

ОТЖИГ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ $EM1$ И $E10$ В GaAsИванюкович В. А., Карась В. И., Ломако В. М.,
Счастный В. В., Тарасевич А. Д.

Изучению термического отжига основных радиационных дефектов в n -GaAs, облученном электронами 1 МэВ, посвящен ряд работ. По электрическим измерениям установлено, что отжиг дефектов, образованных в результате облучения при 4.2 К, происходит в три стадии при температурах 235, 280 и 520 К [1]. Применение метода нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (НЕСГУ) позволило определить, что на первой стадии отжигаются центры $E7$ и $E9$, на третьей — $E1$ — $E5$, после чего в спектре остаются лишь пики, со-

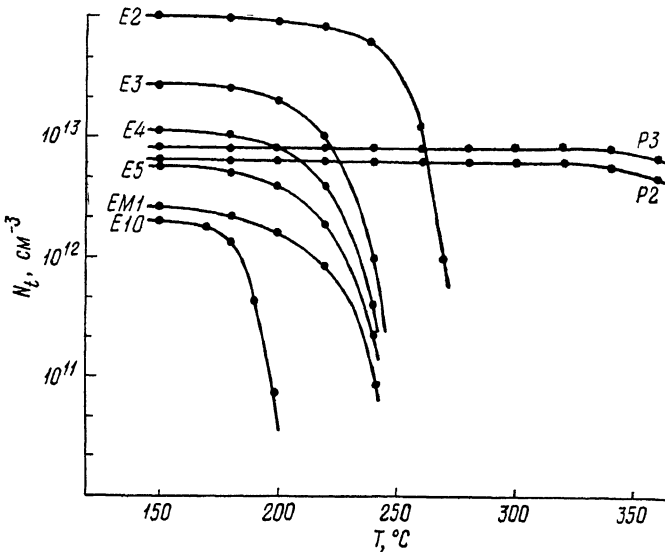


Рис. 1. Изменение концентрации радиационных дефектов в n -GaAs, облученном электронами 7 МэВ при 300 К, после 20-минутных изохронных отжигов.

ответствующие центрам $P1$ — $P3$ [2, 3]. Дефекты, отжиг которых обуславливает наличие второй стадии (280 К), в спектре НЕСГУ не обнаружены. Возможно, они вносят в запрещенную зону такие глубокие уровни, термоэмиссия носителей заряда с которых происходит при более высокой температуре, чем температура их отжига, и поэтому они отжигаются раньше, чем могут быть зарегистрированы методом НЕСГУ [4]. Может быть, по этой же причине не обнаружена часть дефектов, отжигающаяся на первой стадии, так как вклад наблюдаемых методом НЕСГУ центров $E7$ и $E9$ в суммарный спектр радиационных дефектов значительно меньше, чем степень восстановления электропроводности материала на первой стадии отжига [1, 4].

Ранее сообщалось о новых радиационных дефектах, обнаруженных в GaAs, — конфигурационно-бистабильном центре $EM1$ [5] и центре $E10$, для которого пик эмиссии электронов регистрируется в том же интервале температур, что и пик $E3$ [6]. Целью данной работы являлось исследование процессов отжига этих центров. Для решения задачи изучалось изменение спектра радиационных дефектов в GaAs в процессе проведения изохронных и изотермических отжигов. Измерения проводились методом НЕСГУ. Использовались диоды Шоттки, изготовленные на слоях, выращенных методом газовой фазной эпитаксии ($n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$), и облученные γ -квантами ^{60}Co и электронами 7, 25 МэВ.

Изохронные отжиги продолжительностью 20 мин проводились в интервале температур 420—630 К (рис. 1). В отличие от упомянутых ранее радиационных дефектов, отжигающихся на третьей стадии, центр $E10$ отжигается при более низкой температуре (460 К) (считаем, что температура отжига — это температура, при которой концентрация центра уменьшается в 2 раза [3]). Температура отжига центра $EM1$, как и центров $E3$ — $E5$, лежит в интервале 480—490 К. Как сообщалось ранее, бистабильный центр $EM1$ может находиться в A - или B -конфигурации, причем при $T > 208$ К стабильной является B -конфигурация, а вероятность реализации A -конфигурации мала и уменьшается с ростом температуры [6]. Так как постоянная времени перехода центра из A - в B -конфигурацию описывается выражением

