

## ПРИМЕСНЫЕ ЦЕНТРЫ ДИСПРОЗИЯ В АМОРФНОМ ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОМ КРЕМНИИ

Регель А. Р., Абдуманов У. Ж., Васильев В. А.,  
Мездрогина М. М., Насрединов Ф. С., Серегин П. П.

Показано, что примесные атомы диспрозия образуют в зазоре подвижности аморфного гидрогенизированного кремния полосу акцепторного типа, лежащую на 0.73 эВ ниже порога подвижности. Увеличение фотопроводимости легированного материала объясняется эффектами геттерирования. Отмечается, что примесные атомы диспрозия формируют центры излучательной рекомбинации и в принципе возможен переход к режиму стимулированного излучения.

Авторы [1] показали, что переходные металлы (железо, европий), введенные в аморфный гидрогенизированный кремний  $a\text{-Si} : \text{H}$  путем сораспыления в газовой смеси водорода, аргона и силана, изменяют его электрические свойства. В данной работе приводятся результаты по идентификации примесных центров диспрозия в  $a\text{-Si} : \text{H}$  методами измерения температурной зависимости электропроводности  $\sigma(T)$ , спектральной зависимости фотопроводимости  $\sigma_{\phi}(\hbar\omega)$ , фотолюминесценции (ФЛ) и эффекта Мессбауэра. Проведено сравнение влияния примесных атомов европия и диспрозия на свойства  $a\text{-Si} : \text{H}$ .

Образцы  $a\text{-Si} : \text{H}$ , Dy и  $a\text{-Si} : \text{H}$ , Eu получены высокочастотным распылением мишеней из кремния и соответствующего металла в газовой смеси водорода, аргона и силана [2]. Температура подложки  $T_s$  составляла 650 К (при более низких  $T_s$  эффект легирования был незначителен из-за высокой концентрации собственных дефектов  $a\text{-Si} : \text{H}$  [1]). Концентрация водорода была 15 ат%, концентрация металла — 0.05, 0.10 и 0.50 ат%. Темновая проводимость и фотопроводимость (ФП) измерялись в планарной геометрии. Спектры ФЛ возбуждались линией Ar<sup>+</sup>-лазера ( $\lambda=0.488$  мкм или 2.54 эВ) мощностью 100 мВт/см<sup>2</sup>. Спектры ФЛ изучены в стационарном режиме возбуждения в спектральном интервале 0.7—1.6 эВ при 77 К. Оптическая ширина запрещенной зоны  $E_0$  определялась при 295 К путем линейной экстраполяции зависимости  $(\alpha\hbar\omega)^{1/2}=f(\hbar\omega)$  (где  $\alpha$  — коэффициент поглощения). Мессбауэровские спектры <sup>151</sup>Eu и <sup>161</sup>Dy измерялись при 295 К с источниками <sup>151</sup>Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и <sup>161</sup>Tb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Измеренные сдвиги приводятся относительно Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Пленки  $a\text{-Si} : \text{H}$  обладали электронным характером проводимости (знак коэффициента термоэдс был отрицательным), зависимость  $\sigma(T)$  являлась линейной функцией в координатах  $\lg \sigma - 1/T$  (см. вставку на рис. 1), а энергия активации  $E_a$  и проводимость при 295 К имели значения  $E_a=(0.58 \pm 0.02)$  эВ,  $\sigma_{295 \text{ К}} = 3.4 \cdot 10^{-8}$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>. Зависимость  $\sigma_{\phi}(\hbar\omega)$  имела максимум при  $\hbar\omega=2.10$  эВ (рис. 1, а), а  $E_0=(1.70 \pm 0.02)$  эВ. Спектры ФЛ представляли собой наложение двух полос, лежащих при энергиях 1.07 и 1.31 эВ (рис. 2, а).

