

детельствуеет о наличии двух фаз, одна из которых отвечает разупорядоченной матрице стекла (GeS_3), а появление другой связано с введением в стекло атомов Bi.

Исследование спектров комбинационного рассеяния в стеклах этой системы при $x > 0.5$ указывает на появление нового максимума при $\nu = 310 \text{ см}^{-1}$, который соответствует структурной единице $\text{BiSi}_{1/2}$, что также подтверждает наши предположения [10].

Таким образом, появление новой низкоэнергетической полосы в спектрах ФЛ $a\text{-Si} : \text{H}$ и некоторых легированных ХСП обусловлено, на наш взгляд, наличием «микрористаллических» включений в исходной аморфной матрице, появление которых ведет к образованию новых центров излучательной рекомбинации в запрещенной зоне. Однако для более глубокого понимания механизмов ФЛ в таких гетерогенных структурах требуются дальнейшие исследования.

Авторы выражают благодарность И. С. Шлимаку за обсуждение результатов работы.

Л и т е р а т у р а

- [1] Kolomiets B. T., Mamontova T. N., Babaev A. A. — J. Non-Cryst. Sol., 1970, v. 4, N 2, p. 289—294.
- [2] Блецкая Д. И., Митровский И. М., Ермолович И. Б., Баран Н. П., Химинец В. В. — УФЖ, 1985, т. 14, в. 3, с. 628—635.
- [3] Аморфные полупроводники / Под ред. М. Бродски. М., 1982. 419 с.
- [4] Vogel-Grote U., Kummerle W., Fischer R., Stuke J. — Phil. Mag. B, 1980, v. 41, N 2, p. 127—140.
- [5] Oguz S., Collins R. W., Palslev M. A., Paul W. — J. Non-Cryst. Sol., 1980, v. 35, N 1, p. 231—235.
- [6] Аморфные полупроводники и приборы на их основе / Под ред. И. Хамакавы. М., 1986. 376 с.
- [7] Орешкин П. Т., Вихров С. П., Ампилогов В. Н., Бабаев А. А., Химинец В. В. — В кн.: Тез. докл. Межд. конф. «Аморфные полупроводники-84». Габрово, 1984, т. 1, с. 192—194.
- [8] Grimmer P. P., Adler P. — In: Proc. 17 IEEE Photovoltaic Spec. Conf. N. Y., 1984, p. 353—358.
- [9] Veprek S., Maresek V. — Sol. St. Electron., 1968, v. 11, N 2, p. 683—685.
- [10] Бабаев А. А. — В кн.: Фото- и электрические явления в полупроводниках. Махачкала, 1984, с. 65—71.

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

Получено 21.07.1987
Принято к печати 20.10.1987

ФТП, том 22, вып. 5, 1988

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ УГЛЕРОДА НА СВОЙСТВА АМОРФНОГО КРЕМНИЯ

Павлов Д. А., Пищулина И. В., Хохлов А. Ф.

Модификация свойств аморфного гидрогенизированного кремния при его изовалентном легировании углеродом широко применяется при изготовлении приборов на основе $a\text{-Si} : \text{H}$ и сплавов $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x : \text{H}$ [1]. Влияние примеси углерода в $a\text{-Si} : \text{H}$ на его свойства изучено сейчас очень подробно. С другой стороны, данных о влиянии этой примеси на свойства $a\text{-Si}$ без водорода не так уж много.

Целью настоящей работы было изучение дефектности, электрофизических и оптических свойств сплавов $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x$, полученных по технологии, исключаящей водород.

Пленки α -Si, легированные углеродом, методом магнетронного распыления на постоянном токе. В качестве мишени были использованы пластина из кристаллического кремния и кусочки спектрально чистого графита, размещенные в зоне распыления (эрозии). Распыление проводилось в атмосфере аргона при давлении 0.13 Па. Пленки наносились на подложки из кварца, ситалла и поликора при 250 °С. Состав полученных слоев определялся методом электронной оже-спектроскопии. Содержание углерода в пленках изменялось от 0 до 18 ат%.

