

БОЛЬШАЯ КУЛОНОВСКАЯ ЩЕЛЬ В СПЕКТРЕ СОСТОЯНИЙ Mn В *a*-Si

А.В.Двуреченский, И.А.Рязанцев, В.А.Дравин, А.И.Якимов

По температурной зависимости проводимости в рамках теории, развитой Шкловским и Эфросом, обнаружена и определена кулоновская щель  $\Delta$  в энергетическом спектре локализованных состояний Mn в аморфном Si вблизи перехода металл – диэлектрик. Установлено, что величина  $\Delta$  более чем на порядок превышает значения, известные ранее для систем полупроводник – примесь с мелкими уровнями.

Кулоновское взаимодействие электрона и дырки, локализованных на центрах, между которыми осуществляется перенос носителей заряда, приводит к перестройке спектра состояний вблизи уровня Ферми с появлением кулоновской щели – области, с резко пониженной плотностью состояний<sup>1</sup>, проявляющейся в экспериментах по низкотемпературной проводимости. Трудность выявления кулоновской щели в аморфных полупроводниках состоит в том, что с понижением температуры сопротивление образцов становится большим ( $10^{12} \div 10^{15}$  Ом · см) в результате чего не удается провести измерения. Температура, начиная с которой в проводимости проявляется кулоновская щель, определяется, исходя из<sup>1,2</sup>, следующим выражением:

$$T^+ \cong e^6 g / k^2 \kappa^3 T_1, \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $g$  – плотность локализованных состояний (ПЛС),  $k$  – постоянная Больцмана,  $\kappa$  – диэлектрическая проницаемость,  $T_1$  – постоянная, зависящая от свойств материала. Отсюда следует, что для повышения  $T^+$  необходимо увеличивать ПЛС, при условии что система еще остается на диэлектрической стороне перехода металл – диэлектрик (ПМД).

В аморфном Si (*a*-Si), содержащем примесь с глубокими уровнями, можно ожидать более яркого проявления кулоновских корреляций, поскольку в этом случае волновая функция электронов сильно локализована, что позволяет реализовать большую ( $\sim 10^{21}$  см<sup>-3</sup> · эВ<sup>-1</sup>) ПЛС до перехода системы в квазиметаллическое состояние, происходящего, согласно критерию Мотта<sup>3</sup>, при  $g^{1/3} a \sim 0,25$  (здесь  $a$  – радиус локализации). Рост ПЛС приводит к уменьшению длины прыжка и, соответственно, к увеличению кулоновского взаимодействия между носителями.

Цель данной работы заключалась в выявлении корреляционных эффектов при исследовании низкотемпературной проводимости *a*-Si, легированного внедрением Mn, растворимость которого в сетчатой структуре Si значительно больше, чем в кристалле. Этот факт является определяющим для достижения больших значений примесных состояний с глубокими уровнями в исследуемом материале.

Образцы получались методом электронно-лучевого испарения кремния в вакууме с последующей ионной имплантацией марганца. Для достижения однородного распределения Mn по толщине пленки проводилось варьирование энергии ионов в пределах  $50 \div 230$  кэВ. Температура при облучении поддерживалась вблизи комнатной.