$$\tau_{AB} = (2.4 \cdot 10^{13})^{-1} \exp(0.43 \text{ эВ}/kT) \text{ с,}$$

а для обратного процесса — $\tau_{BA} = (1.7 \cdot 10^{10})^{-1} \times \exp(0.30 \text{ эВ}/kT)$ с [7], то при 490 К вероятность пребывания центра в A -конфигурации равна 0.015, а в B -конфигурации — 0.985. Поэтому, учитывая положение уровня Ферми в исследуемом материале при 490 К ($F \approx E_c - 0.29$ эВ), можно предположить, что наблюдаемый отжиг происходит в то время, когда центр находится в B -конфигурации в незаполненном состоянии (напомним, что такой конфигурации соответствует уровень $E_c - 0.17$ эВ в запрещенной зоне [6]).

Установлено, что процессы термических отжигов радиационных дефектов $EM1$ и $E10$ описываются уравнениями кинетики 1-го порядка. Температурные зависимости скоростей

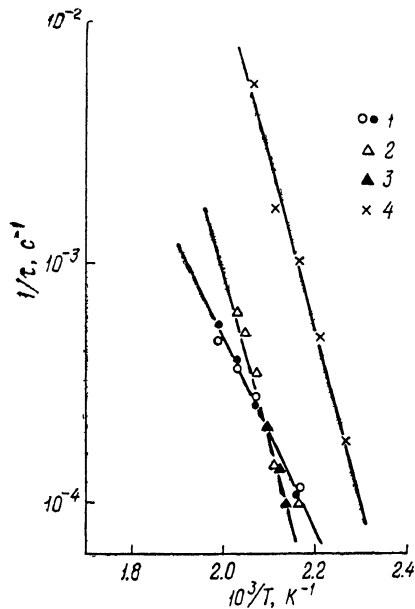


Рис. 2. Температурная зависимость скоростей отжига радиационных дефектов $EM1$ (1), $E4$ (2), $E5$ (3) и $E10$ (4).

отжига исследуемых центров изображены на рис. 2. Для центра $EM1$ эта зависимость имеет вид $\tau^{-1} = (5.6 \cdot 10^4) \exp(-0.80 \text{ эВ}/kT)$, а для центра $E10$ — $\tau^{-1} = (1.8 \cdot 10^{13}) \exp(-1.50 \text{ эВ}/kT)$ с.

Обращают на себя внимание значения частотных факторов в приведенных зависимостях $\tau(T)$. Сравнение с полученными на тех же структурах параметрами отжига центров $E4$ и $E5$, для которых $\tau \approx (3 \cdot 10^{12})^{-1} \exp(1.5 \text{ эВ}/kT)$ с, показывает, что вероятность отжига центра $E10$ больше, чем центров $E4$ и $E5$. Отметим, что центр $E4$ отжигается несколько быстрее центра $E5$, но различие в величинах энергий активации и предэкспоненциальных множителей не превышает допустимых ошибок измерений. Параметры отжига центров $EM1$ и $E10$ мы сравниваем с параметрами, полученными для центров $E4$ и $E5$, отжиг которых описывается уравнениями кинетики 1-го порядка. Было бы интересно сравнить их и с параметрами отжига центра $E3$, так как в спектре НЕСГУ пик $E10$ и $EM1$ (A -конфигурация) регистрируются при тех же температурах, что и пик $E3$ [7]. Согласно [3], в образцах n -GaAs, облученных электронами 1 МэВ, его отжиг также описывается уравнением кинетики 1-го порядка. Однако в нашем случае после облучения электронами 7 и 25 МэВ процесс отжига центра $E3$, контролируемый методом НЕСГУ, носил более сложный характер. Причем учитывался вклад центров $E10$ и $EM1$ в амплитуду суммарного пика $E3$ [7], поэтому параметры отжига центра $E3$ не определялись.

