

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПИКΟΣЕКУНДНЫХ ПЕРЕПАДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

С. Балявичюс, А. Тамашевичюс, А. Пошкус,
Н. Шикторов, Э. Бабянкас

УДК 621.315.592

Экспериментально в неупорядоченных пленках $\text{In}_x\text{Te}_{1-x}$, $\text{Ga}_x\text{Te}_{1-x}$, $\text{Ge}_x\text{Te}_{1-x}$ и $\text{Si}_x\text{Te}_{1-x}$ изучен эффект переключения, в результате которого формируется перепад электрического напряжения длительностью в несколько десятков пикосекунд. Установлены факторы, влияющие на длительность этого перепада. В схеме обострителя, используя в качестве механизма переключения процесс ударной ионизации, проведен анализ параметров сформированного импульса.

В аморфных и стеклообразных полупроводниках сильное электрическое поле вызывает неустойчивость [1], вследствие которой активное вещество переходит из высокоомного состояния (ВС) в низкоомное (НС) за времена порядка 10^{-10} [2, 3]. Такой быстрый рост проводимости является особенно интересной стороной явления переключения в этих материалах, так как может быть использован для формирования электрических импульсов с субнаносекундными фронтами нарастания τ_ϕ [4]. Вместе с тем до сих пор не выяснено, какие факторы определяют скорость этого роста и отражают ли экспериментально обнаруженные минимальные величины времени τ_ϕ предел быстродействия эффекта. Выяснение этих вопросов важно не только для практического использования этого явления, но и для понимания механизма неустойчивости. Отсутствие более широких экспериментальных данных о процессе включения в первую очередь связано со значительными трудностями его изучения в пикосекундном диапазоне. Эти трудности главным образом обусловлены статистическим разбросом параметров переключения, сопутствующим каждый цикл включения. Однако в работах [5, 6] было показано, что существуют условия, при которых дисперсия разброса параметров меньше уровня флуктуаций широкополосных регистрирующих устройств. Это открывает новые возможности исследования кинетики эффекта переключения в пикосекундном диапазоне, чему и посвящена настоящая работа.

Методика эксперимента

Исследуемые образцы представляли собой аморфные пленки из $\text{In}_x\text{Te}_{1-x}$, $\text{Ga}_x\text{Te}_{1-x}$, $\text{Ge}_x\text{Te}_{1-x}$ и $\text{Si}_x\text{Te}_{1-x}$ толщиной от 0.2 до 1.2 мкм, нанесенные вакуумным дискретным испарением на неподогретую шлифованную пластинку из стеклоуглерода или Мо, которая служила одним из токовых электродов. В качестве другого электрода применялся стеклоуглеродный или молибденовый стержень, создающий прижимной контакт диаметром 30—60 мкм. Образец монтировался в разрез коаксиальной линии (схема обострителя) с полосой пропускания не менее 20 ГГц и волновым сопротивлением 50 Ом. Проходная емкость держателя с образцом составляла 0.2—0.4 пФ. Для переключения использовались

электрические импульсы с частотой следования 200 Гц, длительностью 10–30 нс и фронтом нарастания 0.5 нс. Кинетика переключения регистрировалась стробоскопическим осциллографом С1-70/3 и SAS-50099В с полосой пропускания 3.5 и 18 ГГц соответственно. Измерения проводились при комнатных температурах.

Результаты эксперимента

Было установлено, что электрическая неустойчивость в исследованных материалах развивается в полях $(2 \div 5) \cdot 10^5$ В/см. При этом в кинетике процесса наблюдаются три типичные для явления переключения фазы: задержка, включение и низкоомное состояние.

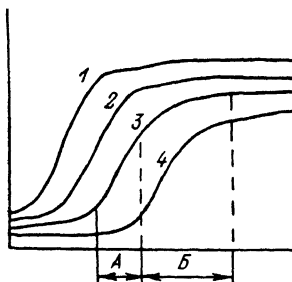


Рис. 1. Осциллограммы тока через образец в случае переключаются напряжений 14.5 В (1), 11 В (2), 9.2 В (3), 8 В (4). Масштаб по вертикали 20 мА/дел., по горизонтали — 100 пс/дел.

Задержка наступает сразу же после токового выброса, обусловленного проходной емкостью, и проявляется как относительно медленный рост тока до момента резкого скачка из ВС в НС. Время задержки τ_z есть величина порядка нескольких наносекунд и уменьшается с увеличением напряжения, приложенного к образцу. Одновременно увеличивается скорость роста тока в течение τ_s . В случае стабильной работы образца величина разброса τ_s от импульса к импульсу не превышала уровня флуктуаций, вносимых регистрирующим устройством, т. е. составляла менее 25 пс.

