

05.2; 06; 12

© 1993

АВТОВОЛНЫ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СТРУКТУРАХ С СОБСТВЕННОЙ ПАМЯТЬЮ

А.И. Б е л е ц к и й, Н.А. В л а с е н к о

Автоволновые процессы в активных распределенных средах широко изучаются во многих областях науки – биофизике, химии, физике горения и плазмы, физике твердого тела. Особое внимание привлекают активные твердотельные автоволновые среды (в частности, полупроводниковые) ввиду перспектив их применения в микроэлектронной технике. Теоретические исследования автоволн и различных видов пространственно-неоднородных состояний (ПНС) в активных средах намного обгоняют эксперимент [1]. Особенно ограничено число экспериментально исследованных сред со светозлучающими автоволнами. Светящиеся ПНС обнаружены в газовом разряде в случае высокоомных электродов [2]. В твердотельных средах наблюдались лишь светящиеся шнуры и домены в горячей электронно-дырочной плазме обратных р-п переходах [3]. Движущиеся светящиеся нити и домены разной формы наблюдали также в тонкопленочных электролюминесцентных структурах (ТПЭЛС) с собственной памятью на основе $ZnS:Mn$ [4], но они не были рассмотрены как автоволновые процессы. В данной работе показана возможность получения в таких ТПЭЛС автоволн всех типов.

Образцы представляли собой нанесенную на стеклянную подложку МДПДМ структуру, где М – электроды (In_2O_3 и Al), Д – диэлектрические слои SiO_2/Al_2O_3 толщиной ~ 250 нм, П – электролюминесцентная пленка $ZnS:Mn$ толщиной 500–700 нм с концентрацией Мп 1–2 вес.%. Электролюминесценцию возбуждали синусоидальным напряжением U или знакопеременными импульсами.

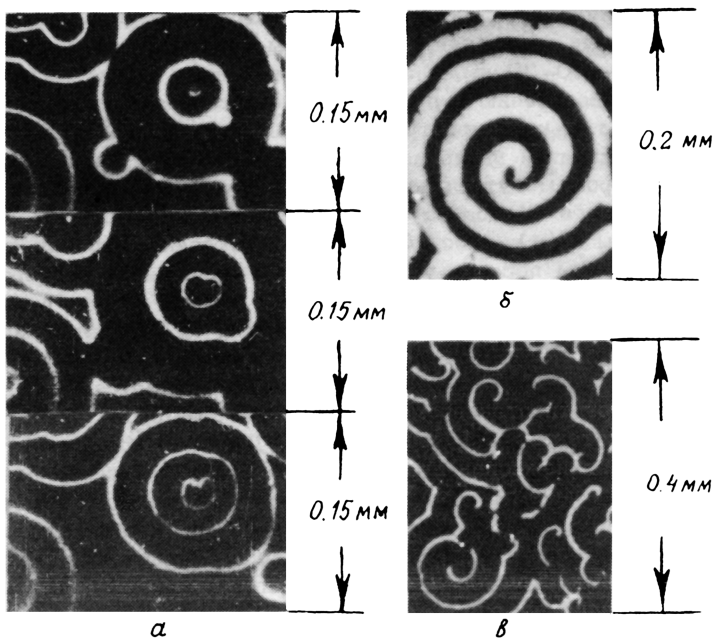
Такие ТПЭЛС обладают собственной памятью, связанной с гистерезисом зависимости яркости и активного тока от U и обусловленной отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) их.

