

ЗАПАЗДЫВАЮЩИЕ СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ, СТИМУЛИРОВАННЫЕ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Давыдов В. Н., Лоскутова Е. А., Найден Е. П.

Приводятся экспериментальные результаты исследования долговременной релаксации постоянной решетки, температуры, структурного совершенства, а также электрофизических характеристик приповерхностного слоя элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ после воздействия импульсов магнитного поля.

Наблюдаемые изменения указанных параметров и характеристик свидетельствуют о генерации, преобразовании и распаде кластеров френкелевских дефектов с аномально низкой энергией образования, обладающих генерационно-рекомбинационной активностью и легирующим действием.

Явление долговременной релаксации (ДР) в полупроводниках и полупроводниковых структурах является объектом интенсивных исследований [1-3]. Особенностью этих исследований является то, что ДР вызвана освещением или электрическим полем.

В работах [4, 5] сообщалось о наблюдении ДР в полупроводниках, стимулированной действием магнитного поля. В данной работе приводится детальная информация об изменении свойств широкого класса полупроводников, вызванном слабым магнитным полем. Полученные экспериментальные данные однозначно свидетельствуют о том, что в основе ДР лежат структурные изменения решетки полупроводника за счет образования френкелевских дефектов.

В работе исследовались монокристаллические полупроводники Si, Ge, InSb, InAs, GaAs. Постоянная решетки полупроводников a измерялась рентгенографическим методом по отражению от плоскостей (444) FeK_{α} -излучения (для InSb) и (333) FeK_{α} -излучения (для InAs, GaAs, Ge). Измерения температуры образцов проводились дифференциальной термопарой. Импульсные магнитные поля прикладывались перпендикулярно поверхности полупроводника. В качестве объекта электрофизических измерений ДР выбрана структура металл-оксид-полупроводник (МОП), в которой легко регистрировать изменения приповерхностных свойств полупроводника. Измерения малосигнальной фотодс U и вольтфарадных характеристик (ВФХ) производились аналогично [6].

На рис. 1, 2 представлены зависимости относительного изменения постоянной решетки $\Delta a/a$ (рис. 1) и температуры ΔT (рис. 2) различных полупроводников от времени после воздействия импульса магнитного поля амплитудой 10^3 Э и длительностью 20 с при температуре 300 К. Началом отсчета времени служит момент окончания импульса. Из результатов видно, что все зависимости имеют глубокий минимум при $t=50 \div 200$ с. Аналогичный вид имеют зависимости от времени продольного сопротивления образцов, в частности для GaAs минимум этой зависимости достигает 20 % от исходного значения продольного сопротивления.

Изменение структурного совершенства приповерхностного слоя полупроводников после действия импульса магнитного поля исследовалось с помощью металлографического метода [7]. Оказалось, что концентрация фигур травления растет до момента $t=200$ с после окончания импульса, а затем в течение не-

сколько сот секунд убывает практически до исходной величины. На рис. 3, а для примера показана поверхность InAs до воздействия, а на рис. 3, б — по истечении 200 с с момента окончания импульса амплитудой 10^3 Э и длитель-

