

Импульсный пробой пленок халькогенидных стеклообразных полупроводников в присутствии магнитного поля

© Э.Н. Воронков

Московский энергетический институт,
111250 Москва, Россия

(Получена 23 ноября 1998 г. Принята к печати 2 февраля 1999 г.)

Наложение внешнего магнитного поля при пробое пленок халькогенидных стеклообразных полупроводников позволило осуществить пространственно-временную развертку процесса эволюции токового канала и разделить вклады электронных и тепловых эффектов. Быстрое перемещение вдоль образца токового канала приводит к его охлаждению, что значительно снижает его разогрев джоулевым теплом и позволяет поднять мощность. Показано, что пробой имеет стримерно-лидерный механизм.

Один из наиболее интересных эффектов, сопровождающих электрический пробой в халькогенидных стеклообразных полупроводниках (ХСП), — эффект переключения — обнаружен и исследован Коломийцем с сотрудниками [1]. Овшинским [2,3] был предложен ряд применений этого эффекта в микроэлектронике, что вызвало интенсивные исследования ХСП в конце 70-х, начале 80-х годов и разработку моделей эффекта переключения [1–3]. Вместе с тем следует отметить, что сложная природа этого эффекта до конца так и не была раскрыта. С нашей точки зрения, снижение интереса к этому эффекту, вызванное развитием кремниевых микросхем памяти, вытеснивших элементы памяти на ХСП, не оправданно, поскольку эффект переключения является одним из наиболее эффективных способов генерации электронно-дырочной плазмы и может быть использован при разработке различных устройств функциональной электроники, а возможно, и светоизлучателей на основе пленок, легированных редкоземельными металлами.

Цель данной работы заключалась в изучении динамики пробоя ХСП и разделении вкладов электронных и тепловых эффектов, легших в основу феноменологической электронно-тепловой модели эффекта переключения [1–3]. Для достижения поставленной цели было использовано внешнее магнитное поле, позволившее осуществить пространственно-временную развертку процесса эволюции токового канала.

В выполненной ранее работе [4] было показано, что в магнитном поле при пробое пленки ХСП возникает искривленный след, образованный расплавленным или кристаллизовавшимся материалом, напоминающий след трека в камере Вильсона. По форме этого следа были выполнены оценки скорости предполагаемой частицы, оказавшейся чрезвычайно высокой, однако никаких предположений о ее возможной природе сделано не было, поэтому в задачу данной работы входило выяснение природы "трека" и объяснение его формы.

При исследовании было замечено, что основные стадии пробоя тонких пленок ХСП в магнитном поле совпадают с основными стадиями эффекта переключения. Это позволило сделать вывод, что в основе эффекта переключения и исследованного нами пробоя лежат одни и те же процессы.

Измерения были проведены на образцах с планарным и копланарным расположением электродов ("сэндвич"). Расстояние между планарными электродами составляло 100–200 мкм, длина электродов 70 мм. Сэндвич-структуры имели площадь электродов 0.1–1.0 мм². Толщина пленок ХСП лежала в пределах 1–3 мкм. Измерения, выполненные на различных составах ХСП, принципиально не отличались. Приводимые далее результаты относятся к пленкам As₂SeTe₂.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Образец, состоящий из стеклянной подложки с нанесенными на него пленкой ХСП (1) и металлическими полосковыми электродами (2), находился в магнитном поле (3). Импульсное напряжение от генератора (4) через токоограничивающий резистор (5) прикладывалось между парой соседних электродов, один из которых был заземлен. В нескольких случаях были выполнены эксперименты на образцах с коаксиальными кольцевыми электродами. При этом были получены примерно такие же результаты, что и в случае полосковых электродов.

Амплитуда прикладываемого к образцу прямоугольного импульса для сэндвич-структур варьировалась в пределах 5–50 В, для образцов с планарными электродами — в пределах 100–800 В. Длительность импульса составляла 1–3 мс, время переднего фронта составляло 0.1–1 мкс. Образец при измерениях помещался в зазор магнита, величина индукции в котором составляла 2 Тл.

