

О ВЛИЯНИИ УЛЬТРАЗВУКА НА ОТЖИГ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В НЕЙТРОННО-ЛЕГИРОВАННОМ ГЕРМАНИИ

© Я.М.Олих, Н.И.Карась

Институт физики полупроводников Национальной академии наук Украины,
252650 Киев, Украина
(Получена 11 июля 1995 г. Принята к печати 28 июля 1995 г.)

С помощью эффекта Холла исследованы температурные (в интервале $77 \div 330$ К) характеристики электрофизических параметров образцов нейтронно-легированного германия (уровень легирования сурьмой в исходном германии $N_{\text{Sb}} = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, интегральный поток тепловых нейтронов $\Phi_n \simeq 10^{15} \text{ см}^{-2}$), прошедших изохронный отжиг в диапазоне температур $90 \div 210^\circ \text{ C}$. Часть образцов одновременно с отжигом подвергалась воздействию ультразвуком с частотой $f = 5 \div 10$ МГц, мощностью $W = 1 \text{ Вт/см}^2$. Установлено, что ультразвук стимулирует низкотемпературную стадию обратного отжига радиационных дефектов в нейтронно-легированном германии.

Введение

Известно, что термообработка полупроводникового материала, содержащего термодинамически неравновесные дефекты (в том числе и радиационной природы) является традиционной технологической операцией восстановления его электрофизических характеристик. Альтернативным способом понижения необходимой температуры и ускорения процесса отжига может оказаться дополнительное воздействие ультразвуком (УЗ) [1].

Возможности значительного ускорения диффузионных процессов в образцах германия с помощью мощных ультразвуковых колебаний низкой частоты (19 кГц) были показаны еще в работе [2]. Учитывая точечные размеры отжигаемых дефектов и резонансные механизмы взаимодействия УЗ с реальными кристаллами [3], а также недавние результаты многочисленных экспериментальных исследований воздействия УЗ на физические свойства полупроводников (см., например, библиографию в [4]), мы полагаем, что более эффективным будет применение ультразвуковых волн именно высокочастотного (мегагерцового и выше) диапазона.

Удобными для исследования термоакустического отжига в качестве модельного объекта нам представляются радиационные дефекты (РД). РД в нейтронно-легированном германии (НЛГ), как показано ранее во многих работах (например, [5-9]), поддаются управляемому и контролируемому отжигу. В зависимости от температуры и интенсивности облучения, исходной степени легирования и т.д. существуют разные подходы разделения полного цикла отжига РД в НЛГ на стадии [6-8]. Мы придерживаемся трактовки авторов [10], которые показали, что отжиг РД идет в две стадии. На первой стадии, до температур 150°С над процессом исчезновения дефектов превалирует процесс образования комплексов из простейших дефектов, входящих в состав разупорядоченных областей (скорее всего многовакансионные комплексы), на второй стадии, которая заканчивается примерно к 350°С, происходит распад комплексов.

Цель данной работы — выяснение возможностей ультразвуковой интенсификации процессов низкотемпературного (I стадия) отжига РД в НЛГ.

1. Экспериментальные условия

В качестве исходного материала использованы кристаллы германия, легированные сурьмой с концентрацией $N_{\text{Sb}} = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, которые были облучены реакторными нейтронами с интегральным потоком тепловых нейтронов около 10^{15} см^{-2} . После нейтронного легирования образцы оказались n -типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho = 63 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при 288 К. Последующий изохронный отжиг проводился в интервале температур $30 \div 210^\circ \text{C}$ с шагом 30°C в течение 30 мин в специально изготовленной печи, отличительной особенностью которой являлась возможность одновременного ультразвукового нагружения образца (продольные волны частотой $5 \div 10 \text{ МГц}$, интенсивностью до 2 Вт/см^2).

Акустический канал состоял из кварцевой трубы, закрытой с двух сторон плотно подогнанными по внутреннему диаметру кварцевыми стержнями с плоскопараллельными торцами. Длинные стержни выполняли роль звукопроводов (буферов) и служили для тепловой и акустической развязки. Образцы размещались между буферами внутри печи, на внешних торцах которых, находящихся вне печи при комнатной температуре, собирались звукопреобразовательные узлы. В качестве ультразвуковых преобразователей обычно использовались пластины ниобата лития LiNbO_3 среза $Y + 36^\circ$. Контроль прохождения УЗ при отжиге осуществлялся эхо-импульсным методом, а воздействие УЗ в процессе отжига производилось в непрерывном режиме. Температура образца контролировалась с помощью термопары хромель-алюмель, термоэдс которой в то же время служила в блоке управления автоматического источника питания печи сигналом сравнения с опорным напряжением, соответствующим заданной температуре отжига. Погрешность установления и поддержания температуры образца в процессе отжига не превышала $\pm 2^\circ \text{C}$.

