

$$v(t) = \lambda(t) \exp \left\{ - \int_{\max(T_0, t-\tau)}^t \lambda(x) dx \right\},$$

что совпадает с выражением, полученным в [3].

Выражение (2) позволяет предложить следующую простую процедуру восстановления интенсивности исходного потока. Разобьем интервал Ω на N отрезков точками $t_i = T_0 + i\Delta t$, $T_0 = t_0$, $i = \overline{1, N}$, $\Delta t = (T - T_0)/N$. Обозначим λ_i оценку интенсивности в точке t_i . Тогда

$$\begin{aligned} \lambda_i &= v(t_i) \exp \left\{ \sum_{j=0}^{i-1} \lambda_j \int_{t_j}^{t_{j+1}} [1 - F(t_i - x)] dx \right\} = \\ &= v(t_i) \exp \left\{ \sum_{j=0}^{i-1} \lambda_j \left[\Delta t - \int_{(t-j-1)\Delta t}^{(i-j)\Delta t} F(y) dy \right] \right\}, \quad \lambda_0 = v(t_0), \quad i = \overline{1, N}. \end{aligned}$$

Для иллюстрации полученного вывода на рисунке представлен результат проведенного на э. в. м. имитационного эксперимента по регистрации и последующего восстановления исходного потока вида

$$\lambda(t) = A_1 \exp \left\{ - \frac{(t - B_1)^2}{C_1^2} \right\} + A_2 \exp \left\{ - \frac{(t - B_2)^2}{C_2^2} \right\} + D. \quad (3)$$

Конкретные значения параметров в выражении (3) следующие: $A_1 = 2$; $B_1 = 0,5$; $C_1 = \begin{cases} 0,1 & \text{при } t < B_1 \\ 0,3 & \text{при } t \geq B_1 \end{cases}$; $A_2 = 0,5$; $B_2 = 1$; $C_2 = 0,1$; $D = 0,5$. Мертвое время имеет равномерный закон распределения на интервале $[0,5; 1]$. Значения всех величин даны в относительных единицах. Число повторений статистического эксперимента n равно $5 \cdot 10^4$.

Оценка среднеквадратического отклонения величины λ_i в нашем случае имеет вид

$$\sigma(\lambda_i) = \lambda_i / \sqrt{v_i n \Delta t}. \quad (4)$$

Анализ полученных результатов показал, что восстановленные значения λ_i при данном количестве повторений лежат в пределах допустимого выражением (4) разброса, обусловленного статистическими погрешностями при определении значений v_i .

Список литературы

1. Курочкин С. С. Многомерные статистические анализаторы.— М., 1968.
2. Маталин Л. А. Электронные методы ядерной физики.— М., 1973.
3. Рехин Е. И., Курашов А. А., Чернов П. С. Измерение интервалов времени в экспериментальной физике.— М., 1967.
4. Delotto I., Manfredi P. F. // Nucl. Instr. and Methods.—1965.—V. 32.—P. 175.

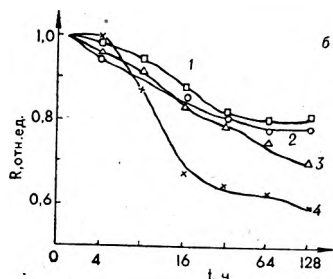
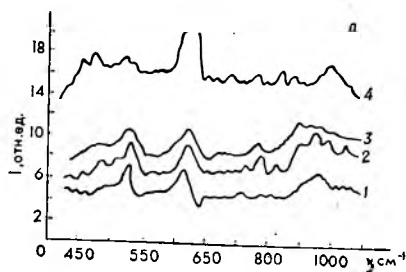
Поступила в редакцию 16.09.85.