На рис. 2, *a* и *b* показаны типичные осциллограммы напряжения на образце (вверху) и тока через него (внизу) соответственно для случаев отсутствия и наличия магнитного поля. На осциллограммах можно выделить несколько характерных участков: задержку, во время которой не происходит изменений падения напряжения на образце и тока через него; быстрое включение, при котором происходит скачкообразное нарастание тока, сопровождающее уменьшение сопротивления образца на несколько порядков (пробой или включение); включенное состояние. На осциллограмме — в области, соответствующей включенному состоянию, — имеются два участка, свидетельствующие о дополнительном увеличении через некоторое время проводимости образца, причем изменение проводимости происходит скачком. В эффекте переключения для составов, обладавших повы-

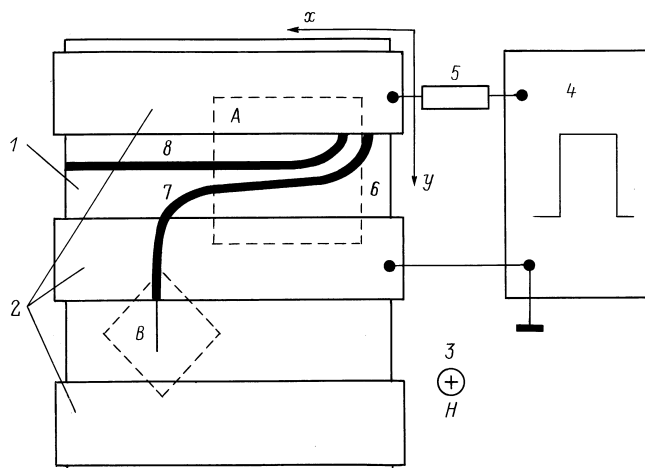


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. Цифрами 6–8 обозначены разновидности наблюдаемых треков.

шенной кристаллизационной способностью (например, $\text{Ge}_{15}\text{Te}_{84}\text{As}_4$), первый из этих участков соответствовал времени запоминания, т.е. если импульс прекращался до наступления дополнительного скачка, то сопротивление образца оставалось высоким; в противном случае низкое сопротивление сохранялось и после снятия напряжения.

Основные стадии пробоя, отраженные на рис. 2, имеют место как для сэндвич-, так и планарных структур, хотя осциллограммы даже для отдельных однотипных образцов могли значительно отличаться. Так, на отдельных образцах в областях выключенного и включенного состояний наблюдалось постепенное возрастание тока; кроме того, часто во включенном состоянии был только один участок.

Сравнение рис. 2, *a* и *b* показывает, что магнитное поле в основном не изменяет вида осциллограмм (в магнитном поле несколько возрастает время запоминания), что позволяет заключить, что механизм пробоя пленок при наличии магнитного поля тот же, что и при его отсутствии. Это дает возможность обобщить выводы, полученные для пробоя в магнитном поле и на случай, когда магнитное поле отсутствует.

Электрический пробой в магнитном поле приводил к образованию канала-трека, который можно было наблюдать по выгоревшему, расплавленному или кристаллизованному материалу (в зависимости от мощности импульса). При отсутствии магнитного поля трек был прямолинейным (6) (рис. 1), в магнитном поле он искривлялся (7) и не всегда соединял электроды (8). Это свидетельствует о том, что в магнитном поле трек не соответствует форме токового канала. Токовый канал остается прямолинейным, однако он перемещается между электродами вдоль пленки. Скорость перемещения пропорциональна току и в наших экспериментах могла превосходить 10^4 см/с. О перемещении шнура можно судить по эрозии электродов в тех областях, через которые он прошел.

Быстрое перемещение токового канала вдоль пленки способствует его охлаждению и исключает возможность теплового пробоя. Анализ многочисленных фотографий показал, что трек, остающийся после пробоя, образован горячим пятном, перемещающимся от анода к катоду.

