

КИНЕТИКА НАНОСЕКУНДНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ «ФОРМОВКИ» ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ НЕКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК $\text{Ge}_x\text{Te}_{1-x}$

Бабянская Э., Бальюнас В., Бзлявичюс С.,
Ченис А., Шикторов Н., Ясутис В.

С помощью однократных импульсов длительностью 3–10 нс изучена кинетика переключения в переключающих элементах на основе некристаллических пленок $\text{Ge}_x\text{Te}_{1-x}$. Обнаружено, что процесс «формовки» сопровождается высокочастотными флуктуациями тока, возникающими из-за попередного включения и выключения некоторых частей межэлектродного материала. Показано, что процесс выключения обусловлен термическим разрушением низкоомного состояния. Представлена математическая модель, объясняющая основные закономерности таких флуктуаций.

«Формовка» — это необратимое изменение свойств некристаллического полупроводника переключающего элемента, ведущее к установлению его стабильных рабочих параметров [1]. Электрическая формовка обычно осуществляется переключающими импульсами, количество которых (N), необходимое для ее завершения, зависит от режима переключения, химического состава активного вещества и конструкции элемента. Исследования показали, что в случае наносекундного переключения в зависимости от этих факторов N может меняться в широком диапазоне: от нескольких десятков до сотен тысяч [2]. При этом основная информация о процессах, происходящих в межэлектродном веществе, получалась путем анализа остаточных явлений в нем [3], в то время как кинетика наносекундной формовки оставалась неизученной. Кроме того, исследование развития электрической неустойчивости во времени в течение первых циклов переключения интересно с точки зрения природы и механизма эффекта переключения [4], так как отражает процессы, происходящие в неформированном полупроводниковом материале.

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты исследования кинетики наносекундного переключения в условиях проявления электрической формовки.

М е т о д и к а

Для исследований использовались образцы конденсаторного и копланарного типа. Конденсаторный тип представлял собой тонкую (0.2–1.0 мкм) пленку $\text{Ge}_x\text{Te}_{1-x}$ (где $0.15 \leq x \leq 0.25$), нанесенную вакуумным дискретным напылением на стеклянную подложку, с перпендикулярно ее поверхности вплавленным стержнем Мо-электродом [2]. Шлифованный в плоскости подложки конец стержня создавал с полупроводниковой пленкой электрический контакт площадью $\approx 10^2$ мкм². Второй электрод изготовлялся путем нанесения Мо-слоя толщиной 0.1 мкм на свободную поверхность пленки. В завершение Мо-слой покрывался пленкой Al толщиной 1–1.2 мкм.

Копланарный тип имел вид полоски из Ni толщиной 0.1–0.15 мкм и шириной 1.2 мм, нанесенной на кварцевую или ситаловую подложку. В поперечном направлении полоски методом самоформирования [5] создавалась щель шириной

0.3—0.8 мкм. Щель дискретным вакуумным напылением покрывалась пленкой $\text{Ge}_x\text{Te}_{1-x}$. Толщина пленки изменялась в пределах 0.1—2 мкм.

Для исследования кинетики переключения использовались электрические импульсы длительностью 3—10 нс и фронтом нарастания 0.5 нс. Развитие процесса переключения во времени регистрировалось в 50-омном тракте передачи с помощью скоростного осциллографа С7-19. При изучении структурных изменений в полупроводниковой пленке использовался электронный сканирующий микроскоп марки JXA-50A.

Результаты исследования

Сначала была изучена кинетика первых переключений на образцах конденсаторного типа, в которых в зависимости от режима работы [6] можно осуществить стабильное переключение или переключение со статическим разбросом параметров. Типичная картина кинетики в условиях проявления разброса представлена на рис. 1. Из рисунка видно, что переход из высокоомного состояния в низкоомное для неформированных образцов проявляется как высокочастотные



Рис. 1. Осциллограммы тока при электрической наносекундной «формовке» переключающего элемента на основе $\text{Ge}_{0.15}\text{Te}_{0.85}$ толщиной 0.56 мкм.

