В заключение авторы благодарят В. Ф. Киселева за обсуждение работы и ценные замечания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Кашкаров П. А., Киселев В. Ф.//Изв. АН СССР, сер. физ. 1986. 50, № 3. С. 435. [2] Кашкаров П. К., Петров А. В.//ФТП. 1985. 19, № 2. С. 234. [3] Ефимова А. И., Кашкаров П. К., Джиджоев М. С., Попов В. К.// //Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1988. 29, № 6. С. 73. [4] Lowndes D. H.// //Semicond. and Semimet. 1984. 23. Р. 477. [5] Быковский В. А., Бычков А. Г., Зуев В. А. и др.//Поверхность. Физика, химия, механика. 1985. № 10. С. 48. [6] Вавилов В. С., Кив А. Е., Ниязова О. Р. Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках. М., 1981. [7] Neumark G. F., Козаі К.//Semicond. and Semimet. 1983. 19. Р. 1.

Поступила в редакцию 05.01.89

ЗВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1989. Т. 30, № 6

УДК 621.315.592;541

## УСКОРЕНИЕ РЕЛАКСАЦИИ ЗАРЯДА МЕДЛЕННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ Состояний германия при воздействии излучения ик-лазера

А. В. Зотеев, В. Ф. Киселев, Г. С. Плотников

(кафедра общей физики для химического факультета)

Показано, что возбуждение локальных фононов на границе раздела Ge-GeO2 излучением CO2-лазера приводит к ускорению релаксации заряда в медленных электронных состояниях, расположенных вблизи указанной границы.

На реальной поверхности германия существуют две группы медленных электронных состояний: 1) на границе раздела Ge—GeO<sub>2</sub> (МСГ) с сечениями захвата электронов и дырок  $c_{n,p} \sim 10^{-24} - 10^{-26}$  см<sup>2</sup>, перезаряжающиеся в эффекте поля; 2) ловушки электронов (ЛД<sup>-</sup>) и дырок (ЛД<sup>+</sup>) в диэлектрической пленке с  $c_{n,p} \sim 10^{-27} - 10^{-32}$  см<sup>2</sup>, перезаряжающиеся, например, при фотоинжекции носителей заряда из Ge в GeO<sub>2</sub> [1] (рис. 1). Основу МСГ составляют адсорбционные комплексы, в нашем

случае типа



обменивающиеся зарядами с полупроводником по

туннельному механизму. Их малые сечения захвата (по сравнению с объемными быстрыми состояниями (БС)) связаны с существованием мягких мод в комплексах и существенной перестройкой комплексов в актах захвата, т. е. с перемещением тяжелых частиц. Кроме того, в неупорядоченной граничной фазе локальные фононы отделены от объемных энергетическим барьером. Истинная природа ЛД- пока не известна, но несомненно, что в их состав входят фрагменты молекул воды; основой ЛД+ являются вакансионные дефекты (Е'-центры). Крайне малые (по отношению к полупроводнику) сечения захвата ЛД определяются вероятностями надбарьерного перехода носителей через барьер на границе Ge-GeO<sub>2</sub> (см. рис. 1). Они могут быть быстрыми состояниями по отношению к зонам диэлектрика [1].

До сих пор наиболее подробно исследовался захват носителей заряда на МСГ и ЛД при сильном возбуждении электронной подсистемы полупроводника [1, 2]. В этих условиях захват сопровождался возбуждением локальных мод адсорбционных комплексов и диссоциацией адсорбированных молекул [3]. Поскольку захваченный на МСГ электрон находится в состоянии сильной электрон-фононной связи с модами адсорбционного комплекса, не менее интересно исследовать влияние на захват возбуждения локальных фононов на поверхности.

Удобным объектом для таких исследований является окисленная поверхность монокристалла германия. В этом случае для возбуждения поверхностных оптических фононов может быть использовано излучение CO<sub>2</sub>-лазера. Его рабочая частота излучения  $\lambda^{-1} \simeq 946$  см<sup>-1</sup> лежит внутри полосы объемных LO-фононов GeO<sub>2</sub> с максимумом 973 см<sup>-1</sup>. Тонкая пленка GeO<sub>2</sub> структурно разупорядоченна и имеет нарушенный стехнометрический состав GeO<sub>x</sub> (x<2), особенно вблизи границы Ge—GeO<sub>2</sub> [4]. Размытый максимум колебательного епектра GeO<sub>x</sub> лежит в области  $\lambda_{\phi}^{-1} \sim 935$  см<sup>-1</sup> [5]. Одной из причин сдвига  $\lambda_{\phi}^{-1}$  может быть изменение углов в кислородных мостиках структуры [6]. Разупорядоченность структуры GeO<sub>x</sub> проявляется в возникновении хвостов локализованных состояний, отщенившихся от разрешенных зон (штриховые линии на рис. 1) и приводящих к уменьшению барьера на границе Ge—GeO<sub>2</sub> [1]; Это сказывается также на оптических константах пленки [7].





Рис. 2. Релаксация заряда на поверхности германия при приложении поперечногоэлектрического поля (а) и после оптического заряжения (б) в присутствии ИК-облучения (3, 5) и без него (1, 2, 4) при различных температурах образца: T<sub>0</sub>=295 (1), 310 (2, 3) и 325 K (4, 5)

В работе использовались образцы высокоомного *n*-германия ( $\rho \simeq 25 \rightarrow 30 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ), обработанные в перекисном травителе. Образцы слегка окислялись при T = 770 K до толщины окисла  $d \simeq 5 \text{ нм}$ . Часть кристаллов окислялась до большей толщины окисла  $d \simeq 30 \text{ нм}$ . Измерения полного заряда поверхности  $Q_S$  проводились методом стационарного эффекта поля на большом синусоидальном сигнале [1, 2]. Заряжение  $ЛД^-$  осуществлялось освещением образдов азотным лазером ИЛГИ-503 (hv=3,7 эВ). Все исследования проводились в безмасляном вакууме ~1 Па.