На рис. 3, *a* показана фотография начального участка одного из треков, возникших в пленке после пробоя в магнитном поле (см. трек 8 на рис. 1). Из рис. 3, *a* видно, что происходит постепенное развитие горячего пятна (разогрев), сопровождающееся его перемещением от анода к катоду (со средней скоростью порядка 100 см/с) при одновременном перемещении вместе с токовым шнуром вдоль подложки. При этом скорость шнура (скорость пятна вдоль оси *x*) может в несколько раз превышать скорость пятна внутри шнура (в направлении *y*).

В том случае, когда горячее пятно достигало катода, происходило выгорание электрода и, что особенно интересно, трек в виде кристаллического шнура распространялся в область, в которой электрическое поле отсутствовало (область B на рис. 1). Соответствующая фотография, демонстрирующая направленное распространение возбуждения на значительное расстояние за заземленным электродом, приведена на рис. 3, *b*. Наиболее вероятно, что энергия в этой области переносится акустическим колебательным процессом, причем колебания носят когерентный характер, что подтверждается отсутствием расходимости в треке.

Наблюдаемые эффекты хорошо объясняются в рамках стримерно-лидерного (leader stream) механизма [5]. В этом случае время задержки (рис. 2) соответствует времени формирования пространственного заряда головки стримера. Следует отметить, что в зависимости от амплитуды импульса это время составляло от нескольких мкс до нескольких мс, время распространения стримера между контактами не превышало 100 нс, в то время как для лидера оно могло изменяться в пределах от нескольких мкс до нескольких мс. Плотность свободных носителей заряда в канале, остающемся за лидером, близка к 10^{18} см⁻³, примерно такова же плотность не скомпенсированного заряда в головке лидера.

Сформировавшийся стример практически мгновенно заполняет канал электронно-дырочной плазмой (момент включения на рис. 2), после чего начинается формирование горячей головки лидера (горячее пятно) и ме-

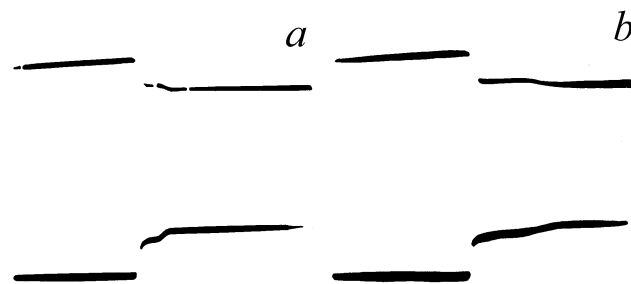


Рис. 2. Осциллограммы напряжения (вверху) и тока (внизу) для случаев отсутствия (*a*) и наличия (*b*) магнитного поля.

