

05;07

Прямое наблюдение эволюции пластических свойств стеклообразных полупроводников при облучении светом

© М.Л. Трунов

Ужгородский национальный университет

E-mail: stm@tn.uz.ua

Поступило в Редакцию 5 мая 2004 г.

Исследована временная эволюция пластических свойств пленок халькогенидных стеклообразных полупроводников при непрерывном облучении светом из области края собственного поглощения. Показано, что процесс фотоиндуцированного изменения пластичности (фотопластический эффект) имеет двухстадийный характер с возникновением на начальном этапе облучения светом промежуточной метастабильной фазы, обладающей более высокой пластичностью, чем стабильная по отношению к свету фаза, возникающая при продолжительном облучении. Для обоих этапов методом микроиндентирования проведена оценка вязкости пленок как количественной характеристики степени их пластичности при облучении. Показано, что максимальные фотоиндуцированные изменения пластичности наблюдаются в свеженапыленных пленках $As_{50}Se_{50}$, вязкость которых для обоих этапов облучения меняется от $\sim 1.5 \cdot 10^{12}$ Пуаз (гигантское фоторазмягчение) до $\sim 6 \cdot 10^{14}$ Пуаз соответственно.

Ранее [1,2] в пленках халькогенидных стекол был обнаружен отрицательный фотопластический эффект, заключающийся в том, что при облучении пленок $As-S(Se)$ светом из области края собственного поглощения наблюдалась трансформация структуры стекла из вязкоупругого в пластическое состояние (фоторазмягчение). Макроскопическая модель этого явления была основана на предположении, что вязкость халькогенидных стекол во время облучения при комнатной температуре падает до $10^{12}-10^{13}$ Пуаз, что близко к вязкости исходных стекол вблизи их температуры размягчения T_g . Оценка вязкости по кинетике микроиндентирования в момент облучения подтвердила это предположение [2]. Аналогичные результаты были получены для пленок халькогенидных стекол других составов [3,4], а также при облучении слабопоглощаемым светом плотностью мощности около 100 W/cm^2

волокон из стекла As_2S_3 и одновременном приложении растягивающих напряжений [5]. Измеренное в [5] значение вязкости для таких условий облучения составило $5 \cdot 10^{12}$ Пуаз, что хорошо согласуется с ранее опубликованными данными [1,2] и свидетельствует об универсальном характере и едином механизме обнаруженной закономерности.

В настоящем сообщении приведены результаты исследования кинетики фотопластического эффекта в пленках халькогенидных стекол системы As–Se.

Эксперименты выполнены на пленках толщиной $1-3 \mu\text{m}$, полученных термическим испарением стекол As_xSe_{1-x} из квазизамкнутых эффузионных ячеек со скоростью $2-5 \text{ nm/s}$ на неподогретые подложки из кварцевого стекла. В качестве источника света использовался He–Ne-лазер (длина волны 633 nm), а плотность мощности излучения на поверхности образца составляла не более 130 mW/cm^2 . Облучение образца таким светом не вызывает его нагрев [6]. Таким образом, все эффекты, представленные нами ниже, имеют атермическую (электронную) природу.

Механические свойства пленок исследовались методом циклического микроиндентирования. Испытания проводились на микротвердометре ПМТ-3 индентором Виккерса (четырёхгранная алмазная пирамида с углом при вершине 136°) при нагрузках на образец $0.02-0.05 \text{ N}$. Во время эксперимента производилось несколько уколов образца при одной и той же нагрузке на инденторе. При этом после каждого цикла „нагружение–разгружение“ образец перемещался таким образом, чтобы новый цикл проводился на следующем участке пленки. При испытаниях облучаемого светом образца процесс облучения не прерывался между циклами „нагружение–разгружение“. Таким образом, время, необходимое на перемещение образца (не более 10 s), входило в общее время экспозиции, которое для каждого данного отпечатка складывалось из длительности всех предыдущих циклов индентирования. Для первой серии экспериментов время каждого цикла последовательно возрастало от 10 s до 2 h , для второй — было постоянным и составляло 20 s . Общий диаметр индентируемых участков не превышал $200 \mu\text{m}$, что значительно меньше диаметра лазерного пятна (2 mm). Испытания проводились на пяти образцах, полученных в одном цикле напыления. Диаметр образцов составлял 15 mm и позволял для каждого образца провести многократные серии испытаний для набора статистики и получения надежных и воспроизводимых результатов.