Рис. 2. Осциллограмма тока через элемент конденсаторного типа на основе $\text{Ge}_{0.15}\text{Te}_{0.85}$ толщиной 0.38 мкм, облученного после формовки γ -квантами энергии 1 МэВ.

Доза облучения $5 \cdot 10^6$ Р.

с возрастающей во времени амплитудой флуктуации тока через образец. Импульсы тока, возникающие в результате флуктуаций, имеют фронт нарастания 50—100 пс и длительность спада 150—300 пс. После подачи некоторого количества формирующих импульсов флуктуации исчезают, и переключение происходит с исключительно маленьким разбросом параметров.¹ Следует отметить, что N уменьшается по мере увеличения длительности переключающего импульса τ_n . Так, например, для образцов с активным материалом $\text{Ge}_{0.15}\text{Te}_{0.85}$ и расстоянием между электродами ≈ 0.7 мкм $N=1$ при $\tau_n=10$ нс и $N=5$ при $\tau_n=3$ нс.

Если в сформированном элементе посредством увеличения длительности импульса или тока в низкоомном состоянии увеличить энергию, выделяющуюся при переключении, то флуктуации снова возникают. Для их устранения необходим некоторый процесс вторичной формовки, после завершения которого устанавливается новое стабильное состояние. Было обнаружено, что если переключение осуществляется на образцах, в которых, следуя работе [6, 7], невозможно добиться отсутствия статистического разброса параметров, то флуктуации тока всегда наблюдаются.

С целью выяснения влияния степени разупорядоченности активного вещества на наличие флуктуаций несколько сформированных образцов² конденсатор-

¹ Абсолютный разброс времени задержки составляет не более 20—30 пс.

² Напряжение переключения в результате формовки снизилось на 50 % от начальной величины.

ного типа были облучены γ -квантами с энергией 1 МэВ дозой $5 \cdot 10^6$ Р. Облучение привело к восстановлению первоначальных параметров переключения, а в кинетике единичных переключений появились типичные для процесса формовки флуктуации тока (рис. 2).

Флуктуации тока, возникающие при наносекундной формовке, были обнаружены и в переключающих элементах копланарного типа. Основные параметры и закономерности этих флуктуаций оказались аналогичными тем, которые наблюдались на образцах конденсаторного типа. На рис. 3 представлены осциллограммы тока в случае первого переключения для двух образцов копланарного типа, ширина щели которых $l=0.5$ мкм, а толщина активного материала $d=0.1$ мкм. Как видно, осциллограмма I содержит 3 минимума, а II — 2. Исследование поверхности этих переключающих элементов в области межэлектродного зазора с помощью сканирующего микроскопа показало, что количество минимумов на осциллограммах совпадает с количеством мест разрушений в активном материале. Форма и размеры областей разрушения существенно зависят от l и d , а также от энергии, выделяющейся при переключении. Так, например, ширина области разрушения для элемента, где $l=0.65$ мкм, а $d=0.1$ мкм, при переключении без ограничительного сопротивления (R_L) составляла ≈ 2 мкм, а при $R_L=140$ Ом — ≈ 0.3 мкм. При значительном

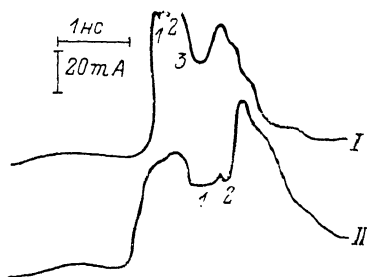


Рис. 3. Осциллограммы тока через элементы копланарного типа на основе $\text{Ge}_{0.15}\text{Te}_{0.85}$ толщиной 0.1 мкм и шириной щели 0.5 мкм.

ограничении тока в низкоомном состоянии (НС) на элементах, где $d \geq 0.5$ мкм, область разрушения не выходит на поверхность слоя, в результате активное вещество остается без видимых изменений.