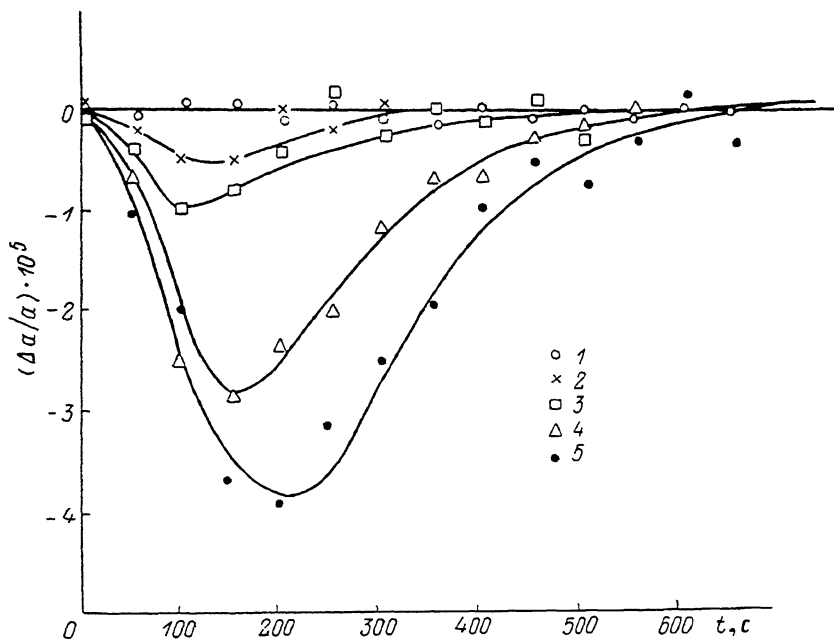


Рис. 1. Релаксация относительного изменения постоянной решетки различных полупроводников после воздействия импульса магнитного поля.

1 — Si, 2 — GaAs, 3 — InAs, 4 — InSb, 5 — Ge.

ностью 20 с. Характерной особенностью рис. 3, б является распределение фигур травления вдоль параллельных и закручивающихся линий, а также окружностей.

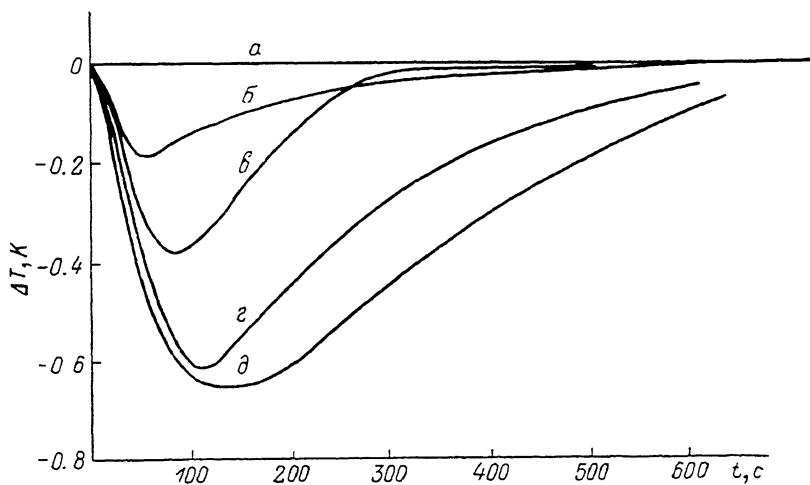


Рис. 2. Релаксация температуры образцов различных полупроводников после воздействия импульса магнитного поля.

Заметим, что величины максимальных изменений постоянной решетки, температуры, а также времен достижения этих изменений (рис. 1, 2) после действия импульсов магнитного поля в ряду соединений $A^{III}B^V$ находятся в обратной зависимости от значений микротвердости этих материалов, составляющих для InSb, InAs и GaAs соответственно 220, 330 и 750 кг/мм².

На рис. 4 представлены релаксационные зависимости фотоэдс $U(t)$ после воздействия на МОП структуру из InSb импульса магнитного поля амплитудой 100 Э и длительностью 10 с (кривая 1) и 20 с (кривая 2). Кривой 3 изображена ре-

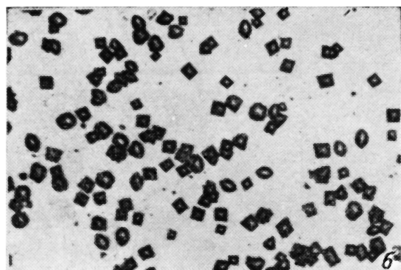
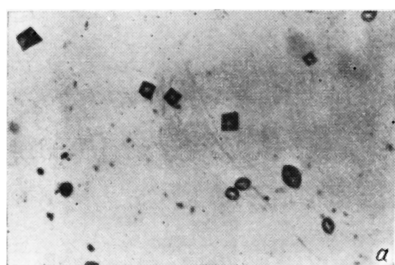


Рис. 3. Фотографии селективно травленных поверхностей n -InAs до (а) и после (б) воздействия импульса магнитного поля.

