получение $I_{f, \text{нач}}$. Пороговое значение тока переключения в образце с каналом определяется суммой начального избыточного тока шнура $I_{f, \text{нач}}$, фоновых токов через образец $J_{R, \text{нач}}$ ($A - a_{c0}$) и неоднородностью $J_{cф}$ [равной $J_{R, \text{нач}} (\rho_0/\rho_c) a_{c0}$]; поскольку $a_{c0} \ll A$, выражение для порогового тока приобретает вид

$$I_t = I_{f, \text{нач}} + J_{R, \text{нач}} A + J_{R, \text{нач}} a_{c0} \rho_0 / \rho_c.$$

Теперь можно сформулировать три критерия перерастания канала в шнур.

1. Плотность тока в канале должна соответствовать участку с отрицательным наклоном кривой S -ОДС: $J_v < J_c < J_{t_0}$.

2. Плотность тока вне канала должна превышать критическую

$$J_{k, \text{кр}} = (I_{f, \text{нач}} + J_{R, \text{нач}} A + J_{R, \text{нач}} a_{c0} \rho_0 / \rho_c - I_c) A^{-1}. \quad (1)$$

3. Сопротивление остальной части образца R_R должно превышать критическое для получения в канале режима заданного тока. Для оценки величины критического сопротивления вспомним, что, по определению, режим заданного тока должен обеспечивать одну точку пересечения кривой S -ОДС с линией нагрузки. Тогда критическое значение сопротивления нагрузки определится максимальной величиной наклона отрицательного участка. Поскольку в нашем случае сопротивлением нагрузки для канала является сопротивление остальной части образца R_R , получим

$$R_{R, \text{кр}} = L \rho_s (J) / a_{c0}, \quad (2)$$

где $\rho_s (J)$ — наклон кривой S -ОДС, L — расстояние между электродами.

Все критерии должны выполняться одновременно, поэтому в зависимости от начальной величины неоднородности возможны различные вариации пороговых параметров переключения.

Если неоднородность столь мала, что критерии по плотности тока и сопротивлению области вне канала заведомо выполняются, необходимым и достаточным условием перерастания канала в шнур является достижение в неоднородности плотности тока $J_c = J_{t_0}$. При этом $J_k \sim J_{t_0} \rho_c / \rho_0$ и средняя пороговая плотность тока

$$\bar{J}_t = j_{t_0} (a_{c0} / A + \rho_c / \rho_0).$$

С повышением неоднородности (уменьшением ρ_c / ρ_0) и ростом сечения образца средняя пороговая плотность тока снижается. Средняя пороговая напряженность поля $F_t = \rho_0 J_k = J_{t_0} \rho_c$ и не зависит от сечения, но уменьшается с ростом неоднородности.

Рассмотрим теперь случай большой неоднородности, когда при достижении пороговой плотности тока в канале плотность тока вне канала еще ниже критической. Переключение произойдет при $J_k = J_{k, \text{кр}}$, т. е. при средней пороговой плотности тока

$$\bar{J}_t = (I_{f, \text{нач}} + J_{R, \text{нач}} A + J_{R, \text{нач}} a_{c0} \rho_0 / \rho_c) A^{-1}.$$

Как видно, в этом режиме увеличение неоднородности приводит к повышению средней пороговой плотности тока в отличие от предыдущего случая, а средняя пороговая напряженность электрического поля $F_t = \rho_0 J_{k, \text{кр}}$ продолжает монотонно снижаться из-за роста I_c . С ростом сечения пороговая плотность тока и пороговое поле снижаются. Таким образом, зависимость средней пороговой плотности тока от степени неоднородности образца имеет минимум, как это показано на рис. 1. Предположив, что в минимуме значения пороговой плотности тока для режимов малой и большой неоднородности совпадают, можно оценить оптимальное для получения минимального тока переключения значение начальной неоднородности:

$$\rho_c' \sim \rho_0 (I_{p, \text{нач}}/AJ_{t_0} + J_{R, \text{нач}}/J_{t_0} - a_{c_0}/A).$$

Это значение удельного сопротивления неоднородности разделяет режимы малой и большой неоднородности.

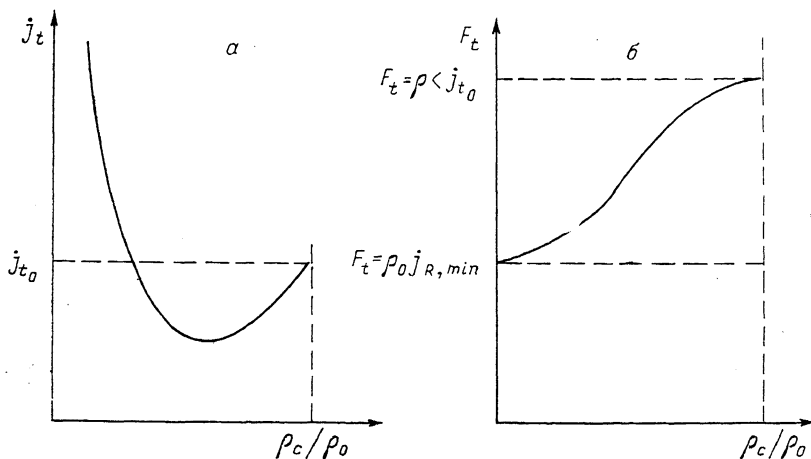


Рис. 1. Схематически изображенные зависимости средней пороговой плотности тока (а) и средней напряженности электрического поля (б) от степени однородности образца (отношение $\rho_c/\rho_0=1$ для однородного образца).

