

ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКЕ, СОДЕРЖАЩЕМ АМФОТЕРНУЮ U^- -ПРИМЕСЬ

Гончарова А. Г., Зуев В. В.

Исследуется влияние амфотерных примесных центров с отрицательной корреляционной энергией на концентрацию свободных носителей. В случае отсутствия компенсирующей примеси обнаружено наличие температурного интервала, в котором концентрация носителей не зависит от концентрации амфотерной U^- -примеси.

Приведены результаты численного расчета зависимости концентрации свободных носителей от обратной температуры для межзельного бора, который, по последним данным, является амфотерной U^- -примесью в кремнии.

Отмечено, что кажущееся несоответствие в пороговой энергии фотопроводимости и энергии активации при температурной ионизации примесей можно рассматривать как необходимый признак того, что данная примесь представляет собой центр с отрицательной корреляционной энергией.

Изучению свойств полупроводников с U^- -центрами посвящено множество работ [1-3]. Однако во всех этих работах рассматриваются центры с одним типом электрической активности [имеются в виду многозарядные примеси, которые дают в запрещенной зоне полупроводника два акцепторных (донорных) состояния, отвечающих разным зарядовым состояниям примеси].

Результаты исследований работ [4, 5] дают основание утверждать, что межзельный бор в кремнии является амфотерным U^- -центром, т. е. дает в запрещенной зоне полупроводника донорный и акцепторный уровни, причем акцепторное состояние E_a лежит ниже донорного E_d по энергии.

В отличие от ранее опубликованных работ по U^- -центрам наша работа посвящена исследованию температурной зависимости концентрации свободных носителей в полупроводнике, содержащем в качестве примеси амфотерные U^- -центры (концентрация N) и компенсирующие мелкие однозарядные доноры (концентрация N_d).

В полупроводнике, содержащем амфотерные U^- -центры даже без введения дополнительных примесей, может протекать реакция распада нейтрального состояния [4]



Рассмотрим случай, когда выполняется следующее условие:

$$N > N_d \quad (2)$$

или $K < 1$, где $K = N_d/N$ — степень компенсации. При этом уравнение нейтральности имеет вид

$$N^+ + N_d = N^- + n \quad (3)$$

где $N^+ = N/Z$, $N^- = N(n^2/(n_a n_d))/Z$ — концентрация амфотерных положительно и отрицательно заряженных U^- -центров соответственно, $Z = 1 + (n/n_d) + (n^2/(n_a n_d))$ — статистическая сумма для амфотерного U^- -центра, n — концентрация свободных носителей, $n_a \equiv N_c \exp(-E_a/\tau)$, $n_d \equiv N_c \exp(-E_d/\tau)$ — характерные концентрации, $\tau \equiv k_B T$, где k_B — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

Формально решение уравнения нейтральности (3) можно представить в виде

$$n = [|n_d - N_d| n_d / (2(n_a + N - N_d + n))] \times \\ \times \{ [1 + 4(N + N_d) n_d (n_a + N - N_d + n) / (n_d - N_d)^2]^{1/2} - \text{sign}(n_d - N_d) \}. \quad (4)$$

Упростить это решение можно, если исследовать область температур ниже $\tau_0 \equiv (E_a + E_d) / 2 \ln(N_c (N + N_d)^{1/2} / (N - N_d)^{3/2})$, т. е. область, где концентрация свободных носителей n гораздо меньше концентрации электронов на отрицательно заряженной примеси N^- , т. е. $n \ll N^-$. В этом случае получим