УДК 621.315.592

Д. И. БРИНКЕВИЧ, В. В. ПЕТРОВ, В. В. ЧЕРНЫЙ

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ ИК ПОГЛОЩЕНИЯ ТЕРМООБРАБОТАННОГО ПРИ 450 °С КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ГЕРМАНИЕМ

Присутствие германия подавляет генерацию кислородсодержащих термодоноров (ТД), вводимых в кремний в температурном интервале 400—500 °С [1]. Кроме того, легирование кремния германием изменяет структуру полосы решеточного поглощения в области 600—640 см⁻¹ [2].



а — Спектры ИК поглощения образцов № 1 (1, 3) и № 4 (2, 4). Длительность отжига 16 (1, 2) и 128 (3, 4) ч. б — Зависимость нормированного R -фактора кислородной полосы от длительности ТО. Номера кривых соответствуют номерам образцов

образцов. Отметим основные особенности.

1. В $\text{Si}\langle\text{Ge}\rangle$ в процессе отжига не вводятся в заметной концентрации новые оптически активные центры, включающие в свой состав атомы германия.

2. Данная примесь в концентрации $\leq 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ не влияет на процессы генерации термодефектов (спектры ИКП образцов № 1 и № 2 идентичны). При увеличении N_{Ge} уменьшается интенсивность всех полос, связанных с ТД, т. е. имеет место подавление генерации оптически активных центров.

3. Присутствие германия по-разному влияет на эффективность введения отдельных дефектов, причем некоторые полосы, наблюдавшиеся в контрольном материале ($\nu, \text{см}^{-1}$: 402, 440, 468, 478, 646, 825, 847, 862, 905, 1045), в образце № 4 не проявлялись.

4. Легирование кристаллов германием концентрацией $\geq 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ приводит к уширению полос ИКП. Так, например, полуширина полосы при 715 см^{-1} в образце № 4 примерно в три раза превосходит соответствующую величину для образцов № 1, 2.

Известно, что ТО при 450°C кристаллов кремния вызывает изменение структуры кислородной полосы при $\sim 9 \text{ мкм}$ [3]. Следует отметить, что нами наблюдалось изменение структуры кислородной полосы при 9 мкм в нетермообработанном $\text{Si}\langle\text{Ge}\rangle$. В этих кристаллах интенсивность полосы 1135 см^{-1} значительно ниже, чем в контрольном материале. Для количественной оценки изменения структуры кислородной полосы обычно используют R -фактор [4]: $R = (\alpha_3 - \alpha_2) / (\alpha_1 - \alpha_2)$, где α_1, α_3 — коэффициенты поглощения в максимумах полос при 1128 и 1135 см^{-1} соответственно; α_2 — коэффициент поглощения, измеренный в седловине между полосами 1128 и 1135 см^{-1} .

Уменьшение R -фактора при ТО в кремнии с $N_{\text{Ge}} \geq 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ происходит гораздо эффективнее, чем в контрольном материале (см. рисунок, б). Отношение α_3/α_1 в ходе отжига во всех образцах изменялось

В этом аспекте представляет интерес исследование характерных особенностей спектров инфракрасного поглощения (ИКП) в $\text{Si}\langle\text{Ge}\rangle$, подвергнутом термообработке (ТО) при 450°C .

Наряду с контрольным материалом (образец № 1) исследовался p -кремний, легированный германием в процессе выращивания из расплава по методу Чохральского. Концентрация германия (N_{Ge}), определенная методом нейтронно-активационного анализа, составляла в образце № 2 $3 \cdot 10^{18}$, № 3 — $3 \cdot 10^{19}$ и № 4 — $1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Концентрация кислорода и углерода, определенная по соответствующим полосам ИКП при 1128 и 607 см^{-1} , и концентрация свободных носителей заряда, по данным эффекта Холла, составляла во всех исследованных образцах $9,0 \cdot 10^{17}$, $5,6 \cdot 10^{16}$ и $7,1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ соответственно.