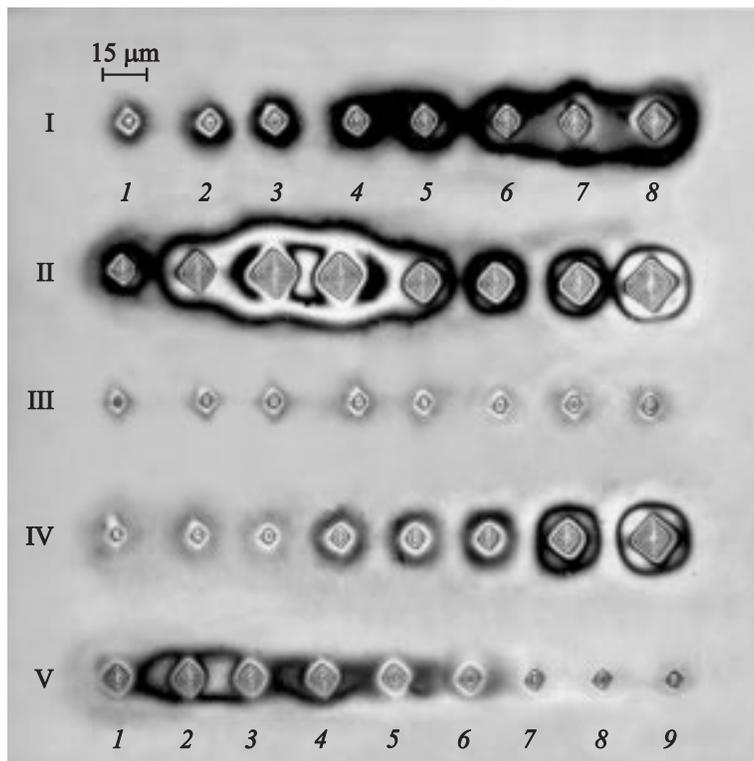


Рис. 1. Интерферограммы микроотпечатков, полученных после микроиндентирования свеженапыленной пленки $As_{50}Se_{50}$ толщиной $3 \mu m$. Для рядов I–IV время каждого цикла микроиндентирования непрерывно возрастает и составляет соответственно номеру отпечатка: 1 — 10 s; 2 — 30 s; 3 — 1 min; 4 — 3 min; 5 — 5 min; 6 — 10 min; 7 — 30 min; 8 — 120 min. Для ряда V время каждого цикла микроиндентирования одинаково и составляет 20 s; экспозиция образца возрастает соответственно номеру отпечатка: 1 — 20 s; 2 — 50 s; 3 — 80 s; 4 — 140 s; 5 — 200 s; 6 — 300 s; 7 — 600 s; 8 — 1200 s. Микроотпечаток 9 получен сразу после выключения света.

На рис. 1 (ряды I–IV) приведены интерферограммы микроотпечатков, полученных в первой серии экспериментов (при нагрузке $P = 0.02 N$) при микроиндентировании свеженапыленных пленок.

нок $As_{50}Se_{50}$ в темноте (ряд I), во время первого облучения (ряд II), после выключения света (ряд III) и при повторной засветке (ряд IV). Микроиндентирование пленки при последующих циклах „включение–выключение“ света приводит к получению отпечатков, аналогичных рядам IV и III соответственно.

Из полученных данных видно, что глубина погружения индентора при микроиндентировании свеженапыленной пленки в темноте незначительно увеличивается с увеличением времени выдержки индентора под нагрузкой (рис. 1, ряд I) и практически не зависит от него после облучения пленки светом (рис. 1, ряд III). Однако при облучении картина существенно меняется: процесс погружения индентора нелинейно зависит от времени — на начальном этапе отпечаток резко растёт и достигает максимального размера на 120 s облучения, затем наблюдается уменьшение глубины отпечатка и далее ее возрастание пропорционально экспозиции образца (рис. 1, ряд II). При повторном облучении светом после выдержки образца в темноте глубина погружения индентора практически линейно зависит от времени облучения (рис. 1, ряд IV). Интерферограммы отпечатков, полученные с помощью микроинтерферометра Майкельсона, показывают, что хрупкое стекло под действием света и нагрузки становится мягким и текучим. Это приводит к существенному увеличению глубины погружения индентора и появлению вокруг микроотпечатков наплывов, которые проявляются на интерферограммах в виде широкой черно-белой каймы по периметру отпечатка. Такие наплывы обычно характерны для микроотпечатков, полученных при микроиндентировании пластичных материалов (например, металлов).

Видно (рис. 1, ряд I), что определенная пластичность характерна и для свеженапыленных пленок. Однако увеличение глубины погружения индентора с ростом времени индентирования в этом случае больше связано с малой начальной плотностью упаковки пленки и наличием в ней свободного объема — из-за пустот, пор и прочих микродефектов, которые разрушаются вследствие высокого давления, развиваемого на острие индентора.

