

- [1] Акимова И.В., Бочкарев А.Э., Долгинов Л.М., Дракин А.Е., Дружинина Л.В., Елисеев П.Г., Свердлов Б.Н., Скрипкин В.А. - ЖТФ, 1988, т. 58, в. 4, с. 701-707.
- [2] Бочкарев А.Э., Долгинов Л.М., Дракин А.Е., Дружинина Л.В., Елисеев П.Г., Свердлов Б.Н., Скрипкин В.А. - Квантовая электроника, 1986, т. 13, в. 10, с. 2119-2120.
- [3] Saneau C., Srivastava A.K., Dentai A.G., Zyskind J.L., Burgess C.A., Pollack M.A. - Electron. Lett., 1986, v. 22, N 19, p. 992-993.
- [4] Баранов А.Н., Джуртанов Б.Е., Именков А.Н., Рогачев А.А., Шерняков Ю.М., Яковлев Ю.П. - ФТП, 1986, т. 20, в. 12, с. 2217-2221.
- [5] Баранов А.Н., Данилова Т.Н., Джуртанов Б.Е., Именков А.Н., Ершов О.Г., Яковлев Ю.П. - ЖТФ, 1988, т. 58, в. 8, с. 1623-1626.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
21 июля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 18

26 сентября 1988 г.

ОСОБЕННОСТИ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПЛЕНОК АМОРФНОГО ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОГО УГЛЕРОДА ($a - C:H$)

В.А. Васильев, А.С. Волков,
Е. Мусабеков, Е.И. Теруков

Исследование фотолюминесценции (ФЛ) гидрогенизированных аморфных полупроводников ($a - Si : H$, $a - SiC : H$, $a - Ge : H$) позволяет получать важную информацию об оптических свойствах этих материалов, природе структурных дефектов и энергетическом распределении локализованных состояний в запрещенной зоне E_g ¹. Установлено, что излучательные переходы в этой группе материалов преимущественно являются туннельными. Эти переходы осуществля-

¹ За величину E_g в аморфных полупроводниках обычно принимают значение энергии, при которой коэффициент оптического поглощения $\alpha = 10^4 \text{ см}^{-1}$.

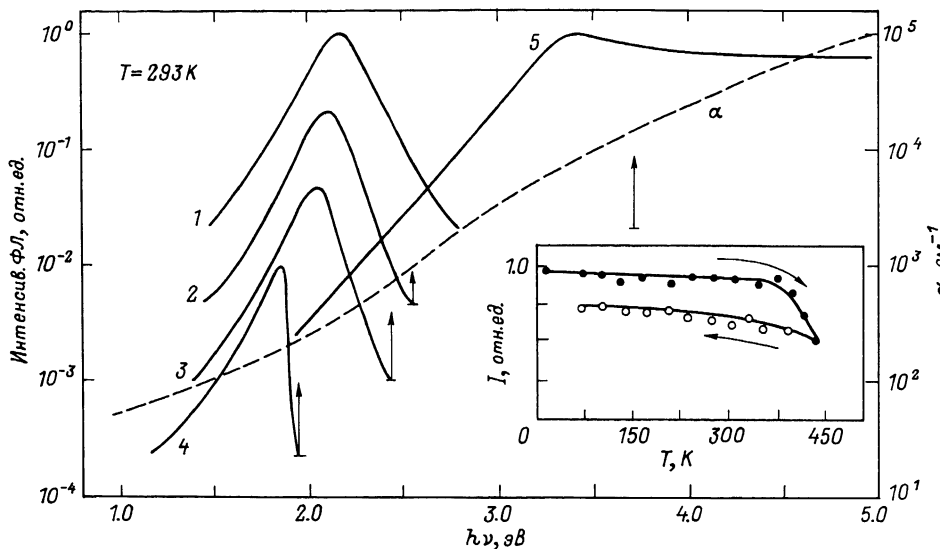


Рис. 1. Нормированные спектры ФЛ (1-4) и спектр возбуждения (5) для пленок а-С:Н, $T = 293$ К. Стрелками отмечены соответствующие энергии квантов возбуждающего света. Пунктирной кривой представлен $\alpha(h\nu)$, согласно [4]. На вставке $I(T)$, $h\nu_{8035} = 2.54$ эВ.

ются между локализованными состояниями, обусловленными дефектами структуры. Туннельные и термоактивированные переходы неравновесных носителей заряда по локализованным состояниям могут существенным образом влиять на квантовую эффективность излучательной рекомбинации, например, приводя к подавлению близнецовой излучательной рекомбинации [1-3].