Легирование  $a\text{-Si} : \text{H}$  диспрозием (концентрация 0.1 ат%) не изменяет тип проводимости и величину  $E_0$ , зависимость  $\sigma(T)$  остается линейной функцией в координатах  $\lg \sigma - 1/T$  (см. вставку на рис. 1), хотя изменяются параметры проводимости:  $E_a=0.73$  эВ,  $\sigma_{295 \text{ К}}=3.5 \cdot 10^{-9}$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>. Следовательно, для нелегированных и легированных образцов  $a\text{-Si} : \text{H}$  проводимость осуществляется электронами по делокализованным состояниям, лежащим выше порога подвижности  $E_c$ , а  $E_c=E_c-F$ , где  $F$  — уровень Ферми. Легирование  $a\text{-Si} : \text{H}$

диспрозием, таким образом, сдвигает уровень Ферми к середине запрещенной зоны, что, вероятно, связано с образованием примесными атомами диспрозия в зазоре подвижности  $a\text{-Si} : \text{H}$  полосы акцепторного типа (а значение  $E_a = 0.73$  эВ указывает на положение этой полосы относительно  $E_c$ ). Отметим, что европий в  $a\text{-Si} : \text{H}$  образует полосу донорного типа, лежащую ниже  $E_c$  на 0.25 эВ [1].

Введение диспрозия в  $a\text{-Si} : \text{H}$  увеличивает ФП, причем максимум спектра ФП остается при  $\hbar\omega = 2.10$  эВ (рис. 1, б). Европий также увеличивает ФП  $a\text{-Si} : \text{H}$ , но одновременно смещает максимум спектра ФП до  $\hbar\omega = 1.91$  эВ (рис. 1, в). Такое различное влияние диспрозия и европия на положение макси-

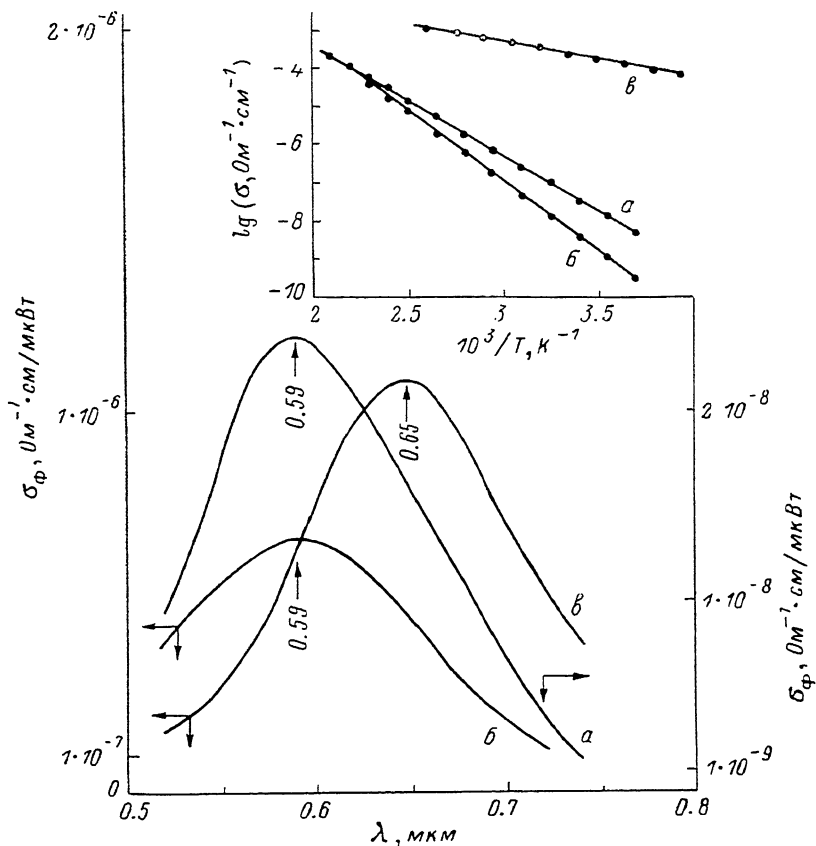


Рис. 1. Спектральные зависимости фотопроводимости при 295 К  $a\text{-Si} : \text{H}$  (а),  $a\text{-Si} : \text{H} + 0.1$  ат% Dy (б),  $a\text{-Si} : \text{H} + 0.1$  ат% Eu (в).