Как показано ранее в [2], скорость процесса погружения индентора при засветке пленок халькогенидных стекол контролируется вязким течением стекла. Поэтому немонотонное изменение размеров отпечатков при первом облучении (рис. 1, ряд II) свидетельствует о том, что вязкость стекла меняется во время облучения. Это подтверждается

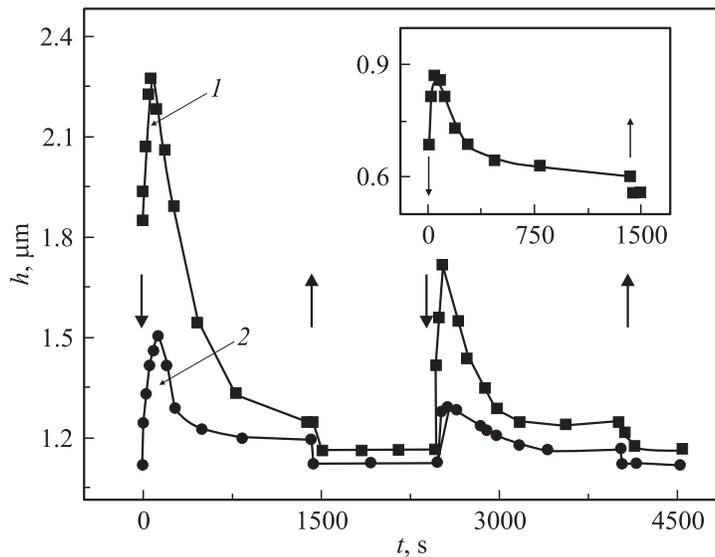


Рис. 2. Зависимость глубины погружения индентора от времени облучения при микроиндентировании свеженанесенных пленок $\text{As}_{50}\text{Se}_{50}$ (кривая 1) и $\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$ (кривая 2). На вставке — то же, но для отожженной пленки $\text{As}_{50}\text{Se}_{50}$. Толщина пленок $3 \mu\text{m}$. Время микроиндентирования для каждой экспериментальной точки 20 s. Стрелками показаны моменты включения (\downarrow) и выключения (\uparrow) света.

результатами второй серии экспериментов по микроиндентированию пленок при одинаковом времени ($\Delta t = 20 \text{ s}$) выдержки индентора под нагрузкой (рис. 1, ряд V). Поскольку в данном случае кинетика погружения индентора отражает усредненные за время Δt изменения вязкости стекла при облучении, то можно утверждать, что вязкость пленок падает до минимального значения в первые 50 s облучения, затем плавно возрастает и далее не меняется с ростом экспозиции. Вязкость пленок, оцененная по методике, представленной в [2], составила $\sim 1.5 \cdot 10^{12}$ Пуаз на начальном этапе засветки и $\sim 6 \cdot 10^{14}$ Пуаз в конце.

Количественные данные всего процесса микроиндентирования для второй серии экспериментов (при нагрузке $P = 0.04 \text{ N}$), включая повторные циклы облучения светом, представлены на рис. 2 (кривая 1).

Как следует из них, промежуточный этап повышенной пластичности пленок наблюдается не только для первого цикла облучения, но и при повторных циклах включения света. Подобный результат, хотя и в меньшей мере, наблюдается и при облучении пленок As–Se других составов, в частности $As_{40}Se_{60}$ (рис. 2, кривая 2), а также при засветке отожженной пленки $As_{50}Se_{50}$ (рис. 2, вставка). Таким образом, полученные данные свидетельствуют, что во всех случаях микроиндентирования при облучении мы наблюдаем две стадии процесса; для первой из них (на начальном этапе облучения светом) пленка характеризуется большей пластичностью, чем для последующей стадии при продолжительном облучении.

Согласно интрамолекулярной модели фотоиндуцированной пластичности халькогенидных стекол, предложенной в [7], одновременное действие света и внешней нагрузки вызывает трансформацию молекул типа $As_4S_4(Se_4)$ из закрытой (трехмерной) в открытую (планарную) форму. Таким образом, максимальные изменения фотопластичности должны достигаться для пленок с наибольшей концентрацией таких молекул, т. е. пленок состава $As_{50}Se_{50}$, что и подтверждается экспериментально.

Автор благодарен В.С. Биланичу и А.А. Грабару за помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] Трунов М.Л., Анчугин А.Г. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 1. С. 37–40.
- [2] Трунов М.Л., Анчугин А.Г. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 5. С. 78–81.
- [3] Trunov M.L., Anchugin A.G., Savchenko N.D. et al. // Proc. SPIE. 1994. V. 2113. P. 186–192.
- [4] Trunov M.L. // J. Non-Cryst. Solids. 1995. V. 192&193. P. 431–434.
- [5] Hisakuni H., Tanaka K. // Science. 1995. V. 270. P. 974–975.
- [6] Salimonia A., Galstian T., Villeneuve A. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85. N 19. P. 4112–4115.
- [7] Yannopoulos S.N. // Phys. Rev. B. 2003. V. 68. P. 064206-1–064206-7.