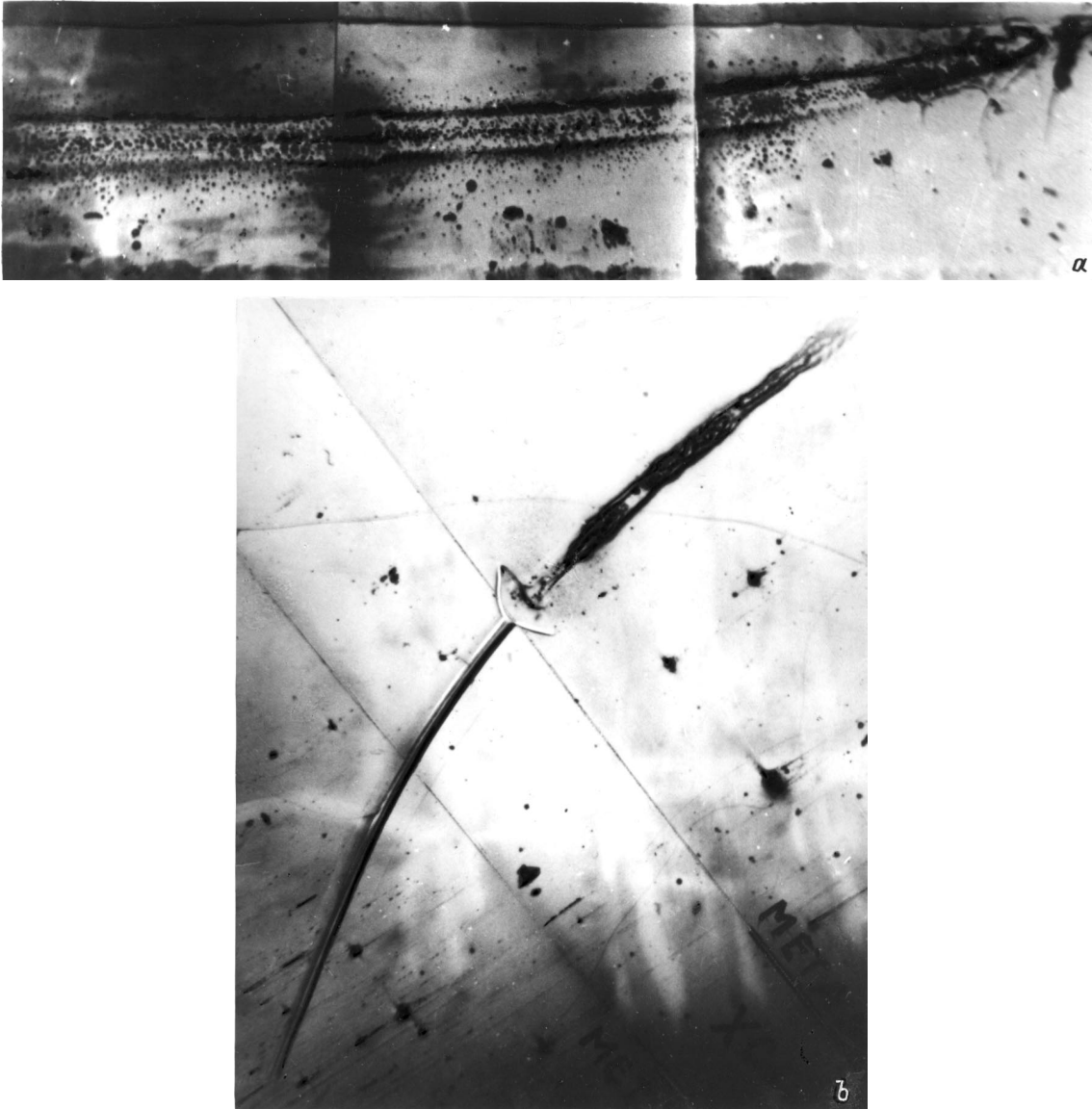


Рис. 3. Фотографии начального (*a*) и конечного (*b*) участков трека после пробоя в магнитном поле.