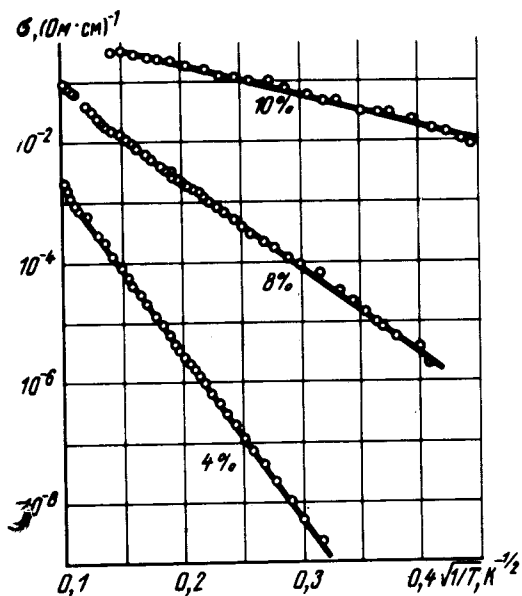


Рис. 1

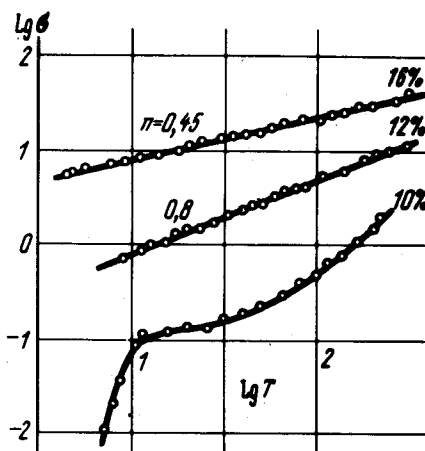


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость проводимости от  $T^{-1/2}$  образцов  $a\text{-Si} : \text{Mn}$  с различной концентрацией примеси

Рис. 2. Температурная зависимость проводимости образцов  $a\text{-Si} : \text{Mn}$  в области перехода металл – диэлектрик

С увеличением концентрации примеси от  $10^{19}$  до  $5 \cdot 10^{21}$   $\text{см}^{-3}$  наблюдается возрастание удельной проводимости образцов  $a\text{-Si} : \text{Mn}$  с  $10^{-5}$  до  $60$   $(\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ . При исследовании температурной зависимости проводимости  $\sigma(T)$  в интервале  $500 > T > 4$  К (рис. 1) обнаружено, что в области низких температур  $80 > T > 4$  К изменение  $\sigma(T)$  образцов с концентрацией примеси  $2, 4, 5 \cdot 10^{21}$   $\text{см}^{-3}$  следует закону:

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left[ - (T_1/T)^{1/2} \right], \quad T_1 = \beta e^2 / kka, \quad (2)$$

где  $\beta$  – постоянная (согласно <sup>4</sup>  $\beta \cong 2,8$ ).

Такая функциональная зависимость интерпретируется в рамках кулоновской параболической щели в спектре локализованных состояний <sup>1</sup>. Ширина щели  $\Delta$  определяется из соотношения  $\Delta = (K/2) \cdot (T_1 T^+)^{1/2}$  <sup>2,5</sup>. В таблице приведены значения  $T_1$ ,  $T^+$  и  $\Delta$ , которые оказались на порядок больше аналогичных величин для полупроводников (в том числе и  $a\text{-Si}$  <sup>6</sup>), легированных примесями с мелкими уровнями. С увеличением концентрации примеси происходит сужение щели и при  $N > 12$  ат.% щель исчезает вследствие перехода системы в квазиметаллическое состояние. Известно, что после такого перехода температурная зависимость проводимости имеет степенной вид:  $\sigma(T) = \sigma_0 + \sigma_0 T^n$ ; где  $0 < n < 1$ . Для образцов  $a\text{-Si} : \text{Mn}$  с содержанием 12 и 16 ат.% примеси кривые  $\sigma(T)$  хорошо спрямляются в координатах  $\lg \sigma, \lg T$  (рис. 2). Величина  $n$  составляла 0,8 и 0,45 соответственно для указанных концентраций.

№ образца	$N$ $\text{см}^{-3}$	$N$ ат. %	$T^+$ К	$T_1$ К	$\Delta$ мэВ
1	$2 \cdot 10^{21}$	4	80	4290	25
2	$4 \cdot 10^{21}$	8	50	1040	10
3	$5 \cdot 10^{21}$	10	35	130	3

В заключение авторы выражают благодарность Э.М.Баскину за полезное обсуждение работы.

#### Литература

1. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1979.
2. Ионов А.Н., Shlimak I.S., Matveev M.N. Solid. State. Comm., 1983, 47, 763.
3. Мотт Н.Ф. Переходы металл – изолятор. М.: Наука, 1979.
4. Efros, A.L., Nguyen V.L., Shklovskii B.I. Solid. State. Comm. 1979, 32, 851.
5. Забродский А.Г., Зиновьева К.Н. ЖЭТФ, 1984, 86, 727.
6. Алешин А.Н., Деуреченский А.В.; Рязанцев И.А., Ионов А.Н., Шлимак И.С. ФТП, 1985, 19, 1240.

Институт физики полупроводников  
Академии наук СССР  
Сибирское отделение

Поступила в редакцию  
10 ноября 1985