

$$C = -\frac{2\tau(\Omega)}{15\sqrt{2m\Omega}} \left(1 - \frac{\chi^2}{m\Omega}\right), \quad (6)$$

$$\tau^{-1}(\varepsilon_p) = 2\pi e^2 N_i \sum_{p'} \varphi_{p-p'}^2 (1 - \cos \theta) \varepsilon^{-2}(\mathbf{p} - \mathbf{p}', 0) \delta(\varepsilon_p - \varepsilon_{p'}), \quad (7)$$

здесь  $\chi = (6\pi n e^2 / (\varepsilon_0 \varepsilon_F))^{1/2}$  — обратный радиус экранирования Томаса—Ферми,  $\sigma_0 = e^2 n \tau(\varepsilon_F) / m$ ,  $\beta = e^2 F^2 / (m \Omega^3)$ ,  $n$  — концентрация электронов проводимости,  $\varepsilon_{ijk}$  — единичный антисимметричный тензор,  $e = F/F$ . В интеграле (4) мы положили  $\varepsilon(\mathbf{q}, 0) = 1 + \chi^2 / q^2$ , что справедливо лишь вблизи  $\mathbf{q} = 0$  [5].

Далее считаем, что ось  $OZ \parallel \mathbf{H}$ , ось  $OX$  направлена вдоль постоянного тока (во всех остальных направлениях образец гальванически разомкнут), а вектор  $\mathbf{e}$  лежит в плоскости  $XOY$ . Тогда удельное сопротивление

$$\rho(\mathbf{H}) = \frac{\sigma_{yy}(\mathbf{H})}{\sigma_{xx}(\mathbf{H}) \sigma_{yy}(\mathbf{H}) - \sigma_{xy}(\mathbf{H}) \sigma_{yx}(\mathbf{H})}. \quad (8)$$

Подставляя (2) в (8) и учитывая (6), находим в линейном приближении по  $\mathbf{H}$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\rho(\mathbf{H}) - \rho(0)}{\rho(0)} = \frac{4\pi}{15} N_i \left(\frac{eQ}{\varepsilon_0}\right)^2 \frac{\beta \omega_H \tau(\Omega)}{\sqrt{2m\Omega^3}} (\tau(\Omega) - \tau(\varepsilon_F)) \left[1 - \frac{\chi^2}{m\Omega}\right] \sin 2\alpha, \quad (9)$$

здесь  $\alpha$  — угол между  $\mathbf{e}$  и направлением постоянного тока. Формула (9) отличается от соответствующего результата работы [2] множителем  $[1 - \chi^2 / (m\Omega)]$ , что обусловлено учетом зависимости потенциала рассеивающего центра от поля электромагнитной волны.

Сделаем численные оценки применительно к  $n$ -GaAs. Параметр  $\chi^2 / (m\Omega) = 1$  и, стало быть,  $\Delta\rho/\rho = 0$  при  $n = 5.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $\varepsilon_F = 7.75 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$ ,  $\Omega = 6 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ , а  $\chi^2 / (m\Omega) = 2$  при  $n = 1.9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $\varepsilon_F = 3.8 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$  и  $\Omega = 3 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ . Таким образом, смена знака НМС возможна при вполне реальных значениях частоты подсветки и концентрации электронов. Если, например, полупроводник некомпенсирован ( $n = N_i$ ), то для случая, когда  $\chi^2 / (m\Omega) = 2$ ,  $\tau(\Omega) = 6.3 \cdot 10^{-11} \text{ с}$ , и при  $\omega_H = 5 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ ,  $F = 2.4 \cdot 10^4 \text{ В/см}$  величина  $\Delta\rho/\rho = 1.2 \%$ .

#### Список литературы

- [1] Эпштейн Э. М., Шмелев Г. М., Цуркан Г. И. Фотостимулированные процессы в полупроводниках. Кишинев, 1987. 168 с.
- [2] Малевич В. Л., Эпштейн Э. М. // ФТТ. 1976. Т. 18. В. 5. С. 1286—1289.
- [3] Балкарей Ю. И., Эпштейн Э. М. // ФТТ. 1972. Т. 14. В. 3. С. 741—745.
- [4] Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Физическая кинетика. М., 1979. 528 с.
- [5] Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М., 1966. 416 с.

Институт прикладной физики  
АН ССР Молдовы  
Кишинев

Получено 14.02.1990  
Принято к печати 10.09.1990

ФТП, том 25, вып. 1, 1991

## О СВЯЗИ ПИКОВ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И ИК ПОГЛОЩЕНИЯ В $a$ -Si : H

Спирин А. И., Понарина Е. И., Бендюгов В. Е.,  
Захаров Ю. В., Селезнев А. Е., Кириллов В. И.