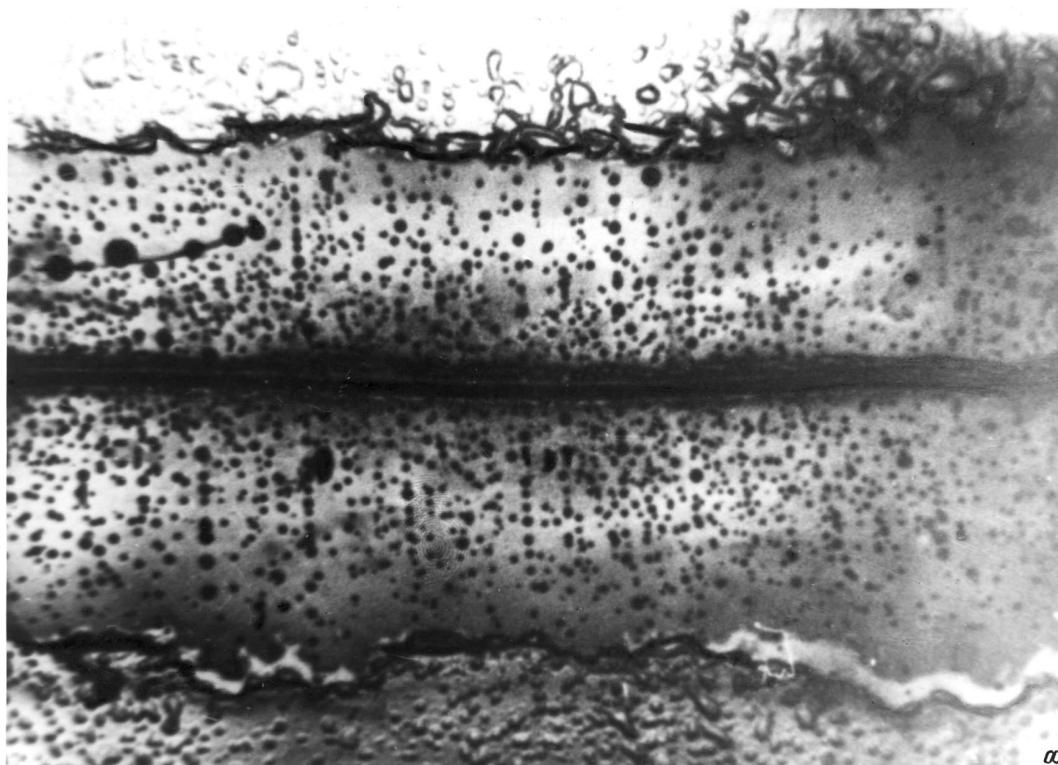
дленное перемещение головки лидера от анода к катоду. Генерируемые в области головки лидера электроны и дырки выносятся в канал, обеспечивая его высокую проводимость. Разгорание пятна у анода соответствует формированию головки лидера, состоящей из двойного заряженного слоя. Следует отметить, что возникновение связанного с головкой лидера "горячего пятна" сопровождалось излучением в ближнем ИК диапазоне, которое ранее в эффекте переключения интерпретировалось как рекомбинационное [6].

Разогрев канала осуществляется перемещением горячего пятна, связанного с головкой лидера. Это подтверждается тем, что плавление, кристаллизация и выгорание имеют место только в той области канала, через которую прошла головка лидера (рис. 3, *a*). При подходе головки лидера к катоду происходит исчезновение области пространственного заряда, при этом заполненный плазмой

проводящий след лидера замыкает контакты, чему соответствует небольшой скачок тока во включенном состоянии. Поскольку в переключателях с памятью след лидера заполнен высокопроводящим кристаллизовавшимся материалом, низкое сопротивление между электродами сохраняется после прекращения электрического импульса.

Поскольку ток после стримерного пробоя не изменялся или изменялся очень слабо (рис. 2), можно считать, что скорость перемещения канала была примерно постоянной и наблюдаемые особенности трека связаны с изменением скорости лидера. Тогда на стадии формирования и на стадии распада головка лидера в направлении к катоду имела максимальную скорость. В остальном временном интервале средняя скорость была примерно постоянной.

На рис. 4 показаны отдельные участки образцов для случаев, когда перемещение головки лидера привело