На рис. 1 представлены температурные зависимости темновой проводимости

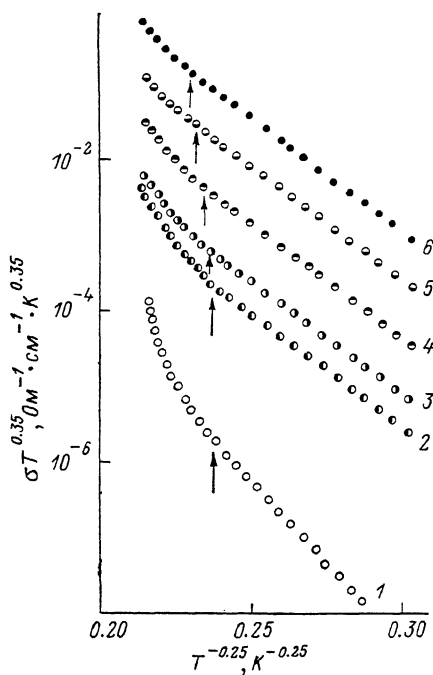


Рис. 1. Температурные зависимости темновой проводимости пленок аморфного кремния с различным содержанием углерода.

1 — α -Si, 2 — α -Si_{0.97}C_{0.03}, 3 — α -Si_{0.96}C_{0.04}, 4 — α -Si_{0.94}C_{0.06}, 5 — α -Si_{0.9}C_{0.1}, 6 — α -Si_{0.82}C_{0.18}.

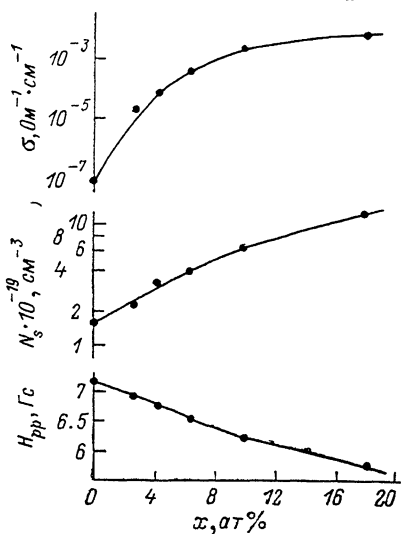


Рис. 2. Зависимость темновой проводимости, концентрации оборванных связей с некомпенсированным спином N_s , ширины линии ЭПР ΔH_{FP} от содержания углерода в пленках аморфного кремния.

мости пленок аморфного кремния с различным содержанием углерода. Спрямление этих зависимостей в координатах $\lg(\sigma T^{0.35}) - f(T^{-0.25})$ в области низких температур указывает на то, что проводимость осуществляется путем перескоков электронов по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми [2]:

$$\sigma = c (T_0/T)^{0.35} \exp[-(T_0/T)^{1/4}], \quad (1)$$

где параметр T_0 , определяемый по наклону кривых, выражается через плотность состояний на уровне Ферми N_F и радиус локализации волновой функции электрона a_s :

$$T_0 = 60 (\pi N_F a_s^3 k)^{-1}. \quad (2)$$

Видно, что введение углерода до 20 ат% приводит к увеличению прыжковой проводимости на 5 порядков (для $T=300$ К). Меняется также и наклон кривых $\sigma(T)$. Для чистого α -Si параметр T_0 оказывается равным $9.8 \cdot 10^7$ К. Введение 3 ат% углерода приводит к уменьшению наклона до $T_0 = 2.4 \cdot 10^7$ К. Увеличение содержания углерода от 3 до 18 ат% не приводит к изменению наклона. Температура, ограничивающая низкотемпературный участок, описываемый выражением (1), растет с повышением содержания углерода от 310 (для чистого α -Si) до 360 К (для α -Si_{0.82}C_{0.18}). Эта температура, ограничивающая чисто прыжковый механизм проводимости, на рис. 1 отмечена стрелками.