В последнее время заметное внимание привлечено к изучению свойств алмазоподобных пленок а-С:Н [4]. Однако неравновесные электронные процессы в этом материале практически не исследованы.

В настоящем сообщении приводятся результаты исследований ФЛ в пленках а-С:Н с целью выяснения механизма излучательной рекомбинации и роли структурных дефектов. Обнаружены новые особенности ФЛ пленок а-С:Н, такие как гистерезис на температурной зависимости ФЛ, усталость ФЛ и эффект фотопросветления.

Пленки а-С:Н толщиной $d \sim 1$ мкм были получены путем разложения аргон-метановой ($Ar + CH_4$) смеси 90:10 в ВЧ тлеющем разряде. Осаждение пленок проводилось на кварцевые подложки, температура которых в ходе процесса составляла $T = 200$ °С. Пленки характеризовались удельным сопротивлением $\rho \approx 10^{16}$ Ом·см при 293 К и отсутствием фотопроводимости при облучении белым светом. Для исследования ФЛ в качестве источников возбуждения использовались линии $Ar^+ - Kr^-$ лазеров и ртутной лампы низкого давления $h\nu_{8035} = 1.83-5.0$ эВ, а для изучения кинетики затухания ФЛ -

импульсный N_2 -лазер $h\nu_{8036} = 3.69$ эВ и $\tau_{\alpha} = 8$ нс. Спектральное распределение ФЛ исследовалось в диапазоне энергий 1.2–3.0 эВ в температурном интервале 4.2–430 К.

Спектры ФЛ при различных энергиях фотонов возбуждающего света $h\nu_{8036}$ в стационарном режиме возбуждения при 293 К представлены на рис. 1 (кривые 1–4). Зависимость интенсивности ФЛ (1) от $h\nu_{8036}$, т.е. спектр возбуждения ФЛ представлен кривой 5. Пунктирная кривая на рис. 1 – спектр поглощения $\alpha(h\nu)$ для пленок а-С:H, полученных из метана ($E_g = 3.6$ эВ) [5]. Из рисунка видно, что при возбуждении ФЛ в области $\alpha \sim 10^4$ см⁻¹ спектр ФЛ характеризуется следующими параметрами: положение максимума $E_m = 2.1$ эВ и полушириной $\Delta = 0.65$ эВ. Отметим, что наши данные хорошо согласуются с результатами [6] для пленок а-С:H, полученных из ацетилена ($E_g = 2.95$ эВ, $E_m = 2.05$ эВ, $\Delta = 0.61$ эВ). По мере уменьшения энергии квантов возбуждающего света спектр ФЛ смещается в область меньших энергий и Δ уменьшается, главным образом, за счет обрезания спектров со стороны высоких энергий, при этом значительно уменьшается интегральная интенсивность ФЛ.

Спектр возбуждения ФЛ (кривая 5) имеет максимум при $h\nu_{8036} = 3.3$ эВ, в области $h\nu_{8036} = 3.5$ –5.0 эВ $I(h\nu)$ практически постоянна, а при $h\nu_{8036} < 3.1$ эВ $I(h\nu)$ падает с уменьшением $h\nu_{8036}$ несколько быстрее $\alpha(h\nu)$. Такой ход $I(h\nu)$ позволяет сделать вывод о постоянстве квантовой эффективности (η) ФЛ в широком интервале $h\nu_{8036} > 3.0$ эВ и некотором уменьшении η при $h\nu < 3.0$ эВ. Величина η составляет $\sim 10\%$. На вставке рис. 1 приведена температурная зависимость $I(T)$ при нагревании и последующем охлаждении образцов. Как видно из рисунка, в широком температурном интервале $T = 4.2$ –350 К $I(T)$ слабо зависит от температуры. Увеличение температуры свыше 350 К приводит к гашению ФЛ. Отметим, что $I(T)$ обнаруживает гистерезисное поведение, которое зависит от времени отжига образцов при высокой температуре ($T > 400$ К) и длительности облучения.

Кинетика затухания ФЛ при импульсном возбуждении для трех значений $h\nu$ спектра ФЛ представлена на рис. 2,а. Видно, что $I(t)$ неэкспоненциальна и времена спада $I(t)$ зависят от $h\nu$. Такая зависимость времени спада от $h\nu$ свидетельствует о том, что в процессе затухания ФЛ спектр ФЛ смещается в область низких энергий, как это имеет место в туннельной рекомбинации [1]. Эффективное время жизни, определенное из кривых затухания ФЛ, согласно процедуре, предложенной в [7], составляет для а-С:H $\tau_{эфф} \sim 10^{-8}$ с. Более подробные исследования $I(T)$ и $I(t)$ будут представлены в следующей статье.