В случае синусоидального напряжения характер свечения вблизи порога сильно зависит от частоты f . При $f < 1$ кГц оно имеет вид сплошного фона, на котором появляются яркие точки размером < 1 мкм при повышении f до 5 гГц. При $f \approx 10$ кГц происходит расслоение свечения на отдельные области, образованные множеством точек, которые начинают скачкообразно и хаотически двигаться. При дальнейшем повышении частоты усиливается коллективный характер движения точек, приводящий к движению стенок светящихся областей наружу при фиксированном U . Затем в центре этих областей возникают с течением времени темные пятна, светящиеся

участки сужаются и вся картина становится динамичной. В некоторых образцах при этом наблюдаются крупные домены, движущиеся от одного конца ячейки к другому или по ее периметру с периодом в несколько секунд. Наконец, при некоторой частоте, зависящей от свойств образца и условий возбуждения, возникают автоволны различных типов, примеры которых показаны на фотографии. Сразу после подачи напряжения, близкого к пороговому, преобладают автоволны типа „ведущий центр“, имеющие вид расходящихся концентрических колец (а). Со временем начинают доминировать автоволны в виде вращающихся архимедовых спиралей, присущие центрам ревербераторам (б). В конце концов картина хаотизируется, принимая вид причудливо изменяющихся узоров (в). После включения и повторного включения напряжения характер автоволновых процессов качественно повторяется, но местоположение и число ведущих центров может измениться. Это указывает на то, что источником их являются не только какие-либо неоднородности образца, но и случайные флуктуации.

Свойства описанных выше динамических ПНС не оставляют сомнения в том, что они представляют собой именно автоволны. При распространении интенсивность свечения (амплитуда волны) не изменяется. При встрече двух волн происходит аннигиляция (рис. а). Когда волна достигает границы среды, наблюдается ее исчезновение, а не отражение. В то же время имеют место дифракция волн на крупных неоднородностях и характерный автоволновой эффект — подавление низкочастотных источников высокочастотными. Параметры автоволн следующие: длина волны — 10–40 мкм, частота — десятые доли герца, скорость распространения — 10–40 мкм/с. Параметры изменяются от образца к образцу и при изменении условий возбуждения, особенно напряжения и частоты. Например, скорость распространения резко возрастает (более, чем в два раза) при повышении U всего на 1 В, а с ростом f увеличивается примерно линейно.

Пороговая частота $f_{\text{пор}}$, при которой возникают автоволны, зависит от температуры окружающей среды $T_{\text{ср}}$, формы возбуждающего напряжения и сопротивления прозрачного электрода R . При комнатной температуре и синусоидальном напряжении $f_{\text{пор}}$ равна 100–120 кГц для образцов с $R = 50\text{--}70$ Ом/п. При таком режиме возбуждения образец сильно разогревается за счет протекания полного тока через прозрачный электрод и активного тока через возбужденную ячейку. Измерение температуры образца $T_{\text{обр}}$ с помощью жидкого кристалла, нанесенного на ТПЭЛС, показало, что даже при предпороговом напряжении в автоволновом режиме $T_{\text{обр}}$ равна $\sim 40^\circ\text{C}$ как на самой ячейке, так и электродной шине In_2O_3 . После переключения ячейки в возбужденное состояние температура на шине возрастает на 10–20 $^\circ\text{C}$, а на самой ячейке достигает $\geq 80^\circ\text{C}$. Следует отметить, что в рассматриваемом случае устойчивая автоволновая картина свечения имеет место в довольно узком диапазоне частот — 5–10 кГц. При более высокой частоте картина быстро хаотизируется и деградирует. Повышение $T_{\text{ср}}$ до 40–



а

б

Фотография автоволн: а – кольцевые волны, заснятые с интервалом 1 с; б – спиральная автоволна; в – автоволновой хаос.

50 °С или увеличение сопротивления прозрачного электрода примерно на порядок величины без изменения $T_{\text{ср}}$ позволяет снизить f пор до 30–40 кГц с одновременным расширением диапазона частот, в котором существуют автоволны, до 20–40 кГц.

При возбуждении прямоугольными импульсами напряжения с высокой скважностью (≥ 10), когда разогрев образца за счет токопрохождения невелик, автоволны удается возбудить, только повысив $T_{\text{ср}}$ до 80–85 °С при $f \geq 10$ кГц независимо от величины R .