Для исследований использован набор образцов с идентичными исходными холловскими характеристиками. Часть образцов отжигалась в условиях одновременного (с отжигом) ультразвукового воздействия,

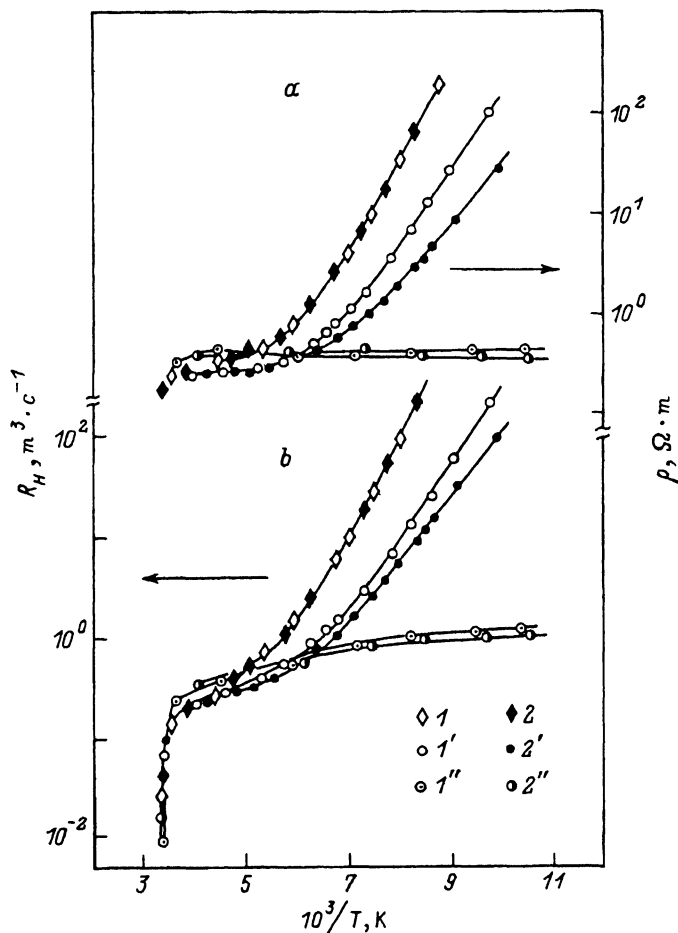
другая — без такового, но при тех же остальных условиях, что и первая. После каждого этапа отжига все образцы проходили одинаковую дополнительную обработку — травление и нанесение электрических контактов (In), а также температурные (в интервале $77 \div 300$ К) измерения электрофизических параметров холловским методом.

2. Результаты и их обсуждение

Важно отметить, что специально были отобраны такие образцы германия, температурные характеристики которых обладали ярко выраженной примесной проводимостью с «крутыми» активационными участками (дефекты радиационной природы акцепторного типа) в области $77 \div 330$ К. Последнее позволяло в процессе отжига легко отмечать небольшие изменения удельного сопротивления ρ ($1/T$) и коэффициента Холла $R_H(1/T)$. Для исследованных образцов наблюдались область примесного истощения («полка» на температурных зависимостях R_H и ρ) и инверсия типа проводимости вблизи комнатных температур.

Было установлено, что ультразвуковая обработка исходных образцов НЛГ при температурах $20 \div 90^\circ\text{C}$ не влияла на холловские характеристики. Отжиг при $T_a = 120 \div 150^\circ\text{C}$ приводил к заметным их изменениям — см. рисунок (отрицательная ветвь R_H из-за ее незначительных изменений в процессе отжига не приведена). При этих температурах происходит обратный отжиг с постепенным уменьшением наклона $R_H = f(1/T)$ в области $T < 200$ К. После $T_a = 120^\circ\text{C}$ этот наклон в измеряемом температурном интервале примерно равен $E_v + 0.16$ эВ. Однако заметных изменений величин концентрации носителей, определяемой на «полке», в пределах точности измерений практически не наблюдается. В дальнейшем, при $T_a > 150^\circ\text{C}$, намечается тенденция уже прямого отжига, т.е. понижения концентрации дырок p .

Обратим внимание на особенности изменения параметров образцов, связанные с ультразвуковым воздействием. Влияние УЗ наиболее проявляется в начале обратного отжига при $T_a = 120^\circ\text{C}$ (см. кривые $1'$ и $2'$ соответственно). Видно, что ультразвуковое воздействие фактически эквивалентно некоторому дополнительному повышению температуры — с УЗ процесс отжига ускоряется. Так, для образца 2 (с УЗ) по сравнению с контрольным (образец 1 — без УЗ) при 100 К наблюдается уменьшение удельного сопротивления ρ в 3 раза, увеличение концентрации дырок p в 1.8 раза и, следовательно, увеличение подвижности дырок μ в 1.6 раза. Количественное определение параметров отжигаемых РД и их изменений на этой стадии отжига из-за взаимного влияния других уровней РД^[5-10] из результатов лишь холловских измерений весьма затруднительно. Механизм отжига, как представляется в нашем случае, определяется не единым процессом. Наряду с образованием многовакансионных комплексов, создающих глубокие акцепторные уровни^[5,6,10], иным механизмом обратного отжига в исследуемых образцах при $T_a = 120 \div 150^\circ\text{C}$ может быть отжиг компенсирующего донорного уровня. Вероятность такого процесса подтверждается результатами работы [8], где методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней показано, что отжиг подобных нашим образцов НЛГ при температуре 125°C ведет к разрушению донорного центра (предположительно, дивакансии) с энергией $E_c - 0.17$ эВ.