В настоящей работе проведены исследования оптических свойств пленок гидрогенизированного аморфного кремния  $a$ -Si : H, полученных методом разложения моносилана в ВЧ тлеющем разряде. Были измерены оптическое поглощение и фотолюминесценция (ФЛ). Образцы для измерения оптического поглощения в видимом диапазоне спектра получены осаждением пленок  $a$ -Si : H

на стеклянные подложки, в ИК диапазоне и ФЛ — на подложки из монокристаллического кремния (КДБ-10) при тех же условиях осаждения. Температуру подложек поддерживалась 520—550 К.

Оптическое пропускание образцов при 300 К в видимой области спектра измерялось с помощью спектрофотометра Spesord UV-VIS, а в инфракрасной —

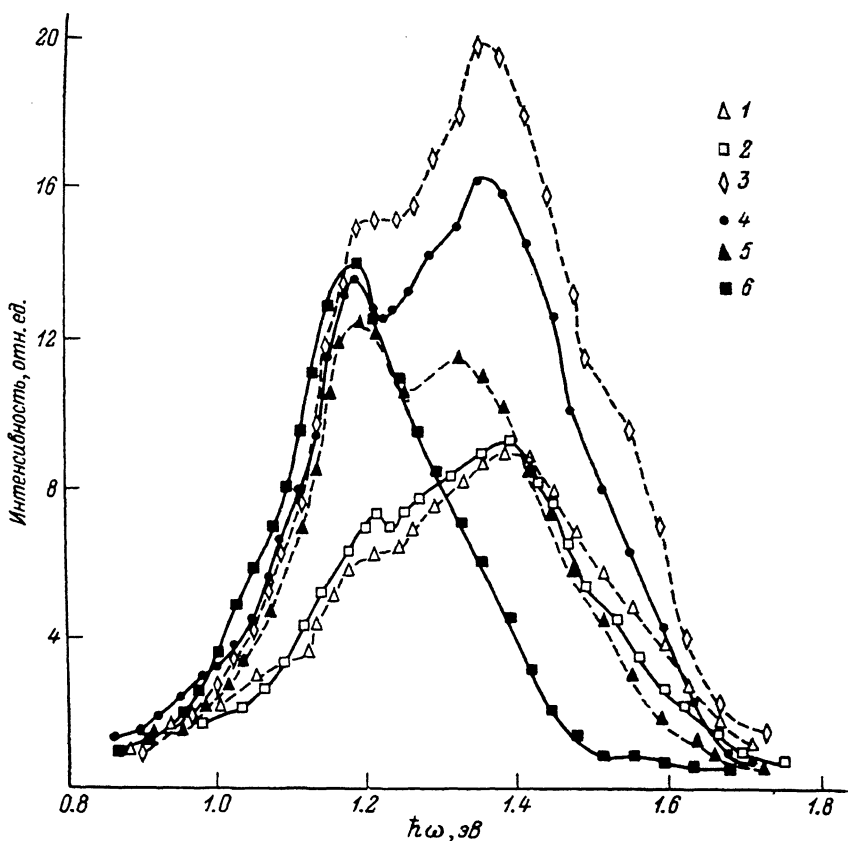


Рис. 1. Спектры фотолуминесценции  $a\text{-Si}:\text{H}$ .

1—6 — образцы 20—25.

ИКС-14А и ИКС-22. Измерения ФЛ проводились при 77 и 300 К с помощью монохроматора МДР-23. В качестве источника возбуждения использовался аргоновый лазер ЛГН-502 с длиной волны излучения  $\lambda = 0.49$  мкм. Приемником излучения служил германиевый фотодиод.

Параметры пленок  $a\text{-Si}:\text{H}$

№ образца	$n_0$ при $\lambda = 1.5$ мкм	$E_g$ , эВ	Общая концентрация водорода $C_{\text{H}}$ , ат%	$\frac{C_{\text{SiH}}}{C_{\text{SiH}_2}}$	$\frac{S_1}{S_2}$
20	3.10	1.89	23.8	0.46	0.52
21	3.13	1.85	30.8	0.63	0.59
22	2.97	1.91	23.1	0.32	0.27
23	3.25	1.87	25.5	0.61	0.53
24	3.35	1.86	29.4	0.66	0.71
25	3.50	1.81	26.0	6.0	9.0

Коэффициент поглощения  $\alpha$ , показатель преломления  $n$  и толщина пленок  $d$  рассчитывались по формулам работы [1]. Полученные значения  $d$  с ошибкой 5 % величины совпадают с найденными при помощи МИИ-4 и составляют 0.5—0.7 мкм. Дисперсия  $n$  в коротковолновой области спектра получена экстраполя-