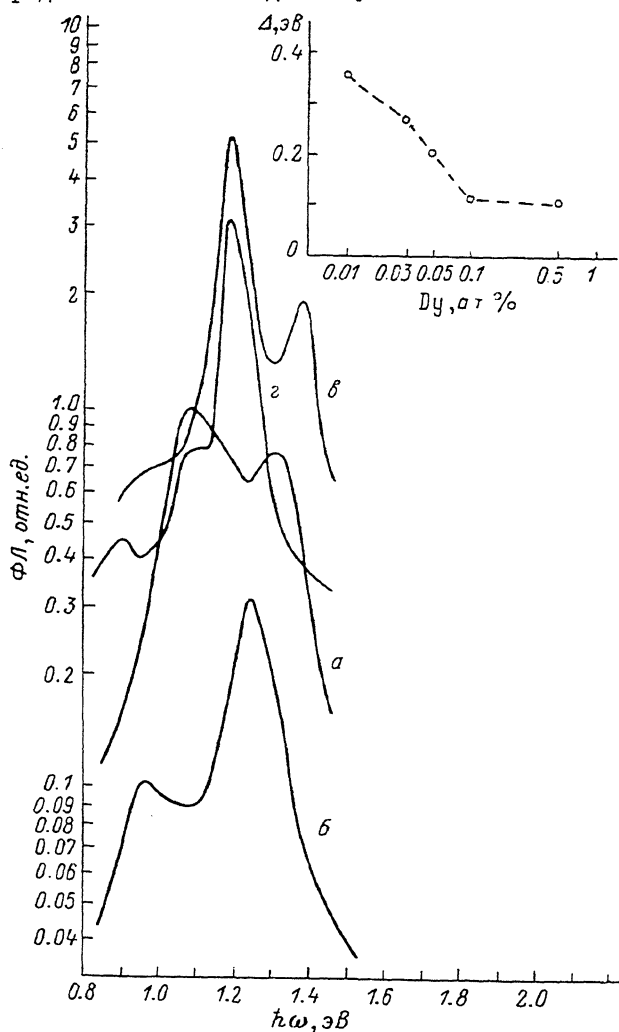
Интенсивность светового потока  $3 \cdot 10^{12}$  фот/см<sup>2</sup>·с. На вставке показана температурная зависимость проводимости для тех же образцов.

мум  $\varepsilon_{\text{ф}}(\hbar\omega)$  объясняется различной глубиной залегания энергетических уровней, образуемых этими примесями в щели подвижности  $a\text{-Si} : \text{H}$ .

Нормированные спектры ФЛ  $a\text{-Si} : \text{H}$ , Dy представлены на рис. 2. На оси ординат отложено изменение интегральной интенсивности ФЛ при различных концентрациях примеси (за единицу принята интенсивность ФЛ нелегированного  $a\text{-Si} : \text{H}$ ). Как видно из рис. 2, б, при концентрации диспрозия 0.05 ат% интенсивность ФЛ уменьшается, при этом появляется полоса, максимум которой расположен при 1.20 эВ. При концентрации диспрозия 0.10 ат% интенсивность ФЛ вновь увеличивается и в спектре ФЛ появляется структура, состоящая из трех полос излучения — 1.09, 1.20 и 1.37 эВ (рис. 2, в). Увеличение концентрации примеси до 0.50 ат% ведет к незначительному уменьшению интенсивности ФЛ, полоса излучения при 1.37 эВ исчезает, и имеет место сужение полосы при 1.20 эВ (рис. 2, г; см. вставку на рис. 2). Для полосы при 1.20 эВ ширина спектра имеет тенденцию к сужению при изменении интенсивности возбуждения в пределах от 3 до 300 мВт/см<sup>2</sup>. В образцах  $a\text{-Si} : \text{H}$ , Eu наблюда-

ется сильное гашение собственной полосы ФЛ при возрастании концентрации примеси от 0.05 до 0.50 ат%. Таким образом, в спектрах ФЛ образцов  $a\text{-Si} : \text{H}$ , Dy наблюдаются примесные состояния излучательного типа, причем наличие в спектрах ФЛ тонкой структуры и увеличение интенсивности ФЛ указывают на то, что излучательные переходы являются внутрицентровыми, характерными для редкоземельных элементов в оксидных стеклах при спонтанных переходах [3].