При исследовании общих характеристик ФЛ нами был обнаружен эффект усталости ФЛ², т.е. уменьшение $I(t)$ в режиме стационарно-

2

Представленные выше спектры излучения и возбуждения ФЛ и $I(T)$ исследовались после установления квазистационарного режима рекомбинации, в нашем случае после 10^3 с после начала возбуждения.

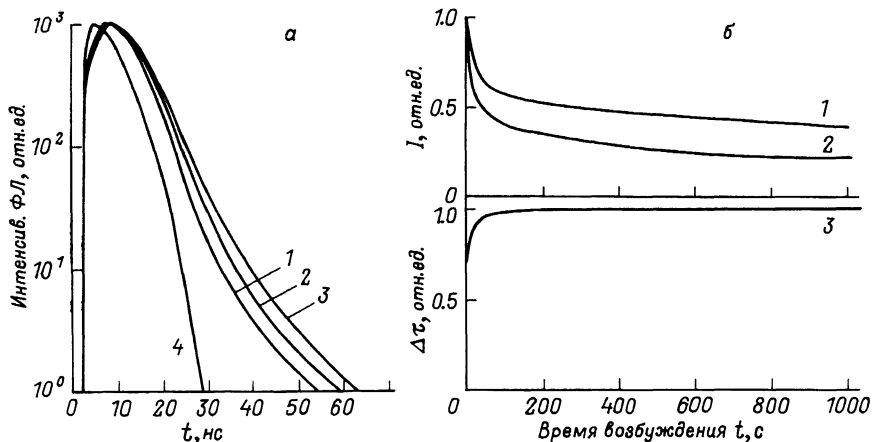


Рис. 2. а) Кинетика затухания ФЛ в пленках а-С:Н при $T = 293$ К и $h\nu_{\text{возб}} = 3.69$ эВ. Для энергий квантов люминесцентного излучения: 1 - 2.3 эВ, 2 - 2.1 эВ, 3 - 1.8 эВ, 4 - лазер. б) Изменение интенсивности ФЛ и $\Delta\tau$ ($t_{\text{возб}}$) в а-С:Н при непрерывном возбуждении, $h\nu_{\text{возб}} = 2.54$ эВ, $T = 293$ К. 1 - падающая мощность 3 мВт, 2 - 30 мВт, 3 - изменение прозрачности $\Delta\tau$ ($t_{\text{возб}}$) свежеприготовленной пленки (эффект фотопросветления), падающая мощность 3 мВт.

ного возбуждения. Типичные зависимости в свежеприготовленных пленках а-С:Н представлены на рис. 2,б для двух интенсивностей возбуждающего света (кривые 1, 2). Уменьшение $I(t_{\text{возб}})$ в зависимости от мощности и энергии облучаемого света может достигать 5-8 раз, причем $I(t_{\text{возб}})$ характеризуется быстрой составляющей спада при малых временах и медленной - при больших. При этом было обнаружено, что быстрая составляющая спада усталости ФЛ коррелирует с увеличением прозрачности ($\Delta\tau$) пленок (кривая 3, рис. 2,б), т.е. наблюдаются фотостимулированные изменения прозрачности и $\alpha(h\nu)$. Аналогичный эффект фотопросветления наблюдался ранее в стеклообразных полупроводниках [8, 9].

Переходя к обсуждению полученных данных, отметим те из них, которые наиболее существенны для понимания механизма излучательной рекомбинации.

1. Положение спектра ФЛ относительно краев зон ($E_m < E_g$ и $\Delta \sim 0.65$ эВ) и независимость низкоэнергетического крыла спектра стоксовского излучения от $h\nu_{\text{возб}}$.

2. Высокая квантовая эффективность ($\eta > 10\%$) и ее независимость от температуры (в области 4.2-350 К) и энергии возбуждения (до 5 эВ).

3. Неэкспоненциальная быстрая кинетика затухания ФЛ ($\tau_{\text{эфф}} \sim 10^{-8}$ с) и увеличение времени затухания с ростом длины волны излучения.