цией в эту область зависимости  $n = (\text{const}/\lambda^2) + n_0$ , где  $n_0$  — длинноволновый показатель преломления. Ширина запрещенной зоны  $E_g$  найдена экстраполяцией линейного участка зависимости  $(\alpha\hbar\omega)^{1/2}$  от энергии фотонов  $\hbar\omega$ , пересекающей ось абсцисс в точке  $\hbar\omega = E_g$ . Концентрация водорода в пленках определялась по величине интегрального поглощения в области  $630 \text{ см}^{-1}$  с использованием формулы работы [2]. Полученные значения параметров пленок  $a\text{-Si}:\text{H}$  приведены в таблице.

В спектрах ФЛ большинства исследованных образцов (рис. 1) присутствуют два пика с полушириной  $\sim 0.3 \text{ эВ}$  при 77 К. Один пик довольно жестко фиксиро-

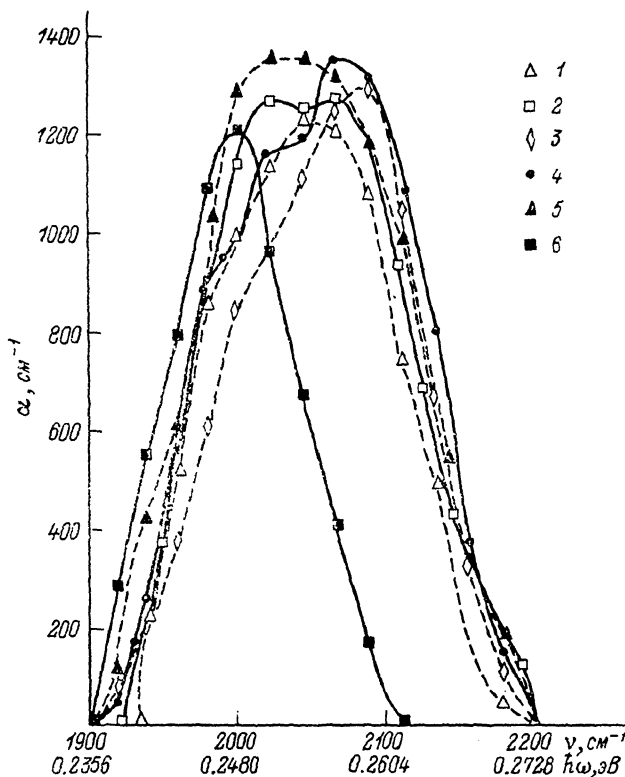


Рис. 2. Спектры оптического поглощения  $a\text{-Si}:\text{H}$  в колебательной области.

1—6 — то же, что и на рис. 1.

ван при  $\hbar\omega \approx 1.2 \text{ эВ}$ , положение второго находится между 1.3 и 1.4 эВ и не коррелирует с изменениями концентрации водорода в пленках. Величина пиков практически линейно зависит от мощности возбуждения в диапазоне 50—250 мВт, указывая на мономолекулярный характер рекомбинации. С повышением температуры измерения интенсивность ФЛ падает, и при 300 К люминесценции не наблюдается. Таким образом, поведение обнаруженных нами в исследованных образцах пиков ФЛ аналогично поведению пиков так называемой краевой люминесценции в  $a\text{-Si}:\text{H}$ .

В колебательной области спектра, кроме пика  $630 \text{ см}^{-1}$ , исследованные пленки  $a\text{-Si}:\text{H}$  имеют широкую полосу поглощения в интервале 1900—2200  $\text{см}^{-1}$  (рис. 2), в которой выделяются два пика поглощения — при 2000 и 2090  $\text{см}^{-1}$ . Поглощение в  $a\text{-Si}:\text{H}$  при 2000 и 2090  $\text{см}^{-1}$ , как известно, связывают с продольными колебаниями  $\text{SiH}$ - и  $\text{SiH}_2$ -связей соответственно. Присутствие в спектре ИК поглощения исследованных пленок полосы поглощения в области 860—890  $\text{см}^{-1}$ , обусловленной колебаниями группы  $\text{SiH}_2$  в полисилановых цепях [3], подтверждает, что пик поглощения при 2090  $\text{см}^{-1}$  определяется колебаниями именно  $\text{SiH}_2$ -связей.