Мессбауэровские спектры примесных атомов  $^{161}\text{Dy}$  в  $a\text{-Si} : \text{H}$  ( $\sim 0.1$  ат%) представляют собой одиночную линию с изомерным сдвигом ( $\delta = 0.10 - 0.15$  мм/с),



отвечающим  $\text{Dy}^{3+}$ . Этот спектр относится к электрически не активному состоянию диспрозия, так как параметры спектра не изменяются и для  $a\text{-Si} : \text{H}$ , Dy, полученного при  $T_s = 520$  К (когда не наблюдается эффектов влияния диспрозия на электрические свойства  $a\text{-Si} : \text{H}$ ). Исходя из близости изомерных сдвигов спектров примесных атомов  $\text{Dy}^{3+}$  в  $a\text{-Si} : \text{H}$  и в соединении  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  [4], можно сделать вывод, что электрически не активным центрам диспрозия отвечает ассоциативного типа « $\text{Dy}^{3+}$ —кислород». Аналогично электрически не активному состоянию атомов европия в  $a\text{-Si} : \text{H}$  отвечает в мессбауэровском спектре линия  $\text{Eu}^{2+}$  ( $\delta = -11.7$  мм/с), причем эта линия уширена из-за образования ассоциатов типа « $\text{Eu}^{2+}$ —кислород» (изомерные сдвиги мессбау-

Рис. 2. Спектры фотолюминесценции при 77 К  $a\text{-Si} : \text{H}$  (а),  $a\text{-Si} : \text{H} + 0.05$  ат% Dy (б),  $a\text{-Si} : \text{H} + 0.1$  ат% Dy (в),  $a\text{-Si} : \text{H} + 0.5$  ат% Dy (г).

На вставке показана зависимость ширины спектра ФЛ при  $\hbar\omega = 1.20$  эВ от концентрации диспрозия.

эровских спектров примесных атомов  $\text{Eu}^{2+}$  в  $a\text{-Si} : \text{H}$  близки к изомерному сдвигу спектра соединения  $\text{EuO}$  [4]).

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:  
а) Примесные атомы диспрозия образуют в зазоре подвижности  $a\text{-Si} : \text{H}$  полосу акцепторного типа, лежащую на 0.73 эВ ниже  $E_c$ .

б) В  $a\text{-Si} : \text{H}$ , Dy формируется центр излучательной рекомбинации  $\text{Dy}^{3+}$ , и в принципе возможен переход к режиму стимулированного излучения при создании инверсной заселенности возбужденного уровня  $\text{Dy}^{3+}$ .

в) Увеличение ФЛ и уменьшение интенсивности ФЛ основной полосы излучения в  $a\text{-Si} : \text{H}$ , Dy и  $a\text{-Si} : \text{H}$ , Eu объясняются эффектом геттерирования, т. е. связывания центрами диспрозия и европия кислорода и разрушение ассоциатов «кислород—азот», которые являются центрами безызлучательной рекомбинации в  $a\text{-Si} : \text{H}$  [5].

Список литературы

- [1] Регель А. Р., Серегин П. П., Мездрогина М. М., Насрединов Ф. С., Аблова М. С., Абдуманапов У. Ж. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 161—164.
- [2] Насрединов Ф. С., Мездрогина М. М., Подхалюзин В. П., Серегин П. П. // ФТТ. 1986. Т. 28. В. 8. С. 2543—2546.
- [3] Алексеев Н. Е., Анпкиев Ю. Г., Гапонцев В. Г., Жаботинский М. Е., Кравченко В. Б., Рудницкий Ю. П. // Радиотехника. 1978. Т. 18. В. 1. С. 5—146.
- [4] Vauminger E. R. // Mössbauer Isomer Shifts. N. Y., 1978. P. 243—310.
- [5] Тиджи Т. // Физика гидрогенизированного аморфного кремния. Электронные и колебательные спектры. М., 1988. С. 329—376.

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

Получена 9.03.1989  
Принята к печати 10.04.1989

---