$$n = \{(1 + K)(1 - K)^{-1}\}^{1/2} N_c \exp(-(E_a + E_d)/2\tau). \quad (5)$$

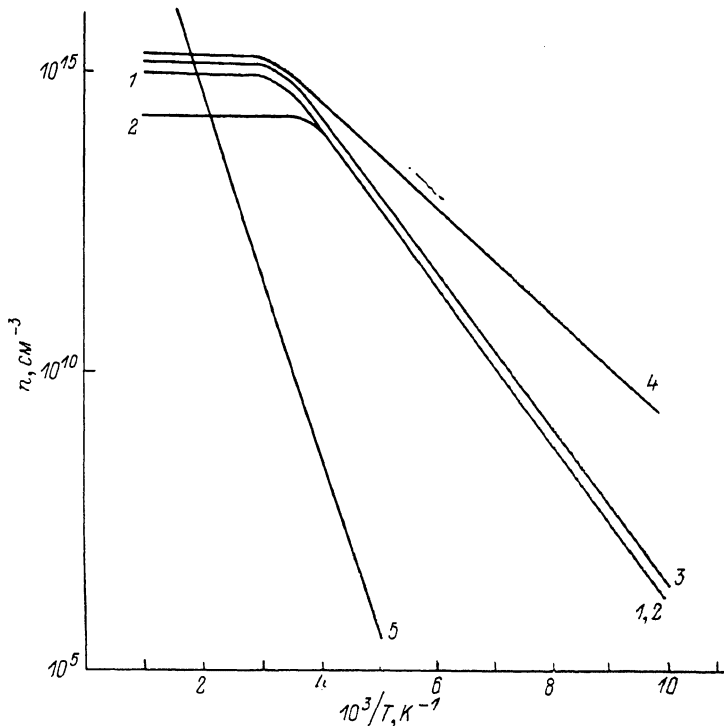


Рис. 1. Температурная зависимость концентрации свободных носителей в собственном кремнии (5) и в кремнии, содержащем межузельный бор, с энергиями ионизации $E_d = E_c - 0.13$, $E_a = E_c - 0.37$ эВ (1-4).

Концентрация бора, см^{-3} : 1-4 — 10^{18} , 2 — $2 \cdot 10^{14}$. Концентрация компенсирующих доноров, см^{-3} : 1, 2 — 0, 3 — $5 \cdot 10^{14}$, 4 — 10^{16} . Энергия активации, эВ: 1-3 — 0.25, 4 — 0.17.

Из решения (5) следует, что в случае отсутствия компенсирующей примеси (т. е. $K=0$) концентрация свободных носителей не зависит от концентрации амфотерной U^- -примеси. Конечно, это справедливо только в области существования решения (5), границы которой определяет концентрация амфотерных U^- -центров (т. е. $\tau < \tau_0$, где $\tau_0 = \tau_0(N)$). Такой результат можно объяснить тем, что в результате реакции (1) образовалось равное количество центров захвата и генерации.

Аналогичным способом можно проанализировать случай, когда

$$K \approx 1. \quad (6)$$

В этом случае, при температурах ниже $\tau_1 = (E_a + E_d) / (2 \ln(N_c/N))$ концентрация носителей определяется следующим образом:

$$n = (2NN_0^2)^{1/3} \exp(-(E_a + E_d)/3\tau). \quad (7)$$

Появление показателя $1/3$ обусловлено тем, что концентрация свободных мест начальной стадии захвата N^+ порядка концентрации свободных носителей, а сам процесс захвата проходит в две стадии.

Если рассмотреть более высокие температуры ($\tau > E_a / \ln(N_c / 2N_d)$), то концентрация носителей в этой области для любого K не изменяется с ростом температуры и все примесные центры полностью ионизированы. Концентрация свободных носителей n равна

$$n = N + N_d. \quad (8)$$

Начиная с температур $\tau_g \equiv E_g / [2 \ln((N_c N_v)^{1/2} / (N + N_d))]$ и выше, концентрация носителей определяется собственной генерацией.

Для двухзарядного U^- -акцептора, у которого состояние, соответствующее второму лишнему электрону E_2 , лежит ниже по энергии, чем состояние первого E_1 , мы для сравнения провели подобные исследования и получили аналогичные результаты. Энергия активации также зависит от степени компенсации K :