Включению $\tau_{\text{вкл}}$ в результате которого формируется перепад напряжения, происходит двумя этапами (рис. 1): сначала возникает сверхбыстрый, почти прямолинейный, рост тока (А), после чего появляется этап с более медленным ростом (Б). Относительный вклад «быстрого» и «медленного» этапов в длительность фронта сформированного сигнала $\tau_{\text{ф}}^1$ зависит от толщины межэлектродного материала и приложенного напряжения. По мере их увеличения вклад медленной части снижается. Величина $\tau_{\text{ф}}$ уменьшается с увеличением напряже-

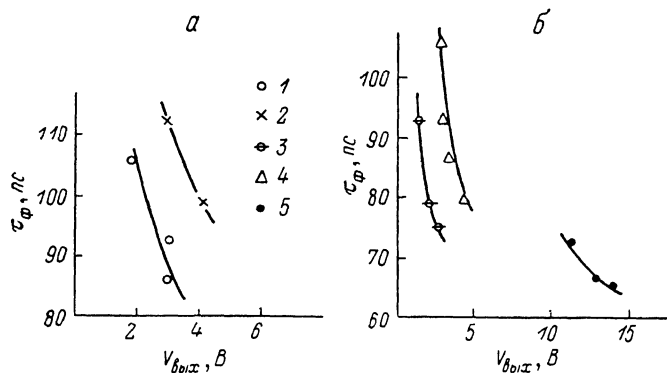


Рис. 2. Зависимости длительности сформированного перепада от напряжения на выходе обострителя для $\text{Si}_{0.25}\text{Te}_{0.75}$ (а) и $\text{Ge}_{0.20}\text{Te}_{0.80}$ (б).
d, мкм: 1 — 0.35, 2 — 0.64, 3 — 0.8, 4 — 0.9, 5 — 1.3.

ния на выходе схемы обострителя $V_{\text{вых}}$ (рис. 2). Минимальное время включения $\tau_{\text{фн}}$ для разных химических составов активного вещества несколько отличается. В системе $\text{In}_x\text{Te}_{1-x}$ $\tau_{\text{фн}} \approx 80$ пс. При этом наблюдается небольшая «формовка» образцов, т. е. изменение параметров в процессе работы образца. В системе $\text{Ga}_x\text{Te}_{1-x}$ $\tau_{\text{фн}} \approx 70 \div 80$ пс, но всегда в начале работы имеет место сильная фор-

¹ $\tau_{\text{ф}}$ — время, в течение которого в сформированном импульсе ток возрастает от 0.1 до 0.9 своей максимальной величины.

мовка и сопутствующую ей флуктуации параметров переключения. После формовки параметры существенно стабилизируются. В системе $\text{Si}_x\text{Te}_{1-x}$ $\tau_{\text{фн}} \approx 80 \div 90$ пс. Следует отметить, что такие величины $\tau_{\text{фн}}$ получены для $\text{Si}_{0.25}\text{Te}_{0.75}$, так как составы с большим количеством теллура сильно формируются и имеют тенденцию к образованию устойчивого НС [7]. В системе $\text{Ge}_x\text{Te}_{1-x}$ $\tau_{\text{фн}} \approx 60 \div 70$ пс, при этом практически отсутствует процесс формовки. Однако если, увеличивая ток или длительность пребывания образца в НС, нарушить условия стабильного переключения, вызвав тем самым статистический разброс параметров, то в процессе работы переключателя $\tau_{\text{ф}}$ постепенно увеличивается. Так, например, в случае образца на основе $\text{Ge}_{0.25}\text{Te}_{0.75}$ с толщиной активного материала $d=0.6$ мкм (Мо электроды) при переключении импульсами 10 нс ($\tau_d \approx 1$ нс) с частотой 200 Гц в течение 10 мин $\tau_{\text{ф}}$ изменилось от 100 до 300 пс.

Низкоомное состояние, образовавшееся сразу же после процесса включения, имеет сопротивление R_H в несколько сот Ом. Величина R_H уменьшается с увеличением напряжения на входе обострителя $V_{\text{н}}$ по закону, установленному в работе [8].