α

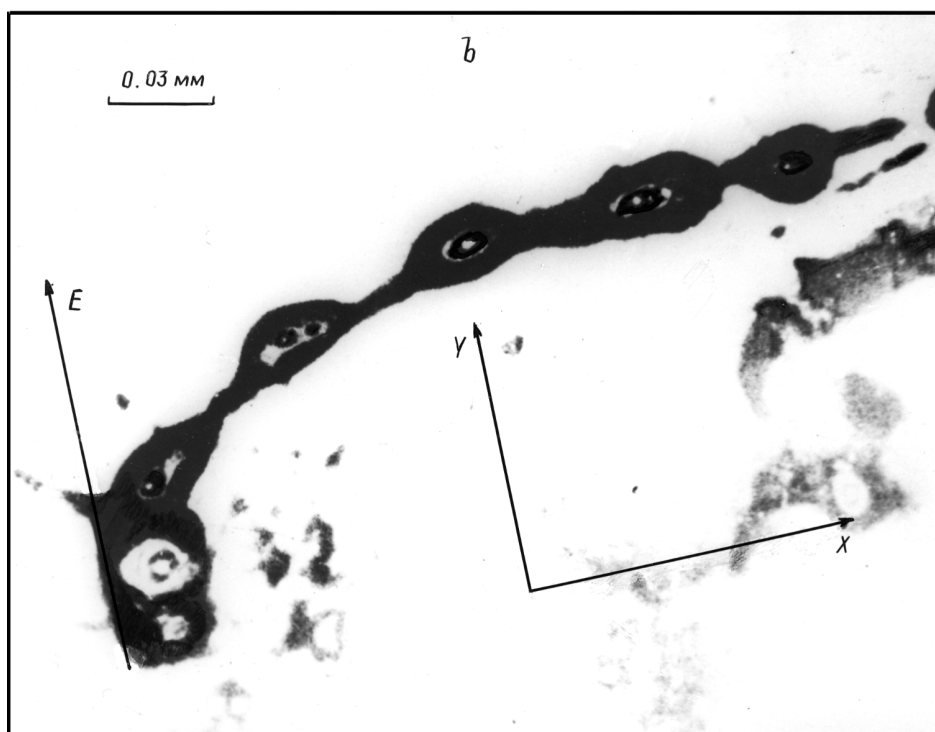


Рис. 4. Фотографии участков образцов, демонстрирующие прерывистое движение головки лидера в случае образования трека выгоревшим (а) и расплавленным (b) материалом.

к выгоранию — полоса в центре образца (а) и плавлению ХСП (b). Эти фотографии демонстрируют, что, несмотря на то что средняя скорость перемещения лидера остается постоянной, головка лидера пульсирует, разгораясь и затухая, т. е. перемещается как бы скачками,

что особенно наглядно видно на рис. 4, b. Возможно, именно с пульсацией энергии, выделяющейся в головке лидера, и связано возникновение акустического возбуждения солитонного типа (рис. 3, b) с длиной волны порядка 10^{-3} см.

В заключение, вновь возвращаясь к эффекту переключения, отметим, что, по нашему мнению, в его основе также лежит стримерно-лидерный механизм, хорошо объясняющий все известные свойства этого эффекта. Отличия могут быть связаны с тем, что в эффекте переключения, как правило, выполняется условие короткого канала и область пространственного заряда может заполнять все межэлектродное пространство.

Все сказанное свидетельствует о том, что эффект переключения может иметь прикладное значение, поскольку позволяет создавать мощные генераторы твердотельной плазмы. При этом для коротких импульсов принципиально возможно исключить стадию шнурования [7], что позволит создать твердотельные аналоги газоразрядных приборов, которые могли бы найти применение при разработке малогабаритных импульсных излучателей.

Список литературы

- [1] Б.Т. Коломиец, Э.А. Лебедев. Радиотехника и электроника, **8**, 2097 (1963); Б.Т. Коломиец, Э.А. Лебедев, И.А. Таксами, К.Д. Цэндин. ФТП, **17**, 119 (1983).
- [2] S.R. Ovshinsky. Patent USA, cl. 307-885, № 3281591 (1963); D. Adler, M.S. Shur, M.N. Silver, S.R. Ovshinsky. J. Appl. Phys., **51**, 3289 (1980).
- [3] С.А. Костылев, В.А. Шкут. *Электронное переключение в аморфных полупроводниках* (Киев, Наук. думка, 1978).
- [4] Г.И. Боровов, Э.Н. Воронков. ФТП, **10**, 75 (1976).
- [5] В.Я. Ушаков. *Импульсный электрический пробой жидкостей* (Томск, Изд-во Том. ун-та, 1966).
- [6] M.I. Tompson, D. Pooladej, P.J. Walsh. J. Non-Cryst., **35/36**, 1111 (1980).
- [7] A.M. Minarsky, P.B. Rodin. Sol. St. Electron., **41**, 813 (1997).

Редактор Т.А. Полянская

A pulse break-down of halcogenide glassy semiconductor films in magnetic field

E.N. Voronkov

Moscow Energy Institute,
111250 Moscow, Russia