$J_{R, \text{min}}$ — минимальная фоновая плотность тока при насыщении плотности тока в шнуре.

Для экспериментальной проверки модели мы использовали то обстоятельство, что после окончания переключающего импульса на месте шнура в течение времени, достаточно длительного для проведения измерений пороговых параметров на коротких импульсах, сохраняется область повышенной проводимости. Причем это время тем больше, чем больше межэлектродное расстояние [2]. Зависимость порогового тока от времени восстановления, пропорционального уменьшению неоднородности (проводимости области шнура), приведена для образца Si—Te—As—Ge на рис. 2. Из экспериментальных зависимостей порогового напряжения от сечения образцов [9] следует, что в однородных пленках Si—As—Te пороговое напряжение переключения не зависит от сечения, а в неоднородных уменьшается с ростом сечения. Как видно, имеется полное качественное соответствие феноменологической модели и результатов эксперимента.

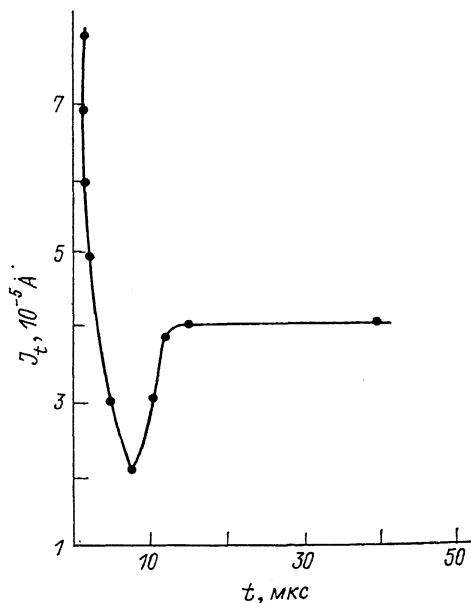


Рис. 2. Зависимость порогового тока переключения от времени восстановления в образце Si—Te—As—Ge длиной 6 мкм (насыщение порогового тока свидетельствует о восстановлении начальной величины неоднородности).

Если неоднородность столь велика, что плотность тока вне канала ни при каких значениях тока смещения не превосходит $J_{k, \text{кр}}$ и остается меньше минимальной плотности тока вне шнура, переключения не происходит и канал трансформируется в шнур плавно, без скачка напряжения. После того как плотность тока в канале станет равной максимальной плотности тока в шнуре, на вольт-амперной характеристике появится вертикальный участок, и мы получим идеальный стабилизатор напряжения с динамическим сопротивлением,

равным пулю, поскольку любые изменения тока будут вызывать только вариацию сечения шнура.

Рассмотрим теперь случай, когда канал шунтируется остальной частью образца, т. е. оказывается включенным в режим заданного напряжения. После достижения в канале пороговой плотности тока в нем возникает S -ОДС, но устойчивость канала по отношению к неоднородным флуктуациям сохраняется, даже если сечение расширяющегося с ростом тока канала превысит критическое. Поскольку с ростом тока канал расширяется, а сечение остальной части образца уменьшается, ее сопротивление будет возрастать и при каком-то значении тока смещения превзойдет критическую величину, определяемую выражением (2). При этом произойдут трансформация канала в шнур и переключение. Отметим следующие особенности этого режима: а) на пороговые параметры влияет не удельное сопротивление материала в канале ρ_c , а только его сечение; б) поскольку с ростом сечения образца его сопротивление снижается, требуется больший ток для выполнения критерия (2), поэтому с ростом сечения образца средняя пороговая плотность тока возрастает.

Таким образом, неоднородность образца может не только оказывать существенное влияние на пороговые параметры переключения в ХСП и их зависимости от условий эксперимента, но и приводить к вырождению кривой S -ОДС. Основную часть времени задержки в длинных образцах составляет время формирования канала при перераспределении напряжения вдоль линий тока. Поэтому экстраполяция зависимости максимальной времени задержки от длины образца [9] к нулю в длинных образцах дает максвелловское время. При малых длинах время задержки — это время перерастания канала в шнур.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Walsh P. J., Vezzoli G. C. // Appl. Phys. Lett. 1974. V. 25. P. 28—31.
- [2] Костылев С. А., Шкут В. А. Электронное переключение в аморфных полупроводниках. Кишинев, 1978. 203 с.
- [3] Суханов А. А. // ФТП. 1978. Т. 12. В. 12. С. 2338—2345.
- [4] Коломиец Б. Т., Сморгонская Э. А., Шпунт В. X. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 5. С. 908—911.
- [5] Adler D. // J. Vac. Sci. Techn. 1973. V. 10. N 5. P. 728—738.
- [6] Owen A. E., Robertson J. M. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1973. V. ED-20. N 2. P. 105—122.
- [7] Волков А. Ф., Коган Ш. М. // УФН. 1968. Т. 96. В. 4. С. 633—672.
- [8] Madan A., Shaw M. P. The Physics and Applications of Amorphous Semiconductors. N. Y., 1988. 543 p.
- [9] Костылев С. А., Шкут В. А. // Структура, физ.-хим. свойства и применение некристаллических полупроводников. Кишинев, 1989. С. 280—284.

Отделение физико-технических проблем транспорта
на сверхпроводящих магнитах «Трансмаг»
Днепропетровск

Получена 16.05.1991
Принята к печати 18.07.1991