

## ОТЖИГ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ОБЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНАМИ МОНОКРИСТАЛЛАХ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ, НАСЫЩЕННЫХ ВОДОРОДОМ

Коршунов Ф.П., Курилович Н.Ф., Гуринович В.А., Карась В.И.

ГНУ "Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси"  
220072 г. Минск, ул. П. Бровки, 17. Тел. (017)284-11-27

В последнее время большое внимание исследователей привлечено к выяснению роли водорода в различных полупроводниковых материалах и, в частности, в арсениде галлия [1]. Водород здесь играет важную роль как в изменении свойств материалов, так и характеристик приборов на его основе. Такие приборы могут работать в условиях радиации, в результате чего в кристаллической структуре арсенида галлия образуются радиационные дефекты. Изучение свойств и природы РД, возникающих при воздействии на GaAs, обогащенном атомарным водородом, различных видов излучения представляет, как научный, так и практический интерес [2-5]. Дополнительную информацию о природе и свойствах этих дефектов можно получить, исследуя изохронный и изотермический отжиг облученных кристаллов.

В данной работе приводятся результаты исследования отжига радиационных нарушений в кристаллах нелегированного GaAs n-типа, прошедших обработку в атмосфере водорода при температуре 400°C в течение 4 часов и облученных быстрыми электронами с энергией 4 МэВ. Величины подвижности и концентрации электронов в исходных и прошедших обработку в атмосфере водорода, облученных и отожженных образцах определялись из измерений эффекта Холла и электропроводности. Концентрация носителей заряда в исходных образцах  $n \sim 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , а подвижность  $\mu \sim 5 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Следует отметить, что насыщение водородом несколько снижает концентрацию и подвижность носителей заряда вследствие пассивации водородом электрически активных мелких и глубоких центров. Облучение дополнительно существенно снижает эти параметры. После облучения дозой  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  концентрация стала  $2,8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , а подвижность -  $4 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Изохронный и изотермический отжиг облученных образцов проводился на воздухе в кварцевых лодочках в интервале температур 80-500°C. Время выдержки при каждой температуре при изохронном отжиге составляло 20 минут.

На рис.1 представлены результаты изохронного отжига, вызвавшего изменение концентрации носителей заряда, отражающее долю неотожженных дефектов  $f = (n_0 - n_{\text{отж}}) / (n_0 - n_{\text{обл}})$ , где  $n_0$  - концентрация носителей заряда в необлученном материале,  $n_{\text{обл}}$  - концентрация носителей заряда после облучения,  $n_{\text{отж}}$  - концентрация носителей заряда после определенной температуры отжига облученных образцов.

Видно, что отжиг образцов, обогащенных водородом (кривая 2) и без водорода (кривая 1) происходит в две стадии: в кристаллах без водорода при температурах 200-280°C и 350-450°C, а в образцах, насыщенных водородом - при температурах 180-260°C и 350-450°C, т. е на первой стадии отжиг в кристаллах, насыщенных водородом происходит при температурах примерно на 20°C ниже. На первой стадии в обоих случаях отжигается примерно 65% дефектов, а на второй стадии - 30%. Считается [6], что отжигаемые на первых стадиях дефекты являются собственными дефектами типа пар Френкеля в подрешетке мышьяка ( $V_{\text{As}} - \text{As}_i$ ). Наличие второй стадии отжига свидетельствует о том, что в облученных кристаллах обоих типов имеются и более сложные дефекты, которые могли образоваться при взаимодействии собственных дефектов с примесями и другими дефектами структуры в процессе отжига на первой стадии, когда первичные РД приобретают подвижность и могут взаимодействовать с другими дефектами структуры.

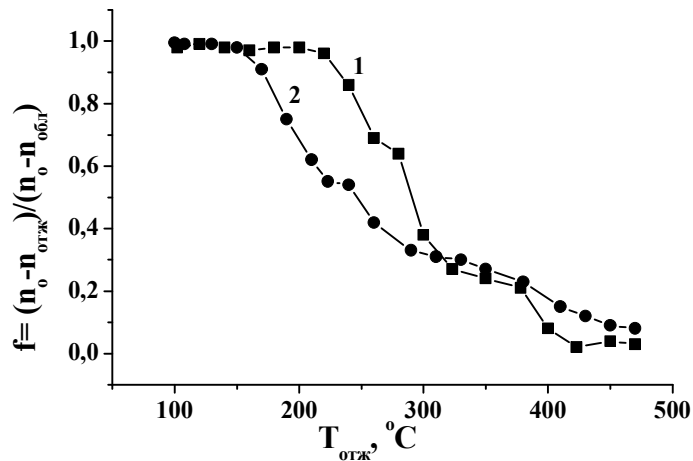


Рис. 1. Восстановление в процессе отжига концентрации носителей заряда в облученных кристаллах GaAs (1) и в кристаллах, насыщенных водородом (2).

Для определения энергии активации отжига РД на первой и второй стадиях изохронного отжига проводился изотермический отжиг. Измерялись концентрации носителей заряда  $n_{обл}$  и  $n_{отж}$ . Использовался метод сечения [7], при котором из отношения времен  $t_1$  и  $t_2$ , необходимых для получения заданной постоянной величины  $n_{отж}/n_{обл}$  при температурах  $T_1$  и  $T_2$  определяется энергия активации отжига РД на первой и второй стадиях отжига

$$E = \ln(t_2/t_1) \cdot k \cdot T_1 \cdot T_2 / (T_2 - T_1) \quad (1),$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $E$  – искомая величина энергии активации отжига РД,  $t_1$  и  $t_2$  – времена отжига,  $T_1$  и  $T_2$  – температуры отжига – величины, определяемые из экспериментально полученных изотерм. Интервалы температур для проведения изотермического отжига были выбраны после проведения изохронного отжига (рис. 1).