Зависимость удельного сопротивления (a) и коэффициента Холла (b) от температуры для образцов НЛГ. 1, 1', 1'' — образец 1, без обработки УЗ; 2, 2', 2'' — образец 2, подвергнутый обработке УЗ с частотой $f = 6.4$ МГц и плотностью мощности $W = 1$ Вт/см². 1, 2 — до отжига; 1', 2' — после отжига при 120° С; 1'', 2'' — после отжига при 210° С.

Причиной дополнительного (при УЗ) увеличения ρ и μ при низких температурах также может быть ускоренный в ультразвуковом поле отжиг компенсирующего донора и, следовательно, уменьшение общего числа рассеивающих центров. Иной механизм увеличения μ — за счет стимулированного УЗ распада кластеров (скоплений) центров [11] — должен, по-видимому, происходить на второй стадии отжига.

Поскольку в общем влияние УЗ на отжиг РД в НЛГ, как уже упоминалось выше, эквивалентно некоторому повышению температуры, то механизм ультразвукового воздействия сводится в основном к ускорению диффузии точечных дефектов [1-3]. Причем это происходит как за счет снижения энергии активации диффузионного процесса при ультразвуковом воздействии, так и за счет повышения при этом концентрации неравновесных дефектов вакансионной природы [12,13].

Таким образом, в данной работе впервые методом термоакустического отжига показана стимулирующая роль ультразвукового воздействия при отжиге РД в НЛГ. Безусловно, перспективность дальнейших исследований возможности управления свойствами полупроводниковых материалов путем ультразвуковых обработок, в том числе и в сочетании с иными видами физического воздействия, является очевидной и должна включать поиск оптимальных ультразвуковых режимов для конкретных кристаллов.

В заключение авторы благодарят Ф.М. Воробкало за представленные для исследований образцы НЛГ.

Список литературы

- [1] Ya.M. Olikh, V.P. Tartachnik, R.M. Vernidub. *Ext. Abstr. V Conf. Acoustoelectronics-91* (Varna 1991) p. 95.
- [2] О.В. Абрамов, С.С. Горелик. ФТТ, **10**, 2514 (1968).
- [3] В.Г. Воеводин, В.Е. Степанов. Изв. вузов. Физика, **37**, 3 (1994).
- [4] И.В. Островский. *Акустолюминесценция и дефекты в кристаллах* (Киев, Вища шк., 1993).
- [5] В.В. Емцев, Т.В. Машовец. Письма ЖЭТФ, **13**, 675 (1971).
- [6] С.Н. Абдурахманова, Т.Н. Достходжаев, В.В. Емцев, Т.В. Машовец. ФТП, **8**, 1771 (1974).
- [7] N. Fukuoka, H. Saito. *Japan. J. Appl. Phys.*, **23**, 203 (1984).
- [8] V. Nagesh, J.W. Farmer. *J. Appl. Phys.*, **63**, 1549 (1988).
- [9] О.П. Ермолаев. ФТП, **28**, 2021 (1994).
- [10] Р.Ф. Коноплева, С.Р. Новиков, Э.Э. Рубинова, В.П. Садиков, Н.А. Ухин. ФТП, **4**, 1517 (1970).
- [11] П.И. Баранский, А.Е. Беляев, С.М. Комирченко, Н.В. Шевченко. ФТТ, **32**, 2159 (1990).
- [12] А.С. Бакай. ФТТ, **26**, 2504 (1984).
- [13] А.С. Бакай, И.П. Лозинский. ФТТ, **28**, 2455 (1986).

Редактор Л.В. Шаронова

On ultrasonic influence on radiation-induced defect annealing in germanium after neutron-transmutation

Ya.M. Olikh, M.I. Karas'

Institute of Semiconductor Physics, Ukrainian Academy of Sciences,
252650 Kiev, the Ukraine

A combined method of thermo (90–210° C, 30 min) and ultrasonic (6 MGz, 1 W/cm²) action on neutron-induced defects in Ge (Sb concentration $N_{\text{Sb}} = 4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, neutron dose $\Phi_n = 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) was used. Hall measurements were performed after stages of isochronal annealing. It was shown that the additional ultrasonic effect accelerated the process of annealing.