лаксационная зависимость шума, соответствующая случаю 1. На вставке к рис. 4 (кривые 1—5) показаны ВФХ структуры, измеренные с интервалом 50 с начиная с момента достижения зависимости $U(t)$ минимума после действия 5-се-

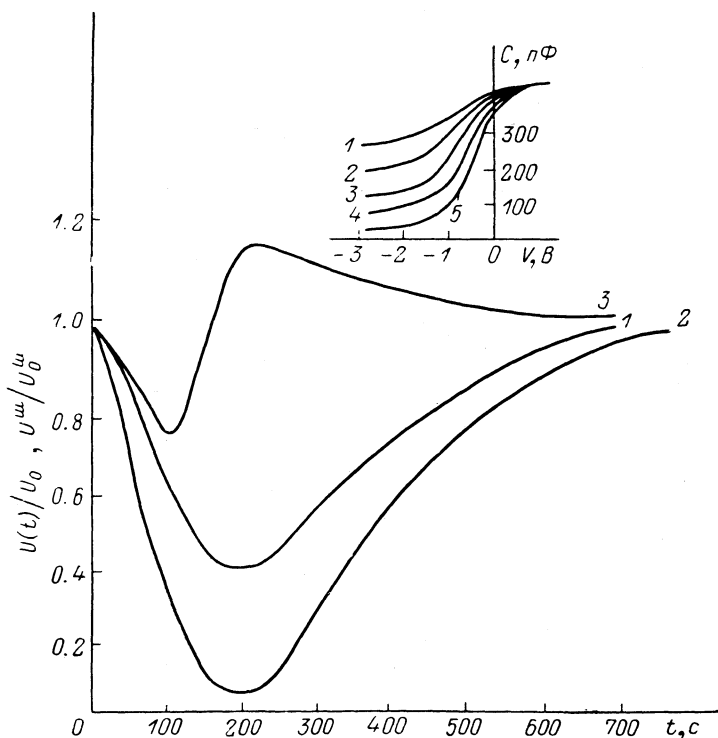


Рис. 4. Релаксация величины фотоэдс МОП структуры из InSb в режиме обеднения — сильной инверсии после воздействия импульсов магнитного поля различной длительности (1, 2) и релаксация величины шума МОП структуры (3).

На вставке — ВФХ в различные моменты релаксации.

кундного импульса магнитного поля. Качественно аналогичные зависимости наблюдались на структурах из других материалов.

Для выявления кинетических свойств эффекта ДР измерялись зависимости $U(t)$ после воздействия на структуры переменного магнитного поля различной частоты f_m . Обнаружено, что частотная зависимость $\Delta U(f_m)$ [ΔU — разность между значением фотоэдс до воздействия импульса и значением минимума

релаксационной зависимости $U(t)$ совпадает с зависимостью фототок от частоты модуляции света $U(f)$. Частота «среза» обеих зависимостей составляет 10^4 Гц для InSb.

Совокупность полученных результатов позволяет сделать вывод, что воздействие магнитного поля на полупроводники приводит к образованию френкелевских дефектов решетки, их объединению в кластеры, скопления, которые по истечении сотен секунд распадаются, а френкелевские дефекты аннигилируют.

Действительно, изменение структурного совершенства приповерхностного слоя полупроводника после действия магнитного поля хорошо видно на рис. 3. Генерация структурных дефектов происходит, вероятно, вследствие возбуждения решетки кристалла, о чем свидетельствуют изменения a и T решетки (рис. 1, 2). Передача же решетке электромагнитной энергии осуществляется посредством первоначального возбуждения электронной подсистемы полупроводника, на что указывает совпадение частотных зависимостей фототок и наблюдаемого эффекта релаксации. Вид релаксационной зависимости шума МОП структуры и его существенное отличие от вида зависимости $U(t)$ (рис. 4) также свидетельствуют о протекании в структурах после воздействия магнитного поля генерационно-рекомбинационных процессов, вероятно, связанных с образованием, преобразованием и распадом структурных дефектов.

