

## ВЛИЯНИЕ АНДЕРСОНОВСКОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ В ВЕРХНЕЙ ЗОНЕ ХАББАРДА НА СПЕКТРЫ СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ ФОТОПРОВОДИМОСТИ КРЕМНИЯ

В.Н. Мурзин, И.Е. Трофимов

*Исследованы спектры субмиллиметровой фотопроводимости легированного кремния, обусловленные переходами носителей из  $H^-$ -подобных примесных состояний в зону проводимости. Определен концентрационный порог образования  $H^-$ -зоны.*

При изучении перехода металл-диэлектрик в легированных полупроводниках, как правило, основываются на модели Мотта - Хаббарда - Андерсона /1/. Согласно этой модели переход возникает при концентрации примесей  $N_M$ , при которой происходит слияние нижней зоны Хаббарда, образованной перекрытием волновых функций основных состояний примесных атомов, с верхней зоной Хаббарда (ВЗХ), образующейся в результате взаимодействия двухэлектронных примесных состояний ( $H^-$ -состояний) /2/. Образование полосы делокализованных состояний в ВЗХ ( $H^-$ -зоны) в первом приближении должно происходить при концентрации, определяемой условием Мотта  $N_{сг} a_1^{1/3} \cong 0,25$ , где  $a_1 = \hbar / \sqrt{2mE_i}$  - борковский радиус изолированного  $H^-$ -подобного центра.

Одним из наиболее информативных методов исследования взаимодействия  $H^-$ -состояний и образования  $H^-$ -зоны является изучение фотопроводимости (ФП), обусловленной переходами из этих состояний в зону проводимости. В большинстве случаев измерения ФП ведутся при относительно высоких уровнях примесного фонового возбуждения (число переходов в секунду в одном примесном атоме  $W > 100 \text{ с}^{-1}$ ), что обеспечивает достаточную заселенность  $H^-$ -состояний и, как следствие, хорошее отношение сигнал/шум. Однако при таких уровнях фонового возбуждения всегда существенную роль играют флуктуации кулоновского потенциала заряженных примесных атомов ( $H^+$ ) и комплексов ( $H^-H^+$  и др.), которые вызывают разброс  $H^-$ -состояний по энергиям и тем самым препятствуют образованию  $H^-$ -зоны (т.е. происходит андерсоновская локализация).

Целью данной работы было изучение образования  $H^-$ -зоны при максимальном понижении роли флуктуаций кулоновского потенциала примесей путем уменьшения интенсивности фонового возбуждения; определение минимальной критической концентрации  $N_{сг}$  перехода, ограниченной по возможности лишь неупорядоченностью в расположении примесных атомов в кристалле. Исследовались спектры ФП образцов Si:P и Si:B ( $N = 8 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , компенсация  $k < 10^{-4}$ ), обусловленные переходами носителей из различных состояний ВЗХ в зону проводимости. Измерения проводились на фурье-спектрометре /3/ при гелиевых температурах в спектральном диапазоне от 10 до  $250 \text{ см}^{-1}$ , при различных уровнях примесного фонового возбуждения  $W = 0,1 - 100 \text{ с}^{-1}$ , что позволяло в широких пределах изменять концентрацию заряженных примесных атомов и комплексов. Образцы закреплялись внутри медного контейнера в гелиевом криостате. Интенсивность фонового возбуждения регулировалась установкой перед окном контейнера холодных фильтров из кристаллического кварца различной толщины и черного полиэтилена. Градуировка интенсивности фонового возбуждения осуществлялась по значениям фотопроводимости эталонного образца Si:B с  $N = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $k = 0,15$ .

На рис.1 приведены спектры ФП Si:P с концентрацией примеси  $N = 1,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , зарегистрированные при  $T = 4,2 \text{ К}$  и трех различных значениях интенсивности фонового возбуждения ( $W = 50 \text{ с}^{-1}$ ;  $2,5 \text{ с}^{-1}$ ;  $0,6 \text{ с}^{-1}$ ). Спектры имеют колоколообразную форму, характерную для фотоионизации локализованных состояний типа  $H^-H^+$ . При уменьшении интенсивности фонового излучения наблюдается подъем кривых в коротковолновой части спектра, который, как было показано /2/, свидетельствует о делокализации  $H^-$ -состояний. При этом интегральный сигнал ФП практически не меняется при понижении интенсивности