Обсуждение

Эксперимент показывает, что амплитуда флуктуаций тока, возникающих при формовке, может составлять значительную часть той, которая устанавливается при стабильном переключении. Поэтому возникновение флуктуаций следует связывать с включением и выключением некоторых областей межэлектродного материала, т. е. свежизготовленный материал можно представить как гетерогенную кластерную среду, состоящую из объемной сети микропереключателей, поочередный переход которых между высокоомным и низкоомным состояниями приводит к флуктуациям тока. Время включения микропереключателей обусловлено электронными процессами и составляет десятки пс [2], поэтому фронт нарастания импульсов, возникающих в результате флуктуаций, составляет 50—100 нс.³ Время выключения определяется временем термического разрушения канала тока в низкоомном состоянии одного или нескольких микропереключателей. Более медленные термические эффекты, о наличии которых свидетельствует рис. 4, приводят по сравнению с фронтом нарастания импульсов флуктуаций к более длительному их спаду.

Импульсный термический отжиг приводит к повышению степени упорядочения некристаллического полупроводника, в результате чего снижается напряжение переключения и повышается температура структурных превращений активного вещества микропереключателей, т. е. происходит своеобразная термическая «закалка» переключающего элемента. При облучении сформированных областей частицами высокой энергии полупроводник возвращается в исходное разупорядоченное состояние, что создает условия возобновлению флуктуаций.

³ Эта величина совпадает с пределом широкополосности регистрирующей аппаратуры, следовательно, настоящее время включения еще меньше.

На основе представлений о кластерном характере активного материала можно объяснить и увеличение амплитуды флуктуаций при формовке. Для этого необходимо предположить, что канал, закорачивающий межэлектродное пространство, создается в результате перехода в низкоомное состояние нескольких последовательно соединенных микроэлементов. Так как ток в цепи в этом случае обратно пропорционален сопротивлению в низкоомном состоянии (R), то особенно сильное изменение тока произойдет при включении или выключении последних микроэлементов.

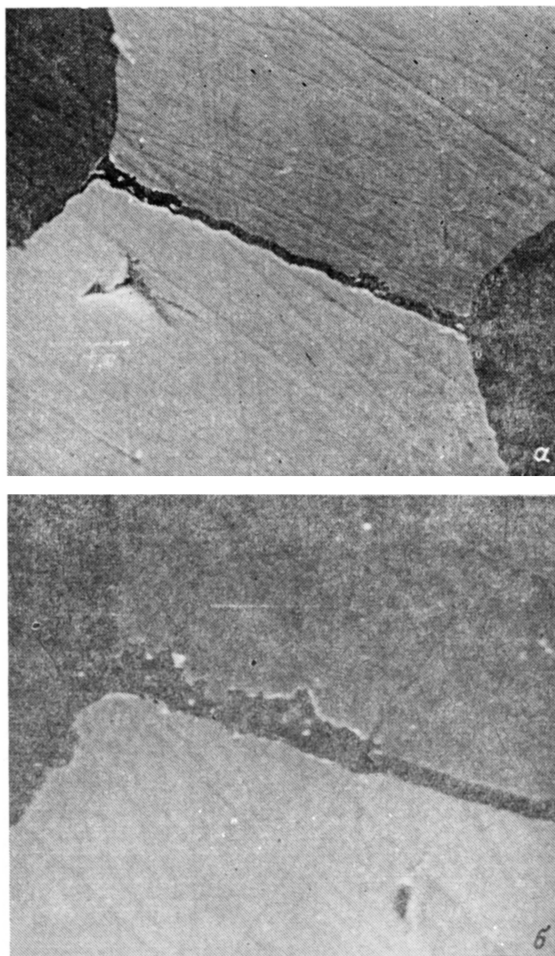


Рис. 4. Вид области щели копланарных элементов, подвергнутых единичному наносекундному переключению (*a*) соответствует осциллограмме I; *b*) — осциллограмме II на рис. 3.

a — 5000 \times , b — 10 000 \times .

Более детально это утверждение демонстрирует численный эксперимент, проведенный на основе следующей модели. Межэлектродный материал имитировался как параллельно соединенные m -цепочки, состоящие из n -микроэлементов. Сопротивление в высокоомном состоянии (ВС) одного элемента было в 10 раз больше его сопротивления в низкоомном состоянии (НС). Каждому микроэлементу с помощью генератора случайных чисел присваивалось некоторое время задержки, после которого элемент резко переходил из ВС в НС, и время восстановления, необходимое для обратного перехода. Необратимость процесса формовки и связанное с ним снижение напряжения переключения учитывались введением конечного числа актов восстановления (k) и уменьшением на некоторую величину времени задержки повторного включения микроэлемента. Результаты расчета для случая, когда $m=5$, $n=6$, $k=1$, представ-

лены на рис. 5, откуда видно, что данная модель хорошо объясняет факт увеличения амплитуды флуктуаций при формовке.