Мы считаем, что рост прыжковой проводимости обусловлен созданием дополнительных дефектов структуры при введении углерода в α -Si. Если атом углерода, имеющий существенно меньший ковалентный радиус, чем атом крем-

ния, попадает в положение замещения, то ближний порядок вокруг этого атома меняется. Существенно должен уменьшиться радиус первой координационной сферы. В локальной области могут возникнуть значительные напряжения (растяжения) и обрывы связей. Последнее предположение подтверждается экспериментом. Измерения методом ЭПР концентрации оборванных связей с нескомпенсированным спином N_s обнаружили корреляцию с величиной темновой проводимости σ (рис. 2). Хорошо известно, что дефекты такого типа (нами регистрировались ЭПР центры с $g=2.0055$) образуют полосу локализованных состояний и закрепляют уровень Ферми в середине щели подвижности. Согласно [3], плотность состояний на уровне Ферми и концентрация оборванных связей N_s связаны соотношением

$$N_F = N_s / (\gamma \Delta E), \quad (3)$$

где ΔE — интервал энергий, занятый состояниями со спином, а коэффициент $\gamma \geq 1$. На основании (2) и (3) получим выражение для радиуса локализации волновой функции электрона a_s

$$a_s = \sqrt[3]{60 \gamma \Delta E / \pi N_s k T}. \quad (4)$$

Если положить $\gamma \Delta E \approx 1$ эВ, то для чистого a -Si ($N_s = 1.6 \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$) получим значение $a_s = 5.3$ Å, а для a -Si $_{0.82}$ C $_{0.18}$ ($N_s = 1.3 \cdot 10^{20}$ см $^{-3}$) — $a_s = 4.2$ Å. Поскольку локализация волновой функции электрона вызвана отсутствием периодичности решетки, то уменьшение a_s можно связать с изменением структуры ближнего порядка a -Si при введении в него атомов углерода. Изучение дифракции электронов на прохождение позволило подтвердить это предположение. На электронограмме чистого a -Si можно было различить три гало при углах $S_{\max} = 1.98, 3.60, 5.24$ Å $^{-1}$. Добавление в a -Si 20 ат% углерода приводило к полному исчезновению третьего дифракционного максимума.

Увеличение разупорядочения, накопление локальных деформаций и обрыв связей при введении углерода в случайную сетку атомов приводят к изменению некоторых постоянных этого материала, что, на наш взгляд, является причиной некоторого уменьшения ширины линии ЭПР ΔH_{pp} (рис. 2), которая зависит от времени спин-решеточной релаксации. По-видимому, с ростом разупорядочения в случайной сетке атомов происходит все большая локализация парамагнитного электрона, приводящая к ослаблению взаимодействия его с колебаниями решетки (фононами). Это также должно приводить к увеличению времени спин-решеточной релаксации и сужению линии ЭПР.

В заключение приведем данные, полученные после обработки спектральных зависимостей коэффициента поглощения пленок α ($\hbar\omega$) в оптическом диапазоне. Выполнение квадратичного закона дисперсии

$$\alpha \hbar\omega = B (\hbar\omega - E_g^{\text{opt}})^2 \quad (5)$$

на краю собственного поглощения позволило нам определить ширину оптической запрещенной зоны E_g^{opt} . Исследования показали, что величина E_g^{opt} практически не меняется при увеличении содержания углерода во всей исследованной нами области концентраций вплоть до 18 ат% и составляет 1.45 эВ.

Таким образом, изовалентное легирование аморфного кремния углеродом приводит к росту прыжковой проводимости и концентрации оборванных связей, а ширина оптической запрещенной зоны при этом остается неизменной.

Л и т е р а т у р а

- [1] Аморфные полупроводники и приборы на их основе / Под ред. Й. Хамакавы. М., 1986. 376 с.
- [2] Kirkpatrick S. — In: Proc. Int. Conf. Amorphous a. Liquid Semicond. London, 1974, v. 1, p. 183—187.
- [3] Stuke G. — В кн.: Тр. VI Межд. конф. по аморфным и жидким полупроводникам. Л., 1976, с. 193—202.