Эти данные позволяют предположить, что в а-С:Н преобладает близнецовая излучательная рекомбинация кулоновски сильно связанных электронно-дырочных пар, т.е. рекомбинация экситонов малого радиуса (r_g 2–3 Å). Положение спектра излучения свидетельствует о том, что экситоны локализованы на состояниях, образованных дефектами структуры, как это имеет место в аморфных изоляторах [10]. Согласно представлениям, развитым о структурной сетке а-С:Н [11, 12], можно заключить, что структурные дефекты типа недокоординированных атомов углерода (состояния T_3^- и T_3^+) и полимерные конфигурации $(CH)_x$ являются эффективными уровнями для локализации электронно-дырочной пары перед актом излучательной рекомбинации.

Одним из возможных механизмов усталости ФЛ и фотопросветления а-С:Н могут быть фотохимические реакции, приводящие к структурным изменениям аморфной сетки пленок. Определенную роль, возможно, в этих процессах играет перестройка энергетического спектра локализованных состояний вследствие заполнения их неравновесными носителями заряда, например процесс перезарядки уровней дефектов типа T_3^- и T_3^+ в состоянии T_3^0 .

Л и т е р а т у р а

- [1] Street R.A., - Adv. Phys. 1981, v. 30, N 5, p. 593-676.
- [2] Hirabayashi I, Morigaki K., Nitta S. - J. Phys. Soc. Jap., 1981, v. 50, N 9, p. 2961-2968.
- [3] Siebert W., Carius R., Fuhs W., Jahn K. - Phys. St. Sol. (b), 1987, v. 140, N 1, p. 311-321.
- [4] J. Non-Cryst. Solids, 1987, v. 97-98.
- [5] Sotiropoulos J., Weiser G.-J. Non-Cryst. Solids, 1987, v. 97-98, p. 1087-1090.
- [6] Nonomura S., Hattori S., Nitta S. - Solid State Comm., 1987, v. 64, N 10, p. 1261-1264.
- [7] Tsang C., Street R.A. - Phys. Rev., 1979, v. B19, p. 3027-3034.
- [8] Любин В.М., Федоров В.А. - ФТТ, 1981, т. 23, в. 8, с. 2315-2320.
- [9] Eguchi H., Suzuki Y., Hirai M. - J. Non-Cryst. Solids, 1987, v. 95-96, p. 757-764.
- [10] Kivelson S., Gelatt Jr.C.D. - Phys. Rev., 1982, v. B26, N 8, p. 4646-4673.
- [11] O'Reilly E.P. - J. Non-Cryst. Solids, 1987, v. 97-98, p. 1095-1102.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
4 июля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 18

26 сентября 1988 г.

ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОГРАММ С НАНОСЕКУНДНЫМИ ЭКСПОЗИЦИЯМИ НА ЭЛЕКТРОНОГРАФЕ ЭМР-100

Н.А. С а и н о в

Мощное импульсное лазерное излучение может вызвать фазовые переходы на поверхности кристаллов [1]. При этом, в принципе, могут образоваться кристаллические структуры, существующие только в момент действия импульса излучения. Для обнаружения таких структур необходимо развитие дифракционных методов структурного анализа с наносекундным и субнаносекундным временным разрешением. В настоящем сообщении описан метод получения электронограмм с наносекундными экспозициями.

Применяемые в электронографии экспозиции составляют обычно несколько секунд, следовательно, для получения достаточной плотности почернения фотоэмульсии в наносекундном диапазоне экспозиций необходимо повысить яркость дифракционной картины в $\sim 10^8$ раз.

Повышение яркости достигнуто применением двух микроканальных пластин (МКП), расположенных друг за другом (рис. 1) и образующих „шеvronную“ конструкцию [2]. При приложении напряжения ~ 2.5 кВ к блоку МКП за счет лавинообразного увеличения числа электронов в каналах пластин плотность потока электронов на выходе блока будет в $\sim 10^8$ раз превышать плотность потока на входе.

За блоком МКП на расстоянии 1-2 мм располагается люминесцентный экран. Экран представляет собой волоконно-оптическую шайбу с осажденным слоем люминофора, который покрыт тонкой токопроводящей алюминиевой пленкой.

При приложении к зазору между экраном и блоком МКП ускоряющего напряжения 4-5 кВ на экране наблюдается усиленная по яркости дифракционная картина. Фотографирование производится контактным способом.

Питание блока МКП импульсное. Импульс длительностью ~ 1 мкс формируется при разряде накопительной линии через искровой разрядник с лазерным поджигом. Экспозиция при фотографировании задается длительностью импульса напряжения, подаваемого на от-