В заключение можно сделать следующие выводы.

Процесс электрической формовки в переключающих элементах на основе неупорядоченных пленок Ge_xTe_{1-x} сопровождается флуктуациями тока через элемент. К флуктуациям приводит совместное действие электронных и термических эффектов: первые из них определяют фронт нарастания, а вторые —

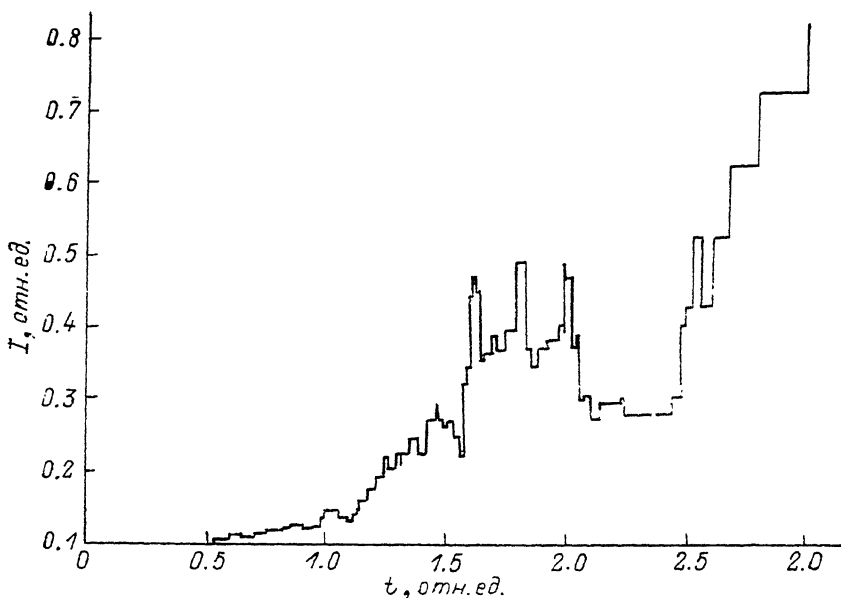


Рис. 5. Численный расчет зависимости тока от времени через элемент, состоящий из 5 параллельных цепочек с 6 микропереключателями в каждой.

фронт спада импульсов флуктуаций. Основные закономерности флуктуаций можно смоделировать имитируя активный материал переключателя схемой последовательно и параллельно соединенных микроэлементов.

Список литературы

- [1] Сандомирский В. Б., Суханов А. А. // Зарубежн. радиоэлектрон. 1976. № 9. С. 68—101.
- [2] Babenskas E., Balevičius S., Česnys A., Poškus A., Šiktorov N. // J. Non-Cryst. Sol. 1987. V. 90. P. 601—604.
- [3] Ormondroyd R. F., Thompson M. J., Allison J. // J. Non-Cryst. Sol. 1975. V. 18. N 3. P. 375—393.
- [4] Buckley W. D., Holmberg S. H. // Sol. St. Electron. 1975. V. 18. N 2. P. 127—147.
- [5] Янушонис С., Янушонене В. Самоформирование в полупроводниковой технологии. Вильнюс, 1985. 192 с.
- [6] Балявичюс С., Декснис А., Лисаускас В., Пошкус А., Шикторов Н. // Лит. физ. сб. 1982. Т. 24. № 2. С. 95—101.
- [7] Бузин В. В., Коба Б. В., Литвинов В. Л., Ухин Н. А., Федотов И. Б., Флидлидер Г. В. // ФТП. 1981. Т. 5. В. 8. С. 1635—1637.

Институт физики полупроводников
АН Литвы
Вильнюс

Получена 2.11.1990
Принята к печати 9.01.1991