Изотермический отжиг кристаллов длительностью до 128 ч проводился при $(450 \pm 5)^\circ\text{C}$. Спектры ИКП регистрировались на спектрофотометрах UR-20 и Spereord-75IR при 80 K .

На рисунке, а представлены типичные спектры ИКП подвергнутых ТО

слабо: на 15 % в контрольном материале и на 10 % в кремнии с $N_{\text{Ge}} \approx 1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Интенсивность полосы 1128 см^{-1} уменьшалась незначительно ($< 10\%$) во всех кристаллах. Таким образом, значительное уменьшение R -фактора в кремнии, легированном германием, связано с уширением полос ИКП при 1128 и 1135 см^{-1} (либо одной из них), суперпозиция которых определяет значение α_2 в седловой точке. Вероятно, в ходе отжига $\text{Si} < \text{Ge} >$ атомы кислорода взаимодействуют с атомами германия и окружающими их точечными дефектами, создавая дополнительные деформационные напряжения, приводящие к уширению полос ИКП термодоноров и кислорода (см. [4]). Данное взаимодействие может быть обусловлено полями упругой деформации, существующими в кремнии, легированном изовалентной примесью [5].

Список литературы

1. Бабницкий Ю. М., Горбачева Н. И., Гринштейн П. М., Ильин М. А., Мильвидский М. Г., Туровский Б. М. // ФТП.—1984.— Вып. 7.— Т. 18.— С. 1309.
2. Кузнецов В. П., Ильин М. А., Горбачева Н. И. // Изв. АН СССР. Неорганические материалы.—1984.— Т. 20.— № 11.— С. 1781.
3. Ахметов В. Д., Болотов В. В., Васильев А. В. // Радиационные эффекты в полупроводниках.— Новосибирск.—1979.— С. 205.
4. Totterdell D. H. J., Newman R. C. // J. Phys., C.: Solid. State Phys.—1975.— V. 8.— № 5.— P. 589.
5. Соловьева Е. В., Мильвидский М. Г. // ФТП.—1983.— Вып. 11.— Т. 17.— С. 2022.

Поступила в редакцию 29.10.85.

УДК 537.311/312:546.289

ДИАЛЛО АМАДУ ДЖУЛЬДЕ, А. К. ФЕДОТОВ

ПРОВОДИМОСТЬ ПО ГРАНИЦАМ ЗЕРЕН В ГЕРМАНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ РТУТЬЮ

Проводимость поликристаллических полупроводников обычно на много порядков меньше проводимости монокристаллов того же состава, что объясняется наличием между хорошо проводящими монокристаллическими гранулами или зернами высоких ($\sim 1 \text{ эВ}$) энергетических барьеров разной природы. Представляет интерес изучить свойства поликристаллов, в которых границы зерен обладают большей проводимостью, чем их объем.

С этой целью исследована температурная зависимость проводимости в области $2\text{--}300 \text{ К}$ образцов моно- и поликристаллического германия, легированного ртутью и компенсированного сурьмой. Слитки получали методом зонной плавки в парах ртути под высоким давлением.

Металлографический и рентгеноструктурный анализы свидетельствуют об ярко выраженной текстурированности поликристаллических слитков. Зерна вытянуты вдоль направления [111], совпадающего с осью роста слитков. Размеры зерен вдоль слитков $0,1\text{--}2 \text{ мм}$, а в поперечной плоскости — $10\text{--}300 \text{ мкм}$. Образцы для измерений вырезались поперек слитка и имели концентрацию ртути $N_{\text{Hg}} \approx (1\text{--}2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Компенсация сурьмой обеспечивала в поликристаллических образцах полное заполнение электронами первого уровня ртути $E_v + 0,09 \text{ эВ}$ ($K_1 = 1$), а второго уровня $E_v + 0,23 \text{ эВ}$ — в пределах $0 < K_2 < 0,9$. В монокристаллических слитках полностью компенсировать первый уровень ртути при одинаковых условиях выращивания не удалось.