Обсуждение результатов

Из представленных данных видно, что во всех изученных материалах изменение сопротивления пленки на несколько порядков происходит за время короче 100 пс, а в случае системы $\text{Ge}_x\text{Te}_{1-x}$ получены даже значения 60 пс. Такие большие скорости генерации носителей заряда свидетельствуют о том, что главную роль в развитии неустойчивости играют электронные процессы. Среди них ввиду достаточно высоких переключающих полей и температур эксперимента наиболее вероятно проявление ударной ионизации (УИ) [9, 10]. В работе [11] было показано, что, моделируя энергетический спектр неупорядоченного полупроводника тремя уровнями [12], на основе процесса УИ можно качественно объяснить закономерности кинетики сверхбыстрого переключения. Согласно этой модели [11], в которой верхний энергетический уровень представляет собой уровень протекания, промежуточный — локализованные состояния «хвоста» зоны проводимости, а нижний — состояния, лежащие вблизи уровня Ферми, резкий рост концентрации на уровне протекания, соответствующий переходу из ВС и НС, наступает после заполнения носителями заряда промежуточного уровня. Время заполнения этого уровня соответствует фазе задержки. Скорость роста концентрации в процессе включения зависит от величины приложенного электрического поля, что объясняет обнаруженное в настоящей работе уменьшение $\tau_{\text{ф}}$ с перенапряжением. С другой стороны, переключающее поле тем меньше, чем медленнее рекомбинация из уровня протекания в промежуточный уровень. Это дает возможность понять влияние на величину $\tau_{\text{ф}}$ процесса формовки, в результате которого происходит импульсный отжиг активного вещества, снижающий количество центров рекомбинации. Различие в $\tau_{\text{ф}}$ для разных систем, по-видимому, тоже связано с различными скоростями рекомбинации между верхним и промежуточным уровнем.

Таким образом, основные закономерности пикосекундного переключения качественно удается объяснить на основе модели, представленной в работе [11]. Однако для количественной оценки быстродействия эффекта переключения, причиной которого является УИ в многоуровневой системе, необходимо учесть изменение напряжения на образце и истощение нижнего уровня в процессе переключения, а также неоднородную генерацию носителей в объеме пленки [13]. При этом анализ целесообразно проводить в рамках схемы обострителя [14], учитывая волновое сопротивление линии передачи ($Z=50$ Ом). Тогда связь между напряжением падающего $V_{\text{н}}$ на образец и сформированного $V_{\text{вых}}$ импульса выражается следующей формулой:

$$V_{\text{вых}}(t) = V_{\text{н}} \frac{2ZG(t)}{1 + 2ZG(t)}, \quad (1)$$

G — проводимость образца, t — время. В свою очередь

$$G(t) = G_0 \left(1 - S + \frac{n(t)}{n_0} S \right), \quad (2)$$

G_0, n_0 — начальная проводимость и концентрация носителей заряда; $S = S_2/S_1$ — соотношение сечений токового канала и электродов. Задача, таким образом, сводится к нахождению кинетики $n(t)$ с учетом изменения электрического поля в образце. Для этого запишем уравнения баланса частиц в случае трехуровневой системы, представленной в работе [11]

$$\frac{dn}{dt} = \alpha_1(E) n (N_d - N_a - n) - \gamma_1 n (N_a + n) + \alpha_2(E) nm - \gamma_2 n (M - n), \quad (3)$$

$$dm/dt = -\alpha_2(E) nm + \gamma_2(n) (M - m), \quad (4)$$

где n, m — концентрация электронов на уровне протекания и на промежуточном уровне; N_d, N_a — концентрация доноров и акцепторов; M — концентрация промежуточных состояний; $\alpha_{1,2}$ — коэффициенты УИ; $\gamma_{1,2}$ — коэффициенты рекомбинации, относящиеся к нижнему и промежуточному уровням соответственно.

В уравнениях (3) и (4) опущены члены термической генерации, которые определяют равновесную концентрацию n_0 , однако слабо влияют на кинетику $n(t)$ при развитии лавинного умножения. В дальнейшем n_0 фигурирует как эмпирический параметр. В отличие от [11] в уравнениях учтено истощение нижнего уровня путем замены N_a на $N_a + n$. Среднее поле в образце определяется следующим выражением:

$$E(t) = \frac{E_n}{1 + 2ZG(t)}, \quad (5)$$

где $E_n = 2V_n/d$, d — расстояние между электродами.