На рис.2 (а) представлены зависимости изотермического отжига облученных электронами образцов, обогащенных водородом, для температур 170 и 190 $^\circ\text{C}$ , выбранных исходя из первой стадии (рис.1).

Из рисунка видно, что процесс отжига РД происходит быстрее при температуре отжига 190 $^\circ\text{C}$ , чем при 170 $^\circ\text{C}$ . Шаг времени отжига при данных температурах составлял 20 минут. Величина энергии активации отжига РД первой стадии отжига облученных быстрыми электронами обогащенных водородом кристаллов нелегированного GaAs, рассчитанная по формуле (1) составила  $0,50 \pm 0,05$  эВ.

Для определения энергии активации отжига РД, отжигающихся на второй стадии, проводился изотермический отжиг при температурах второй стадии отжига (рис. 2 (б)). Шаг времени отжига в этом случае составлял 10 секунд. Величина энергии активации отжига РД на этой стадии для прошедших активацию водородом и облученных быстрыми электронами кристаллов нелегированного GaAs, рассчитанная в соответствии с (1), составила  $\sim 1,55 \pm 0,10$  эВ. Отметим, что такую же энергию активации отжига РД в кристаллах нелегированного арсенида галлия, облученного электронами, имели кристаллы, ненасыщенные водородом [8].

Проведенные исследования показывают, что в облученных быстрыми электронами кристаллах нелегированного GaAs, обогащенных атомарным водородом, отжиг РД на первой стадии происходит при более низких температурах (180 - 260 $^\circ\text{C}$ ), чем отжиг на первой

стадии облученных электронами образцов нелегированного GaAs, но не подвергнутых обработке в атмосфере водорода (200 – 280°C). Энергия активации отжига РД на первой стадии отжига (170 – 270°C) составляет 0,50 эВ. На второй стадии отжига РД (350 – 450°C), энергия активации отжига дефектов в кристаллах, прошедших и не прошедших обработку в атмосфере водорода одна и та же, и равна 1,55 эВ.

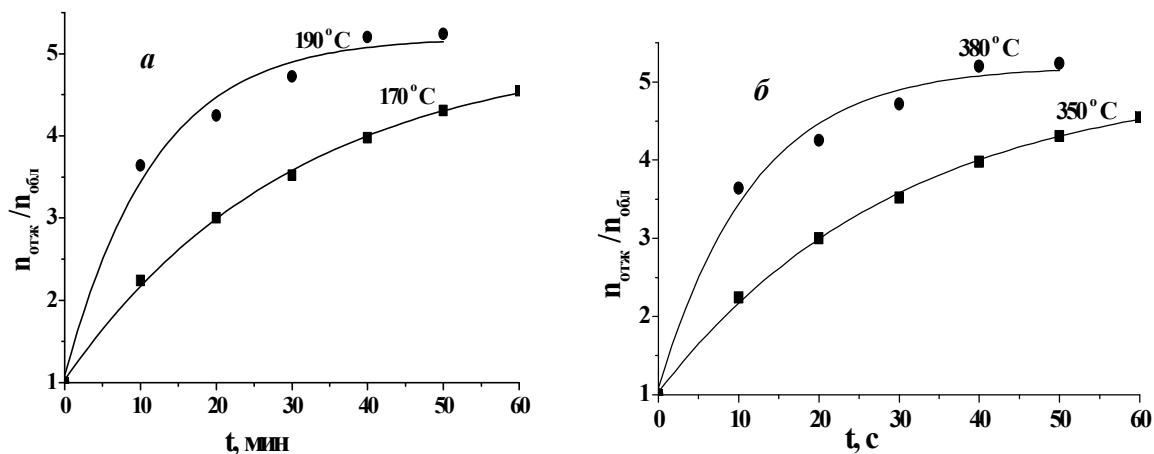


Рис 2. Изотермический отжиг облученных быстрыми электронами монокристаллов нелегированного арсенида галлия, насыщенного водородом, при температурах первой стадии отжига (а) и прошедших предварительно изотермический отжиг при температуре 220°C в течение двух часов.

Таким образом установлено, что у образцов арсенида галлия, насыщенных водородом, отжиг радиационных дефектов происходит в две стадии, при этом температура отжига на первой стадии снижается на 20°C по сравнению с ненасыщенным водородом материалом. Определены энергии активации РД на первой ( $0,50 \pm 0,05$  эВ) и второй ( $1,55 \pm 0,10$  эВ) стадиях отжига.

#### Список литературы

- [1]. E.M. Omeljanovsky, A.V. Pakhomov, A.V. Polganov. J. Electron Matter 18, 6, 659 (1989).
- [2]. В.А. Козлов, В.В. Козловский. ФТТ 5, 659 (2001).
- [3]. В.Н. Брудный, В.В. Пешев, А.П. Суржиков. Радиационное дефектообразование в электрических полях: арсенид галлия, фосфид индия. Новосибирск (2001).
- [4]. C. Clacys, E.A. Simoen. Radiation effects in Advanced semiconductor Materials and Devices 22 (2002).
- [5]. Ф.П. Коршунов, Н.Ф. Курилович, Т.А. Прохоренко. Перспективные материалы 1, 35 (2002).
- [6]. D. Pons, J.C. Bourgoin. J. Phys. C: Solid State Phys 18, 38 (1985).
- [7]. А. Дамаск, Дж. Динс. Точечные дефекты в металлах. М. 150 (1986).
- [8]. Ф.П. Коршунов, Н.Ф. Курилович, Т.А. Прохоренко. Известия НАН Беларуси, сер. ф.-м.н. 4, 74 (2004).