

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Кузнецов Г. И., Хргиан А. Х. Проблема наблюдений и исследований атмосферного озона. М., 1981. С. 113—117. [2] Ozone Data for the World/Publ. by Atmospheric Environment Service, Downsview—Ontario, Canada, 1983. [3] Синоптический бюллетень. Ч. 1, январь—март 1983 г. Обнинск, 1984. [4] Индексы атмосферной циркуляции, январь—март 1983 г. М.: Гидрометцентр СССР, 1984.

Поступила в редакцию  
16.01.89

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

## ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 621.315.592

### ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОЙ ДЕФЕКТНОСТИ КРИСТАЛЛА GaAs НА ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННУЮ МОДИФИКАЦИЮ ЦЕНТРОВ РЕКОМБИНАЦИИ

И. С. Бегичев, П. К. Кашкаров, В. Ю. Тимошенко

(кафедра общей физики для химического факультета)

Исследовалось лазерно-индуцированное дефектообразование в монокристаллах GaAs, исходная дефектность которых варьировалась посредством имплантации ионов  $Ag^+$ . Показано, что в зависимости от дозы имплантации лазерное излучение вызывает либо генерацию, либо отжиг центров. Обсуждается возможный механизм явления.

1. Известно, что при импульсном лазерном облучении (ИЛО) с энергиями  $W$  меньше порога плавления поверхности  $W_n$  генерация дефектов в полупроводниках происходит в узком приповерхностном слое кристалла [1, 2]. Протяженность слоя определяется глубиной области кристалла, разупорядоченной в процессе приготовления образцов (резка, полировка, травление). В связи с этим представляется интересным исследовать влияние исходной дефектности полупроводника на процессы образования центров рекомбинации при ИЛО. Ранее [3] такие эксперименты были выполнены на кристаллах GaAs, существенно различающихся по степени дефектности, которая определялась особенностями их роста. В настоящей работе первичная дефектность изменялась контролируемым образом за счет облучения поверхности GaAs ионами аргона.

2. Использовались поверхности (100) монокристаллов GaAs:Te ( $n=10^{17}$  см $^{-3}$ ). Облучение выполнялось ионами  $Ag^+$  с энергией 40 кэВ и дозами  $D=10^{10}$ — $10^{14}$  ион/см $^2$  при ориентации пучка под углом  $8^\circ$  к оси (100) при 300 К. Дефектообразующее лазерное воздействие осуществлялось моноимпульсами рубинового ОКГ ( $h\nu=1,8$  эВ,  $\tau=20$  нс). Для гомогенизации светового луча применялся кварцевый диффузор. Момент плавления поверхности при ИЛО фиксировался по возникновению фазы высокого отражения [4]. Изменение дефектности образцов после ионного и лазерного облучения регистрировалось методом фотолюминесценции (ФЛ) с помощью автоматизированного промышленного спектрометра СДЛ-2. Для возбуждения ФЛ использовался аргоновый ( $h\nu=2,54$  эВ) лазер. Все эксперименты по ИЛО и регистрации ФЛ выполнялись на воздухе при 300 К.

3. В спектре ФЛ исходных образцов GaAs, а также после их облучения ионными и лазерными лучами преобладала краевая люминесценция с максимумом при  $h\nu=1,42$  эВ. Форма линии ФЛ при указанных воздействиях не изменялась, изменялась только ее интенсивность. Поэтому дефектность кристалла мы будем характеризовать величиной интенсивности ФЛ в максимуме этой линии  $I_m$ .

4. Имплантация ионов  $Ag^+$  в GaAs, начиная с дозы  $10^{10}$  ион/см $^2$ , приводила к заметному гашению ФЛ, что, видимо, связано с генерацией центров безызлучательной рекомбинации [5]. С ростом концентрации последних симбатно растут и величина  $I_m^{-1}$ , что хорошо видно из рисунка (кривая 1). Для  $D=10^{14}$  ион/см $^2$  параметр  $I_m^{-1}$  увеличивается в 50 раз по сравнению с исходным значением. Отметим, что концент-

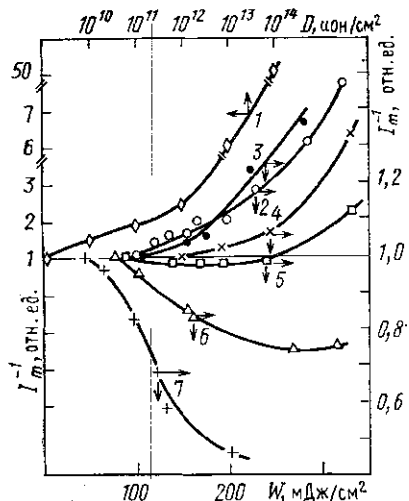
рацию радиационных дефектов, обусловленных ионным внедрением, можно оценить в соответствии с формулой [6]

$$N_d = \frac{D}{R_p} \frac{T}{2E_d}, \quad (1)$$

где  $R_p$  — проецированный пробег иона  $Ag^+$  в GaAs ( $R_p=30$  нм [5]),  $E_d$  — пороговая энергия смещения атомов As или Ga за счет упругого соударения ( $E_d=9-10$  эВ [6]),  $T$  — энергия, передаваемая атому мишени при первичном соударении с ионом  $Ag^+$  ( $T=20$  кэВ в нашем случае). С учетом приведенных численных значений получим

$$N_d = 3,4 \cdot 10^8 D \text{ (см}^{-3}\text{)}. \quad (2)$$

5. В полном соответствии с литературными данными [4] плавление поверхности GaAs при ИЛО начиналось, когда  $W=200 \pm 20$  мДж/см<sup>2</sup>. Импульсы с энергией 100—120 мДж/см<sup>2</sup> уже вызывали заметное уменьшение интенсивности ФЛ исходных кристаллов GaAs (рисунок, кривая 2). Как было показано ранее [3], этот эффект связан с генерацией центров безызлучательной рекомбинации.