Учитывая величину частотного фактора, можно предположить, что отжиг центра $E10$ — это некоторый элементарный процесс, происходящий в кристаллической решетке. Однако, как сообщалось ранее, этому центру присущи свойства, свидетельствующие о его сложной структуре: амплитуда пика $E10$ зависит от длительности импульсов заполнения [постоянная времени заполне-

ния $\tau_i = 8.3 \cdot 10^{-10} \exp(0.17 \text{ эВ}/kT) \text{ с}$], а его скорость введения зависит от температуры облучения и при увеличении энергии облучающих частиц растет быстрее, чем скорость введения основных радиационных дефектов $E2$ и $E3$. Такие свойства позволили сделать вывод о том, что радиационный центр $E10$ является комплексом, содержащим первичные нарушения кристаллической решетки [7]. Более того, предварительные результаты показывают, что скорость введения центра $E10$ зависит также от уровня легирования материала и при $n_0 > 10^{17} \text{ см}^{-3}$ превышает скорость введения центра $E3$, определяя положение максимума суммарного пика $E3$ в спектре НЕСГУ. Это подтверждает сделанный в [7] вывод о сложной структуре центра $E10$ и указывает на то, что в образовании комплекса могут участвовать и атомы примеси. Таким образом, есть основание предположить, что полученное нами значение частотного фактора описывает некоторый элементарный акт, переводящий комплекс $E10$ в электрически не активное состояние, которое не контролируется методом НЕСГУ. Возможно, отжиг заканчивается диссоциацией комплекса или созданием нового электрически не активного образования.

Как видно из рис. 1 и 2, несмотря на то что центры $E3-E5$ и $EM1$ отжигаются в одном и том же интервале температур, параметры отжига конфигурационно-бистабильного центра и центров $E4-E5$ различны. Величина энергии активации отжига центра $EM1$ близка к значениям, полученным для первой и второй стадий отжига (0.72 и 0.83 эВ [5]), однако частотный фактор существенно отличается от величин, полученных для этих стадий ($\sim 10^{12} \text{ с}^{-1}$ [4]). Значение частотного фактора $5.6 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ трудно объяснить с точки зрения диффузионной теории отжига, поэтому мы предполагаем, что при температуре 490 К отжигаются лишь те дефекты $EM1$, которые находятся не в устойчивой конфигурации B , являющейся более термостабильной, а в некоторой другой, возможно, в контролируемой нами конфигурации A [6]. В таком случае отжигу будет предшествовать конфигурационная перестройка дефекта, которая может сопровождаться значительным изменением энтропии вследствие изменения его симметрии, а полученный нами частотный фактор будет характеризовать процесс, состоящий из конфигурационной перестройки и последующего отжига дефекта. На возможность большого изменения энтропии указывает тот факт, что при переходе дефекта $EM1$ из B - в A -конфигурацию при температурах 100–140 К происходит изменение частотного фактора на 3 порядка [6, 7]. Мы не исключаем также того, что при температуре отжига может происходить переход дефекта в иную конфигурацию, сопровождающийся еще большим изменением энтропии. Такое предположение основано на том, что в настоящее время известны дефекты, испытывающие до трех конфигурационных перестроек в процессе термического отжига [8].

Список литературы

- [1] Tommen K. // Rad. Eff. 1970. V. 2. N 2. P. 201–210.
- [2] Pons D., Mircea A., Nitonnean A., Martin G. M. // Inv. contr. pap. Int. Conf. Def. Rad. Eff. Semicond. Bristol—London, 1979. P. 352–357.
- [3] Pons D., Mircea A., Bourgojn J. // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. N 8. P. 4150–4157.
- [4] Pons D., Bourgojn J. C. // J. Phys. C: Sol. St. Phys. 1985. V. 18. N 20. P. 3839–3871.
- [5] Ланг Д. // Точечные дефекты в твердых телах. М., 1979. С. 187–220.
- [6] Иванюкович В. А., Карась В. И., Ломако В. М. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 2. С. 264–267.
- [7] Иванюкович В. А., Карась В. И., Ломако В. М. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 9. С. 1635–1639.
- [8] Chantre A., Kimerling L. C. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 49. N 15. P. 1000–1002.

Научно-исследовательский институт
прикладных физических проблем
им. А. Н. Севченко
БГУ им. В. И. Ленина
Минск

Получено 23.05.1990
Принято к печати 6.07.1990