Известно, что для существования автоволн необходимы процессы с обратной связью, как положительной (активатор), так и отрицательной (ингибитор). Согласно современным представлениям [5], механизм возбуждения электролюминесценции в ТПЭЛС ударный, а порог ее возникновения определяется полевой генерацией свободных электронов. Положительная связь между этим процессом и напряженностью электрического поля в П-слое $E_{\text{П}}$ из-за формирования на Д-П границах поляризаационного заряда $Q_{\text{пол}}$, усиливающего $E_{\text{П}}$ при изменении знака U , является причиной ОДС. Величина $Q_{\text{пол}}$ достаточно велика (> 1 мкК/см²) для создания на Д-П границах сильного ($> 10^6$ В/см) тангенциально направленного поля. Поэтому носители, локализованные на поверхностных уровнях в кристаллитах, возбужденных в результате какой-либо флуктуации,

могут туннелировать на такие незаполненные уровни в соседних невозбужденных кристаллитах (размеры кристаллитов в пленке $ZnS:Mn$ - 20-30 нм, а зазоры между ними - ≤ 2 нм). Это приводит к увеличению в последних E_{Π} и скорости генерации электронов, т.е. к распространению свечения (волны возбуждения) от мест флуктуаций вдоль поверхности ТПЭЛС.

Ингибитором могут служить процессы, которые приводят к ослаблению поля в П-слое за счет уменьшения либо падения напряжения на нем (U_{Π}), либо $Q_{\text{пол}}$. Нами показано, что при повышении температуры образца уменьшается ширина петли гистерезиса характеристик ТПЭЛС и при $T \approx 100^{\circ}\text{C}$ память исчезает совсем. Поэтому при повышении T уменьшается как $Q_{\text{пол}}$, так и модуль ОДС ($R_{\text{одс}}$), а следовательно, и U_{Π} . Критерием существования автоволнового (автоколебательного) режима является: $(R_{\text{одс}}) < R_H$, где R_H - сопротивление, включенное последовательно в ОДС (в данном случае, электрода In_2O_3 и Д-слоев) [6]. Таким образом, необходимость нагрева до $80-85^{\circ}\text{C}$ для получения автоволн в ТПЭЛС может быть объяснена с точки зрения обоих типов ингибиторных процессов, отмеченных выше. Роль частоты в этих процессах, очевидно, не сводится только к обеспечению разогрева образца, о чем свидетельствует эксперимент при импульсном возбуждении. Для выяснения влияния f на автоволновые процессы и конкретизации механизмов ингибитора необходимы дальнейшие исследования.

Таким образом, впервые показано, что ТПЭЛС с собственной памятью являются двумерной диссипативной активной средой, в которой можно наблюдать, изменяя условия возбуждения, все виды автоволновых процессов. Такие среды представляют интерес как модельные, а также для создания автоколебательных оптоэлектронных устройств.

Авторы приносят благодарность А.В. Гладких за помощь в измерении температуры образца и признательны В.В. Гафийчуку и Ю.Г. Семенову за плодотворное обсуждение.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Кернер Б.С., Осипов В.В. // УФН. 1990. Т. 160. В. 9. С. 1-73.
- [2] R a d e h a u s Ch., D i r k s m e y e r T., W i l l e b r a n d H., P u r w i n s H.-G. // Phys. Lett. A. 1987. V. 125. N 2-3. P. 92-94.
- [3] Кернер Б.С., Литвин Д.П., Санкин В.И. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 13. С. 819-823.
- [4] R ü f e r H., M a r e l l o V., O n t o n A. // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. N 2. P. 1183-1189.
- [5] V l a s e n k o N.A. // Acta Polytechnica Scandinavica. 1990. Appl. Phys. Ser. N 170. P. 27-39.

[6] Г а р я и н о в С.А., А б е з г а у з И.Д. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением. М.: Энергия, 1970. 320 с.

Институт полупроводников
АН Украины

Поступило в Редакцию
20 декабря 1992 г.