Сравнение спектров ФЛ и ИК поглощения исследованных образцов показывает некоторую корреляцию в поведении наблюдаемых пиков, точное установление которой, однако, затруднено их наложением. Поэтому нами было выпол-

нено разложение рассматриваемых полос ФЛ и ИК поглощения на два пика гауссовой формы по методу Хука—Дживса с вариацией таких параметров, как интенсивность, полуширина и положение максимума на энергетической шкале. После разложения стало очевидно, что пик ФЛ при  $\sim 1.4$  превалирует над пиком при  $\sim 1.2$  эВ в спектрах тех образцов, в которых преобладает ИК поглощение при  $2090 \text{ см}^{-1}$  (образцы 20—24), и наоборот (образец 25). Для количественного сравнения были рассчитаны отношения интегральных интенсивностей пиков ИК поглощения и ФЛ. Полученные значения показаны в таблице ( $C_{\text{SiH}}/C_{\text{SiH}_2}$  и  $S_1/S_2$  соответственно). Заметна хорошая корреляция между этими величинами для всех исследованных образцов. Поскольку известно, что интегральные интенсивности пиков ИК поглощения и ФЛ пропорциональны концентрации центров, обуславливающих их возникновение, то обнаруженная корреляция отношений интегральных интенсивностей этих пиков дает основание предполагать, что определяющие их центры имеют единую природу.

В работе [4] наблюдавшиеся в области  $1.2\text{--}1.4$  эВ два пика ФЛ объяснялись неомогенностью пленок  $a\text{-Si} : \text{H}$ , вызванной присутствием в них атомов углерода, азота, кислорода. Причем интенсивность пика при  $\sim 1.4$  эВ увеличивалась с ростом концентрации этих атомов, т. е. с увеличением степени неомогенности пленок. Поскольку поведение наблюдавшихся нами пиков ФЛ и их разложение в спектре аналогичны описанным в работе [4], мы предполагаем, что исследованные нами пленки  $a\text{-Si} : \text{H}$  с большой концентрацией водорода также являются неомогенными. Но их неомогенность обусловлена не примесными атомами (которые по спектрам поглощения в наших образцах не обнаружены), а неравномерным распределением водорода, т. е.  $\text{SiH}$ - и  $\text{SiH}_2$ -связей в объеме пленок. Как известно [6], присутствие в пленках  $a\text{-Si} : \text{H}$  большого количества  $\text{SiH}_2$ -связей, их скопление в отдельных участках пленки приводят к ее разрыхлению и пористости, что сопровождается уменьшением показателя преломления. Подобная связь показателя преломления  $n$  с относительной концентрацией  $\text{SiH}_2$ -связей (см. таблицу) наблюдается для исследованных нами пленок, что свидетельствует об их неомогенности с точки зрения распределения в них водородных связей.

С учетом сделанных предположений пик ФЛ при  $1.2$  эВ, связанный с максимумом ИК поглощения при  $2000 \text{ см}^{-1}$ , можно считать обусловленным межзонными переходами в областях пленок, содержащих преимущественно  $\text{SiH}$ -связи. Пик ФЛ при  $\sim 1.4$  эВ, связанный с максимумом ИК поглощения при  $2090 \text{ см}^{-1}$ , можно считать определяемым межзонными переходами в областях пленки, обогащенных водородом с образованием  $\text{SiH}_2$ -связей.

С точки зрения неомогенности исследованных пленок  $a\text{-Si} : \text{H}$  объясняется и обнаруженный в них эффект увеличения проводимости в электрических полях напряженностью  $E > 20 \text{ В/см}$  [6, 7], подобный наблюдавшемуся при исследовании сверхрешеток на  $a\text{-Si} : \text{H}$  [8].

Авторы выражают благодарность В. П. Савельеву и Н. С. Карповой за помощь в проведении исследований.

#### Список литературы

- [1] Swanepoel R. // J. Phys. E: Sci. Instr. 1983. V. 16. N 12. P. 1214—1222.
- [2] Knights J. C. // Japan. J. Appl. Phys. 1979. V. 18 (Suppl. 18-1). P. 104—108.
- [3] Pollard W. B., Lucovsky G. // Phys. Rev. B. 1982. V. 26. P. 3172—3175.
- [4] Street R. A. // Adv. Phys. 1981. V. 30. N 5. P. 593—676.
- [5] Grandall R. S. // Sol. Cells. 1988. V. 24. P. 237—243.
- [6] Курова И. А., Понарина Е. Н. // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. М., 1989. Т. 30. В. 1. С. 90—92.
- [7] Zvyagin I. P., Kurova I. A., Ponarina E. N. // Rep. All-Union seminar. «New ideal in the physics of glass». М., 1989. P. 89—99.
- [8] Yoo B.-S., Song Y.-H., Lee C., Jang J. // Superlat. Microstr. 1989. V. 5. N 2. P. 153—156.