Система уравнений (3)–(5) с учетом (2) решалась численно для нескольких значений перенапряжения $A = E_n/E_0$, E_0 — критическое поле, при котором начинается лавинный рост концентрации. При этом учитывалось, что $\alpha_{1,2}(E) \sim \sim \exp(-\Delta \epsilon_{1,2} e \lambda E)$ [10], λ — длина свободного пробега, ΔE — глубина соответствующего уровня. Кроме того, для упрощения расчета принималось,² что

$$\Delta \epsilon_{1,2} e \lambda E_0 = 1.$$

На рис. 3 представлена кинетика сформированного сигнала в случае, когда активным материалом служат пленки из $\text{Ge}_{0.25}\text{Te}_{0.75}$ толщиной 0.5 мкм. В расчете использовались следующие значения параметров: $\gamma_2 M = 10^{11} \text{ с}^{-1}$ [15], $\gamma_1 N_a = 10^7 \text{ с}^{-1}$, $M = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_d - N_a = 10^{20} \text{ см}^{-3}$ [16], $E_0 = 3 \cdot 10^5 \text{ В/см}$, сопротивление в ВС $2 \cdot 10^5 \text{ Ом}$, подвижность $10 \text{ см}^2/\text{Вс}$, диаметр контактов 50 мкм, канала тока 0.5 мкм. Как видно, τ_ϕ сформированного импульса составляет 40–60 пс, что примерно соответствует эксперименту (рис. 1). Кроме того, в процессе включения выделяются две фазы — быстрая и медленная, — относительный вклад которых меняется с перенапряжением, а сопротивление в НС составляет несколько сот Ом. Оценим минимальное τ_ϕ , которое может быть получено при помощи переключающих элементов на основе неупорядоченных полупроводников. Если за счет сильного разупорядочения активного вещества время рекомбинации на промежуточный уровень достигнет 10^{12} с^{-1} [16], то τ_ϕ окажется порядка нескольких пикосекунд. Следует заметить, что и диаметр канала тока влияет на быстродействие эффекта: чем диаметр меньше, тем при больших концентрациях начинается включение и тем самым сокращается τ_ϕ .

² Этот параметр, строго говоря, может отличаться от единицы, однако, как показывают оценки, его величина слабо влияет на τ_ϕ .

В результате экспериментального исследования кинетики переключения в неупорядоченных пленках теллуридов In, Ga, Ge, Si обнаружено, что минимальные времена сформированных перепадов напряжения составляют 60—80 пс. Оценки, проведенные на основе модели ударной ионизации в многоуровневой системе, показывают, что изменение сопротивления неупорядоченного полупроводника вследствие процесса ударной ионизации может обеспечить формирование перепадов электрического напряжения длительностью в несколько десятков пикосекунд.

Авторы выражают благодарность К. Пирагасу за помощь, оказанную при проведении расчетов.

Литература

- [1] Коломиец Б. Т., Лебедев Э. А., Таксами И. А. ФТП, 1969, т. 3, № 2, с. 312—314.
- [2] Shaw M. P., Holmberg S. H., Kostylev S. A. Phys. Rev. Lett., 1973, v. 31, N 8, p. 542—545.
- [3] Балявичюс С., Чеснис А., Огинскас А. и др. В кн.: Пути повышения стабильности и надежности микроэлементов и микросхем. Рязань, 1984, с. 150—151.
- [4] Привалов В. Н., Швец Г. А., Шкут В. А. Радиоэлектроника, 1972, т. 15, № 12, с. 1515—1516.
- [5] Балявичюс С., Грузинскас В., Декснис А., Чеснис А. Лит. физ. сб., 1980, т. 20, № 2, с. 25—31.
- [6] Valevičius S. et al. Thin Sol. Films, 1984, v. 112, p. 75—80.
- [7] Балявичюс С., Декснис А., Пошкус А., Шикторов Н. ФТП, 1984, т. 18, № 8, с. 1513—1516.
- [8] Балявичюс С., Грузинскас Б., Пошкус А. ФТП, 1982, т. 16, № 11, с. 1934—1937.
- [9] Hindley N. K. J. Non-Cryst. Solids, 1972, v. 8—10, p. 557—562.
- [10] Juška G., Arlauskas K. Phys. Stat. Sol. (a), 1983, v. 77, N 1, p. 387—391.
- [11] Балявичюс С., Забродский А., Пошкус А., Тамашявичюс А. ФТП, 1985, т. 27, № 5, с. 1460—1465.
- [12] Забродский А. Г., Шлимак И. С. ФТП, 1974, т. 16, № 8, с. 2350—2355.
- [13] Alsopp M. I., Thompson M. J., Allison J. VII Int. conf. «Amorphous and liquid semiconductors». Edinburgh, 1977, p. 732—736.
- [14] Агаханян Т. М., Гаврилов Л. Е., Мищенко Б. Г. Основы наносекундной импульсной техники. М.: Атомиздат, 1976, с. 111—114.
- [15] Ackley D. E., Taub J., Paul W. Phys. Rev. Lett., 1979, v. 43, N 10, p. 715—718.
- [16] Аморфные полупроводники / Под ред. М. Бродски. М., 1982.

Институт физики полупроводников
АН ЛитССР
Вильнюс

Поступило в Редакцию
16 декабря 1986 г.