Изменение величины, обратно пропорциональной интенсивности ФЛ, при облучении ионным ( $I$ ) и лазерным (2—7) пучками. Доза имплантации  $D=0$  (2),  $10^{10}$  (3),  $10^{11}$  (4),  $10^{12}$  (5),  $10^{13}$  (6) и  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> (7). Точки на кривых получены усреднением по 3—4 образцам. Разброс экспериментальных значений от образца к образцу не превышал 20%

Влияние ИЛО на фотолуминесценцию ионоимплантированных образцов зависело от дозы  $D$ . Из рисунка видно, что для  $D=10^{10}$  ион/см<sup>2</sup> лазерно-индуцированные изменения  $I_m^{-1}$  весьма близки к случаю исходного образца (ср. кривые 2 и 3). Однако уже при дозе ионного внедрения  $D=10^{11}$  ион/см<sup>2</sup> эффект ИЛО ослаблялся и при  $D=10^{12}$  ион/см<sup>2</sup> практически исчезал в диапазоне  $W=100-150$  мДж/см<sup>2</sup> (рисунок, кривые 4 и 5). Для значительных доз  $D=10^{13}-10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> ИЛО приводило к разгоранию ФЛ (кривые 6, 7).

6. Из наших данных следует, что характер лазерно-индуцированных реакций дефектов в полупроводниках определяется исходной деструкцией приповерхностного слоя. В достаточно совершенных кристаллах ( $D=0$ ;  $10^{10}$  ион/см<sup>2</sup>) ИЛО ведет к росту концентрации дефектов. В более разупорядоченных слоях GaAs ( $D=10^{11}$ ;  $10^{12}$  ион/см<sup>2</sup>) при относительно малых плотностях энергии импульса ( $W=100-210$  мДж/см<sup>2</sup>) лазерное воздействие инициирует конкурирующие процессы генерации и отжига центров гашения ФЛ. Наконец, в сильно нарушенных поверхностных слоях полупроводника ( $D=10^{13}$ ;  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>) определяющим становится процесс аннигиляции дефектов, вызванных ионным облучением, причем указанный процесс начинается уже при  $W=50-60$  мДж/см<sup>2</sup> (рисунок, кривая 7). При этом нагрев поверхности световым лучом не превышает  $\Delta T=300$  К [4]. Столь малые температуры отжига радиационных дефектов (напомним, что время нагрева  $\sim 100$  нс [4]), по-видимому, можно объяснить участием в элементарных актах аннигиляции центров электронного возбуждения кристалла [2, 6].

7. Сравнение эффективности гашения ФЛ GaAs при воздействии ионного и лазерного пучков позволяет оценить концентрацию дефектов при ИЛО. Действительно, учитывая, что набор эффективных центров безызлучательной рекомбинации в GaAs весьма ограничен [7], можно предположить, что при обоих воздействиях возникают дефекты идентичной природы. Как видно из рисунка (кривые 1 и 2), относительные изменения  $I_m^{-1}$  оказываются близки для  $D=10^{10}$  ион/см<sup>2</sup> и  $W=300$  мДж/см<sup>2</sup>. Указанной дозе соответствует, согласно формуле (2), концентрация смещенных атомов  $N_d \sim 3 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, что с учетом выказанного выше предположения можно отнести и к лазерно-индуцированным дефектам. Известно, что формула (1) не учитывает возможную аннигиляцию первичных дефектов уже в процессе имплантации. Поэтому очевидно, что приведенная оценка является весьма грубой и, видимо, может рассматриваться как верхняя граница концентрации указанных центров.

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. P. 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., Kosai K. // Semicond. and Semimet. 1983. 19. P. 1.

Поступила в редакцию  
05.01.89

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

УДК 621.315.592;541

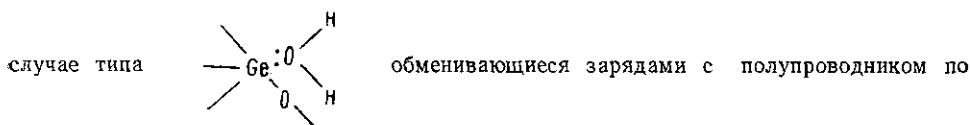
## УСКОРЕНИЕ РЕЛАКСАЦИИ ЗАРЯДА МЕДЛЕННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ ГЕРМАНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ИК-ЛАЗЕРА

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

(кафедра общей физики для химического факультета)

Показано, что возбуждение локальных фононов на границе раздела Ge—GeO<sub>2</sub> излучением CO<sub>2</sub>-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  $\sigma_{n,p} \sim 10^{-24} - 10^{-26}$  см<sup>2</sup>, перезаряжающиеся в эффекте поля; 2) ловушки электронов (ЛД<sup>-</sup>) и дырок (ЛД<sup>+</sup>) в диэлектрической пленке с  $\sigma_{n,p} \sim 10^{-27} - 10^{-32}$  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



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<sup>-</sup> пока не известна, но несомненно, что в их состав входят фрагменты молекул воды; основой ЛД<sup>+</sup> являются вакансионные дефекты (E'-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  $\lambda^{-1} \approx 946$  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 стехиометрический состав GeO<sub>x</sub> ( $x < 2$ ), особенно вблизи границы Ge—GeO<sub>2</sub>