Перезарядка МСГ осуществлялась приложением к образцу поперечного электрического поля (—100 В на полевом электроде). В этом случае величина  $Q_s$  практически определяется зарядом в МСГ  $Q_{ss}$ . Для разделения резонансных эффектов при облучении образца непрерывным СО<sub>2</sub>-лазером (ЛГ-22) от термических эффектов, связанных с равновесным разогревом за счет поглощения ИК-излучения свободными носителями заряда и окислом, образец длительное время выдерживался под облучением до достижения постоянной температуры  $T_{o}$ , измеряемой по его сопротивлению. После этого включалось поле и измерялась релаксация заряда поверхности  $\Delta Q_s^{IK}(t)$ . Зависимости  $\Delta Q_s^{IK}(t)$  были определены для нескольких значений потока ИК-квантов (~1·10<sup>19</sup> квант·с<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>), вызывавших малый радиационный разогрев образца до  $T_0=310$ —330 К. При тех же  $T_0$  измерялась в координатах уравнения  $\Delta Q_s^{T}(t)$ . Все релаксационные кривые хорошо спрямлялись в координатах уравнения Коца (см. [1]) — рис. 2, a:

$$\Delta Q_s(t) \stackrel{!}{=} \Delta Q_s(0) \exp\left(-t/\tau_s\right)^a$$

с константной a=0,6.

Как видно из рис. 2, при одних и тех же  $T_0$  ИК-излучение несколько ускоряет релаксацию. Например, для  $T_0=310$  К времена релаксации  $\tau_s$  уменьшаются от  $\tau_s^{,\rm r}=330$  с до  $\tau_s^{,\rm UK}=240$  с. Это уменьшение не может быть объяснено десорбцией молекул H<sub>2</sub>O, так как десорбция приводила бы к росту  $\tau_s$  [1, 2]. Масс-спектрометрические исследования [4] свидетельствуют об отсутствии заметной десорбции воды при аналогичных лазерных воздействиях. Наблюдаемое уменьшение  $\tau_s$  связано с росто сечений захвата МСГ при их резонансном возбуждении ИК-лазером. Часть мягких мод поверхностных комплексов, по-видимому, соответствует рабочей частоте лазера, при этом изменяется электрон-фононная константа связи захваченного носителя с МСГ. Как известно [1],

$$\tau_s^{-1} = \tau_0^{-1} \exp(-\Delta E_a/kT)$$
.

Грубая (из-за малого температурного интервала) оценка  $\Delta E_a$  указывает на снижение этой величины от  $\Delta E_a^{T} \simeq 0.3$  эВ до  $\Delta E_a^{NK} \simeq 0.25$  эВ, что также указывает на перестройку структуры МСГ.

При оптическом заряжении ЛД- из равновесия выходит система МСГ (см. рис. 1). Полный заряд поверхности  $Q_s = Q_{\pi,\mu} - Q_{ss}$ . Как видно из рис. 2, б, релаксация заряда при оптическом заряжении близка к релаксации заряда в эффекте поля и в основном определяется изменением заряда МСГ. Соответствующее уменьшение  $\tau_s$  при ИК-облучении в случае ЛД- определяется изменением сечений захвата МСГ. Действительно, эффект ускорения релаксации при ИК-облучении отсутствовал в экспериментах на образцах с толстым окислом, для которых концентрация МСГ очень мала (релаксация в эффекте поля отсутствует).

СО2-лазеры начинают использоваться для отжига имплантированных полупроводниковых структур [8, 9]. При анализе этих процессов необходимо учитывать возможность резонансного возбуждения локальных мод окисной пленки, что может приводить к дополнительному дефектообразованню в структуре. При использованных нами мощностях излучения СО2-лазера указанный эффект отсутствует, о чем свидетельствует полная обратимость релаксационных кривых и величин  $Q_{\pi\pi}$ ,  $Q_{ss}$  до и после ИК-облучения. Процессы генерации новых поверхностных электронных состояний при существенно более мощном облучении СО2-лазером являются предметом дальнейших исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Kiselev V. F., Кгуlov O. V.//Electronic Phenomena in Adsorption and Catalysis. Berlin: Springer Verlag, 1987. [2] Kiselev V. F., Коzlov S. N., Levshin N. L.//Phys. Stat. Sol. (a). 1981. 66. Р. 493. [3] Киселев В. Ф. и др.//Кинетика и катализ. 1987. 28. С. 20. [4] Зотеев А. В., Киселев В. Ф.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1987. 28, № 2. С. 92. [5] Ковалевская Т. И., Свиташев К. К.// //ФПП. 1969. 3. С. 799. [6] Jishiashvili D. A., Киtelia E. R.//Phys. Stat. Sol. (b). 1987. 143. Р. К147. [7] Rai B. P.//Phys. Stat. Sol. (a). 1987. 100. Р. K189. [8] Pavlovich V. N.//Phys. Stat. Sol. (b). 1983. 116. Р. К9. [9] James R. B., Geist G. A. et al.//J. Appl. Phys. 1987. 62. Р. 2981.

Поступила в редакцию 02.03.89