фонового возбуждения от  $100 \text{ с}^{-1}$  до  $2,5 \text{ с}^{-1}$ . Однако при дальнейшем уменьшении фоновой подсветки (до  $0,6 \text{ с}^{-1}$ ) происходит значительный (примерно в 30 раз) рост сигнала ФП. Обнаруженное возрастание сигнала, на наш взгляд, может быть связано с тем, что при столь низком уровне фонового возбуждения положительно заряженные примесные атомы довольно быстро связываются в комплексы  $\text{H}^- \cdot \text{H}^+$ , в результате источником кулоновских полей в кристалле становятся не точечные заряды ( $\text{H}^+$ ), а, в основном, диполи  $\text{H}^- \cdot \text{H}^+$  с более короткодействующим потенциалом. Это приводит, с одной стороны, к уменьшению разброса  $\text{H}^-$ -состояний и облегчает образование  $\text{H}^-$ -зоны. С другой стороны, увеличивается время жизни носителей в  $\text{H}^-$ -зоне, поскольку коэффициент захвата на диполь меньше коэффициента захвата на изолированный притягивающий центр /4/.

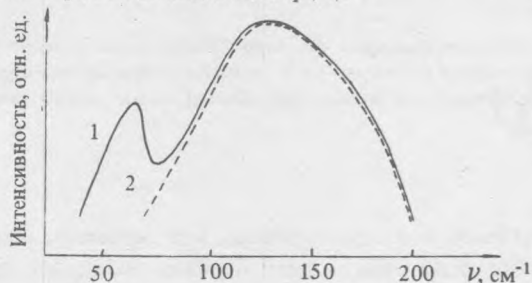


Рис.1. Спектры фотопроводимости образца  $\text{Si:P}$  с  $N = 1,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  при интенсивностях фоновой подсветки  $W = 0,6 \text{ с}^{-1}$  (1),  $2,5 \text{ с}^{-1}$  (2).

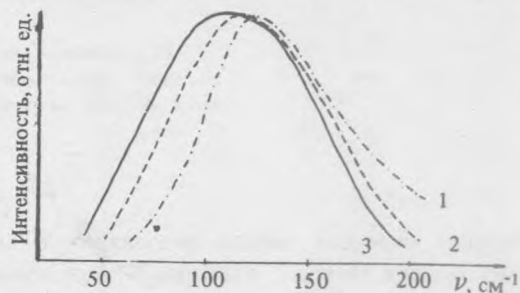


Рис.2. Спектры фотопроводимости образца  $\text{Si:B}$  с  $N = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при различных интенсивностях фоновой подсветки:  $W = 0,6$  (1),  $2,5$  (2),  $50 \text{ с}^{-1}$  (3).

На рис.2 представлены спектры ФП образца  $\text{Si:B}$  с меньшей концентрацией примеси ( $N = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $k = 10^{-5}$ ) при двух значениях интенсивности фоновой подсветки ( $W = 2,5$  и  $0,6 \text{ с}^{-1}$ ). При  $W = 2,5 \text{ с}^{-1}$  спектр имеет характерную колоколообразную форму, типичную для переходов из молекулярных примесных комплексов  $\text{H}^- \cdot \text{H}^+$ . При уменьшении интенсивности фонового подсвета, в отличие от предыдущего случая (рис.1), описанных изменений в коротковолновой области спектра не наблюдается, интегральная интенсивность спектра практически не меняется, а на длинноволновом краю спектра возникает особенность в виде дополнительного максимума (рис.2). Эта особенность не может быть объяснена переходами электронов из локализованных  $\text{H}^-$ -подобных состояний, поскольку понижение концентрации заряженных центров должно приводить к уменьшению вклада локализованных состояний в ФП /5/. Так как никакие другие механизмы ФП при столь низких энергиях в Si не могут проявляться, естественно предположить, что обнаруженная особенность связана с переходами из делокализованных состояний ВЗХ в зону проводимости. В пользу этого предположения свидетельствует и то, что при меньших  $N$  возникновения особенности не зарегистрировано.

Таким образом, в данной работе благодаря выбору оптимальных условий эксперимента удалось реализовать ситуацию, при которой сам процесс измерений ФП не оказывает существенного влияния на образование  $\text{H}^-$ -зоны. Полученное значение  $N_{\text{сг}} = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  заметно ниже величины  $N_{\text{сг}} = 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , полученной ранее /2/, и соответствует моттовскому критерию локализации для  $\text{H}^-$ -подобных состояний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мотт Н.Ф. Переходы металл—изолятор. М., Наука, 1979.
2. Банная В.Ф. и др. ЖЭТФ, 85, в.2(8), 746 (1983).
3. Митягин Ю.А., Трофимов И.Е. Препринт ФИАН № 126, М., 1989.
4. Абакумов В.Н. и др. ФТП, 12, в.1, 3 (1978).
5. Мурзин В.Н. и др. Препринт ФИАН № 56, М., 1989.

Поступила в редакцию 22 мая 1989 г.