Из релаксационных зависимостей емкости МОП структур (рис. 4) следует, что знак заряда избыточных носителей, образующихся в полупроводнике n -типа после действия импульса магнитного поля, положительный. Концентрацию положительно заряженных ионов ΔN_d определим на основе теории фотоемкостного эффекта [8] по значениям инверсионной емкости структуры после действия импульса C' и до него C :

$$\Delta N_d = \lambda n_i \exp [(2 \ln \lambda - 1)(1 - K^{-2})] - 1,$$

где $K = (C_0/C - 1)/(C_0/C' - 1)$, λ — уровень легирования полупроводника, n_i — собственная концентрация носителей в нем, C_0 — емкость диэлектрика. Определив C' и C из рис. 4, получим $\Delta N_d \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Образующимися положительными ионами могут быть следующие дефекты френкелевского типа: вакансии V^v элемента либо межузельные атомы A^{II} элемента, а также их кластеры, структурные комплексы. Уменьшение постоянной решетки после воздействия магнитного поля свидетельствует в пользу межузельной природы дефектов.

Поскольку воздействие магнитного поля приводит одновременно как к увеличению емкости МОП структур, так и к уменьшению фототок U (рис. 4), необходимо предположить, что наряду с увеличением N_d происходит рост концентрации рекомбинационных центров в ОПЗ N_r , поскольку [9]

$$U \sim \frac{N_d \pm N_r}{N_r} \frac{\exp(-y_s)}{\exp(-y_s) + (N_d \pm N_r)^2/n_i^2},$$

где y_s — поверхностный потенциал полупроводника. Такими центрами могут являться структурные комплексы ионов А-подрешетки с ионами кислорода, которые, как известно, обладают генерационно-рекомбинационной активностью [10].

Таким образом, воздействие на полупроводник магнитного поля приводит к долговременным изменениям структурного совершенства решетки, ее температуры, постоянной n , как следствие, к изменениям электрофизических характеристик изготовленных полупроводниковых структур, что обусловлено созданием в полупроводнике под действием магнитного поля кластеров френкелевских дефектов с аномально низкой энергией образования.

Список литературы

- [1] Kos S. // Czech. J. Phys. 1961. V. B11. N 3. P. 193—198.
- [2] Шейнкман М. К., Шик А. Я. // ФТП. 1976. Т. 10. В. 2. С. 209—233.
- [3] Sclez N. // Progr. Quant. Electron. 1984. V. 9. N 1. P. 149—257.
- [4] Дяглер Г. И., Каневский В. М., Москвин В. В., Постников С. Н. // ДАН СССР. 1983. Т. 268. В. 3. С. 591—593.

- [5] Кукушкин Н. В., Постников С. Н., Терман Ю. А., Кедрякин В. М. // ЖТФ. 1985. Т. 55. В. 10. С. 2083—2084.
- [6] Davydov V. N., Petrov A. S. // Phys. St. Sol. 1986. V. A98. N 1. P. 253—261.
- [7] Давыдов В. Н., Фефелова И. И., Лоскутова Е. А. // Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1987. Т. 23. В. 9. С. 1438—1441.
- [8] Sachenko A. V., Zuev V. A., Litovchenko V. G. // Phys. St. Sol. 1974. V. A21. N 2. P. 345—353.
- [9] Ржанов А. В. Электронные процессы на поверхности полупроводников. М., 1971. 480 с.
- [10] Заптов Ф. А., Горшкова О. В., Поляков А. Я., Кеворков М. Н., Попков А. Н. ФТП. 1981. Т. 15. В. 6. С. 1230—1232.

Сибирский физико-технический институт
им. В. Д. Кузнецова при ТГУ
Томск

Получена 27.03.1989
Принята к печати 26.04.1989