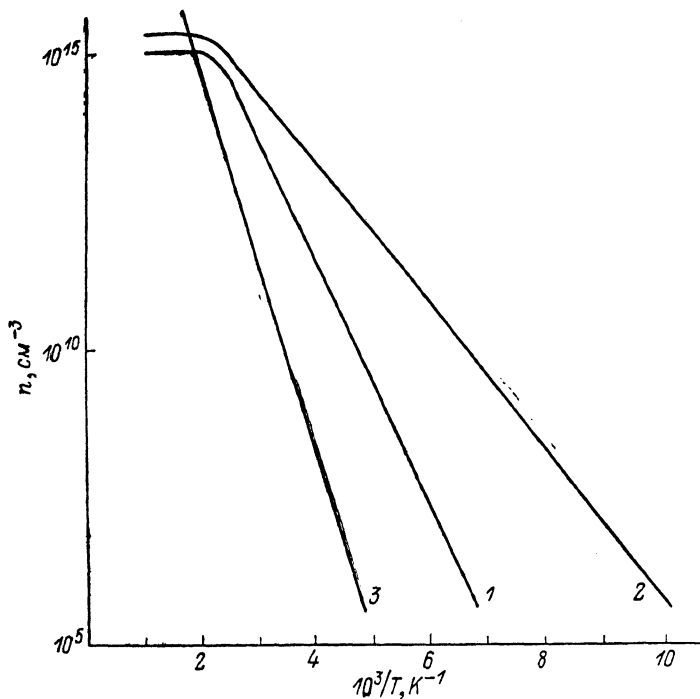


Рис. 2. Зависимость логарифма концентрации свободных носителей от обратной температуры в кремнии, содержащем U^- -акцепторы, с энергиями ионизации $E_1 = E_c - 0.34$, $E_2 = E_c - 0.44$ эВ, в концентрации 10^{15} см^{-3} (1, 2).

Концентрации компенсирующей примеси N_d , см^{-3} : 1 — 10^{16} , 2 — $2 \cdot 10^{15}$. Энергия активации, эВ: 1 — 0.38, 2 — 0.26; 3 — температурная зависимость концентрации свободных носителей в собственном кремнии.

если $K < 2$, то энергия активации равна полусумме энергий ионизации состояний E_1 и E_2 , а если $K \approx 2$, то энергия активации равна 1/3 от суммы энергий ионизации E_1 , E_2 , концентрация же определяется по приведенным выше формулам с заменой N_d на $N_d - N$.

На рис. 1 и 2 представлены результаты расчета концентрации свободных электронов от обратной температуры при ионизации межузельного бора и U^- -акцептора в кремнии соответственно. На рисунках отчетливо видны все указанные выше особенности и различия ионизации этих центров.

Таким образом, суть полученных в итоге данных исследований результатов состоит в следующем.

Показано, что как в случае с U^- -центрами с одним типом электрической активности, так и для амфотерного U^- -центра для процессов захвата и выброса носителей заряда характерна двустадийность, что и объясняет появление в показателе экспоненты полусуммы энергий ионизации [решение (5)]; энергия активации зависит от степени компенсации K [ср. (5) и (6)]. Все эти особенности обусловлены физической природой U^- -центров и были уже ранее разъяснены в литературе [3, 6, 7].

При исследовании температурной зависимости концентрации свободных носителей в случае отсутствия компенсирующей примеси нами обнаружено наличие температурного интервала ($\tau < \tau_0$), в котором концентрация электронов не зависит от концентрации амфотерной U^- -примеси. Этот результат можно получить только для амфотерных U^- -центров.

Как нетрудно понять из самой сути модели U^- -центра, сигнал фотопроводимости будет начинаться с энергии ионизации второго электрона (E_1, E_2). Температурная же зависимость концентрации свободных носителей определяется полусуммой энергий ионизации. Это кажущееся несоответствие в пороговой энергии фотопроводимости и энергии активации при тепловой ионизации примесных центров можно рассматривать как необходимый признак того, что данная примесь представляет собой центр с отрицательной корреляционной энергией.

Список литературы

- [1] Baraff G. A. et al. // Phys. Rev. B. 1980. V. 21. N 12. P. 5662—5686.
- [2] Hoffman H. J. // Appl. Phys. A. 1982. V. 27. N 1. P. 39—47.
- [3] Adler D. // Phys. Rev. Lett. 1981. V. 46. N 15. P. 1027—1030.
- [4] Watkins G. D., Troxel J. R. // Phys. Rev. B. 1980. V. 44. N 9. P. 593—598.
- [5] Harris R. D. et al. // Phys. Rev. B. 1987. V. 36. N 2. P. 1094—1104.
- [6] Смит Р. Полупроводники. М., 1962. 468 с.
- [7] Шпинар Л. И., Ясковец И. И. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 10. С. 1845—1848.

Московский инженерно-физический
институт

Получена 10.05.1988
Принята к печати 1.12.1989